

2023

DIPLOME D'UNIVERSITÉ DE GEMMOLOGIE

présenté

devant l'Université de Nantes

U.F.R. des Sciences et des Techniques

par

Ingrid LEROUYER

Étude expérimentale de quelques verres naturels

soutenu publiquement le 18 janvier 2023 au

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

devant la commission d'examen composée de :

M. E. FRITSCH

Professeur

Président

M. C. LATOUCHE

Maître de Conférences

Vice-Président

M. C. EWELS

Directeur de Recherche

Examineur

M. S. KARAMELAS

Chef gemmologue, LFG, Paris

Examineur

M. F. NOTARI

Directeur, GGTL, Genève

Examineur

M. B. LASNIER

Professeur émérite

Invité

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
LISTE DES ABREVIATIONS	3
INTRODUCTION	4
I. ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	4
I.1. Généralités.....	5
I.2. Les verres volcaniques : « les pierres de feu »	6
A. Verre de basalte (volcanisme basaltique)	6
B. Verre d'obsidienne (volcanisme terrestre).....	7
I.3. Les tectites et impactites : « les pierres de choc »	9
A. Les impactites vitreuses.....	9
B. Les tectites	9
C. Verre libyque.....	12
I.4. Les fulgurites : les « pierres de foudre ».....	14
II. MATERIAUX ET METHODES	15
II.1. Description des échantillons	15
II.2. Méthodes	15
A. Préparation de tranches et de lames minces	15
B. Matériel de gemmologie classique	15
C. Microscope optique	16
D. Microscope électronique à balayage (MEB).....	16
E. Spectroscopie Infra-Rouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	16
F. FT Raman.....	16
G. Spectro-fluorimètre	16
H. EDXRF.....	16
III. RESULTATS	17
III.1. Gemmologie classique : observation des caractéristiques internes et externes, caractère optique.....	17
III.2. Gemmologie classique : indices de réfraction, densités, réaction au filtre de Chelsea, luminescence	23
III.3. Gemmologie de laboratoire.....	25
IV. DISCUSSION	32
V. CONCLUSION.....	33
VI. BIBLIOGRAPHIE	34
VII. ANNEXES	38
VII.1. Spectre de matériaux riches en silice	38
VII.2. Analyses des compositions chimiques	39
VII.3. Préparation de tranches et de lames minces au laboratoire Mineralab.....	41

REMERCIEMENTS

Je remercie infiniment le Professeur Emmanuel FRITSCH pour son enseignement, son accompagnement bienveillant, ses encouragements et ses nombreux conseils judicieux,

ainsi que les membres du jury pour leur lecture attentive de mon rapport et pour leurs remarques qui ont permis d'améliorer mon travail,

de même que Jean-Pierre GAUTHIER pour sa relecture minutieuse, ses précieux commentaires et ses corrections,

également, Féodor BLUMENTRITT, Blanca MOCQUET et les équipes de l'Institut des Matériaux de NANTES, en particulier Nicolas STEPHANT, pour leur aide et leur assistance lors des expérimentations sur le matériel scientifique,

sans oublier ceux qui ont su m'accorder leur confiance et m'offrir ma première expérience dans le secteur de la bijouterie-joaillerie, dont Corinne SORNAY et Jérôme GUILLOCHON,

et aussi Olivier SÉGURA et Marie-Laure CASSIUS-DURANTON qui ont permis mes débuts dans l'enseignement,

j'y associe mes enseignantes en gemmologie passionnées et passionnantes, dont Sandrine CLOT-AMIOT et Fabienne THOUVENOT,

ainsi que mes amis négociants de gemmes, pour leur générosité, Dasa KANKANAMGE, Thierry PRADAT, Angélique et Arnaud BINDER,

Monsieur et Madame ROBLIN, pour leur donation d'échantillons, et aussi Pierre-Yves CHATAGNIER,

J'ajoute Aurélien DELAUNAY, Stefanos KAREMPELAS, Ugo HENNEBOIS, toute l'équipe du Laboratoire Français de Gemmologie ainsi que mes collègues enseignants qui me permettent d'apprendre chaque jour à leurs côtés,

Ma famille pour son soutien et sa patience,

L'Association Française de Gemmologie,

Mes camarades de promotion en particulier Fouad AMIN (Mineralab) pour sa générosité, son temps et son aide,

Bertrand DEVOUARD, pour le partage de sa riche expérience sur les verres naturels,

Daniel NEUVILLE, pour le partage de ses derniers travaux,

Alain et Louis CARION, Jean-Claude BOULLIARD qui m'ont gentiment guidée, en particulier, au début de mes recherches,

Béatrice MAISONNEUVE pour son soutien amical, son accompagnement et sa si grande générosité,

Tous mes élèves, amis gemmologues et autres passionnés de gemmes et minéraux rencontrés au détour d'une allée d'une bourse aux minéraux ou autre et qui m'enrichissent par leurs expériences et leur savoir.

LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
ct	Carat
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy (spectroscopie à dispersion d'énergie)
EDXRF	Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie)
FT	Transformée de Fourier
IR	Infra Rouge
LDG	Libyan Desert Glass (verre libyque)
LR	Lumière Réfléchie
LT	Lumière Transmise
MEB	Microscope Electronique à Balayage
NRP	Ne Rétablit Pas la lumière

INTRODUCTION

Comme beaucoup de gemmologues, les curiosités et bizarreries de la nature m'attirent tout particulièrement. Au début de mes études en gemmologie, j'avais été amusée par la destinée de la silice qui, selon les conditions de pression et température présentes dans son environnement, pouvait soit devenir du quartz en cristallisant dans le système rhomboédrique soit du verre si la matière était amorphe soit encore de l'opale si la matière était amorphe et hydratée.

Le sujet des verres naturels n'est pas forcément le premier sujet qui vient à l'esprit lorsqu'on évoque l'univers des gemmes. C'est même souvent plutôt le contraire du fait de la connotation « fabriqué » ou « matière artificielle » que l'on associe au terme « verre ». Pourtant, quand on s'intéresse de plus près au verre, on découvre une matière pour le moins surprenante et, à bien des égards, fascinante. Etudier les verres naturels me tenait à cœur afin d'approfondir ce sujet trop peu développé dans les cours de gemmologie classique.

Nous limiterons notre sujet à l'étude de quelques verres naturels, certains que j'avais déjà dans ma collection et d'autres qui m'ont été généreusement offerts. Ces matières sont particulièrement intéressantes par la pluralité de leurs esthétiques et par leurs différents modes de formation. Ainsi, j'ai choisi de traiter des tectites, du verre libyque et de quelques variétés d'obsidiennes. On peut s'interroger sur les raisons d'une si grande diversité esthétique des verres et tenter de trouver des explications à travers des analyses chimiques et l'étude des différentes textures.

I. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Il serait bien difficile de passer à côté du verre dans notre quotidien car il est partout autour de nous. Le verre a de nombreux usages domestiques et industriels : vitres pour les fenêtres, isolant sous forme de fibres, industrie du laser, conquête spatiale, confinement des déchets nucléaires, etc. (Musikant, 2003 ; Carion et al., 2007).

Le verre est fabriqué par l'homme depuis plusieurs millénaires. Les civilisations antiques telles que les mésopotamiens, les égyptiens, les grecs et les romains réalisaient déjà des objets en verre. Cette découverte du verre fabriqué par l'homme daterait d'environ 4000 av JC (Carion et al., 2007).

Le verre se forme aussi, fortuitement, sans l'intervention de l'homme. Dans la préhistoire, on a utilisé le verre naturel principalement pour fabriquer des outils (couteaux, pointes de flèches, etc.) dont certains ont pu être datés de 200 000 ans (Carion et al., 2007).

Le verre peut donc être créé par la nature ou par l'homme. Ce que l'on sait moins, c'est que l'homme n'est pas le seul être vivant à être capable de fabriquer du verre. Les diatomées, algues microscopiques et micro-organismes cellulaires, se constituent, à température ambiante, par le procédé de chimie douce, une coque protectrice en verre. Le verre naturel peut donc être d'origine biologique ou géologique (Livage et Coradin, 2008).

Dans cette étude, on s'intéressera à une partie seulement des verres naturels inorganiques, qui proviennent de processus naturels et, majoritairement, géologiques.

I.1. Généralités

Il convient de commencer par définir la notion de verre. D'un point de vue chimique, le verre est un matériau dont la composition est très variable (Fig. 1) et qui contient surtout des oxydes de silicium, de bore et/ou de métaux tels que sodium, calcium, plomb ainsi que d'autres molécules comme des carbonates de sodium, fluorures de calcium, etc. (Carion, 2007 ; Cicconi et al., 2022).

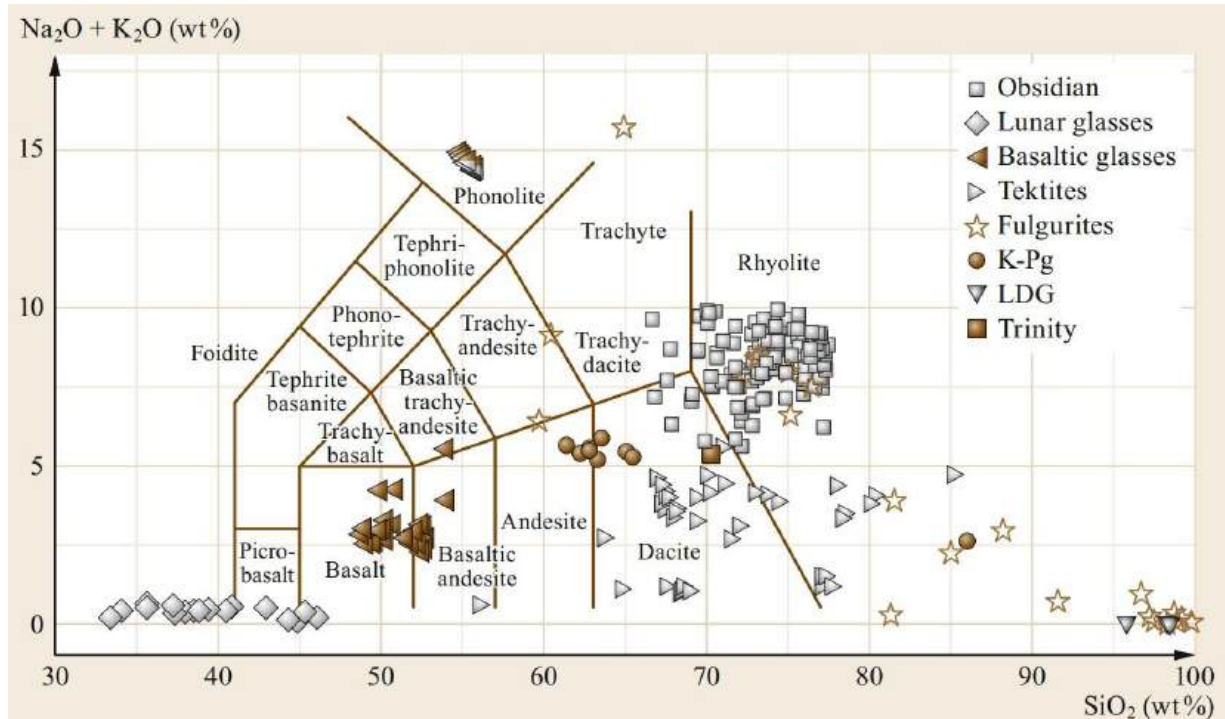


Fig. 1 : Diagramme montrant la grande variabilité dans la composition chimique des différentes variétés de verres naturels (teneur en silice vs alcalins) : les teneurs en silice varient de 30% à 99% du poids total des échantillons de verre alors que les teneurs en alcalins varient de 0% à 15% de leur poids (Cicconi et Langenhorst, 2019). K-Pg fait référence à des sphérules de verre d'impact qui proviennent de l'extinction Crétacé-Paléogène, extinction également appelée K-Pg, suite à la chute de l'astéroïde qui a formé le cratère de Chicxulub (péninsule du Yucatán au Mexique). Trinity, également appelé trinitite ou verre d'alamogordo, désigne un verre artificiel obtenu après vitrification du sable lors de la première explosion nucléaire américaine sur le site de Trinity (Nouveau-Mexique, Etats-Unis)

Chimiquement, les verres sont souvent très proches de minéraux naturels, mais ils vont s'en distinguer par leur organisation atomique. En effet, cette matière minérale silicatée fondue, qui constitue le verre, a refroidi suffisamment vite pour ne pas cristalliser. Ainsi, le verre a une structure amorphe, c'est-à-dire que, même s'il existe un ordre des atomes à courte distance, avec les tétraèdres de dioxyde de silicium (SiO_2), il n'y a pas d'agencement régulier à longue distance (Fig. 2). À l'inverse, les minéraux possèdent une structure cristalline avec une organisation des atomes au sein de la matière.

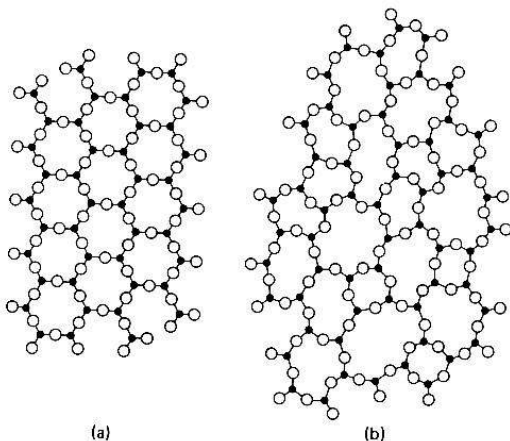


Fig. 2 : Représentation en deux dimensions d'une même composition chimique selon deux structures atomiques différentes : ordonnée pour la structure cristalline en Fig. 2(a) et désorganisée pour une matière amorphe en Fig. 2(b) (Musikant, 2003)

Une caractéristique s'observe fréquemment dans les verres naturels transparents : une texture fluidale accentuée. Le mot « schlieren » décrit parfois cette observation dans la littérature (Rost, 1964 ; De Goutière, 1995). Le Collins Dictionary donne une définition de ces « schlieren » dans les termes suivants : « traînées visibles dans un fluide transparent turbulent, chaque traînée étant une région qui a une densité et un indice de réfraction différents de ceux de la plus grande partie du fluide ». Il précise toutefois que ce terme est de moins en moins utilisé depuis les années 1980. Depuis quelques années, on lui préfère le terme de *figures d'écoulement*. En termes imagés, ces figures d'écoulement prennent l'aspect d'une texture particulière que l'on pourrait décrire comme une « matière sirupeuse », comme du « remous dans la matière », ou comme des « vagues de chaleur ».

Une autre caractéristique est typique des verres naturels : il s'agit de la présence de bulles de gaz qui peuvent être rondes mais qui sont le plus souvent déformées.

En recoupant les informations de deux manuels d'identification de gemmes, le livre Gemmes de l'AFG et le « Petit Lulzac non illustré », on peut établir un tableau comparatif reprenant les caractéristiques et propriétés des différents verres naturels de cette étude :

	Obsidienne "larme d'apache"	Obsidienne acajou	Obsidienne neige	Obsidienne argentée	Moldavite	Verre libyque	Verre de silice
Indice de réfraction	1,480 à 1,510	1,480 à 1,510	1,480 à 1,510	1,480 à 1,510	1,480 à 1,510	1,460 à 1,465	1,459
Masse spécifique	2,25 à 2,40	2,25 à 2,40	2,25 à 2,40	2,25 à 2,40	2,30 à 2,42	2,20 à 2,22	2,20
Inclusions typiques	Texture fluidale accentuée; bulles de gaz souvent déformées	Hématite et pyroxènes	Cristaux groupés radiés de cristobalite, de feldspath, de quartz ou de tridymite	Bulles de gaz alignées le long de couches orientées dans la direction de la coulée	Bulles de gaz généralement déformées; figures d'écoulement; lechatellierite; inclusions minérales ou rocheuses	Cristobalite; figures d'écoulement	

Fig 3 : Tableau comparatif des caractéristiques de propriétés des différents verres naturels de notre étude (d'après le livre Gemmes de l'AFG et le « Petit Lulzac non illustré » et d'après König C., 2006) : le verre libyque se démarque des autres verres par des constantes plus faibles qui correspondent aux constantes du verre de silice.

On distingue trois grandes familles de verres naturels qui se différencient notamment par leur mode de formation. Nous présentons ces trois catégories en reprenant les expressions d'Alain Carion, des expressions particulièrement évocatrices de chacun des modes de formation (Carion, 2007).

