

2025

DIPLÔME UNIVERSITAIRE DE GEMMOLOGIE

Nantes Université
U.F.R Sciences et Techniques

LES SCAPOLITES PHOTOCHROMES

ETUDE GEMMOLOGIQUE D'UN LOT DE SCAPOLITES PHOTOCHROMES D'AFGHANISTAN ET DE LEUR
PLEOCHROISME

par
LE GRIGNOU GUILLAUME

Défendu publiquement le
4 Novembre 2025
Au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

Devant le jury composé de :

PRESIDENT	CHAUVIRÉ B.	<i>Maître de conférences associé, Nantes Université</i>
VICE-PRESIDENT	KARAMPELAS S.	<i>Maître de conférences à l'Université de Thessalonique et consultant scientifique au LFG</i>
EXAMINATEURS	DELAUNAY A.	<i>Directeur du Laboratoire Français de Gemmologie</i>
	GAILLOU E.	<i>Directrice et conservatrice Musée de Minéralogie des Mines de Paris</i>
	LATOUCHE C.	<i>Professeur des universités, Nantes Université</i>
	NOTARI F.	<i>Fondateur du GGTL Laboratories Switzerland et Chef de la Recherche Scientifique à l'AIGS (Bangkok)</i>
INVITES	FRITSCH E.	<i>Professeur émérite, Nantes Université</i>
	LASNIER B.	<i>Fondateur du DUG</i>

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Emmanuel Fritsch pour le prêt des échantillons de scapolites photochromes, ainsi que pour sa disponibilité et son aide précieuse lors des différentes relectures de ce rapport.

Sa connaissance du sujet, alliée à son talent pour recentrer ma réflexion lorsque je me dispersais parmi trop d'informations, m'a été d'un soutien inestimable.

Sans oublier son humour délicat et toujours de bon goût, que j'ai eu grand plaisir à partager, car j'ai le même que lui et qu'entre hommes de qualité on sait reconnaître les siens.

Assister à ses cours chaque semaine de DUG a été un véritable plaisir.

Je remercie également Féodor Blumentritt pour sa relecture attentive et ses conseils avisés, qui m'ont permis de mener ce travail à bien. Sa thèse a été le point de référence de toute cette étude.

A Anne Quédillac, ma professeure de l'ING Paris il y a déjà quelques années et qui au fil du temps a toujours gardé son regard bienveillant et acéré sur ce que je faisais en gemmologie, toujours à l'écoute quand j'ai eu des coups de moins bien ou juste pour papoter... Elle est devenue au fil de cette petite décennie un peu plus qu'une simple professeure pour moi.

Un immense merci à mes camarades de promotion, pour leur soutien sans faille, leur patience face à mon humour parfois un peu lourd, ainsi que pour les nombreux moments de rire... et de stress aussi !

Merci à Marion et Emy la joyeuse équipe de la joaillerie, mes partenaires dans le crime qui m'ont écouté, soutenu et encouragé pour que je mène à bien cette belle aventure.

A mes parents, toujours à mes côtés, même lorsque mes décisions semblent les plus improbables, comme celle de retourner sur les bancs de la faculté après 45 ans, alors que je l'évitais soigneusement à l'âge de 20 ans !

Enfin, le dernier et non des moindres...

Mon mari Nicolas. La force tranquille, celui qui m'a poussé à me lancer et sans qui je n'aurais peut-être jamais osé franchir le pas. Celui qui a balayé mes derniers doutes et m'a permis de croire en ma capacité à relever et mener à bien ce défi.

En un mot Merci à tous ceux qui m'ont soutenu et encouragés dans cette aventure.

Je dédie ce travail à mon papé ingénieur des mines aux charbonnages de France, chez qui trônaient toujours des minéraux ramenés du fond qui sans doute inconsciemment ont beaucoup joué dans mon imaginaire...

TABLE DES MATIÈRES

I. Introduction	3
II. Contexte du sujet et état des connaissances.....	4
II.1. Généralités sur la scapolite.....	4
II.1.1. Généralités gemmologiques des scapolites.....	6
II.1.2. Structure cristallographique de la scapolite.....	6
II.1.3. Définition d'une série continue ou solution solide.....	8
II.1.4. Les groupe des scapolites.....	9
II.2. Photochromisme et luminescence de la scapolite.....	10
II.2.1. Le photochromisme.....	10
II.2.1.1. Définition du photochromisme.....	10
II.2.1.2. Les scapolites photochromes.....	12
II.2. 2. La luminescence.....	13
II.3. Récapitulatif des notions connues.....	13
III. MATÉRIAUX ET MÉTHODES.....	14
III.1. Description des échantillons.....	14
III.2. Méthodes.....	16
III.2.1. Matériel de gemmologie classique.....	16
III.2.2. Prises de vues optiques.....	16
III.3. Spectroscopies d'absorption UV-Visible, vibrationnelles et d'émission.....	17
III.3.1. Absorption UV-Visible.....	17
III.3.2. Spectroscopie Infrarouge.....	18
III.3.3. Spectroscopie Raman.....	18
III.3.4. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	18
IV. RÉSULTATS.....	19
IV.1. Observations optiques.....	19
IV.2. Résultats des mesures Gemmologiques.....	21
IV.3. Spectroscopies vibrationnelles.....	23
IV.3.1. Raman et FT-Raman.....	23
IV.2.1. FT-IR.....	28
IV.4. Microanalyse : MEB.....	30
IV.5. Spectroscopie d'absorption UV-VIS.....	32
IV.5.1. Spectrographie UV-Visible en lumière non polarisée.....	32
IV.5.2. Spectrographie UV-Visible en lumière polarisée.....	35
IV.6. Spectrofluorimétrie.....	40
V. DISCUSSION.....	42
VI. CONCLUSION.....	42
VII. REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES.....	43

I.INTRODUCTION

Ce sujet m'a été confié par le Professeur Emmanuel Fritsch afin de réaliser l'étude gémologique plus approfondie d'une partie des échantillons utilisés pour la soutenance de la thèse de Féodor Blumentritt, pour cela je n'ai ciblé que les scapolites photochromes des différents échantillons utilisés.

Un peu à part dans les nombreux projets proposés, ce n'est pas la monographie d'une gemme ou d'un groupe de gemmes mais la mise en lumière et la tentative d'une explication d'une propriété précise de cette gemme et c'est ce qui m'a plu dans le choix de ce sujet.

C'est également le « talent » caché de cette pierre qui m'a attiré, car de prime abord, la scapolite n'est pas une gemme très prisée des gémologues, collectionneurs ou joailliers sauf si elle possède une couleur caractéristique (pourpre, jaune), ce qui n'est pas le cas pour les échantillons étudiés mais nous y reviendrons plus tard.

Elle se révèle être captivante dès qu'elle est exposée aux rayonnements ultraviolets mais la fugacité de sa coloration en fait un challenge à étudier.

La question qui s'est posée est la même que toute pierre colorée anisotrope, y a-t-il un pléochroïsme ?

Dans notre cas le pléochroïsme ne peut se voir que lorsque celle-ci est dite en mode « Excité » c'est-à-dire après une exposition d'une à 3 minutes aux ultraviolets dits courts, (254nm ; UVC).

Et finalement, quels sont les moyens de l'observer?

Pour cela il a fallu travailler dans l'obscurité le plus longtemps possible ce qui nous a permis de ralentir le retour en mode incolore de la pierre afin de pouvoir étudier ce pléochroïsme. C'est ce que nous allons voir dans cette étude.

II.CONTEXTE DU SUJET / ETAT DES CONNAISSANCES

II.1 – Généralités sur la scapolite

La scapolite est un groupe d'aluminosilicate du sous-groupe des tectosilicates présent sur les cinq continents. Elle est disponible en variété massive translucide ainsi qu'en qualité gemme transparente, dans diverses couleurs : incolore, jaune, pourpre... (figure 1)



Figure 1 : Différents échantillons de scapolite naturelle présentant des couleurs typiques de ce groupe minéral. L'échantillon brun présente également un phénomène de chatoyance. De nombreux détails, photos, carte de localisation de gisements sont accessibles sur le site [Mindat.com](https://www.mindat.com)

La scapolite n'est pas une espèce minérale en soi mais un groupe qui contient seulement trois espèces : la marialite, la meionite et la sylvialite, formant à elles trois une solution solide (figure 2).

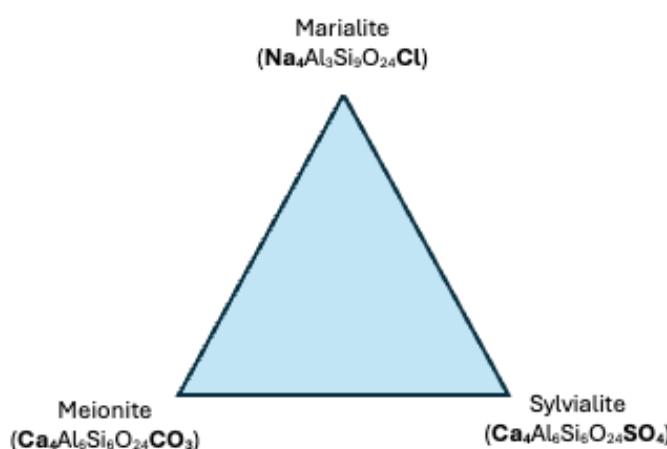


Figure 2 : Solution solide du groupe des scapolites (Blumentritt, 2021)

De système cristallin quadratique (ou tetragonal en anglais), ses cristaux prismatiques de section carrée sont, le plus souvent columnaire, mais aussi trapus, presque aussi larges que hauts, à la terminaison souvent pyramidale aplatie (figure 3). Elle existe également en agrégat massif ou granulaire.