1.2. Les verres volcaniques : « les pierres de feu »

La composition chimique de la lave induit un degré de polymérisation plus ou moins fort qui joue sur la viscosité de la matière. Selon la nature de la lave, on distingue deux types de verre : les verres de basalte et les verres d'obsidienne.

A. Verre de basalte (volcanisme basaltique)

Les laves basiques, plus faibles en silice et contenant des cations modificateurs de réseaux, sont peu visqueuses car elles ont un faible degré de polymérisation. Les magmas basaltiques sont les plus abondants à la surface terrestre. On obtient plus difficilement du verre avec ce type de lave (Richet, 2009). Ainsi, les verres de basalte contiennent de 45 à 52% de silice, de 10 à 20% d'alumine, des métaux alcalins et alcalino-terreux, du fer (10%) et de l'eau (de 0.5 à 3%) (Carion, 2007).

Ces laves basiques sont chaudes, elles peuvent atteindre jusqu'à 1200°C. Cela permet la croissance de minéraux accompagnant le verre interstitiel. En cas de trempe (refroidissement rapide de matière), une

épaisseur vitreuse de quelques millimètres à quelques centimètres se forme en bordure extérieure, seulement comme pour les dykes et les pillow lava (Carion, 2007 ; Bertrand, 2008 ; Richet, 2009).

On peut également citer, comme exemples de verres de basalte, les larmes et cheveux de Pelé ainsi que les réticulites. Les larmes et cheveux de Pelé sont des gouttelettes ou fibres de verre formées lorsque la matière a été projetée dans l'air et filée à grande vitesse. Les réticulites forment comme une fine dentelle de verre en trois dimensions, une sorte de mousse de verre très légère. Elles se produisent lorsque de toutes petites bulles de l'ordre du micron se forment dans la lave et éclatent pour ne laisser qu'un fin réseau de verre entre les pores (Carion, 2007; Richet, 2009).

B. Verre d'obsidienne (volcanisme terrestre)

A l'opposé, les laves acides sont riches en silice et contiennent des cations formateurs de réseau. La lave est alors très visqueuse et présente une forte polymérisation (Milleville et al., 2003). Ces laves sont moins chaudes que les laves basiques (700-900°C). La forte viscosité limite la diffusion des éléments chimiques et donc la cristallisation. Ainsi, les obsidiennes sont vitreuses dans la masse (Bertrand et Dequincey, 2008).

Généralement, les obsidiennes sont de composition rhyolitique, proche de la composition chimique du granite (Zook, 1973). Les verres d'obsidienne sont composés de silice (75 à 77%), d'alumine (10 à 15%), de métaux alcalins (8 à 10%), d'un peu de métaux alcalino-terreux, un peu de fer (0.2 à 1%) et d'eau (0.5 à 3%) (Carion, 2007).

Ces verres sont liés au volcanisme terrestre de zones de collision ou de zones de subduction (Carion, 2007).

Les verres d'obsidienne forment deux types de verre (Carion, 2007) :

- Les verres siliceux : solidification lente en masse due à la grande viscosité, généralement transparents gris-brun si l'épaisseur est faible avec des inclusions cristallines (oxydes de fer, silice, feldspaths et pyroxènes).
- Les « volcans gris » : à la suite d'explosions liées au dégazage du volcan en milieu aquatique (lacs, mers fermées), on peut voir se produire, à l'issue d'un refroidissement très rapide, des larmes d'apache ou marekanites.

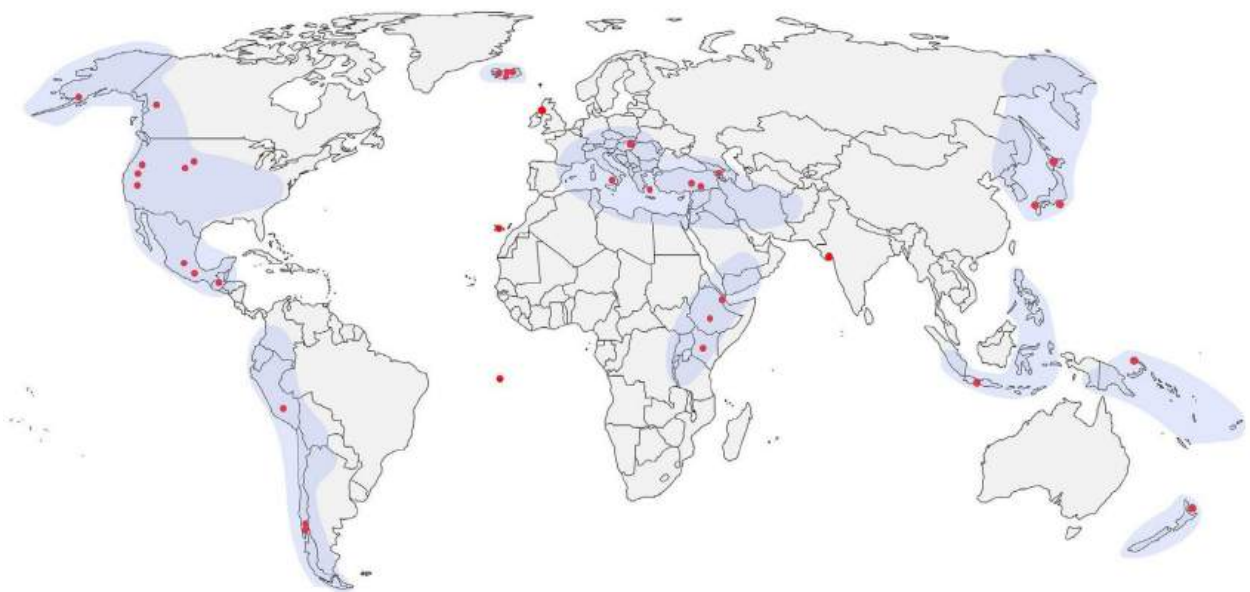


Fig. 4 : Distribution des obsidiennes sur Terre (Tuffen et al., 2020)

Le terme « obsidienne » est très ancien puisque déjà Pline le Jeune (I^{er} siècle après J.-C.) en parle dans ses écrits en expliquant que « parmi les différentes sortes de verre, on peut aussi compter l'obsidienne, une substance très semblable à la pierre qu'Obsidius a découverte en Éthiopie. » (Tardy et Level, 1980 ; McCall, 2005a).

Le fer joue un rôle majeur dans les propriétés physiques et la coloration des verres. On parle de spéciation différente dans les obsidiennes et les tectites car le fer n'est pas incorporé de la même manière en fonction des ligands et des types d'oxydation. Ainsi, des clusters d'oxydes de fer (peut-être des noyaux de magnétite) liés aux conditions de formation, peuvent être observés dans les obsidiennes. Ils expliquent l'aspect noir des obsidiennes comparé aux tectites vertes et translucides (Chassé, 2013 ; Galois et Calas, 2021).

Même si les obsidiennes sont généralement de couleur sombre, quelques rares spécimens incolores à blanc jaunâtre laiteux provenant du Chili ont été rapportés dans la littérature. Ils comportent des inclusions inhabituelles d'indialite et sillimanite (Hyrsl et al., 1998). Un autre exemple d'inclusion inattendue rapportée dans une obsidienne : des cristaux bien formés de grenat spessartite ont été documentés dans une obsidienne de Bolivie (Koivula et Calderon, 2005).

Les verres d'obsidiennes existent sous des aspects très différents qui donnent lieu à différentes variétés. On peut citer la pierre ponce, l'obsidienne cacahouète ou « peanut-obsidian » (Broughton, 1968), l'obsidienne acajou ou « Mahogany », l'obsidienne flocon de neige appelée également obsidienne mouchetée, les larmes d'apache ou « marekanite », l'obsidienne de feu ou « fire-obsidian » (Dodge, 2016), l'obsidienne arc-en-ciel ainsi que les obsidiennes argentées ou dorées. Quelques précisions sont apportées ci-dessous sur les variétés qui constituent quelques-uns de nos échantillons.

a. Obsidienne acajou ou « Mahogany »

Cette variété d'obsidienne comporte des inclusions d'hématite qui lui donnent une couleur brune (Carion, 2007). Les échantillons sont généralement opaques et de couleur inhomogène avec des zones brunes et d'autres noires.

b. Obsidienne flocon de neige ou obsidienne mouchetée

Dans la matrice noire de cette obsidienne, on retrouve des taches blanches. Ce sont des inclusions de cristobalite qui rappellent les motifs de flocons de neige (Carion, 2007 ; Gübelin et Koivula, 2008b).

c. Larme d'apache ou « marekanite »

Cette variété d'obsidienne est de couleur brune et transparente et peut être visuellement confondue avec du quartz fumé (Tardy et Level, 1980).

Un phénomène d'aventurescence a été signalé dans des obsidiennes « larmes d'apache ». Ces échantillons comportaient des plaquettes hexagonales et triangulaires d'hématite et ilménite responsables de cet effet pailleté (Koivula et Tannous, 2003).

d. Obsidienne argentée ou dorée

Ces obsidiennes montrent un phénomène lumineux qui se traduit par un lustre doré ou argenté. Pour les obsidiennes argentées, les images du MEB montrent que les bulles étirées contiennent un deuxième verre avec un indice de réfraction légèrement plus faible que celui de la matrice. Ce deuxième verre pourrait venir de fragments de cendres rhyolitiques (Ma et al., 2001).

Certains échantillons ont pu montrer en plus de ce lustre doré ou argenté un phénomène de chatoyance. La structure linéaire diffusant la lumière correspond au pourtour de bulles laminées, constituant des disques plus ou moins ronds ou ovalisés. Ces contours plats sont tous dans des plans parallèles, de sorte que la chatoyance aura lieu dans une direction qui leur est perpendiculaire. (Gauthier et al., 2019).

1.3. Les tectites et impactites : « les pierres de choc »

L'impactisme, à la base de la formation des planètes, est probablement le processus géologique le plus important de tout le système solaire, voire de tout l'Univers, puisque des cratères d'impacts s'observent sur tous les corps planétaires. Face aux météorites, l'atmosphère terrestre est le plus efficace des boucliers. (Carion, 2007; Detay, 2009).

On distingue deux catégories de verres liés à l'impactisme : les impactites vitreuses et les tectites. Pour chaque famille de tectites, il y a (ou il y a eu) obligatoirement un cratère parent. La formation de tectites nécessite un cratère parent d'au moins 10 km de diamètre. En comparaison, la formation d'impactites ne nécessite qu'un cratère et une énergie libérée beaucoup plus modestes (Combes, 2001).

Nous traiterons également dans cette partie du verre libyque même si son origine n'est pas encore définitivement tranchée.

A. Les impactites vitreuses

Ce sont des verres naturels formés par la fusion du sol à la suite de l'impact d'une météorite. On trouve ces échantillons autour du point d'impact. Un système de classification a été proposé pour ces verres selon qu'ils proviennent d'un impact simple ou d'impacts multiples (Stöffler et al., 2007).

On trouve des impactites vitreuses de différentes provenances (Carion, 2007) :

- Mauritanie : le verre d'Aouelloul, noir verdâtre, se présente en fragments irréguliers et à la surface piquetée ou cannelée. Il est âgé d'environ 3,3 millions d'années et est assez rare (quelques kilogrammes collectés).
- Arabie saoudite : les « perles du Harem » sont des verres sphériques noirs brillants de petite taille et riches en fer. L'âge du cratère est estimé à 6400 ans.
- Tanzanie : les verres du Mont Darwin sont gris-noirs et ne dépassent pas les 5 ou 6 cm. Le cratère est âgé probablement de 700 000 ans.
- Kazakhstan : on retrouve ces verres autour de l'astroblème Zhamanshin. D'après les calculs, ils sont âgés de 1,1 milliard d'années. Parmi ces verres, on retrouve les irgizites, les verres de Zhamanshin, et de manière plus rare, dans des sédiments autour du cratère, des microbilles de verre.
- Américanites ou pseudotectites : leur analyse chimique a permis d'établir qu'il ne s'agit pas de tectites à proprement parler mais que ces verres ont une origine volcanique. De couleur gris verdâtre, on les trouve au Pérou et en Colombie.

Les impactites contiennent assez souvent des traces chimiques de la météorite incidente (Carion, 2017). L'analyse géochimique est essentielle pour les caractériser (Koeberl et al., 2012).

B. Les tectites

Etymologiquement, le mot tectite vient du grec « tektos » qui signifie « fondu » (Glass, 1984 ; Carion, 2007). Déjà, en 950 de notre ère, Liu Sun a été le premier à écrire sur les tectites, il parlait de « pierres noires » (Carion, 2007). En 1844, Charles Darwin les étudia d'un point de vue scientifique et conclut qu'il s'agissait d'un verre provenant de bombes volcaniques (Carion, 2007 ; Chevallier, 2021). C'est le géologue autrichien Eduard Suess qui leur donna le nom de tectites qui étaient pour lui des météorites vitrifiées (Carion, 2007 ; Chevallier, 2021).

Leur origine est longtemps restée une énigme. Mais une hypothèse est aujourd'hui reconnue par la communauté scientifique : ce sont des fragments de roches sédimentaires terrestres qui ont été arrachées du sol à la suite de l'impact d'une météorite, fondues sous l'effet du choc et figées sous leur forme vitreuse à la suite du refroidissement brutal qu'ils subissent durant leur trajet dans l'atmosphère entre le cratère d'impact dont ils sont issus et le site définitif où on les retrouvera (Carion, 2007 ; Chevallier, 2021).

La matière peut donc être satellisée en étant éjectée à plusieurs centaines de kilomètres de hauteur. La matière va subir une nouvelle fusion en rentrant dans l'atmosphère pour retomber sur Terre. Elle pourra alors être façonnée en des formes régulières comme des sphères, poires, gouttes, boutons (Carion, 2007).

Actuellement, on connaît quatre champs de tectites dans le monde (Fig. 5). Les tectites portent des noms en fonction de leur provenance (Carion, 2007 ; Fetherston et al., 2013) :

- Côte d'Ivoire avec les ivoirites qui sont des tectites noires opaques. Ce sont les plus rares et on les trouve au milieu des placers aurifères. Elles seraient les plus jeunes avec un âge estimé entre 1,1 et 1,3 million d'années (Kourimsky et Tvrv, 1979).
- Amérique du Nord avec les bédiasites, les géorgites : ces tectites gris verdâtre sont plutôt rares également et seraient âgées de 32 à 34 millions d'années (Zook, 1974 ; Kourimsky et Tvrv, 1979).
- République Tchèque avec les moldavites, de très jolis échantillons verts transparents âgés de 14 à 15 millions d'années (Trnka et al., 2002).
- Australasie avec les rhizalites, les australasites. Généralement noires et opaques, ce sont les plus nombreuses, réparties sur de vastes champs (sur une aire de 10 000 km par 6 000 km). Elles datent de 700 000 ans. Le cratère n'a pas été officiellement retrouvé mais une hypothèse émise par C.C. Schnetzler propose un cratère à la frontière entre le Laos et la Thaïlande (Carion, 2007).