Figure 3: Scapolite, Kokcha Valley, Badakhshan, Afghanistan. Copyright © Rob Lavinsky & irocks.com

Les plus importantes régions de production de scapolites gemmes sont l’Afghanistan (Badakhshan), la Chine (la région autonome de Xinjian Uygur), Myanmar (Mogok), Pakistan, Sri Lanka, Tadjikistan, Kenya, Madagascar, Mozambique, Tanzanie et Brésil (Superchi et al., 2010). Son nom qui vient du grec « skapos » pour tige, en référence à la forme de ses cristaux allongés et lui a été donné en 1800 par José Bonifácio de Andrada e Silva (MINDAT).

La scapolite se forme dans les roches métamorphiques régionales, plus spécialement dans les marbres, les gneiss, les granulites et les schistes.

Nous la retrouvons également dans les roches ignées altérées, dans certaines pegmatites et dans quelques veines hydrothermales (Pradat, 2012).

II.1.1 - Propriétés gemmologiques des scapolites (Schumann 17^e édition)

Couleur	Jaune, rose, violet, incolore	Transparence	Transparent, translucide
Dureté sur l'echelle de Mohs	5,5-6	Indice de réfraction	1,54 -1,579
Masse spécifique	2,57-2,74	Biréfringence	0,006 à 0,037
Clivage	Facile	Dispersion	0,017
Cassure	Conchoïdale, esquilleuse	Caractère optique	Uniaxe
Système Cristallin	Quadratique	Signe optique	Négatif

Tableau1 : Propriétés gemmologiques des scapolites.

II.1.2- Structure cristallographique de la scapolite

La figure 4 ci-après nous montre la structure atomique, formée par des chaines de tétraèdres de AlO_4 et SiO_4 reliés par leurs sommets, la charpente aluminosilicatée voit ses charges neutralisées par différents ions. Sa structure a été résolue par Pauling (Pauling, 1930).

La structure contient des anneaux de quatre tétraèdres connectés entre eux par les sommets. Ces anneaux sont empilés selon l'axe c et interconnectés par quatre piliers de deux tétraèdres pour former des rubans infinis.

Pour finir, ces rubans se condensent pour former la structure tridimensionnelle où apparaissent des espaces vides appelés « cages ».

C'est le remplissage de ces cages qui définit le placement de l'espèce étudiée dans la solution solide des scapolites, voir figure 4 ci-après (Blumentritt, 2021).

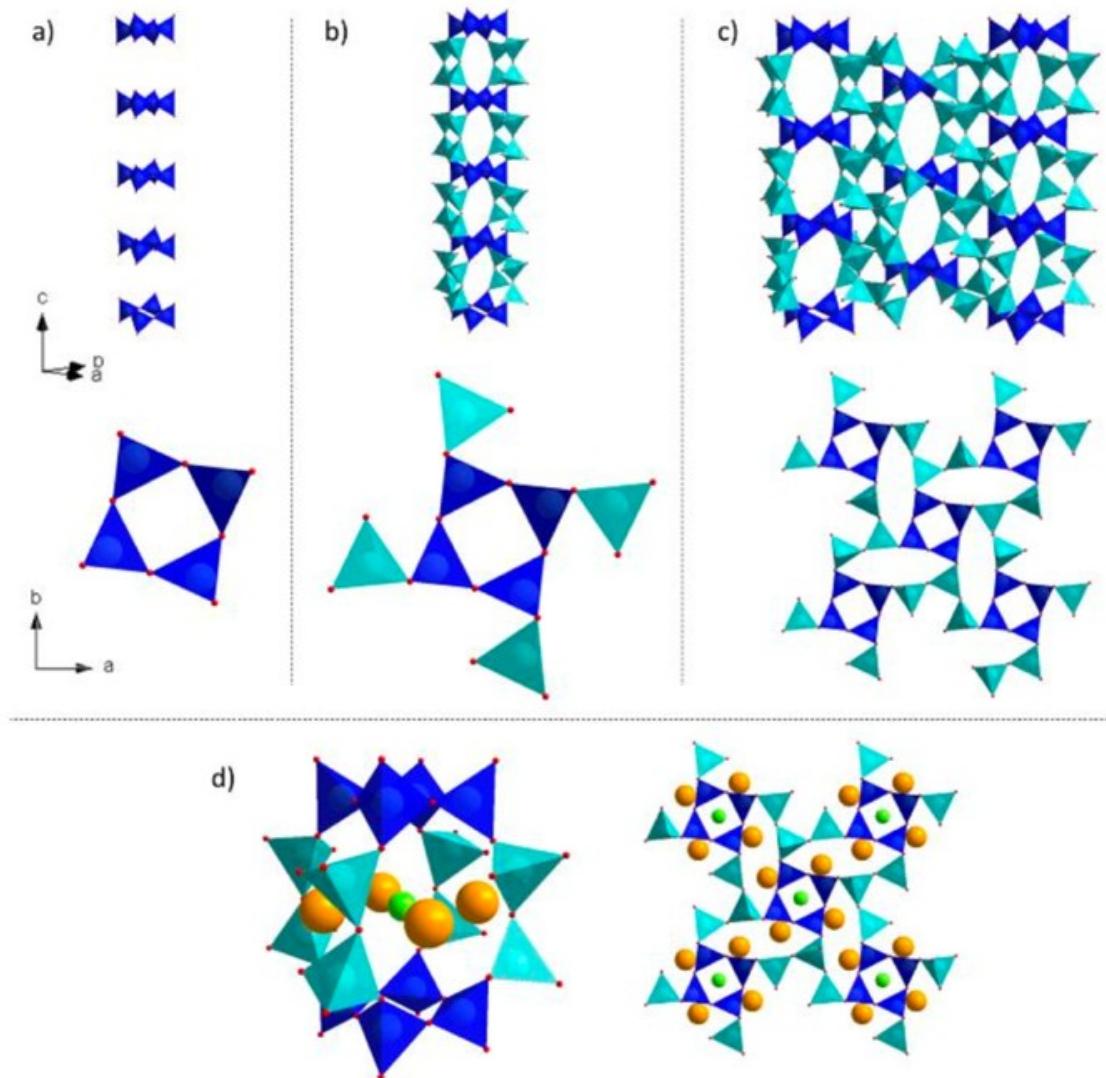


Figure 4 : Construction de la structure scapolite avec en a) l'empilement d'anneaux de tétraèdres selon l'axe c , b) les rubans de $1/\infty[\text{Al}, \text{Si}]_{12}\text{O}_{24}$, c) la condensation des rubans pour former la structure 3D et d) l'exemple de la marialite avec le remplissage des cages par les couples d'ions Na^+ et Cl^- . (Al et Si : bleu clair et foncé, O : rouge, Na : orange, Cl : vert).

II.1.3 Définition d'une série continue ou solution solide

Une solution solide correspond à la transition progressive entre deux ou plusieurs phases minérales par substitution d'éléments chimiques (Wikipédia). En gemmologie, ces mélanges entre pôles dits « purs » forment des séries continues (Bour, 2019). Ce phénomène repose sur le remplacement isomorphique, c'est-à-dire la substitution d'un ion par un autre de même valence et de rayon ionique proche, sans modifier la structure cristalline. Selon la loi de Goldschmidt, cette substitution est possible si la différence de rayon ionique ne dépasse pas 15 % (Abreal, 2018).

Les substitutions chimiques expliquent les variations physiques et optiques observées entre les différentes variétés au sein d'une même famille gemmologique. Les membres intermédiaires correspondent aux minéraux issus de la combinaison de plusieurs pôles purs. De nombreuses gemmes comme les grenats, les feldspaths, les pyroxènes, les olivines ou encore les spinelles se forment ainsi par le biais de solutions solides. Enfin, la miscibilité des pôles complique souvent la distinction nette entre pôles purs et membres intermédiaires (Stockton & Manson, 1985 ; Hanneman, 1997 ; Deer et al., 1992).

II.1.4- Le groupe des scapolites

En minéralogie, ce nom générique désigne un groupe de trois espèces, chacune est une espèce minérale, les formules des trois pôles purs sont

- Celle du pôle chlorosodique la marialite (Ma) : $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\text{Cl}$
- Celle du pôle carbonatocalcique la méionite (Me) : $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{CO}_3$
- Celle du pôle sulfaté la sylvialite $(\text{Ca},\text{Na})_4(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4,\text{CO}_3)$.

Cette dernière n'ayant à notre connaissance jamais été rencontrée ni décrite en gemmologie, nous nous intéresserons ici uniquement aux deux variétés de la série isomorphe Ma-Me (Pradat, 2012).