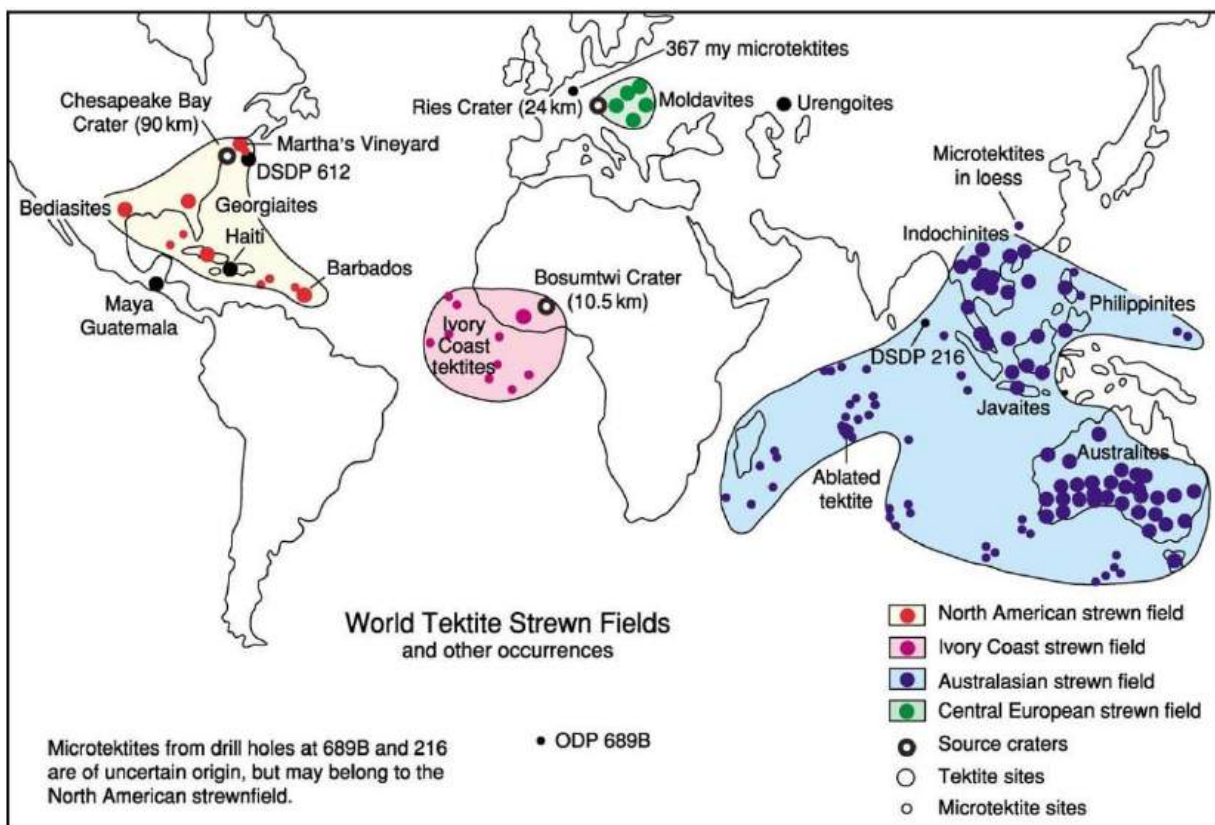


Fig. 5 : Localisation des quatre champs de tectites dans le monde des cratères connus pour trois de ces champs : Chesapeake Bay aux USA, Ries en Allemagne, et Bosumtwi au Ghana (McCall, 2005b). D'après John Weihaupt, le cratère associé aux australasites pourrait être sous les glaces de l'Antarctique (Chevallier, 2021)

Les tectites sont les verres naturels les plus pauvres en eau, ce qui permet de les différencier des obsidiennes. Elles sont composées de 70% à 80% de silice, de 9 à 16% d'alumine et ont une faible teneur en fer (Carion, 2007 ; Fetherston et al., 2013). Le pourcentage de silice des tectites varie selon les provenances (Fig. 41 en annexe 2) : de 68% pour celles de Côte d'Ivoire à plus de 76% de silice pour celles d'Amérique du Nord (McCall, 2005b).

Les macro-tectites ont souvent des formes étranges (sphère, ellipsoïde, haltère, diabololo, poire, larme, disque renflé sur les bords, etc.) (Baker, 1959). Ces formes s'expliquent par l'histoire balistique de ce verre fondu éjecté du cratère à grande vitesse (O'Keefe, 1976 ; Thomas, 2014).

Les micro-tectites (en-dessous 1mm) ont été découvertes dans les sédiments des profondeurs marines en 1968 par B.P. Glass. Elles sont connues au large de la Côte d'Ivoire et à l'ouest du champ de tectites australasien (Konta et Saul, 1976).

En termes d'inclusions, les tectites peuvent contenir de la lechatérite, un minéraloïde constitué de dioxyde de silicium amorphe. A contrario, les verres volcaniques ne contiennent pas de lechatérite (Thomas, 2014).

La littérature mentionne un échantillon de tectite provenant de Luc Yen au Vietnam comportant une inclusion fluide contenant à la fois du gaz et du liquide (Vertriest et al., 2017).

a. Moldavite

Le terme moldavite vient du nom de la Moldau, traduction allemande de la rivière Vltava en République Tchèque où ce verre naturel fut découvert pour la première fois (Konta et Saul, 1976). Agée de 14 à 15 millions d'années (Zook, 1974), la moldavite est une très jolie tectite d'un vert transparent qui est appréciée en bijouterie aussi bien en gemme facettée qu'en pierre brute grâce à sa surface sculptée, pour les plus belles, telle un hérisson. L'élément Fe^{2+} est responsable de cette couleur verte (Whymark, 2022).

Une échelle de couleur a été établie par Bouska et déposée au Musée national de Prague et à Washington DC (Zavetova et al., 1989). De manière très exceptionnelle, il existe des moldavites bicolores lorsqu'il y a collision en vol de deux morceaux dans l'atmosphère. La fusion laisse une limite nette entre les deux pièces (Funda, 2015).

Il existe deux grands champs principaux en République Tchèque sur une soixantaine de localités : l'un au Sud de la Bohême et l'autre au Sud-ouest de la Moravie. On retrouve des moldavites jusqu'à environ 500 km autour du cratère (Hyrsl, 2015). Des occurrences mineures se trouvent en Autriche (Waldviertel) et en Allemagne (Lausitz), et de très rares occurrences ont été signalées dans le sud-ouest de la Pologne (mindat.org ; Bouska, 1997). Le cratère-parent serait celui de Nordlingen-Ries, en Allemagne, qui mesure 24 km de diamètre (Carion, 2007). Les plus belles moldavites sont réputées provenir de Besednice (Funda, 2015).

La lechatérite se rencontre fréquemment en inclusion dans la moldavite. Cette inclusion prenant l'allure de méandres ne se rencontre que dans des moldavites naturelles, jamais dans des imitations (Gübelin et Koivula, 2005 ; De Goutière, 2011 ; Funda, 2015 ; Pearson, 2015). Elle est plus fréquente dans les moldavites tchèques que dans les moldavites moraves (Rost, 1964). La cathodoluminescence de la moldavite est intéressante car on voit bien deux matériaux différents entre la lechatérite et le reste de la matrice (Fritzke et al., 2015 ; Fritzke. et al., 2017). En inclusions dans la moldavite, on retrouve également des bulles de gaz ainsi que les schlieren, à l'aspect sirupeux sous forme de traînées (De Goutière, 1995 ; Bouska, 1993 ; Funda, 2015, Trnka et al. 2002). Plus exceptionnellement, une publication rapporte l'observation d'une longue bulle de 8mm dans une moldavite (Koivula et al., 1992).

Les moldavites représentent le groupe de tectites le plus acide avec une teneur en silice d'environ 80% en poids (Fig. 42 en annexe 2). Ils sont également relativement riches en K_2O (Trnka et al. 2002). Une teneur élevée en Na_2O et CaO peut être une aide utile pour identifier le verre synthétique (Sangsawong et al., 2016).

Les spectres FTIR sont également utiles pour distinguer la moldavite naturelle d'un verre synthétique : des pics d'absorption à environ 2850 et 3520 cm^{-1} sont couramment trouvés dans le verre synthétique alors que la moldavite présente généralement de larges bandes à environ 3609 cm^{-1} (Sangsawong et Pardieu, 2016).

b. « Pseudo-tectite »

Il est parfois facile de confondre tectites et obsidiennes, ces deux verres naturels ayant pu être érodés par l'eau et présentant alors une surface similaire. La littérature parle parfois de pseudo-tectites pour désigner des obsidiennes qui ont une allure extérieure de tectite (Konta et Saul, 1976). Cependant, en lumière transmise, l'obsidienne est de couleur brun-gris. Une tectite est de couleur brun-vert (Whymark, 2021).

L'observation des inclusions au microscope permet généralement de faire la différence. L'obsidienne contient des cristallites (cristaux embryonnaires) et des sphérulites (cristaux fibreux radiaux). Les tectites contiennent des inclusions de coésite (polymorphe de haute pression de la silice qui cristallise dans le système monoclinique), de baddeleyite et de lechatérite (Pierce, 2002).

L'analyse chimique permet également de faire la différence entre tectite et obsidienne (Koomans, 1938 ; Pierce, 2002 ; Verish, 2016). La présence d'eau fera notamment la différence entre ces deux verres puisque l'obsidienne en contient environ 2% contrairement aux tectites qui n'en ont quasiment pas (Carion, 2007 ; Fetherston et al., 2013).

	Tectite	Obsidienne
Couleur	brun-vert	brun-gris
Inclusions	coésite baddeleyite lechatérite	cristallites sphérulites
Présence d'eau	quasiment pas	environ 2% d'eau

Fig 6 : Tableau comparatif des caractéristiques discriminantes entre tectite et obsidienne

C. Verre libyque

Popularisé par le naturaliste Theodore Monod, le verre libyque était déjà connu et utilisé durant la préhistoire pour fabriquer des armes et outils ainsi qu'en Égypte Antique où on le sculptait pour servir d'ornement (Carion, 2007). Daté de 28 à 29 millions d'années (Diemer, 1998), on le retrouve sur le site du « silica glass », dans la « Grande Mer de Sable », dans la partie égyptienne du désert libyque (Fig. 7), en morceaux éparpillés sur une aire qui varie, selon les sources de la littérature, entre 3500 km² (Barrat et al., 1997 ; Detay, 2009) et 6500 km² (Aboud, 2009 ; Brügge, 2006 ; Detay, 2009). On le nomme « verre libyque » ou, en anglais, « libyan desert glass » (LDG). Les endroits les plus productifs sont au nord du plateau de Gilf Kebir (Brügge, 2006).



Fig. 7 : Carte de localisation du LDG. La question de l'abondance du LDG dans cette zone reste encore à élucider (Koeberl et al. 2019)

L'origine de sa formation reste encore assez mystérieuse et a fait l'objet de multiples théories. D'anciennes hypothèses sont désormais abandonnées comme celles d'un calcaire dépoli, d'une céramique vitrifiée, d'une origine lunaire, d'un gel durci suite à l'évaporation d'un lac dont l'eau aurait été riche en silice, d'un incendie massif d'une paléo-forêt (Carion, 2007 ; Detay, 2009).

L'hypothèse qui semble la plus largement reconnue aujourd'hui est celle d'un violent impact d'origine météoritique sur une cible riche en silice entraînant la formation d'un verre d'impact. D'ailleurs, la présence de certaines inclusions comme la lechatélierite ou la cristobalite qui ne se forment qu'à haute température ainsi que la faible teneur en H₂O (<0,05% en poids), vont dans ce sens (Fudall, 1981 ; Beran et Koeberl, 1997 ; Koeberl, 1997 ; Kleinmann, 2001 ; Pratesi G. et al., 2002 ; Brügge, 2006 ; Carion, 2007 ; Bölit et Langenhorst, 2009 ; Mizera, 2017).

De même, certains échantillons contenant des traînées brunes appelées « dark schlieren » ont pu être analysés et les résultats ont démontré une origine cosmique grâce à des quantités détectables d'iridium et des concentrations en éléments sidérophiles. La chimie suggère que la roche à l'origine du LDG était sédimentaire. Le LDG présente une structure typique des verres obtenus par fusion. La présence de l'élément chimique germanium (Ge) et du minéral appelé stishovite (polymorphe quadratique de la silice) démontre une formation sous haute-pression et haute-température (Barrat et al., 1997 ; Detay, 2009 ; Saul, 2018).

Toutefois, le cratère d'impact correspondant à la formation du LDG n'a jamais été retrouvé. Et on ne peut pas croire à une tectite car les pièces ne présentent pas de formes aérodynamiques (Detay, 2009 ; Saul, 2018) et que l'état d'oxydation du fer dans le verre libyque diffère de celui dans les tectites (Giuli et al., 2003). On peut supposer que, depuis 29 millions d'années, le cratère ait pu disparaître suite à l'érosion ou être caché sous les dunes de sable (Carion, 2007 ; Greshake et al., 2018 ; Koeberl et al. 2019).

A moins qu'il n'ait jamais existé et que le LDG se soit formé à la suite d'un événement comme celui de la Toungouska, en Sibérie, en 1908 où la météorite incidente n'a jamais touché le sol mais a explosé à quelques kilomètres d'altitude. Selon la théorie du panache thermique, l'effet du souffle et de la chaleur aurait transformé le grès nubien en verre (Wasson, 2017).

Le scénario de l'origine cométaire du LDG semble se confirmer avec l'analyse d'Hypatia, une météorite pas comme les autres, découverte dans le désert du Sahara dans les années 1990. L'analyse chimique d'Hypatia montre qu'elle est composée majoritairement de carbone (70%), ce qui ne correspond à aucun corps astral connu jusqu'à présent (Devos, 2018). Il pourrait s'agir d'un vestige de la nébuleuse de gaz et de poussière à l'origine de la formation de notre système solaire qui aurait été amené sur Terre par une comète. Hypatia pourrait alors avoir été la cause de la gigantesque explosion donnant naissance aux morceaux de verre libyque (Kramers et al., 2013).

La faible teneur en matériel chondritique dans le LDG va dans le sens d'une formation suite à l'impact d'une comète (Detay, 2009). Actuellement, il semble qu'il y ait un consensus autour du fait que LDG soit le produit d'un impact de surface ou d'une explosion d'une comète ou d'une météorite. Mais de nombreuses zones floues persistent. Les preuves d'une température d'origine extrêmement élevée et soutenue pour certains des matériaux trouvés dans le désert libyen sont claires, mais des preuves de températures beaucoup plus basses sont également rapportées. De la même manière, des preuves d'événements de basse et de haute pression sont présentes. Il est aussi possible que l'origine de la formation du LDG puisse se trouver dans plusieurs événements à différents moments dans le passé (Saul, 2018).

On trouve la première mention du LDG en 1850 dans le mémoire de Fulgence Fresnel sur la Wadaï. Le LDG est ensuite tombé dans l'oubli jusqu'en 1932 où Patrick A Clayton le redécouvrit (Diemer, 2010). Clayton & Spencer le décriront dans une première documentation en 1934 (Clayton et Spencer, 1934 ; Barrat et al., 1997). En hommage à Patrick Andrew Clayton, on appelle parfois le LDG du nom de « claytonite ».

Il s'agit du verre naturel connu le plus riche en silice (Detay, 2009). L'analyse chimique a montré qu'il se compose de 98% de silice et de 2% d'alumine ainsi que quelques traces d'oxyde de fer, de titane, de zirconium (Carion, 2007 ; Diemer, 2010). Le LDG comporte des éléments traces dans les mêmes proportions d'éléments rares que les chondrites (Richet, 2009). Les caractéristiques chimiques et physiques du LDG sont absolument uniques et sans équivalent comparable à d'autres verres naturels que ce soient des verres volcaniques, des tectites ou des verres d'impact (Brügge, 2006).

Transparent à translucide et de couleur jaune légèrement vert, il présente ce que l'on peut décrire comme un beau poli désertique avec sa surface alvéolée caractéristique de l'érosion éolienne (Carion, 2007 ; Detay, 2009).

En inclusions, on a pu relever la présence de minéraux confirmés en spectroscopie Raman, tels que des cristaux de tourmaline, de la lechatérite, de la wollastonite, des zircons, de la baddeleyite, de l'enstatite, des quartz choqués, des sphérules de cristobalite (polymorphe de basse température de la silice du système quadratique), des traînées brunes, les « schlieren », de l'eau dans les bulles, du rutile, de l'anatase, de l'anhydrite, de l'aragonite (Kleinmann, 1969 ; McHone et al., 2000 ; Detay, 2009 ; Diemer, 2010 ; Frost et al., 2010 ; actueologie.fr, 2021).

Le Dr John Saul a émis l'hypothèse qu'en l'absence d'oxygène, certains « microfossiles » riches en carbone auraient pu ne pas s'être enflammés, mais auraient été encapsulés par la silice fondue (Johnson et Koivula, 1998).

Le verre libyque n'a pas encore dévoilé tous ses secrets.

1.4. Les fulgurites : les « pierres de foudre »

L'étymologie du mot fulgurite vient du latin « fulgar » qui signifie éclair. Les fulgurites ont été découvertes au XVII^{ème} siècle (Carion, 2007). Elles ressemblent à des tubes creux opaques et granuleux, une sorte d'empreinte du passage de l'électricité. Généralement, elles mesurent une dizaine de centimètres de long et un diamètre entre 5 et 20 mm. Le plus souvent, elles proviennent des dunes de la Grande Mer de Sable dans le sud-ouest de l'Égypte (Carion, 2007).

Une fulgurite résulte, la plupart du temps, de la rencontre explosive entre un puissant éclair orageux et un sol sableux. Plus rarement, elle peut se former lorsque la foudre s'abat sur une roche telle que le granite (Lacroix, 1915a ; Carion et al., 2007 ; Carter et al, 2010).

Avec une température locale supérieure à 3000°C, l'impact de la foudre sur le sol sableux très riche en silice provoque la fusion instantanée de cette silice. Le refroidissement rapide de la silice fondue crée un verre naturel très pur appelé « lechatérite » comme l'a proposé Alfred Lacroix en 1915.

Grâce à la méthode de thermoluminescence, une datation a pu être effectuée et l'âge des fulgurites a pu être estimé entre 14 000 et 16 000 ans (Carion, 2007).

Paradoxalement, alors que l'on trouve les fulgurites en abondance dans ce désert, les orages y sont extrêmement rares. Cela s'explique par le changement de climat entre aujourd'hui et celui qui régnait sur la région il y a 15 000 ans (Carion, 2007).

Les fulgurites ne forment pas des gemmes en soit mais sont constituées de lechatérite, matériau constitué de silice très pure que l'on retrouve dans des verres naturels de qualité gemme comme la moldavite, le verre libyque (Lacroix, 1915b).

II. MATERIAUX ET METHODES

II.1. Description des échantillons

Photos macro	Réf	Variété	Couleur	Forme	Taille	Masse (ct)	Provenance	Dimensions (mm)
	IL01	Larme d'apache	brune	ovale	mixte	4,69	USA	13,3 x 9,5 x 7,2
	IL02	Larme d'apache	brun/gris	goutte érodée	brut	1,38	France, la Bourboule	9,4 x 6,3 x 4,8
	IL03	Moldavite	verte	ronde	brillant	1,15	République Tchèque	7,3 x 7,3 x 5,3
	IL04	Verre libyque	jaune grisâtre pâle	poire	brillant	1,94	Désert libyque Egypte	12,1 x 8,1 x 4,5
	IL05	Obsidienne acajou	noire avec zonations brunes	ovale	cabochon simple	5,4		19,7 x 9,9 x 4,1
	IL06	Obsidienne neige	noire avec zonations blanches	ovale	cabochon simple	7,44		16,1 x 12,1 x 6,1
	IL07	Moldavite	verte	ovale	brillant	4,64	République Tchèque	12,6 x 10,4 x 8,1
	IL08	Verre libyque	jaune grisâtre pâle	tranche	brut	5,48	Désert libyque Egypte	24 x 12 x 3
	IL09	Obsidienne acajou	brune	tranche	brut	11,87		31 x 13 x 2,5
	IL10	Obsidienne argentée	noire	tranche	brut	12,74		31 x 21 x 2,5
	IL11 (fragments 14 à 18)	Obsidienne acajou	noire et brune	fragment	brut	119,4	Mexique	50,3 x 30,8 x 10,1
	IL12	Obsidienne acajou/larme d'apache	brune	triangle arrondi	cabochon simple	81,22	Arménie	50 x 40,7 x 6
	IL13	Agni manitite	brune	tranche	brut	173,35	Indonésie	40 x 33 x 24

II.2. Méthodes

A. Préparation de tranches et de lames minces

Des préparations ont été nécessaires pour certains échantillons de bruts. Les échantillons IL08 (verre libyque), IL09 (obsidienne acajou), IL10 (obsidienne argentée) et IL13 (agni manitite) ont été sciés, tranchés et l'élaboration d'une lame mince pour chacun a également été nécessaire. La réalisation de ces préparations s'est faite au laboratoire Mineralab appartenant à mon camarade de promotion, Fouad Amin. Les étapes de préparation sont expliquées à travers les illustrations suivantes (Fig. 44 à 54 en annexe 3).

B. Matériel de gemmologie classique

Nous avons utilisé un microscope de la marque Krüss modèle trinoculaire KSW5000-T pour l'observation des inclusions et leur photographie. Les propriétés physiques et optiques étudiées en gemmologie classique seront déterminées à l'aide d'un polariscope, d'un réfractomètre, d'une balance hydrostatique et d'une cabine UV équipée d'UVL (365 nm) et d'UVC (254 nm).

C. Microscope optique

L'instrument a été mis à disposition par le laboratoire Mineralab pour observer et photographier les échantillons IL08 (verre libyque), IL09 (obsidienne acajou), IL10 (obsidienne argentée) et IL13 (agni manitite). Il s'agit d'un microscope optique polarisant Leica DM750P.

Des photographies ont pu être prises en lumière réfléchie sur des tranches d'environ 2 mm d'épaisseur. L'instrument a également été utilisé en lumière transmise pour étudier la texture interne ou les inclusions d'échantillons préparés, au préalable, en lames minces.

D. Microscope électronique à balayage (MEB)

Avant toute utilisation de MEB, les échantillons nécessitent une préparation puisqu'ils doivent être métallisés au carbone. Ils ont été pour cela montés sur un plot en laiton avec de la laque d'argent conductrice qui permet la métallisation de la surface de l'échantillon.

L'instrument utilisé est un microscope électronique à balayage (MEB), le modèle JEOL JSM 5800LV avec un détecteur à dispersion d'énergie EDS de type SDD, de marque SAMx et de surface active de 10 mm². Pour les conditions expérimentales, on paramètre un temps de comptage pour les analyses (life time) de 60 secondes. Le grandissement varie de 2000 fois à 4000 fois. La distance (WD) entre les pièces polaires et l'échantillon est de 15 mm. On note une tension d'accélération au niveau du faisceau égale à 15kV et un courant de 0.5nA.

E. Spectroscopie Infra-Rouge à Transformée de Fourier (FTIR)

L'instrument utilisé est celui de l'IMN de Nantes, un modèle FTIR Bruker Vertex 70 avec le logiciel Opus 7. Il s'agit d'une manipulation en transmission avec une résolution de 4 cm⁻¹ et un nombre de 100 scans.

F. FT Raman

Nous avons utilisé l'instrument de l'IMN de Nantes, un FT Raman Bruker MultiRam avec le logiciel Opus 7. Les manipulations ont été faites à température ambiante avec une puissance de laser de 500 mW dans un domaine spectral qui s'étend essentiellement dans l'IR moyen et avec un nombre de 1000 scans.

Le Laboratoire Français de Gemmologie (LFG) a également mis à disposition un micro-Raman de la marque Renishaw pour réaliser des spectres sur les inclusions. Grâce à la binoculaire intégrée à l'instrument, cela permet de pointer le laser sur l'inclusion afin d'analyser cette cible.

G. Spectro-fluorimètre

Cet appareil de photoluminescence se trouve à l'IMN de Nantes. Il s'agit du fluorimètre Horiba Jobin-Yvon Fluorolog3. Le logiciel utilisé s'appelle FluorEssence v3.8.

H. EDXRF

Nous avons pu réaliser des manipulations sur l'instrument EDXRF Arl Quant'x de Thermofisher dans le but de tenter d'obtenir une analyse chimique par fluorescence X de quelques échantillons de nos verres naturels. Cette analyse permet de connaître les éléments majoritaires mais également les éléments traces qui composent la matière.

III. RESULTATS

III.1. Gemmologie classique : observation des caractéristiques internes et externes, caractère optique

Photo macro	Réf	Variété	Observation des caractéristiques externes	Inclusions observées	Caractère optique	
					Observation entre polariseurs croisés	Caractère optique
	IL01	Larme d'apache	Cassures conchoïdales et éclat sur l'arête de culasse	Inclusions minérales de forme pseudo-hexagonale et aciculaires courtes bulles de gaz allongées	NRP	Isotrope
	IL02	Larme d'apache	Rayures et égrisures	Inclusions minérales noires, certaines de forme pseudo-hexagonale et aciculaires	Anomalies de polarisation	Isotrope
	IL03	Moldavite	Nombreuses rayures et égrisures	Nombreuses bulles de gaz rondes et ovales Lechatelierite Aspect sirupeux	NRP	Isotrope
	IL04	Verre libyque	Nombreuses rayures	Nombreuses bulles de gaz de formes diverses cristobalite Aspect sirupeux	NRP	Isotrope
	IL05	Obsidienne acajou	Tâches rouge-brun			
	IL06	Obsidienne neige	Tâches blanches			
	IL07	Moldavite	Petite cassure sur la pointe de culasse, quelques rayures et égrisures	Texture sirupeuse, nombreuses bulles de gaz, cassure interne, lechatelierite	Anomalies de polarisation	Isotrope
	IL08	Verre libyque	Surface dépolie	Bulles de gaz	NRP	Isotrope

Photo macro	Réf	Variété	Observation des caractéristiques externes	Inclusions observées	Caractère optique	
					Observation entre polariseurs croisés	Caractère optique
	IL09	Obsidienne acajou	Surface dépolie Tâches rouge-brun			
	IL10	Obsidienne argentée	Surface dépolie Petites cassures conchoïdales	Bulles de gaz allongées et orientées		
	IL11	Obsidienne acajou	Cassure conchoïdale brillante, rayures	Très nombreuses petites inclusions noires à l'aspect dendritique	NRP dans la partie transparente	Isotrope
	IL12	Obsidienne acajou/larme d'apache	Petite cassure conchoïdale, surface légèrement piquetée, rayures	Aspect fibreux dans les parties acajou et rubans de petits points noirs	Anomalies de polarisation dans la partie transparente	Isotrope
	IL13	Agni manitite	Nombreuses dépressions en surface sur le brut	Nombreuses bulles de gaz, trainées noires, inclusions minérales noires		

Les échantillons ont été observés et photographiés principalement à l'aide d'un microscope de la marque Krüss modèle trinoculaire KSW5000-T couplé à une caméra oculaire Euromex modèle sCMEX-20. Les clichés les plus intéressants sont présentés ci-dessous. Ils rejoignent les descriptions que l'on peut trouver dans la littérature à savoir :

- de nombreuses bulles de gaz le plus souvent déformées ;
- des figures d'écoulement qui ressemblent à une texture sirupeuse ;
- la présence de lechatélierite, une inclusion vermiculée, dans les moldavites ;
- de nombreuses inclusions minérales.

L'étude des échantillons IL07 (moldavite) et IL13 (agni manitite) a fait l'objet d'une publication dans la Revue de l'Association Française de Gemmologie ainsi que le sujet d'une présentation lors des XIX^{ème} Rendez-Vous gemmologiques de Paris.

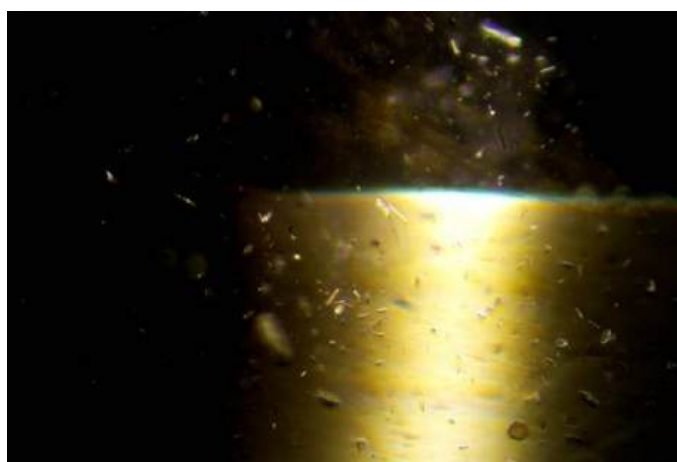


Fig. 8 : Echantillon IL01 (obsidienne « larme d'apache ») observé en LT montrant des inclusions minérales pseudo-hexagonales et aciculaires ainsi que des bulles de gaz (largeur de champ : 4.23 mm)



Fig. 9 : Echantillon IL04 (verre libyque) observé en LT montrant une inclusion de cristobalite (largeur de champ : 5.41 mm)



Fig. 10 : Echantillon IL01 (obsidienne « larme d'apache ») observé en LT montrant à gauche une inclusion octaédrique qui pourrait être de la magnétite et des cristaux incolores formant une croix. Photo Ugo Hennebois (LFG) (largeur de champ : 0.895 mm)



Fig. 11 : Échantillon IL02 (obsidienne « larme d'apache ») observé en LT montrant des inclusions minérales pseudo-hexagonales qui pourraient être du mica (largeur de champ : 4.88 mm)

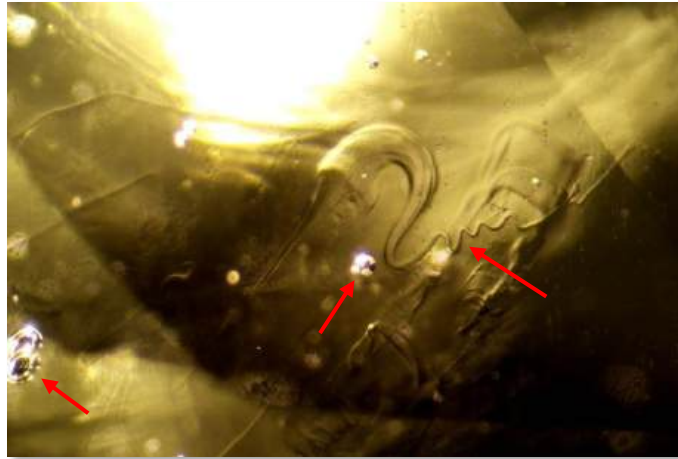


Fig. 12 : Echantillon IL07 (moldavite) observé en LT montrant une inclusion vermiculée de lechatéliérîte et des bulles de gaz (largeur de champ : 0.988 mm)

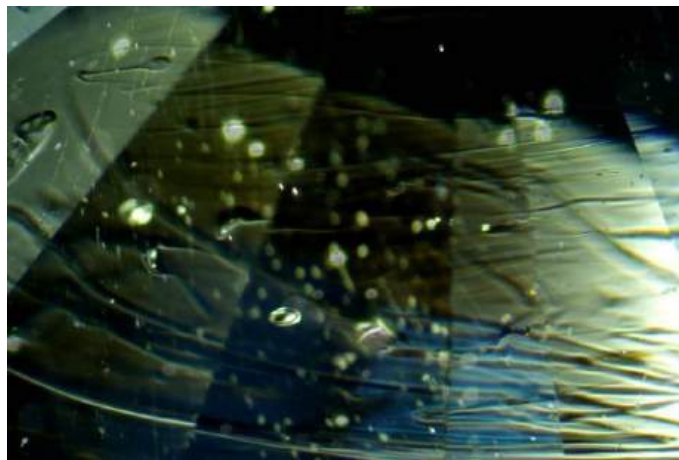


Fig. 13 : Echantillon IL03 (moldavite) observé en LT montrant de manière caricaturale les schlieren, la différence des indices de réfraction selon les zones du verre est visuellement observable grâce à ces figures d'écoulement (largeur de champ : 3.62 mm)

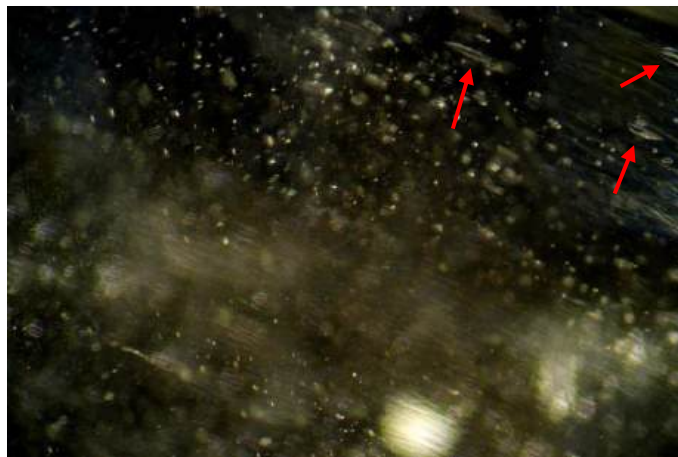


Fig. 14 : Echantillon IL04 (verre libyque) observé en LT montrant de nombreuses bulles étirées et un schlieren discret (largeur de champ : 4.91 mm)

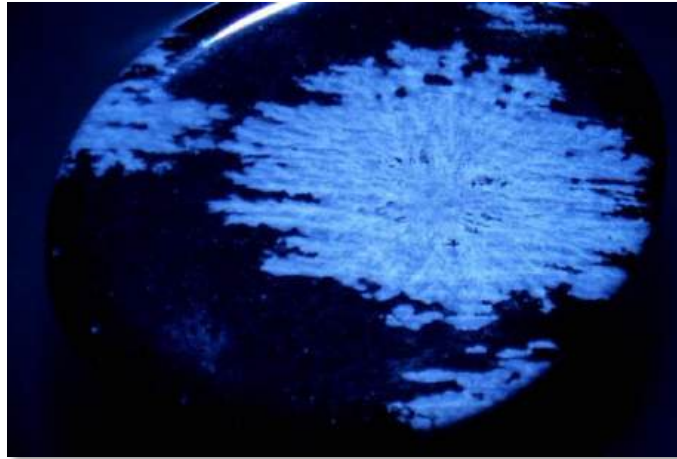


Fig. 15 : Echantillon IL06 (obsidienne neige) observé en LR montrant des dendrites blanches de cristallisation, des inclusions de cristobalite d'après la littérature (largeur de champ : 15,96 mm)