Ces pôles purs sont très rares dans la nature et la plupart des scapolites ont une composition intermédiaire qui varie entre Ma80-Me20 et Ma20-Me80 (Deer et al., 1992). D'après Dunn *et al.* (1978), une scapolite de la série Ma-Me est de variété marialite dès le moment où $\text{Na} > \text{Ca}$ (en % atomique) et l'inverse pour la méionite, avec $\text{Ca} > \text{Na}$, ce qui se traduit par Me0-Me50 = marialite et Me50-Me100 = méionite. Le pourcentage de méionite [=100Ca/(Na+Ca)] est souvent utilisé comme index chimique pour indiquer la composition des scapolites (Shaw, 1960).

II.2 – Photochromisme et luminescence de la scapolite

La littérature décrit que certaines scapolites sont photochromes et d'autres pas. Nous savons également que ces minéraux ont une luminescence sous la lumière ultraviolette et plusieurs couleurs de luminescence sont décrites : pourpre, bleue, jaune et orange (Blumentritt, 2021).

Nous allons voir quels sont les mécanismes de ces deux propriétés et si elles sont liées entre-elles.

II.2.1. Le photochromisme

II.2.1.1. Définition du photochromisme

Le photochromisme est une transformation réversible entre deux états A et B d'une espèce chimique ayant des spectres d'absorption différents, le passage entre les deux états devant être photoinduit donc résultant dans au moins un des sens de l'absorption d'un rayonnement électromagnétique (UV, visible ou IR). De manière générale, pour qu'une réaction photoinduite ait lieu, il est nécessaire d'utiliser une longueur d'onde appartenant au domaine d'absorption du composé comme illustré dans la figure 5.

Il apparaît aussi qu'une transformation spontanée par réaction thermique peut aussi avoir lieu dans un des sens en absence de lumière. Ainsi, le passage de la forme A à la forme B (réaction aller) s'effectue par irradiation à une longueur d'onde λ_A dans la bande d'absorption du photochrome à l'état A (habituellement dans l'UV).

Celui de B vers A (réaction retour) par irradiation à une longueur d'onde λ_B (habituellement dans le visible), distincte de λ_A dans la bande d'absorption du photochrome à B, et / ou par réaction thermique (Δ).

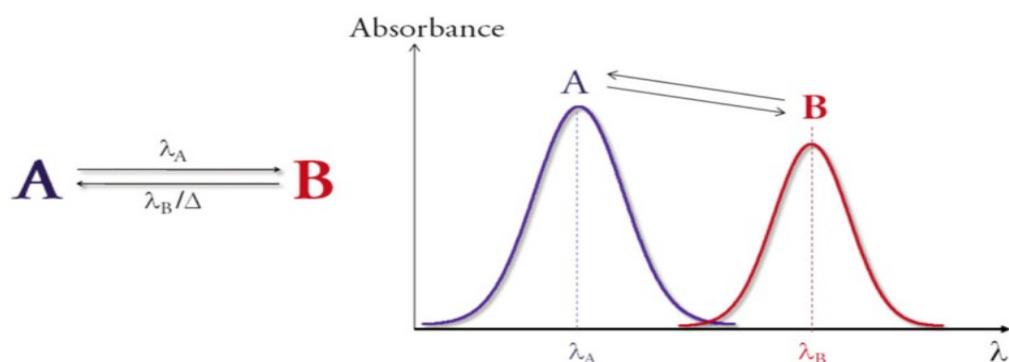


Figure 5 : Principe du photochromisme : réaction et spectres d'absorptions (Piard 2013).

Deux grands types de photochromisme peuvent alors être distingués :

- Si la réaction retour a lieu uniquement par voie photochimique, le photochromisme est dit de type P. Le composé photochrome est qualifié de bistable.
- Si la réaction retour peut aussi avoir lieu par voie thermique, on parle alors de photochromisme de type T.

Bien que le photochromisme soit un processus réversible, des réactions secondaires peuvent toutefois avoir lieu. La perte des propriétés photochromes avec le temps ou sous irradiation prolongée peut engendrer des dégradations de la molécule. La perte de performance est alors qualifiée de « fatigue ». Plus un composé se dégrade difficilement lors des cycles d'irradiation, plus on dit qu'il est résistant à la « fatigue » (Piard, 2013).

Attention, cette dernière affirmation concernant la « fatigue » est appliquée aux composés organiques. Aucune fatigue n'a jusqu'ici été documentée dans la scapolite.

Nous définissons le photochromisme comme le changement de couleur réversible observé dans les gemmes après exposition à la lumière visible ou au rayonnement UV de toute nature (ondes longues ou courtes, en utilisant des lampes UV gemmologiques standard comme exemple, mais aussi la composante UV de la lumière du jour) (Blumentritt et al. 2021), un exemple de différentes gemmes photochromes dans la figure 6 ci-dessous.



Figure 6 : Certaines gemmes photochromiques remarquables sont montrées dans cette image composite avant (gauche) et après (droite) l'exposition aux rayons UV. Dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du haut : sodalite (hackmanite ; 0,48 ct), tugtupite (1,10 g), zircon presque incolore (0,43 ct), zircon rouge (21,3 ct) et scapolite marialite (0,91 ct). Photos de Thomas Hainschwang et Féodor Blumentritt. (Blumentritt et al, 2021).

II.2.1.2– Les scapolites photochromes

Lors du Tucson Gem Show en 2004, le marchand Herb Obodda a présenté des échantillons de scapolite photochrome provenant d'Afghanistan (figure 7), initialement confondus avec de la hackmanite en raison de leur capacité à changer de couleur sous l'effet de la lumière (McClure, 2005).

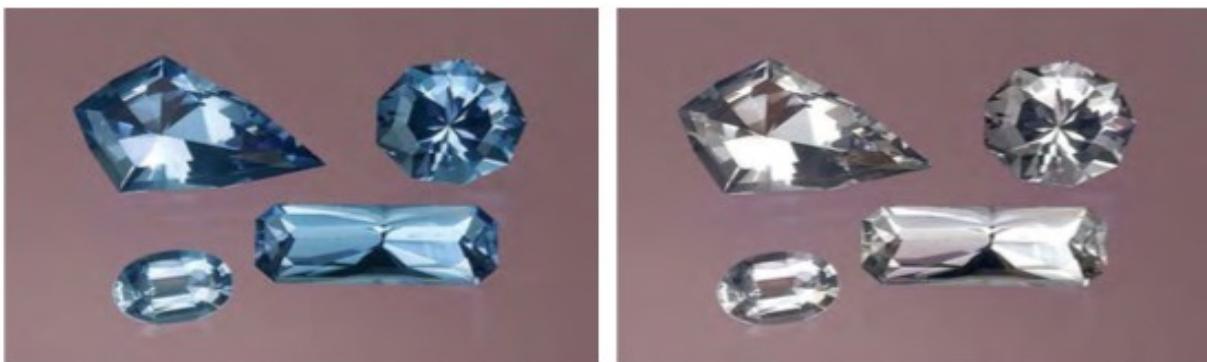


Figure 7 : Scapolites (0,91–5,17 ct) d'Afghanistan. Les pierres sont devenues bleues lorsqu'elles ont été exposées à un rayonnement UV à ondes courtes pendant environ une minute et sont devenues incolores en quelques secondes lorsqu'elles ont été mises en lumière. Avec l'aimable autorisation de H. Obodda ; photos de C. D. Mengason (McClure, 2005).

Cet achat remonte à 2003, lorsqu'un lot de pierres brutes mal identifiées avait été acquis. Les vendeurs locaux avaient pris ces pierres pour de la hackmanite incolore, une variété de sodalite riche en soufre également connue pour son photochromisme. Ce qui a intrigué l'acheteur, c'est la différence de coloration sous UV : la hackmanite passe généralement de l'incolore au pourpre, tandis que ces pierres devenaient bleues sous excitation (Blumentritt et al., 2021).

Sous l'effet des UV courts (254 nm), les échantillons passaient de l'incolore à un bleu profond en environ une minute, avec une couleur plus foncée pour les spécimens les plus volumineux.

Bien qu'une exposition plus courte suffît à obtenir une teinte bleue, une minute complète était nécessaire pour atteindre une couleur optimale. Les UV longs (365 nm) provoquaient également un changement de couleur, mais de manière moins intense.

La couleur restait stable dans l'obscurité, mais s'estompait rapidement à la lumière, surtout sous une lumière incandescente. Cette découverte est notable, car le photochromisme dans la scapolite est rare, étant plus courante dans des gemmes comme la hackmanite et la tugtupite (McClure, 2005).

Les spectres d'absorption UV-visibles qui ont été publiés jusqu'à maintenant (par ex. Milisenda, 2015) ne sont pas obtenus en lumière polarisée alors que le matériau est anisotrope. Une étude en lumière polarisée pourrait aider à mieux caractériser le centre coloré produisant la couleur bleue.

II.2.2 – la luminescence

Nous savons désormais que cette propriété est due à la présence d'un groupe anionique (S_2^-) au centre de la cage de sodium. En effet selon cette étude tous les échantillons photochromes présentent une luminescence orange, ce qui confirme la présence de soufre dans tous les échantillons (Blumentritt et al 2020).

Notons néanmoins que toujours selon cette étude la réciproque n'est pas vraie : tous les échantillons qui luminescent orange ne sont pas nécessairement photochromes.

La présence de soufre est donc indépendante de la propriété photochrome.