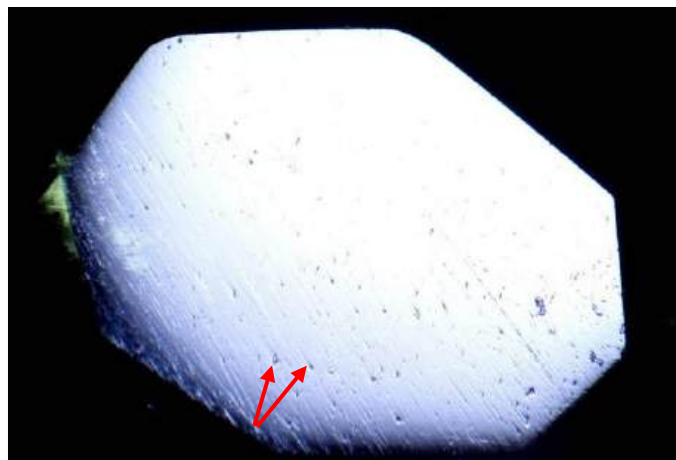


Fig. 16 : Echantillon IL07 (moldavite) observé en LR montrant un poli piqueté à cause des nombreuses bulles dans la matière. Ce poli piqueté correspond aux bulles coupées durant le polissage (largeur de champ : 12.21 mm)

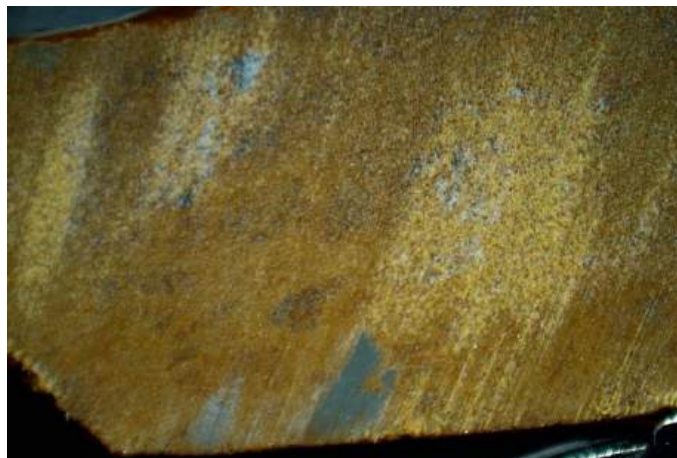


Fig. 17 : Echantillon IL09 (obsidienne acajou) observé en LR montrant une inhomogénéité de la texture sur cette surface sciée (largeur de champ : 11.93 mm)



Fig. 18 : Echantillon IL11 (obsidienne acajou) observé en LT dans sa partie brune montrant un aspect en pointillés isolés en petits segments parallèle, ou en lignes courbes étendues (largeur de champ : 8.91 mm)



Fig. 19 : Echantillon IL12 (obsidienne acajou/larme d'apache) observé en LR montrant une texture non homogène fibreuse (largeur de champ : 10.52 mm)



Fig. 20 : Echantillon IL13 (agni manitite) observé en LT montrant des inclusions translucides brunes en alignement dans la matrice transparente brune qui présente un poli grossier (largeur de champ : 3.17 mm)

III.2. Gemmologie classique : indices de réfraction, densités, réaction au filtre de Chelsea, luminescence

Photo macro	Réf	Variété	Indice de Réfraction	Densité	Filtre Chelsea	Luminescence aux UV	
						UWL	UVC
	IL01	Larme d'apache	1,489	2,33	rougit légèrement	inerte	inerte
	IL02	Larme d'apache	Brut	2,31	aucune réaction	inerte	inerte
	IL03	Moldavite	1,500	2,35	bleuit assez intensément	inerte	inerte
	IL04	Verre libyque	1,460	2,21	aucune réaction	inerte	fluorescence jaune de distribution homogène d'intensité modérée et légèrement crayeuse
	IL05	Obsidienne acajou	1,49	2,36	aucune réaction	inerte	fluorescence "orange" très peu intense
	IL06	Obsidienne neige	1,490	2,35	aucune réaction	faible et au niveau de la cristobalite	faible et au niveau de la cristobalite
	IL07	Moldavite	1,490	2,33	bleuit légèrement	inerte	inerte
	IL08	Verre libyque	Surface dépolie	2,18	aucune réaction	blanc-bleutée faible et homogène	jaune modérée légèrement crayeuse et homogène

Photo macro	Réf	Variété	Indice de Réfraction	Densité	Filtre Chelsea	Luminescence aux UV	
						UVL	UVC
	IL09	Obsidienne acajou	Surface dépolie	2,35	aucune réaction	inerte	fluorescence "orange" modérée et homogène
	IL10	Obsidienne argentée	1,49	2,36	aucune réaction	inerte	inerte
	IL11	Obsidienne acajou	Brut	2,35	aucune réaction	inerte	inerte
	IL12	Obsidienne acajou/larme d'apache	1,489	2,36	aucune réaction	inerte	inerte
	IL13	Agni manitite	Brut	2,31	aucune réaction	inerte	inerte

III.3. Gemmologie de laboratoire

Nous avons fait de nombreuses manipulations infructueuses en spectroscopie avec nos échantillons de verres naturels. Nous n'avons pas réussi à avoir des résultats concluants ou même exploitables en spectroscopie FTIR, en spectro-fluorescence et fluorescence X. Nous avons été étonnés de l'absence de résultat au Fluorolog pour les échantillons de verres libyques IL04 et IL08 alors que ceux-ci montraient une légère fluorescence aux UVC.

Les spectres Raman ont également été difficiles à obtenir. Nous avons été confrontés à différentes contraintes parmi lesquelles le matériau lui-même. En effet, le verre appartient à la classe des oxydes, or les oxydes sont de mauvais diffuseurs Raman. De plus, beaucoup de nos échantillons étaient de couleur foncée et, là encore, il n'y a pas de diffusion Raman car ces matériaux absorbent la lumière.

De plus, certains échantillons ne comportaient pas deux faces parallèles ce qui rendait encore plus difficile l'analyse. On imaginait pallier cet inconvénient en élaborant des lames minces. Mais, par exemple pour l'échantillon IL10 (obsidienne argentée), seul le spectre de la résine issue de la colle a été obtenu sur la lame mince. La tentative de spectre sur la tranche de cet échantillon a échoué, le spectre ne montrait que du bruit. Seul, l'échantillon IL09 d'obsidienne acajou nous a permis d'obtenir le spectre qui suit (Fig. 21).

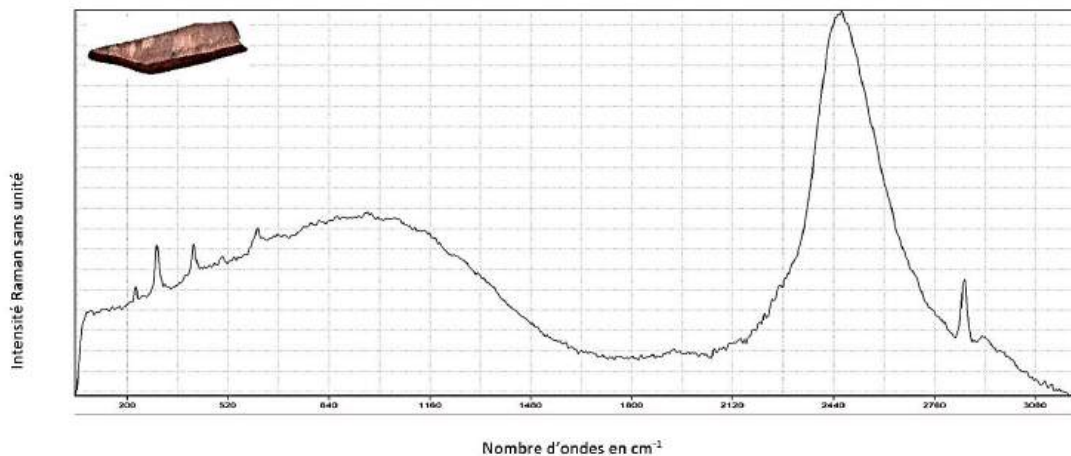


Fig. 21 : Spectre Raman avec excitation laser à 514 nm de l'obsidienne acajou IL09. On note des pics aux positions suivantes : 220, 315, 420, 510, 620, 1950, 2500 et 2880 cm^{-1} . Habituellement, l'obsidienne montre de larges bandes centrées autour de 1000 et 1600 cm^{-1} (Faulques et al., 2001) mais ce n'est pas le cas dans cette figure qui ne ressemble donc pas à l'obsidienne. La raie fine à 2880 cm^{-1} fait penser à la luminescence ou à un signal lié aux liaisons C-H. La littérature ne fait pas état d'un tel pic car les spectres Raman des obsidiennes ne vont généralement pas au-delà de 1200 cm^{-1}

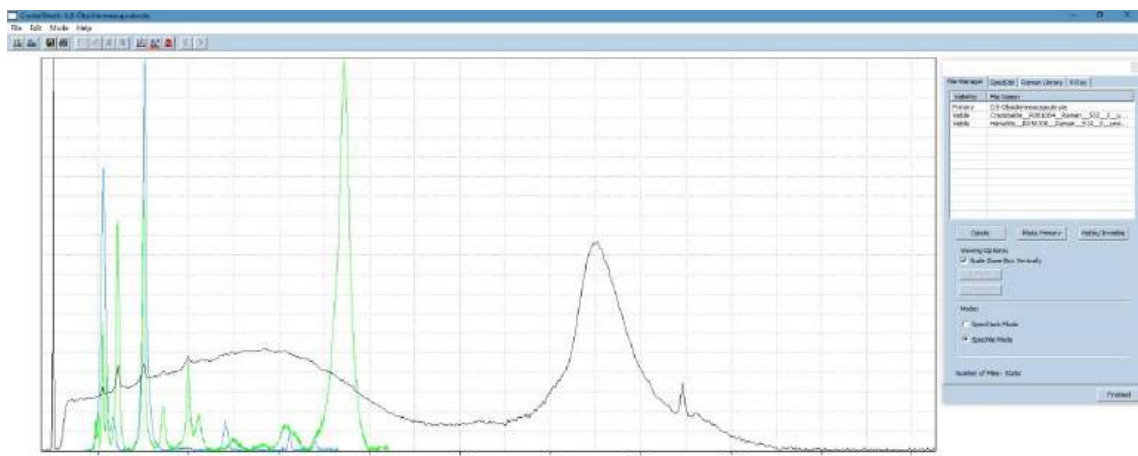


Fig. 22 : Spectre Raman de l'obsidienne acajou IL09 (en noir) comparé grâce au logiciel CrystalSleuth aux spectres Raman de la cristobalite (en bleu) et de l'hématite (en vert). On remarque que les trois pics entre 220 et 420 cm^{-1} correspondent parfaitement au spectre de l'hématite. Coïncidence amusante, le spectre de l'hématite possède deux pics en commun avec la cristobalite. Le spectre Raman de la Fig.21 semble correspondre à celui de l'hématite. On peut noter la couleur orange brun de l'hématite dans l'obsidienne acajou alors que nous la connaissons habituellement rouge intense lorsqu'elle se retrouve en inclusion en fine lamelle

Nous avons également tenté d'obtenir des spectres sur les inclusions de quelques échantillons. Là encore, nous avons été confrontés à de nombreuses limites comme, par exemple, la profondeur des inclusions dans la gemme. Dans notre cas, avec des inclusions non affleurantes, il a été impossible d'en obtenir le spectre. Cet inconvénient nous a empêché, par exemple, de pouvoir confirmer l'inclusion décrite comme cristobalite d'après de nombreuses publications dans l'échantillon IL04 (verre libyque).

Autre limite rencontrée : l'épaisseur des inclusions. L'échantillon IL01 (obsidienne « larme d'apache ») montre des inclusions de plaquettes pseudo-hexagonales (Fig. 8). Nous aurions voulu savoir si, par exemple, les plaquettes pseudo-hexagonales étaient de l'hématite et si les inclusions aciculaires correspondaient à ce qui a pu être décrit comme des micro-bâtonnets d'hédenbergite. Mais les inclusions étaient trop fines et le faisceau passait à travers sans que l'on puisse obtenir un signal.

Nous aurions voulu obtenir un spectre Raman de la lechatéliérite à partir de l'échantillon IL03 (moldavite) mais le spectre n'était pas correct, nous avons seulement obtenu une grande bande caractéristique des matériaux amorphes.

On retient, cependant, le spectre Raman obtenu sur une inclusion de l'échantillon IL01 (obsidienne « larme d'apache ») à l'aide du micro-Raman du LFG (Fig. 23).

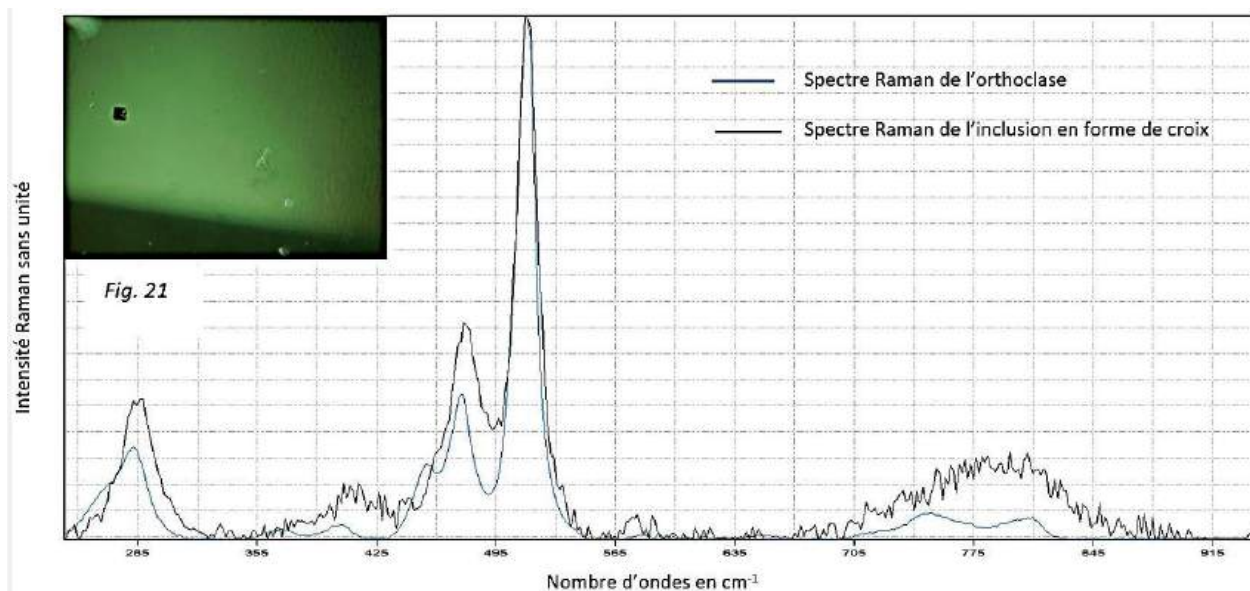


Fig. 23 : En noir, spectre Raman avec excitation laser à 514 nm de l'inclusion cristalline en forme de croix dans l'échantillon IL01.

En bleu, le spectre de l'orthoclase (bibliothèque CrystalSleuth).

La comparaison des deux spectres montre que l'inclusion en forme de croix correspond bien à un feldspath, inclusion déjà rapportée dans la littérature (Gübelin et Koivula, 2008a).

Quelques échantillons, préalablement préparés en lames minces, ont été observés sous microscope optique, des photographies ont été sélectionnées et sont présentées ci-dessous (Fig. 24 à 31).



Fig. 24 : Bulles de gaz de différentes formes dans l'échantillon IL08 (verre libyque)



Fig. 25 : Bulle de gaz ronde dans l'échantillon IL08 (verre libyque)

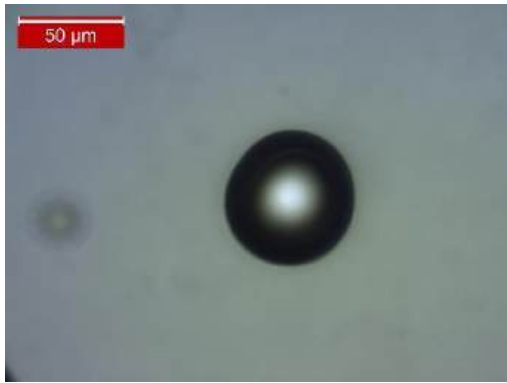


Fig. 26 : Cristal biréfringent en bleu dans l'échantillon IL09 (obsidienne acajou) vu à travers un filtre polarisant

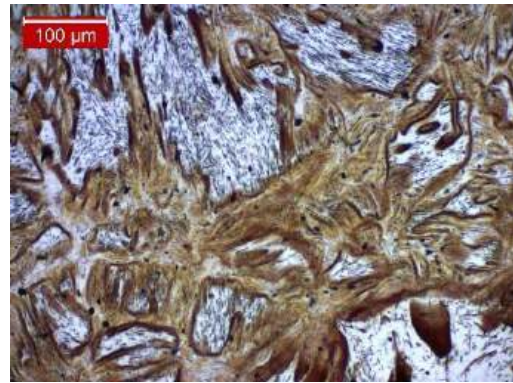


Fig. 27 : Texture inhomogène observée en LT dans la lame mince de l'échantillon IL09 (obsidienne acajou)



Fig. 28 : Echantillon IL10 (obsidienne argentée) photographié sous microscope optique sans filtre polarisant à gauche et avec utilisation d'un filtre polarisant à droite : il s'agit d'un cristal biréfringent, peut-être un cristal de feldspath.



Fig. 29 : IL13 (agni manitite) sous microscope optique. On se demande à quoi correspond cette texture.

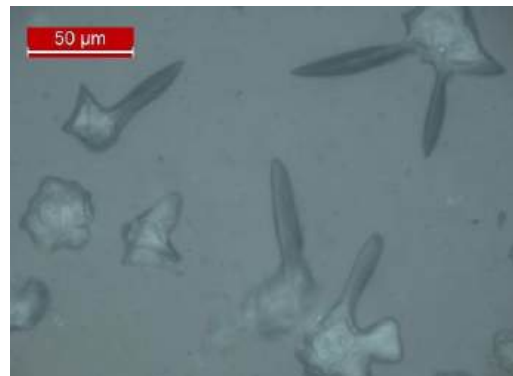


Fig. 30 : grandissement plus important d'une partie de la Fig. 29 (agni manitite) qui rend mieux compte de la structure inhabituelle avec des pointes

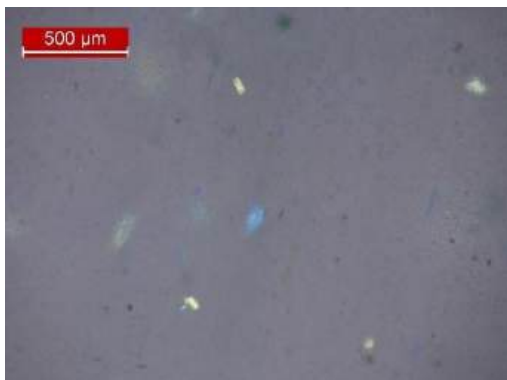


Fig. 31 : IL13 sous microscope optique avec filtre polarisant : en bleu et jaune, on observe des cristaux biréfringents

L'instrument qui nous a le plus aidé dans nos travaux est le MEB. Il a été d'un grand secours pour obtenir des résultats exploitables, notamment les analyses chimiques de nombre de nos échantillons. Seul bémol, le MEB ne permet pas de connaître les éléments légers ni même de détecter la présence d'eau. Or, l'eau est particulièrement attendue pour l'obsidienne mais on ne pourra malheureusement pas vérifier la teneur en eau de nos échantillons.

Nous avons tenté de faire de la cathodoluminescence sur l'échantillon IL03 (moldavite). Mais les résultats n'ont montré aucun contraste entre la lechatérite et le reste de la matrice contrairement à ce que l'on voit dans la littérature (Fritzke et al., 2015 ; Fritzke. et al., 2017).

Concernant les autres échantillons, les résultats de leur analyse chimique ont été regroupés dans les tableaux suivants (Fig. 32 à 34). L'échantillon le plus mystérieux est IL13 commercialisé sous l'appellation « agni manitite » ou « perle de feu divin ». Ce verre naturel est présenté tour à tour par les commerçants comme une tectite ou une pseudo-tectite. Il est vanté pour de multiples vertus thérapeutiques, mais on trouve malheureusement peu de publications scientifiques à son sujet.

Les échantillons d'obsidiennes IL01 (« larme d'apache ») et IL11 (obsidienne acajou) correspondent plutôt bien aux données chimiques de la littérature : de 75% à 77% de silice, de 10% à 15% d'alumine, de 8% à 10% de métaux alcalins (Na et K) et d'un peu de fer entre 0.2% et 1% (0.67%). Pour les échantillons d'obsidiennes IL02 (« larme d'apache »), IL09 (obsidienne acajou) et IL10 (obsidienne argentée), le pourcentage de silice est toutefois bien inférieur à ces données puisqu'il se situe entre 66% et 70%.

Les données chimiques obtenues pour la moldavite IL03 sont comparables à celles de la littérature (annexe 2). En effet, la moldavite est présentée comme la tectite la plus riche en silice avec une teneur en silice autour de 80% de son poids (81.25% en l'espèce). On retrouve également environ 10% d' Al_2O_3 , un peu plus de 3% de K_2O et environ 2% de Fe_2O_3 , CaO et MgO .

L'échantillon IL04 (verre libyque) confirme une fois de plus que le verre libyque est le verre naturel le plus riche en silice puisqu'il s'agit de silice presque pure à laquelle s'ajoute environ 2% d'alumine.

			Si	Al	Na	K	Fe	Ca	Mg	Total
	IL01	Larme d'apache	74,47	12,94	4,03	4,92	0,67	0	0	97,03
	IL02	Larme d'apache	66,05	12,62	4,25	5,66	0,68	0	0	89,26
	IL03	Moldavite	81,25	10,6	0,72	3,98	1,79	2,82	2,27	103,43
	IL04	Verre libyque	101,9	2,14	0,31	0,04	0,18	0,16	0,28	105,03
	IL09	Obsidienne acajou	69,07	12,52	4,04	4,64	0,92	0,43	0	91,62
	IL10	Obsidienne argentée	69,86	10,92	4,44	4,33	2,59	0	0	92,14
	IL11	Obsidienne acajou	74,19	13,72	4,41	5,19	0,74	0,63	0	98,88
	IL13	Agni manitite	65,68	11,49	3,9	3,82	0,54	0,69	0	86,12

Fig. 32 : Tableau comparatif des compositions chimiques de verres naturels obtenus par analyse quantitative au MEB données en pourcentage poids/oxydes.

	O	Si	Al	Na	K	Ca	Ti	Fe	Total
Zone acajou	48,33	33,97	7,09	3,04	4,34	0,39	0,05	0,66	97,87
Zone acajou hors inclusions fer	48,11	33,95	7,04	3,13	4,19	0,36	0,09	0,4	97,27
Zone mixte	51,01	30,43	6,62	3,11	3,34	0,31	0,08	0,21	95,11
Zone noire	51,74	30,32	6,58	3,46	3,24	0,29	0,06	0,14	95,83

Fig. 33 : Tableau de comparaison de la chimie quantitative des différentes zones de l'échantillon IL05 (obsidienne acajou) données en pourcentage masse.

La cartographie chimique de la zone mixte de IL05 (obsidienne acajou) a été effectuée pour savoir s'il y a deux chimies différentes en fonction de la couleur. Mais les résultats n'ont montré aucune différence si ce n'est au niveau des inclusions riches en fer.

	O	Si	Al	Na	K	Ca	Fe	Total
Zone noire	45,21	32,73	6,69	2,43	4,81	0	0,33	92,2
Zone blanche	46,89	34,06	6,83	4,89	0,71	0	0,39	93,77
Inclusion blanche	79,37	56,78	12,06	7,56	1,88	1,4	0,89	159,94

Fig. 34 : Tableau de comparaison de la chimie quantitative des différentes zones de l'échantillon IL06 (obsidienne neige) données en pourcentage masse. On ne s'explique pas le résultat anormal pour les mesures de la zone « inclusion blanche ». Cette zone a pourtant été choisie au sommet du cabochon afin d'être bien perpendiculaire au faisceau d'électrons. Malgré tout, la mesure est anormale et nous n'avons pas d'élément de réponse.

Sur l'échantillon IL06 (obsidienne neige), des spectres qualitatifs ont été effectués au MEB sur les inclusions à l'intérieur de la zone blanche : une inclusion que l'on décrira de forme pseudo-hexagonale et une autre inclusion d'aspect squelettique. Le spectre qualitatif de l'inclusion squelettique suggère une inclusion d'oxydes de fer. Il a été difficile de trouver d'autres inclusions car l'image était floue et les inclusions ressemblaient aux poussières une fois observées au MEB.

Nous n'avons pas réussi à obtenir le spectre de la cristobalite. Une fois sous le MEB, le matériau blanc fibroradié ne s'observe plus contrairement à l'observation macroscopique.

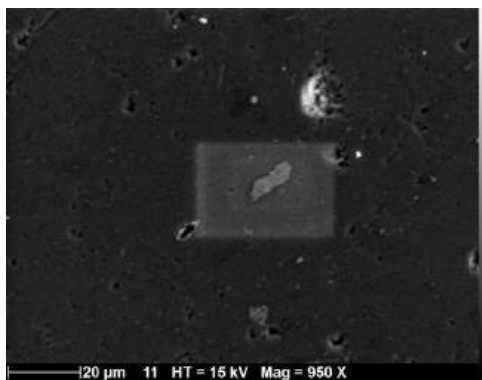


Fig. 35 : Observation au MEB de l'inclusion pseudo-hexagonale dans l'échantillon IL06



Fig. 36 : Observation au MEB de l'inclusion squelettique d'oxyde de fer dans l'échantillon IL06

En gemmologie classique, l'échantillon IL09 (obsidienne acajou) présente une fluorescence orange homogène d'intensité modérée sous UVC. Nous avons cherché à comprendre quelle pouvait être la cause de cette luminescence. On supposait qu'il pouvait y avoir la présence de manganèse (Mn). Or, l'analyse chimique au MEB-EDS de l'échantillon n'a révélé que de légères traces de barium (Ba) et de titane (Ti) qui ne sont généralement pas associés à une fluorescence orange. Cependant, cette technique est très sensible et la luminescence peut donc être causée par des teneurs très faibles non détectables en EDS.

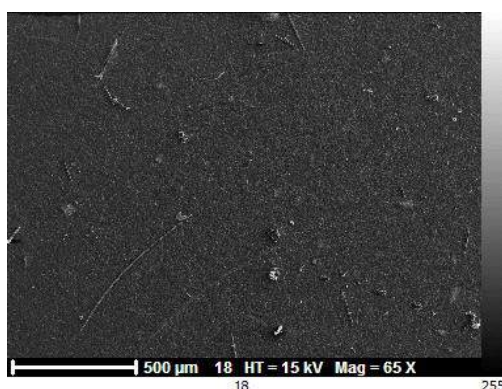


Fig. 37 : Microphotographie au MEB de l'échantillon IL09 qui montre l'absence de différence de texture contrairement à l'observation que l'on peut faire même à l'œil nu de cet échantillon (Fig. 17)

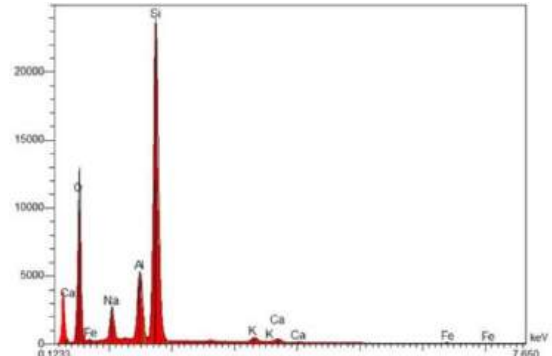
Pour l'échantillon IL10 (obsidienne argentée), nous aurions voulu trouver une explication à l'effet argenté de l'obsidienne mais l'analyse au MEB ne nous a pas permis d'observer la moindre inclusion.

Avec l'échantillon IL11 (obsidienne acajou), l'analyse chimique est identique entre la zone acajou et la zone brune transparente. On mesure très peu de fer dans la zone acajou. Le lien est difficile à établir entre ce que l'on voit à la binoculaire et ce que l'on voit au MEB. Il y a cependant plus de fer et magnésium dans la zone fibreuse (phyllosilicate de fer).

Enfin, à l'aide d'une cartographie chimique au MEB (Fig. 38), nous avons tenté de rechercher des différences chimiques au sein de l'échantillon IL13 (agni manitite) afin d'expliquer les inclusions blanches affleurantes qui sont apparues à la surface de l'échantillon une fois qu'il a été tranché. Cette étude a fait l'objet d'une publication dans la Revue de l'Association Française de Gemmologie et le sujet d'une présentation lors des XIX^{ème} Rendez-Vous gemmologiques de Paris.



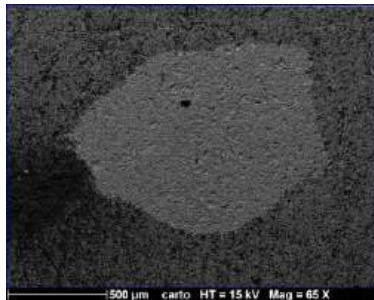
L'échantillon IL13 (agni manitite) installé sur son plot avant métallisation. L'inclusion blanche entourée par le feutre noir est particulièrement visible à l'œil nu.



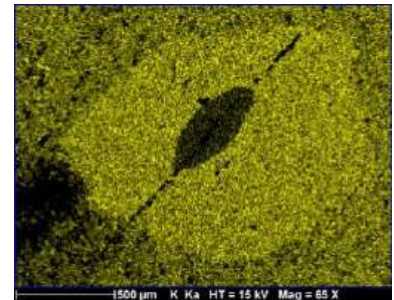
Spectre d'analyse chimique EDS qualitatif de l'échantillon IL13 obtenu au MEB



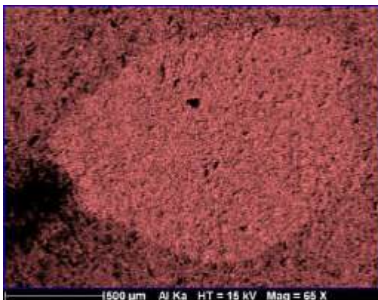
Observation en LT sous microscope de gemmologie de la zone d'inclusion blanche entourée par le feutre noir (barre d'échelle : 500 µm)



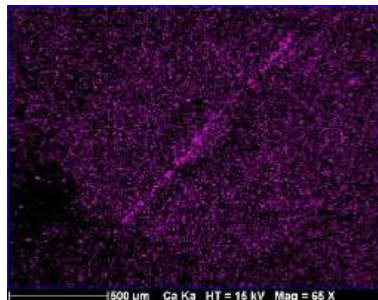
Observation au MEB de la zone d'inclusion blanche entourée par le feutre noir. Plus rien n'est visible



Cartographie chimique du potassium. On observe un trait qui traverse l'inclusion



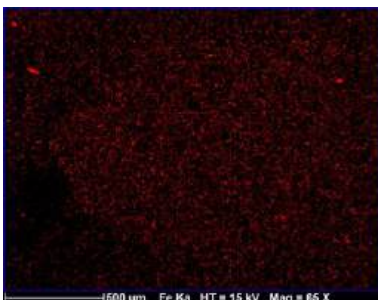
Cartographie chimique de l'aluminium



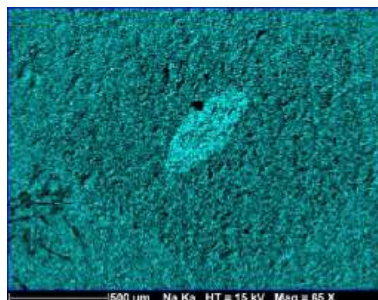
Cartographie chimique du calcium. On devine à nouveau le trait traversant l'inclusion



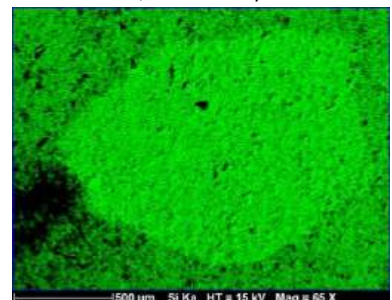
Cartographie chimique du sodium, aluminium, silicium et potassium



Cartographie chimique du fer



Cartographie chimique du sodium



Cartographie chimique du silicium

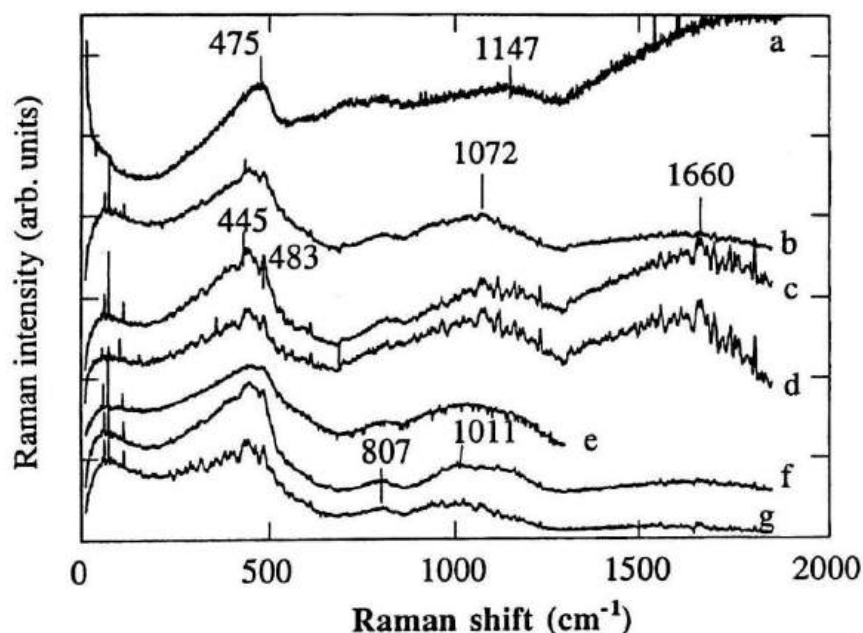
Fig. 38 : Cartographie chimique au MEB de l'échantillon IL13 (agni manitite). La zone périphérique sombre est due au trait du feutre noir visible sur la photo en haut à gauche. Les résultats montrent un contraste très subtil de la chimie en électrons rétrodiffusés : il y a plus de sodium (Na) et moins de potassium (K) dans l'inclusion blanche que dans le reste de la matrice. On voit ainsi que la diffusion de la lumière correspond bien à une différence de chimie. La zone blanche est enrichie en sodium (Na) et pauvre en potassium (K). On constate une ligne médiane qui traverse l'inclusion et qui, elle aussi, est appauvrie en potassium (K) mais est enrichie en calcium (Ca). On peut supposer que le calcium et le potassium circulaient dans une fissure au moment de la formation.