Pour information le tableau 2 ci-dessous nous indique les différentes couleurs de luminescences assez courantes dans la scapolite, ainsi que leurs origines.

Couleur émise	Maximum de la bande d'émission	Commentaire sur cette bande d'émission	Centre émetteur (ion substitué)	références
Violet	420 nm	Bande étroite	Eu^{3+} (Na^+)	(Gorobets & Rogojine, 2002)
Bleu	450-510 nm	Bande large avec structure vibronique visible à T_{amb}	O_2^- (Cl^-)	(Gorobets & Rogojine, 2002)
Orange	520-610 nm	Structure vibronique visible à T_{amb}	S_2^- (Cl^-) ?	(Sidike, Aierken et al., 2007)
Orange	640 nm	Bande large	Mn^{2+} (Na^+)	(Gorobets & Rogojine, 2002)
Rouge	750 nm	Bande large	Fe^{3+} (Al^{3+})	(Marfunin, 1979)

Tableau 2 : Détail des principales luminescences documentées dans la scapolite (Blumentritt, 2021).

II. 3- Récapitulatif des notions connues

En résumé, les scapolites sont des aluminosilicates cristallisant dans le système quadratique, présents sur tous les continents et se déclinant en diverses couleurs. Elles constituent une solution solide à trois pôles : méionite, marialite et sylvialite. Certaines scapolites présentent une luminescence, voire un phénomène de photochromisme. Toutefois, toutes ne sont pas photochromes ; à ce jour, ce comportement n'a été observé que dans des spécimens originaires d'Afghanistan.

III. MATERIAUX ET METHODES

III.1. Description des échantillons

Les échantillons confiés proviennent tous de la même région d'Afghanistan, mais ils peuvent être divisés en trois catégories : les échantillons bruts non traités, les échantillons non traités mais facettés et les échantillons bruts traités, donnés par Dudley Blauwett Gems de Erie, Colorado à Tucson 2020

Une partie de ces échantillons étaient préalablement traitée par irradiation. La nature exacte de ce traitement réalisé au Pakistan reste inconnue.

Ces douze échantillons sont originaires de la mine de Dar-e-Zu dans le district de Sar-e-Sang (Badakshan, Afghanistan) voir figure 8 ci-dessous.



Figure 8 : Positionnement de la mine au NE de l'Afghanistan selon Mindat filtre Esri Nat Geo

Notre groupe d'échantillons se présente comme suit : 5 bruts non traités, 3 gemmes facettées sans indication de traitement et 4 bruts traités par irradiation.

Ils sont réunis dans le tableau 3 ci-après :

Photo de l'échantillon	Numéro de l'échantillon	Dimensions de l'échantillon en mm	Couleur	Forme	Traitement
	E3374	16,2x13,1x3,7	Presqu'incolore	Brut	Non traitée
	E3377	8,4x8,4x3,7	Incolore à bords bruns	Brut	Non traitée
	E3379	16,9x4,2x2,9	Presqu'incolore	Brut	Non traitée
	E3381	10,2x6,1x3,5	Presqu'incolore	Brut	Non traitée
	E3383	15,4x5,9x3,2	Incolore à brun	Brut	Non traitée
	E2992	6,0x5,1x4,2	Presqu'incolore	Ovale modifié	Non traitée
	E3337	7,7x5,7	Presqu'incolore	Ovale modifié	Non traitée
	E3338	12,1x8,5	Presqu'incolore	Poire	Non traitée
	E3375	11,1x4,5x3,7	Incolore à brun	Brut	Traitée
	E3387	9,7x6,5x3,23	Incolore à brun	Brut	Traitée
	E3388	10,3x8,3x3,2	Incolore avec des inclusions brunes	Brut	Traitée
	E3392	17,8x7,2x3,4	Incolore avec des inclusions brunes	Brut	Traitée

Tableau 3 : Propriétés des échantillons de scapolites photochromes étudiés

III.2- Méthodes

III.2.1. Matériel de gemmologie classique

Les propriétés physiques et optiques étudiées en gemmologie classique ont été déterminées à l'aide d'un polariscope de table PK14 de la marque KRUSS, un réfractomètre ER604 de la marque KRUSS et une lampe à ultraviolets équipée d'ultraviolets longs (UVL-365nm) et ultraviolets courts (UVC-254nm), celle-ci étant située à 1cm de l'échantillon.

L'utilisation d'un dichroscope à main : deux feuilles de film polariseur, orientées perpendiculairement et accolées, nous permettra de distinguer la présence et l'intensité d'un éventuel pléochroïsme.

Les masses et masses volumiques ont été acquises sur une balance électronique (METTLER TOLEDO, XS104) avec une première mesure de masse comparée avec une seconde réalisée en immersion dans un solvant, ici l'eau déionisée. La masse volumique est calculée comme suit :

$$\rho_{minéral} = \frac{m_0 \cdot \rho_x}{m_0 - m_1}$$

Où m_0 est la masse de l'échantillon avant immersion, m_1 sa masse en immersion (masse de l'échantillon + masse du volume de liquide déplacé) et ρ_x la masse volumique du fluide d'immersion (eau déionisée).

III.2.2. Prises de vues optiques

Pour réaliser les photos et les observations microscopiques nous avons utilisé une trinoculaire Leica MZ6 munie d'une caméra Leica MC120HD.

Une fois l'échantillon posé sur le plateau lumineux une photo était prise avant exposition aux UVC puis dans le noir l'échantillon était exposé aux UVC durant trois minutes, les photos ont été prises avec la polarisation de la lumière perpendiculaire à l'axe optique c et ensuite parallèlement à ce même axe. La figure 9 ci-dessous montre le système mis en place pour exposer les gemmes au UVC tout en prenant les photos.



Figure 9 : Mise en place du dispositif de prise de photographie sous UVC

III. 3. Spectroscopies d'absorption UV-visible, vibrationnelles et d'émission

III.3.1. Absorption UV-visible

Deux appareils ont été utilisés pour mesurer les spectres d'absorption : MagiLab GemmoSphere™ équipé d'une lampe au xénon et d'un détecteur CCD, utilisant une sphère d'intégration en PTFE de 100 mm pour la collecte en mode transmission. Il couvre un domaine spectral de 365 à 1000 nm, avec une bande passante automatique, un pas spectral de 1 nm, et un temps d'intégration de 0,54 seconde.

Le spectrophotomètre PerkinElmer Lambda 1050 est équipé de deux sources lumineuses : tungstène halogène et deutérium et de trois détecteurs : photomultiplicateur, InGaAs et PbS. Il couvre un domaine spectral de 350 à 850 nm, avec une bande passante automatique de 1 nm, un pas d'échantillonnage de 1 nm, et un temps d'intégration ajustable à 0,54 s ou 0,2 s.

Pour l'étude du pléochroïsme nous avons utilisé la spectroscopie en lumière polarisée : après exposition de la gemme aux UVC pendant 3 mn.

Nous avons installé deux polariseurs, un sur le faisceau de référence et l'autre sur le faisceau échantillon afin de pouvoir mesurer une absorbance lorsque les polariseurs étaient en position perpendiculaire ou parallèle à l'axe c de la pierre, voir figure 10.

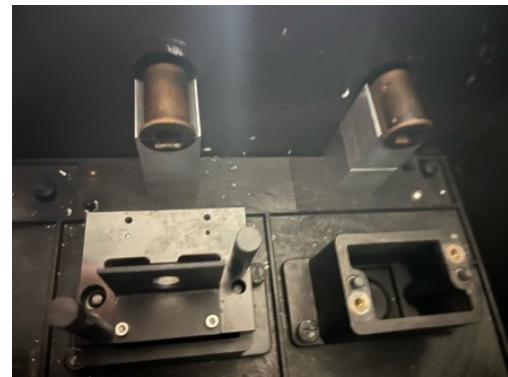


Figure 10 : Polariseurs en place dans le spectromètre Perkin-Elmer.

Les polariseurs utilisés sont en calcite gemme, de type Glan-Thompson, ils sont placés dans un matériau noir, totalement absorbant, et dans un cylindre de laiton, ce qui permet de les manipuler et de les orienter facilement (figure 11).



Figure 11 : Détail d'un polariseur à calcite gemme Glan Thompson tels que ceux utilisés dans le Perkin Elmer de la figure 10

Un repère placé sur le polariseur permet de déduire sa position, après chaque mesure les polariseurs sont tournés de 90° pour passer d'une position à l'autre.

La figure 12 ci-dessous illustre le principe de spectroscopie d'absorption en lumière polarisée où E représente le vecteur électrique, il indique la direction de vibration de l'onde lumineuse (cours DUG, extrait d'une publication non retrouvée).