Cette différence de chimie explique sans doute la différence d'indices de réfraction qui permet de voir apparaître cette inclusion par le phénomène de diffusion de la lumière ou par une meilleure réflectivité de la lumière. Toutefois, la ligne médiane est invisible à l'œil nu et visible seulement en cartographie chimique (Lerouyer et Fritsch, 2022a et conférence « Entre inclusions et illusions » des XIX^{èmes} Rendez-Vous gemmologiques de l'AFG, 2002b)

IV. DISCUSSION

Nous n'avons pas réussi à obtenir le spectre de la cristobalite sur l'obsidienne neige (IL06). Nous ne réussissons malheureusement pas à prouver que c'est bien la cristobalite qui est responsable des « flocons de neige » de cette variété d'obsidienne. Sans preuve de présence de cristobalite, nous pourrions aussi émettre l'hypothèse d'un phénomène physique de diffusion de la lumière qui expliquerait cette couleur blanche, phénomène qui serait causé par deux matériaux différents qui possèderaient des indices de réfraction différents.

Nous aurions voulu pouvoir comparer des spectres Raman avec ceux décrits dans la littérature (Fig. 39) mais nous n'y sommes malheureusement pas parvenus.



Raman spectra of natural glasses and tektites a) Apache tear - obsidian, b) Indochinite, c) Moldavite, d) Tektite Cau-Ca, e) Australite, f) Rainbow obsidian, g) Indochinite

Fig. 39 : Comparaison de spectres Raman de verres naturels et tectites (Funda, 2015)

Les différentes tentatives infructueuses d'étude d'inclusions sur les échantillons IL09 (obsidienne acajou), IL10 (obsidienne argentée) et IL11 (obsidienne acajou) au MEB nous permettent de montrer à quel point il est difficile de faire le lien entre ce que l'on peut voir à l'œil nu ou à la binoculaire comparé à ce que l'on voit au microscope électronique. Lorsqu'on observe l'échantillon sous le MEB, il est toujours étonnant et frustrant, de ne voir aucune différence de chimie ou de texture sur des observations qui étaient pourtant si flagrantes à l'œil nu.

Le tableau de la Fig. 32 met en évidence trois catégories de chimie pour les échantillons comparés. En premier, les échantillons de type obsidienne, verres volcaniques : IL01 (obsidienne « larme d'apache »), IL02 (obsidienne « larme d'apache »), IL09 (obsidienne acajou), IL10 (obsidienne argentée), IL11 (obsidienne acajou) et IL13 (agni manitite). La deuxième catégorie est celle de la moldavite (IL03) avec principalement une teneur plus forte en silicium, plus faible en sodium, aluminium et potassium et avec la présence supplémentaire de calcium et de magnésium. La dernière catégorie est celle du verre libyque (IL04) constitué quasi exclusivement de silice, d'un peu d'aluminium et de quelques éléments en trace.

V. CONCLUSION

Comme dans de nombreux domaines, en apprenant à mieux connaître le sujet du verre naturel, on ne découvre qu'une infime partie de ses mystères. Nos expériences ont souvent abouti à des résultats négatifs ou une absence de résultats. Cela est évidemment décevant mais, même si cela ne permet pas de répondre immédiatement aux problématiques soulevées par le sujet, cela permet peut-être à d'autres de centrer leurs recherches sur d'autres analyses.

On retient le lien particulièrement difficile à faire entre ce qui est visible à l'œil nu et l'observation que l'on peut faire sous un MEB. Le visible à l'œil nu devient invisible lorsque l'on grandit l'image fortement. Aussi surprenant que cela puisse paraître, une hétérogénéité macroscopique prend l'aspect d'une homogénéité microscopique. D'autres expériences complémentaires seraient nécessaires pour expliquer ces effets visuels telles que la mise en évidence de phénomènes physiques comme la diffusion de la lumière.

Les analyses chimiques au MEB ont permis de montrer que les obsidiennes ont des chimies comparables quelle que soit la variété. D'ailleurs, la fameuse « agni manitite » semble plus proche d'une obsidienne que d'une tectite. Il serait intéressant de continuer les recherches sur cette matière en s'intéressant notamment à la présence d'eau qui pourrait faire définitivement la différence entre obsidienne et tectite, les obsidiennes en contenant environ 2% alors que les tectites n'en contiennent pas ou juste à l'état de trace infime.

Il serait aussi intéressant d'étudier plus en détail les curieuses inclusions pointues découvertes au microscope optique dans cet échantillon IL13 (agni manitite). Si ce sont des bulles de gaz, la littérature semble ne pas avoir fait de description de ce genre.

Pour conclure, même si les expériences n'ont pas toujours été aisées avec ces verres naturels, et il faut rappeler que les conditions sanitaires dues au Covid n'ont pas facilité la tâche, j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler ce sujet qui continuera encore longtemps d'éveiller ma curiosité mais cette fois pas seulement pour la destinée de la silice.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- Auteur inconnu (2021) Les verres libyques (site Internet)
Consulté le 14/03/2022 ; <https://actugeologique.fr/2021/07/les-verres-libyques/>
- Aboud T. (2009) Libyan desert glass: has the enigma of its origin been resolved? *Physics Procedia* 2, pp 1425-1432 ; doi:10.1016/j.phpro.2009.11.112
- Baker G (1959) Memoirs of the National Museum of Victoria, Tektites; 1^{er} juillet 1959; 309p: doi.org/10.24199/j.mmv.1959.23.01
- Barrat J.A., Jahn B.M., Amossé J., Rocchia R., Keller F., Poupeau G.R., Diemer E. (1997) Geochemistry and origin of Libyan desert glasses. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **Vol 61**, n° 9, pp 1953-1959; doi: 10.1016/S0016-7037(97)00063-X
- Beran A., Koeberl C. (1997) Water in tektites and impact glasses by Fourier-transformed infrared spectrometry. *Meteoritics & Planetary Science*, **Vol 21**, pp 211-216
- Bertrand H., Dequincey O. (2008) Obsidienne / bordure figée : une obsidienne n'est pas une lave refroidie rapidement. Consulté le 14/03/2022 : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/obsidienne.xml>
- Böhlitz M.C., Langenhorst F. (2009) Liquid immiscibility and gas content in dark schlieren of Libyan desert glass. *40th Lunar and Planetary Science Conference*
- Bouska V. (1993) Natural Glasses. Ellis Horwood ; 1st juillet 1993; 355 pages
- Bouska V. (1997) The moldavite strewn field. *Meteoritics & Planetary Science*, Vol. 32, n° 4, p19
- Broughton P.L. (1968) Peanut obsidian from Sonora, Mexico. *The Journal of Gemmology*, **Vol 11**, pp 7-9
- Brügge N. (2006) The non-impact of the Libyan desert glass (Web report)
Consulté le 14/03/2022 : <http://www.b14643.de/Sahara/LDG/index.htm>
- Carion A., Galois L., Boulliard J-C., de la Tullaye R. (2007) *Guide de l'exposition « Fulgurites et verres naturels - Pierres de foudre, de feu, de choc » du 01/08/2007 au 31/12/2007 au sein de la Collection de minéraux de Jussieu*, 34 pages
- Carion A. (2017) *Impacts – Météorites et pierres de choc*. 58p
- Chassé M. (2013) Thèse de Master : Contrasted speciation of iron in obsidians and tektites: a spectroscopic study. Consulté le 14/03/2022 : https://www.researchgate.net/publication/281097810_Contrasted_IronSpeciation_in_Obsidians_and_Tektites_A_Spectroscopic_Study
- Chevallier J-J (2021) Des cailloux d'origine terrestre tombés du ciel (Site Internet)
Consulté le 14/03/2022 ; <https://www.mineralogie.club/mineralogie-tektites>
- Cicconi M.R., Neuville D.R. (2019) Naturel Glasses. *Springer Handbook of Glass*, Chap 22, pp 515-557; doi: 10.1007/978-3-319-93728-1 – 022
- Cicconi M.R., McCloy J.S., Neuville D.R. (2022) Non-Magmatic Glasses. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, **Vol 87**, pp 965-1014
- Clayton P.A., Spencer L.J. (1934) Silica-glass from the Libyan Desert. doi:10.1180/MINMAG.1934.023.144.04
- Combes M-A. (2001) La Terre bombardée : impactisme et catastrophisme (3^{ème} version actualisée)
http://www.astrosurf.com/macombes/La_Terre_Bombardee_2007.pdf
- De Goutière A. (1995) Photogenic inclusions in moldavite. *The Journal of Gemmology*, **Vol 24**, n° 6, pp 415-419
- De Goutière A. (2011) A moldavite story. *Gems & Jewellery*, Vol 20, n° 4, pp 21-23
- Detay M. (2009) Le verre libyque, une impactite égyptienne ! *Minéraux & Fossiles*, n° 385, pp 16-25
- Devos S. (2018) Hypatia : la météorite qui rend fou. *Science & Vie*, n° 1207, p 96
- Diemer E. (2010) Le verre libyque : une impactite ? Point de nos connaissances en mars 1998 (site Internet).
Consulté le 14/03/2022 : <https://www.geopolis.fr/actualites/dernieres-actualites/71-le-verre-libyque-une-impactite-pointde-nos-connaissances-en-mars-1998.html>
- Dodge W.T. (2016) Fire obsidian. *Gems & Jewellery*, **Vol 25**, n° 1, pp 19-21
- Engelhardt W.V., Luft E., Arndt J., Schock H., Weiskirchner W. (1987) Origin of moldavites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **Vol. 51**. pp. 1425-1443

- Faulques E., Fritsch E., Ostroumov M. (2001) Spectroscopy of natural silica-rich glasses. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, Vol 96, pp 120-128, <https://doi.org/10.2465/jmps.96.120>
- Fetherston J.M., Stockmayer S.M., Stockmayer V.C. (2013) Tektites. *Gemstones of Western Australia, Mineral Resources*, Bulletin 25, Chapitre 39, pp 279-283
- Fritzke B., Götze J., Lange J-M. (2015) Cathodoluminescence of Moldavites. *The Bridging the Gap III: Impact Cratering in Nature, Experiments, and Modeling Conference*
- Fritzke B., Götze J., Lange J-M. (2017) Cathodoluminescence of Moldavites. *Meteoritics & Planetary Science*, **Vol 52**, n° 7, pp 1428–1436
- Frost R.L., Swaenen M., Stefaniak E.A., Worobiec A., Van Grieken R. (2010) Investigation of inclusions trapped inside Libyan desert glass by Raman microscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **Vol. 397**, n° 7, pp 2659-2665
- Fudall R.F. (1981) The major element chemistry of Libyan desert glass and the mineralogy of its precursor. *Meteoritics*, Vol 16, n° 3, pp 247-259, <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1981.tb00549.x>
- Funda F. (2015) Moldavites – Real or fake? Editeur Funda – About Moldavites.com, 1st édition, 171p
- Galoisy L., Calas G. (2021) The unique speciation of iron in calc-alkaline obsidians. *Chemical Geology*, **Vol. 559**, 119925; doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119925
- Gauthier J-P., Fereire J., Bui T.N. (2019) Origine de la chatoyance dans une obsidienne noire du Mexique. *Revue de l'Association Française de Gemmologie*, n° 208, pp 28-30
- Giuli G., Paris E., Pratesi G., Koeberl C., Cipriani C. (2003) Iron oxidation state in the Fe-rich layer and silica matrix of Libyan desert glass: a high-resolution XANES study. *Meteoritics & Planetary Science*, **Vol 38**, n° 8, pp 1181-1186
- Glass B.P. (1984) Tektites. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **Vol. 67**, pp 333-344
- Greshake A., Wirth R., Fritz J., Jakubowski T., Böttger U. (2018) Mullite in Libyan Desert Glass: Evidence for high-temperature/low-pressure formation. *Meteoritics & Planetary Science*, **Vol 53**, n° 3, pp 467-481; [doi: 10.1111/maps.13030](https://doi.org/10.1111/maps.13030)
- Gübelin E.J., Koivula J.I. (2005) Moldavite. *Photoatlas*, **Vol 2**, p 129
- Gübelin E.J., Koivula J.I. (2008a) Naturel glasses and their inclusions. *Photoatlas* (5th édition), **Vol 1**, pp 285-286
- Gübelin E.J. et Koivula J.I. (2008b) Inclusions in glass. *Photoatlas*, **Vol 3**, pp 569-585
- Hyrsl J., Zacek V. (1998) Obsidian from Chile with unusual inclusions. *The Journal of Gemmology*, **Vol 26**, n° 5, pp 321-323
- Hyrsl J. (2015) Moldavites : natural or fake. *Gems & Gemology*, Spring, **Vol 51**, n° 1, pp 103-104
- Johnson M.L., Koivula J.I. (1998) Libyan desert glass. *Gems & Gemology*, **Vol 34**, n° 1, p 58
- Kleinmann B. (1969) The breakdown of zircon observed in the Libyan desert glass as evidence of its impact origin. *Earth and Planetary Science Letters*, n° 5, pp 497-501; [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(68\)80085-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(68)80085-8)
- Kleinmann B., Horn P., Langenhorst F. (2001) Evidence for shock metamorphism in sandstones from the Libyan desert glass strewn field. *Meteoritics & Planetary Science*, n° 36, pp 1277-1282; <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2001.tb01960.x>
- Koeberl C. (1997) Libyan desert glass: geochemical composition and origin. *Proceedings of the "Silica 96" Meeting, 1997*
- Koeberl C., Claeys P., Hecht L., McDonald I. (2012) Geochemistry of Impactites. *Elements*, **Vol 8**, pp 37-42; [doi: 10.2113/gselements.8.1.37](https://doi.org/10.2113/gselements.8.1.37)
- Koeberl C., Ferrière L. (2019) Libyan desert glass area in western Egypt: Shocked quartz in bedrock points to a possible deeply eroded impact structure in the region. *Meteoritics & Planetary Science*, pp 1-11; [doi: 10.1111/maps.13250](https://doi.org/10.1111/maps.13250)
- Koivula J.I., Kammerling C., Fritsch E. (1992) Moldavite plentiful. *Gems & Gemology*, **Vol 28**, n° 1, pp 60-61
- Koivula J.I., Tannous M. (2003) « Star » obsidian. *Gems & Gemology*, **Vol 39** n° 3, pp 233-234