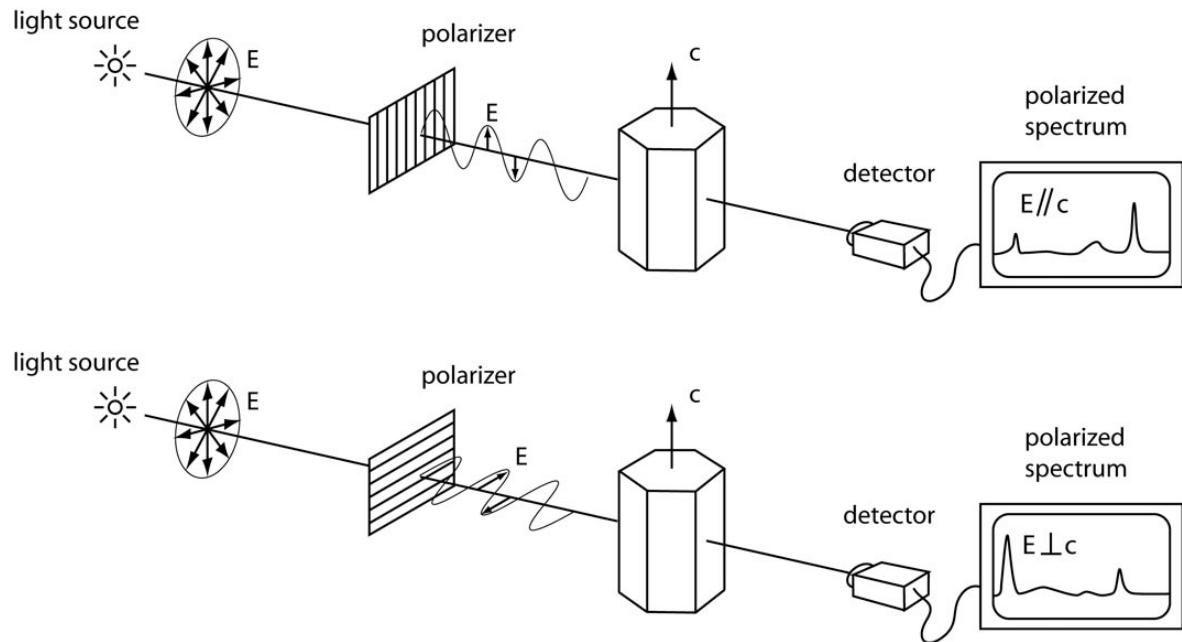


Figure 12 : Principe de spectroscopie en lumière polarisée

III.3. 2. Spectroscopie infrarouge

Le spectromètre infrarouge à transformée de Fourier Bruker Vertex 70 FTIR couvre un domaine spectral de 400 à 10000 cm^{-1} , avec une résolution réglable entre 2 et 4 cm^{-1} , et permet l'acquisition de 100 scans pour améliorer le rapport signal/bruit.

III.3.3. Spectroscopie Raman

Le spectromètre Bruker FT-Raman MultiRam est équipé d'une source laser Nd:YAG à 1064 nm, avec une puissance réglable de 0,3 à 2 W, typiquement utilisée à 300 mW pour l'analyse. Il intègre un détecteur en germanium (Ge) et bénéficie d'un système de calibration automatique de l'énergie grâce à un laser interne.

Le spectromètre dispersif Jobin Yvon Horiba T64000 utilise un laser He-Ne à 632,8 nm, avec une puissance de 50 mW appliquée directement sur l'échantillon.

III.3.4. Microscopie électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) Jeol 5800 est équipé d'un détecteur de rayons X secondaires SanX SSD. Il fonctionne sous une tension de 15 kV et un courant de 5 nA, offrant une analyse précise de la topographie et de la composition des échantillons.

IV.RESULTATS

Dans un premier temps nous allons confirmer que nous sommes en présence de scapolite et plus précisément de sa variété marialite pour ensuite travailler dans le domaine de l'UV-Vis pour confirmer son caractère photochrome

IV.1 Observations optiques

Tous les échantillons étudiés présentent cette particularité de passer d'une couleur presque incolore/brune à une coloration bleue plus ou moins intense après avoir été exposé à une lumière UVC (figure 13).



Figure 13 : Échantillon E3338 avant et après exposition aux UVC

Sur une gemme anisotrope colorée la question qui peut se poser est la présence ou non d'un pléochroïsme. Dans le cas de la scapolite photochrome existe-t-il un pléochroïsme dans son état dit « excité » ?

L'utilisation d'un dichroïsme à main nous a permis de distinguer un dichroïsme dans ces échantillons, quand ils ont été excités et donc devenus bleus.

La coloration bleue disparaissant d'autant plus vite qu'elle est exposée à la lumière blanche il a fallu jouer de rapidité pour pouvoir immortaliser en photo cette réaction. Pour mettre toutes les chances de notre côté nous avons également travaillé le plus possible dans le noir, n'allumant que pour vérifier la position des gemmes.

Le résultat est donc positif : nous constatons une couleur bleue lorsque nous observons l'échantillon parallèle à l'axe optique et pourpre quand nous l'observons perpendiculairement à ce même axe (figure 14).

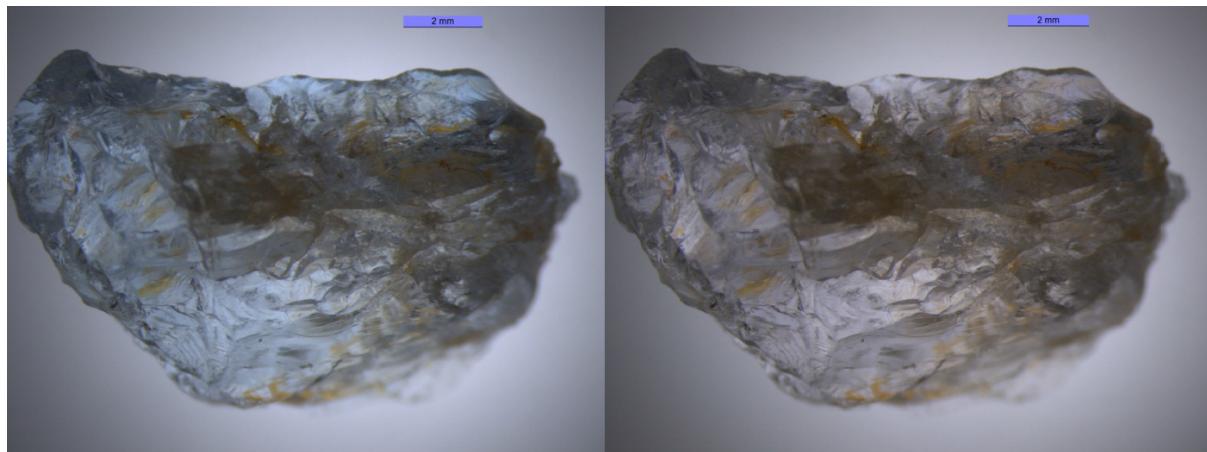


Figure 14 : Échantillon 3382 après exposition aux UVC avec la lumière polarisée dans les deux directions perpendiculaires, extrêmes du pléochroïsme : on distingue nettement le pléochroïsme bleu/pourpre.

Une fois ce résultat obtenu confirmant notre hypothèse nous allons essayer d'aller un peu plus loin et de caractériser ces deux couleurs du pléochroïsme.

IV.2- résultats des mesures gemmologiques

Le tableau 4 ci-dessous reprend les résultats obtenus des mesures physiques de gemmologie classique des différents échantillons.

Photo de l'échantillon	Numéro de l'échantillon	Indice de réfraction mesuré (n.m=non mesuré)	Biréfringence	masse spécifique	Masse (Carat)
	E3374	n.m	n.m	2,53	3,95
	E3377	n.m	n.m	2,46	1,45
	E3379	n.m	n.m	2,56	2,05
	E3381	n.m	n.m	2,54	1,5
	E3383	n.m	n.m	2,53	2,62
	E2992	1,539	0,1	2,56	0,63
	E3337	1,542	0,05	2,56	0,95
	E3338	1,537	0,1	2,55	2,65
	E3375	n.m	n.m	2,53	1,85
	E3387	n.m	n.m	2,34	0,85
	E3388	n.m	n.m	2,58	1,95
	E3392	n.m	n.m	2,52	5.50

Tableau 4 : Mesures physiques des échantillons de scapolites photochromes étudiés

Un certain nombre d'échantillons bruts sont à priori des fragments de clivage selon le plan (110) ceci est commode pour nous car un tel clivage dans la scapolite contient l'axe optique et donc fabrique naturellement des échantillons adaptés à l'obtention de spectres en lumière polarisée.

En effet lorsque l'on observe ces clivages avec la lumière polarisée, en tournant le polarisateur, on observe bien les deux couleurs extrêmes du pléochroïsme, dans notre cas le bleu et le pourpre.