- Koivula J.I., Calderon M. (2005) Obsidian with spessartine inclusions. *Gems & Gemology*, Summer, **Vol 41**, n° 2, pp 179-180
- König C. (2006) Technologies de la silice pure; Consulté le 22/01/2023 : <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geologie-coeur-silice-silex-wafer-567/page/8/>
- Konta J., Saul J.M. (1976) Moldavites and a survey of other naturally occurring glasses. *The Journal of Gemmology*, **Vol 15**, n° 4, pp 179-204
- Koomans C.M. (1938) On Tektites and pseudo-tektites from Dutch East Indies and Philippines: Consulté le 22/03/2022: <https://www.semanticscholar.org/paper/On-Tektites-and-Pseudo-tektites-from-Dutch-East-and-Koomans/3274e2713544907ff4a0caf3656323e58c0fbf52#related-papers>
- Kourimsky J., Tvz F. (1979) Tectites. *Encyclopédie des minéraux*, Editions Gründ, pp 342-344
- Kramers J.D., Andreoli M.A.G., Atanasova M., Belyanin G.A., Block D., Franklyn C., Harris C., Lekgoathi M., Montross C.S., Ntsoane T., Pischedda V., Segonyane P., Viljoen K.S., Westraadt J.E. (2013) Unique chemistry of a diamond-bearing pebble from the Libyan Desert Glass strewnfield, SW Egypt: Evidence for a shocked comet fragment. *Earth and Planetary Science Letters*, **Vol 382**, pp 21-31; <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.09.003>
- Lacroix A.(1915a) Sur les fulgurites exclusivement siliceuses du Sahara oriental et sur quelques fulgurites silicatées des Pyrénées. *Bulletin de la Société française de Minéralogie*, **Vol 38**, n° 5, pp 188-198
- Lacroix A.(1915b) La silice fondue considérée comme minéral (lechatéliérite). *Bulletin de la Société française de Minéralogie*, **Vol 38**, n° 4, pp 182-186; doi:<https://doi.org/10.3406/bulmi.1915.3621>
- Lerouyer I., Fritsch E. (2022a) Entre inclusions et illusions. *Revue de l'Association Française de Gemmologie*, n° 217, pp 16-17
- Lerouyer I., Fritsch E. (2022b) Conférence "Entre inclusions et illusions". *XIX^{èmes} Rendez-Vous Gemmologiques de Paris : La Gemmologie Francophone*
- Livage J., Coradin T. (2008) Le verre biologique inspire les chimistes. *Pour la Science*, n° 371, pp 30-37
- Ma C., Gresh J., Rossman G.R., Ulmer G.C., Vicenzi E.P. (2001) Micro-analytical study of the optical properties of rainbow and sheen obsidians. *The Canadian Mineralogist*, **Vol 39**, pp 57-71
- McCall G.J.H. (2005a) Obsidian. *Encyclopedia of Geology*, pp 267-277
- McCall G.J.H. (2005b) Tektites. *Encyclopedia of Geology*, pp 443-455
- McHone J.F., Killgore M., Kudryavtsev A. (2000) Cristobalite inclusions in Libyan desert glass; Confirmation using Raman Spectroscopy. *31st Lunar and Planetary Science Conference*
- Mizera J. (2017) Neutron and photon activation analyses in geochemical characterization of Libyan desert glass. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, n° 311, pp 1465-1471; doi 10.1007/s10967-016-5094-9
- Milleville A., Bellot-Gourlet L., Champagnon B., Santallier D. (2003) La micro-spectroscopie Raman pour l'étude des obsidiennes : structure, micro-inclusions et études de provenance ? *Revue d'Archéométrie*, n°27, pp 123-130 ; doi: 10.3406/arsci.2003.1048
- Musikant S. (2003) Glass. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 3^{ème} Edition, pp 781-806
- O'Keefe J.A. (1976) Tektites and their origin. Consulté le 14/03/2022; <http://www.originoftektites.com/>
- Pearson G. (2015) Moldavite, a gemmological relevant natural glass. *The Australian Gemmologist*, **Vol 25**, n° 11 & 12, pp 403-409
- Pierce S.E. (2002) A new method to determine the difference between tektites and other natural (volcanic) glasses. *Meteorite Times Magazine*. Consulté le 09/04/2022 : http://www.meteorite-times.com/Back_Links/2002/June/from_the_lab.htm
- Pratesi G., Viti C., Cipriani C., Mellini M. (2002) Silicate-Silicate liquid immiscibility and graphite ribbons in Libyan desert glass. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol 66, n° 5, pp 903-911; [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00820-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00820-1)
- Richet P. (2009) Les verres naturels. *Une petite Encyclopédie du Verre*, **Vol 15**, n°6 Consulté le 14/03/2022 http://www.verreonline.fr/encyclopedie/doc/Une_petite_encyclopedie%20du_verre_Richet.pdf

- Rost R. (1964) Surfaces of and inclusions in moldavites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **Vol 28**, pp. 931-936
- Sangsawong S., Pardieu V. (2016) Two glass samples: Natural or man-made ? *Gems & Gemology*, **Vol 52**, n° 4, p 431
- Saul J.M. (2018) Flickering flames over the Libyan desert. *International Geology Review*; doi.org/10.1080/00206814.2018.1512057
- Stöffler D., Grieve R.A.F. (2007) Impactites ; Consulté le 14/03/2022 : www.bgs.ac.uk/scmr/home.html
- Tardy Level D. (1980) Obsidienne. *Les pierres précieuses*, pp 327-329
- Thomas P. (2014) Les tectites, des larmes de la Terre ; Consulté le 08/04/2022 : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/Img449-2014-02-03.xml>
- Trnka M., Houzar S. (2002) Moldavites: a review. *Bulletin of the Czech Geological Survey*, **Vol 77**, n° 4, pp 283–302
- Tuffen H., Flude S., Berlo K., Wadsworth F. (2020) Obsidian. *Encyclopedia of Geology*, 2nd edition doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12527-8
- Verish R. (2016) Is it a Tektite or a Pseudo-tektite? Consulté le 09/04/2022 <https://www.meteorite-times.com/tektite-or-pseudo-tektite/>
- Vertriest W., Weeramoonkhonlert V., Lawanwong K. (2017) Tektite with a large fluid inclusion. *Gems & Gemology*, **Vol 53**, n° 2, p 254
- Wasson J.T. (2017) A thermal-plume origin of layered and splash-form tektites and Libyan desert glass. *Lunar and Planetary Science XLVIII*
- Whymark A. (2021) The obsidian scam. Consulté le 09/04/2022 : <https://www.tektites.info/the-obsidian-scam>
- Whymark A. (2022) Introduction to tektites Consulté le 09/04/2022 : www.tektites.co.uk
- Zavetova M., Pacesova S., Simeckova M., Chmidt E., Navratil K. (1989) Optical Properties of natural glasses – Moldavites. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **Vol 108**, pp 294-300
- Zook T.F. (1973) Obsidian and some observations. *The Journal of Gemmology*, **Vol 13**, n° 6, pp 220-225
- Zook T.F. (1974) A Moldavite-Some typical inclusions and theories. *The Journal of Gemmology*, **Vol 14**, n° 2, pp 60-68

VII. ANNEXES

VII.1. Spectre de matériaux riches en silice

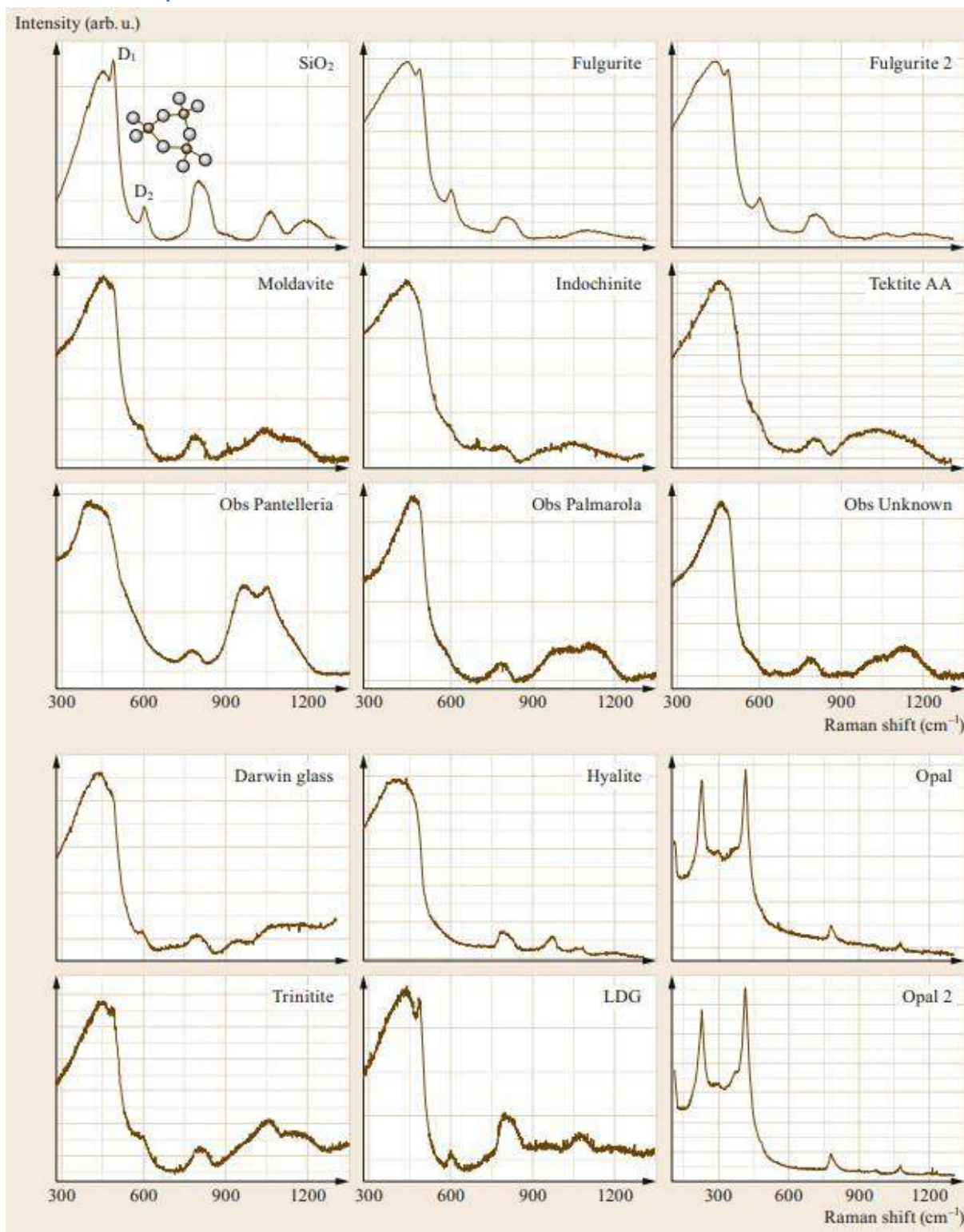


Fig. 40 : Spectres Raman de silice pure amorphe, de verres naturels et d'opales : la forme du spectre change en fonction de la polymérisation de la matière et de la présence/teneur en éléments chimiques tels que le fer (Fe) (Cicconi et al., 2019)

VII.2. Analyses des compositions chimiques

Oxide	Australites [46]	Ivory Coast [47]	Czechoslovakian [48]	North American [13]	Obsidian ^{a)}
	(32) ^{c)}	(7) ^{c)}	(33) ^{c)}	(21) ^{c)}	(10) ^{c)}
SiO ₂	73.06	68.02	79.11	76.37	74.02
TiO ₂	0.68	0.57	0.35	0.76	0.18
Al ₂ O ₃	12.23	16.30	10.11	13.78	11.38
Fe ₂ O ₃	0.60	0.57	0.19	0.19	1.36
FeO	4.14	5.99	1.34	3.81	2.23
MgO	2.04	3.32	1.91	0.63	0.14
CaO	3.38	1.12	2.64	0.65	0.48
Na ₂ O	1.27	2.06	0.52	1.54	5.21
K ₂ O	2.20	1.89	2.15	2.08	4.28
H ₂ O ^{b)}	(< 0.02)	(< 0.02)	(< 0.02)	(< 0.02)	(0.26)

^{a)} Average of ten analyses taken from the literature.

^{b)} According to Rost [48] tektites contain < 0.02% water and obsidians contain up to 2% water with an average of 0.21–0.31%.

^{c)} The numbers in parentheses indicate the number of analyses.

Fig. 41 : Composition chimique moyenne des tectites et des obsidiennes (Glass, 1984)

	Southern Bohemia	Radomilice area	Moravia	Cheb area	Lusatian area	Austrian area
SiO ₂	79.29	82.90	79.27	78.97	79.30	79.73
TiO ₂	0.32	0.28	0.41	0.33	0.34	0.30
Al ₂ O ₃	10.025	8.13	10.935	9.17	10.50	9.81
FeO (total)	1.72	1.27	2.22	1.54	1.84	1.54
MnO	0.09	0.07	0.10	0.22	0.06	0.06
MgO	2.15	1.90	1.35	2.34	1.75	1.72
CaO	2.85	2.29	1.54	3.6	2.00	2.41
Na ₂ O	0.44	0.27	0.56	0.41	0.47	0.39
K ₂ O	3.39	2.47	3.39	3.24	3.46	3.49

Fig. 42 : Valeurs moyennes en pourcentage/masse relevées sur 265 moldavites analysées (Funda, 2015)

	Southern Bohemia	Radomilice area	Moravia
Rb	119,6	102,6	141,2
Cs	13,1	12,5	13,9
Sr	129,7	133,6	118,6
Ba	733	602	789
Sc	4,91	4,32	6,23
Cr	24,3	20,7	29,6
Co	4,7	4,5	5,6
Ni	31,3	18,7	23,1
Sb	0,15	0,16	0,24
Zr	339	333	363
Hf	5,7	6	7
Ta	0,64	0,64	0,79
Au	0,0059	0,0065	0,0092
La	26,2	25,8	31,6
Ce	56,2	55,9	68,3
Nd	25,7	25,3	30,6
Sm	4,39	4,28	5,35
Eu	0,91	0,85	1,05
Gd	5,2	4,7	5,6
Tb	0,52	0,5	0,6
Ho	0,84	0,78	1,02
Tm	0,28	0,27	0,34
Yb	1,59	1,49	1,85
Lu	0,26	0,24	0,32
Th	10,11	9,78	11,98
U	2,67	3,39	2,65
Terrae rarae (total)	122,09	120,11	141,03

Fig. 43 : Éléments chimiques en ppm relevés dans 117 moldavites analysées

VII.3. Préparation de tranches et de lames minces au laboratoire Mineralab

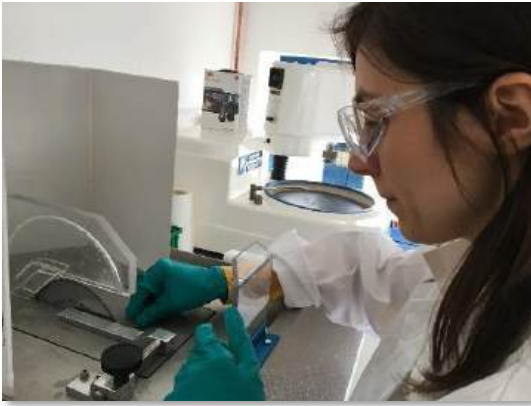


Fig. 44 : On commence par scier l'échantillon brut à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté de marque Brotlab.



Fig. 45 : On découpe l'échantillon d'une dimension maximale de 40 mm de diamètre pour que ça rentre dans le moule.



Fig. 46 : On fabrique la résine Epoxy en mélangeant la résine et le durcisseur.



Fig. 47 : On vient couler la résine dans le moule d'un diamètre de 40 mm pour une hauteur de 35 mm dans lequel on a posé l'échantillon.



Fig. 48 : On place les moules dans un appareil d'imprégnation sous vide pour faire le vide, c'est-à-dire pour extraire toute trace d'air.



Fig. 49 : On place les échantillons dans l'étuve régulée à 60°C pour permettre le durcissement de la résine pendant environ 4 heures.



Fig. 50 : On procède au polissage de la section basale de l'échantillon à l'aide d'un tour lapidaire en utilisant différents disques diamantés (76, 54, 18 et 9 microns)



Fig. 51 : Dépolissage des lames porte-objet à l'aide d'une poudre de carbure de silicium de grains F800 (6.5 micromètres)



Fig. 52 : Une fois collé sur la lame porte-objet, on choisit l'épaisseur que l'on souhaite obtenir pour la lame mince (environ 30 microns) et on scie l'échantillon à cette épaisseur.



Fig. 53 : On vient coller une lamelle couvre-objet qui va protéger l'échantillon. Le collage se réalise grâce à une colle UV605.



Fig. 54 : Pour terminer, la lame mince est passée dans une cabine pour collage UV. Elle est prête à être observée au microscope optique.