IV-3-spectoscopies vibrationnelles

IV-3.1 Raman et FTRaman

Selon la base de données RRUFF, le spectre Raman de la marialite est le suivant : (figure 15)

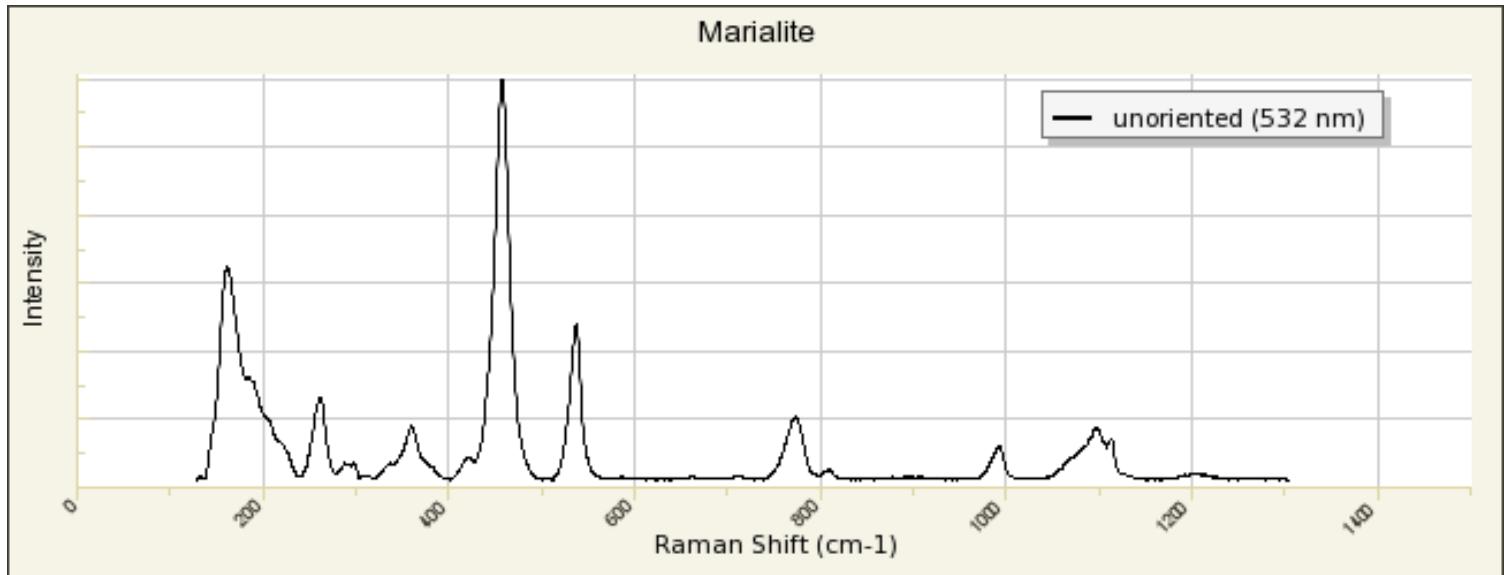


Figure 15 : Spectre Raman de la marialite d'après la base de données RRUFF, RRUFF ID : R100112, Sar-e-Sang District, Koksha Valley, Badakhshan Province, Afghanistan.

Les bandes caractéristiques sont situées à 260, 458, 537, 772 et 1095 cm⁻¹ pour la marialite.

Selon la base de données RRUFF le spectre Raman de la méionite est le suivant : (figure 16)

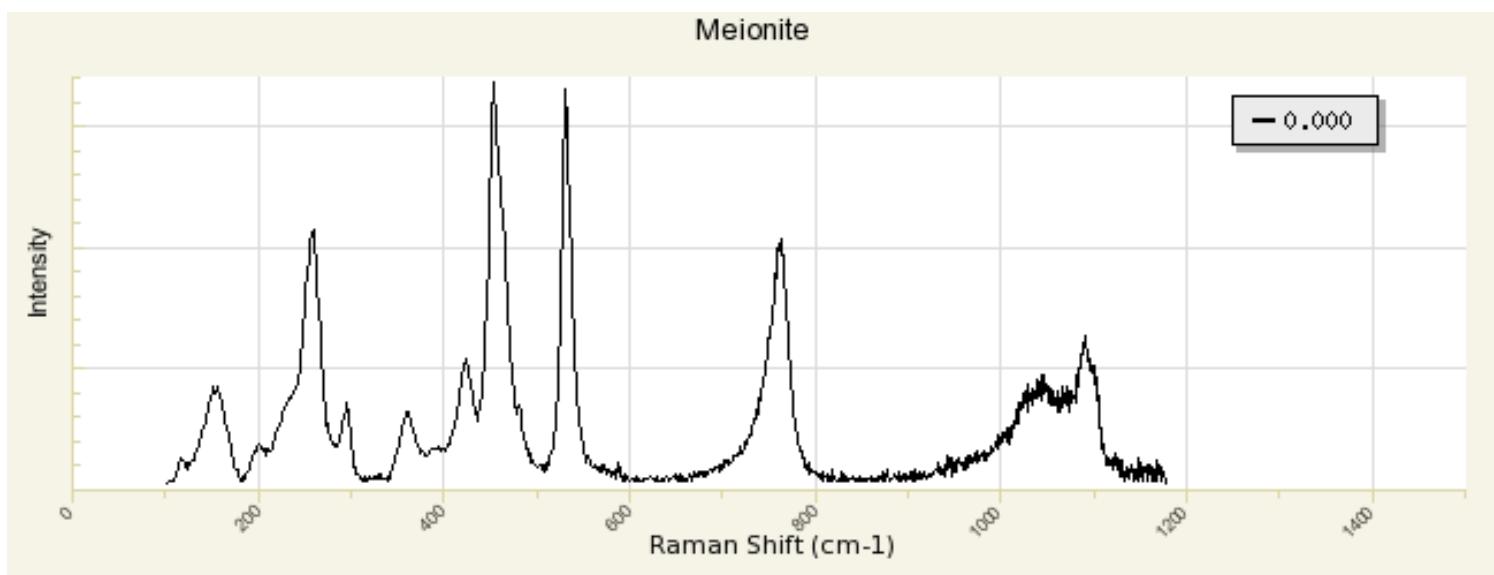


Figure 16 : Spectre Raman de la méionite d'après la base de données RRUFF, RRUFF ID : R040169.3, Black Hills, South Dakota, USA

Nous pouvons observer seulement un léger déplacement des bandes (453, 531 et 760cm⁻¹) entre les deux pôles de la solution solide.

Nous avons donc passé les échantillons au FT Raman (figure 17) et allons cibler notre analyse sur la partie située de 200 à 1200 cm⁻¹, avant la zone des pics caractéristiques de l'eau (de 1700 à environ 3000 cm⁻¹).

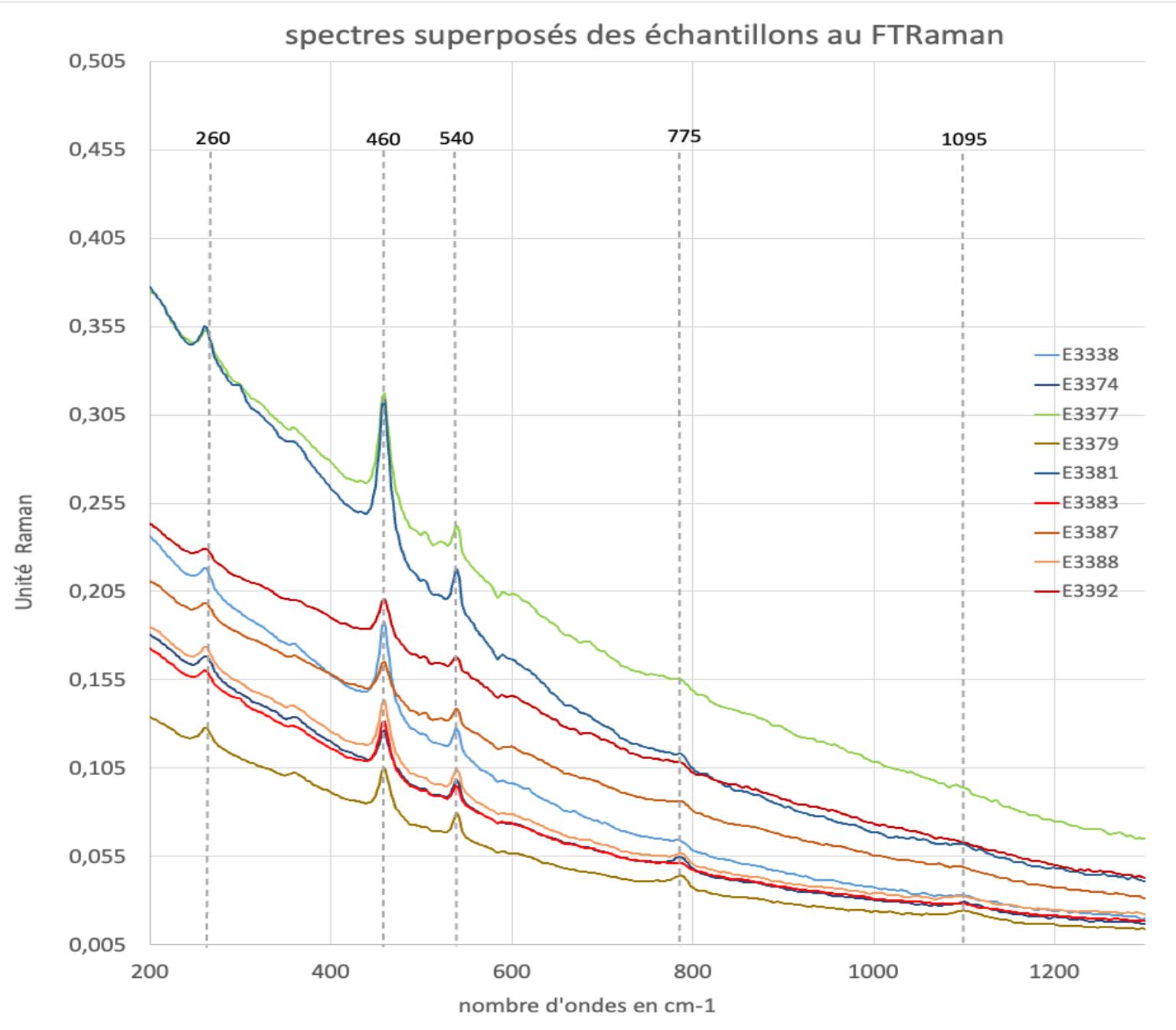


Figure 17 : détails des spectres FT Raman cumulés des différents échantillons de scapolite photochrome démontrant qu'il s'agit bien de marialite

Nous observons des pics d'intensité élevée que nous pourrons considérer comme caractéristique à cette espèce minérale, ils sont situés à 260, 460, 540, 775 et 1095 cm⁻¹.

Le spectre le plus représentatif de la série étant celui de l'échantillon E3379, il nous confirme bien que nous sommes en présence de marialite (figure 18).

Spectre FT-Raman de l'échantillon E3379

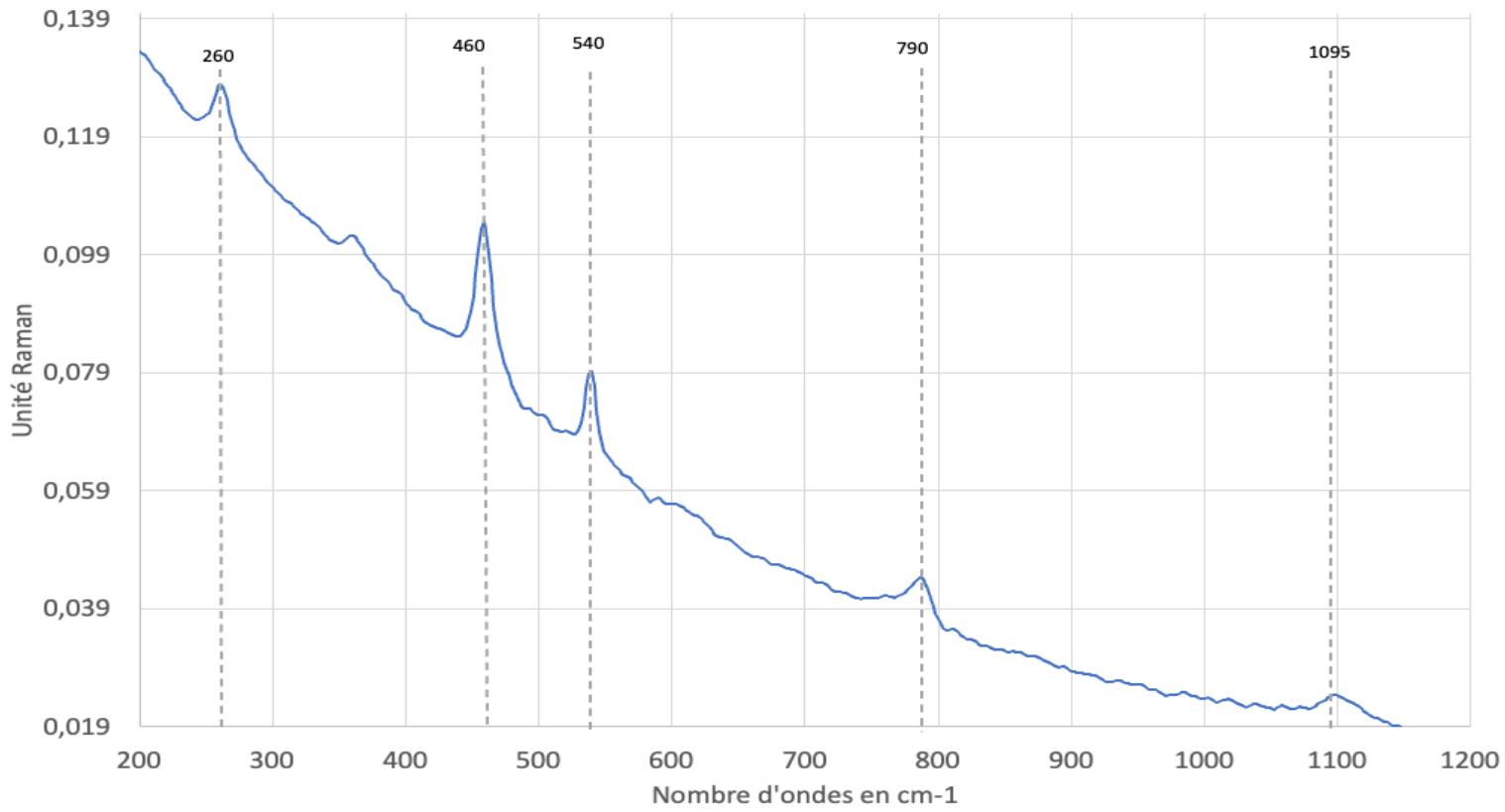


Figure 18 : Spectre FT-Raman de l'échantillon E3379

En effet nous retrouvons bien les bandes caractéristiques de la marialite sur notre échantillon.

Pour plus de précision nous avons passé une partie des échantillons au Raman T64000, le spectre de l'échantillon E3377 est cette fois-ci pris pour échantillon de référence (figure 19).

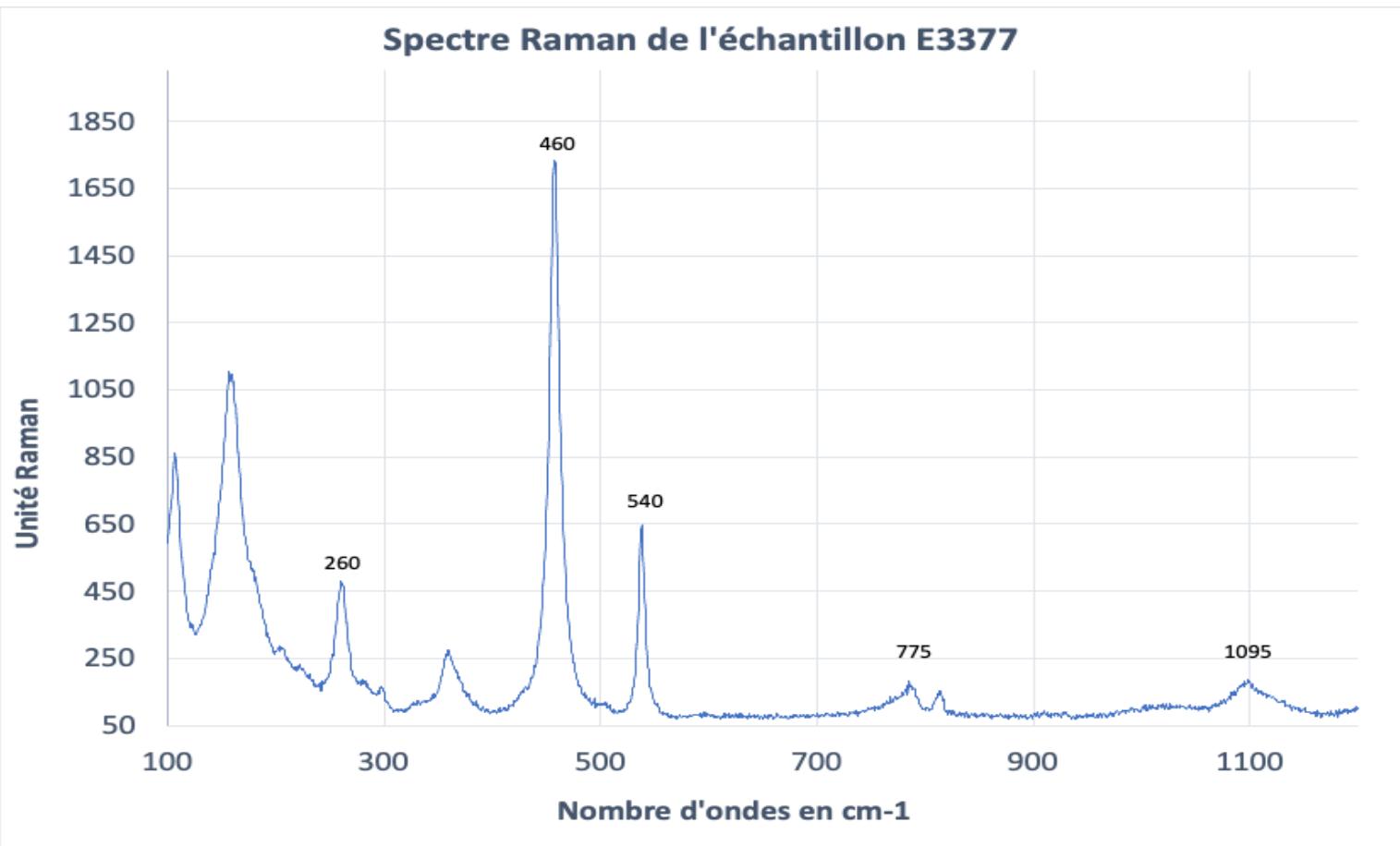


Figure 19 : Spectre Raman au T64000 de l'échantillon E3377

Les mêmes bandes caractéristiques se retrouvent sur ce spectre, nous sommes donc bien en présence de marialite.

Grace au logiciel CrystalSleuth développé par RRUFF, nous avons pu comparer le spectre obtenu avec les spectres de référence voici le résultat en figure 20.

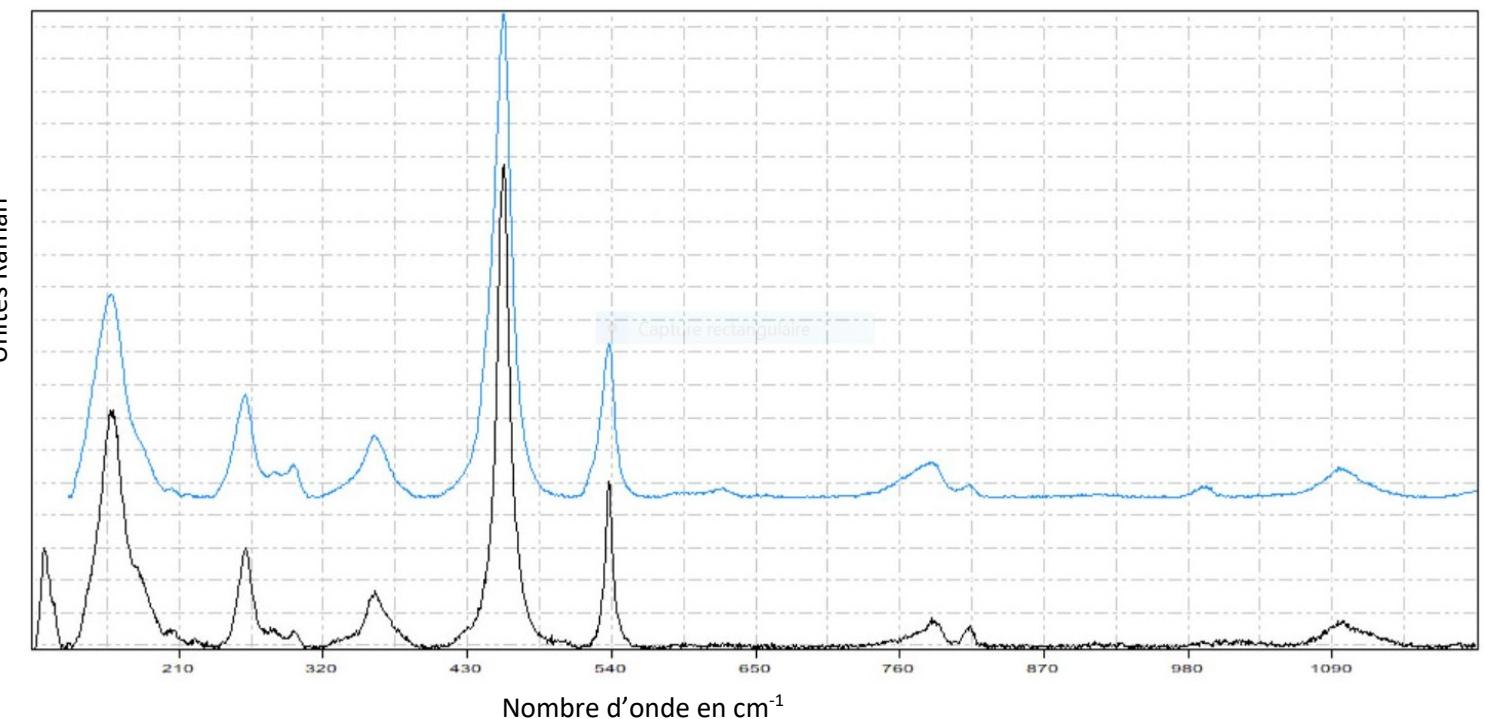


Figure 20 : comparaison des spectres Raman de l'échantillon E3377 à l'échantillon de référence (RRUFF ID R100112) de la base de données RRUFF de la scapolite variété marialite, notre spectre d'échantillon est en noir et le spectre de référence est en bleu.

D'après le logiciel la correspondance est de 96% pour de la marialite, ce qui confirme encore notre hypothèse.

En effet les scapolites en général présentent des bandes d'intensité moyenne ou forte situées aux alentours de $460, 540, 775\text{ cm}^{-1}$ et représentant la vibration de la partie silicatée de l'échantillon, et 993 et $1\,095\text{ cm}^{-1}$ représentant respectivement les vibrations d'étirement symétrique du sulfate et du carbonate (Culka, 2019).

Si nous appliquons ces données à notre échantillon tous les pics correspondent et confirment donc que nos échantillons sont la variété marialite de la famille des scapolites.

IV-3.2-FT-IR

Nous savons désormais que tous nos échantillons sont de la marialite et que seule la marialite a cette propriété de photochromisme (Pradat, 2012).

La marialite correspondant au pôle chlorosodé de la solution solide des scapolites nous avons dans un premier temps émis l'hypothèse de le confirmer par la spectrométrie infrarouge : en tentant de mettre en évidence la présence de chlore dans les échantillons (figure 21).

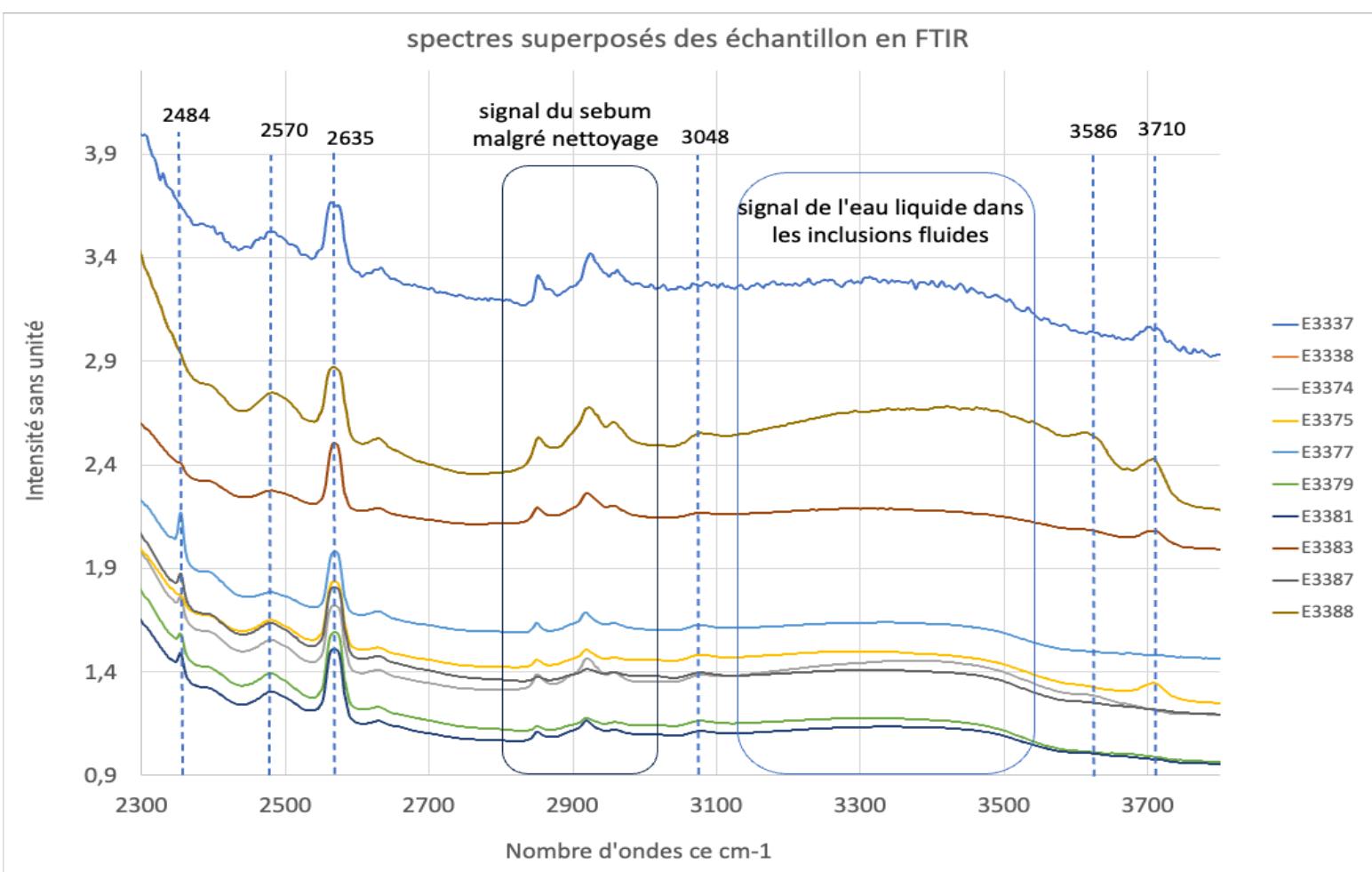


Figure 21 : Spectres FTIR superposés des échantillons de scapolites photochromes

Pour information : les bandes dans le rectangle aux alentours de 2900 cm^{-1} sont simplement des traces de doigts. C'est un signal du sébum humain, typique sur les pierres même en les nettoyant bien. C'est juste très bien adsorbé à la surface idem dans le graphique suivant.

Notre échantillon de référence est le E3377 dont voici le spectre FTIR ci-dessous (figure 22) :

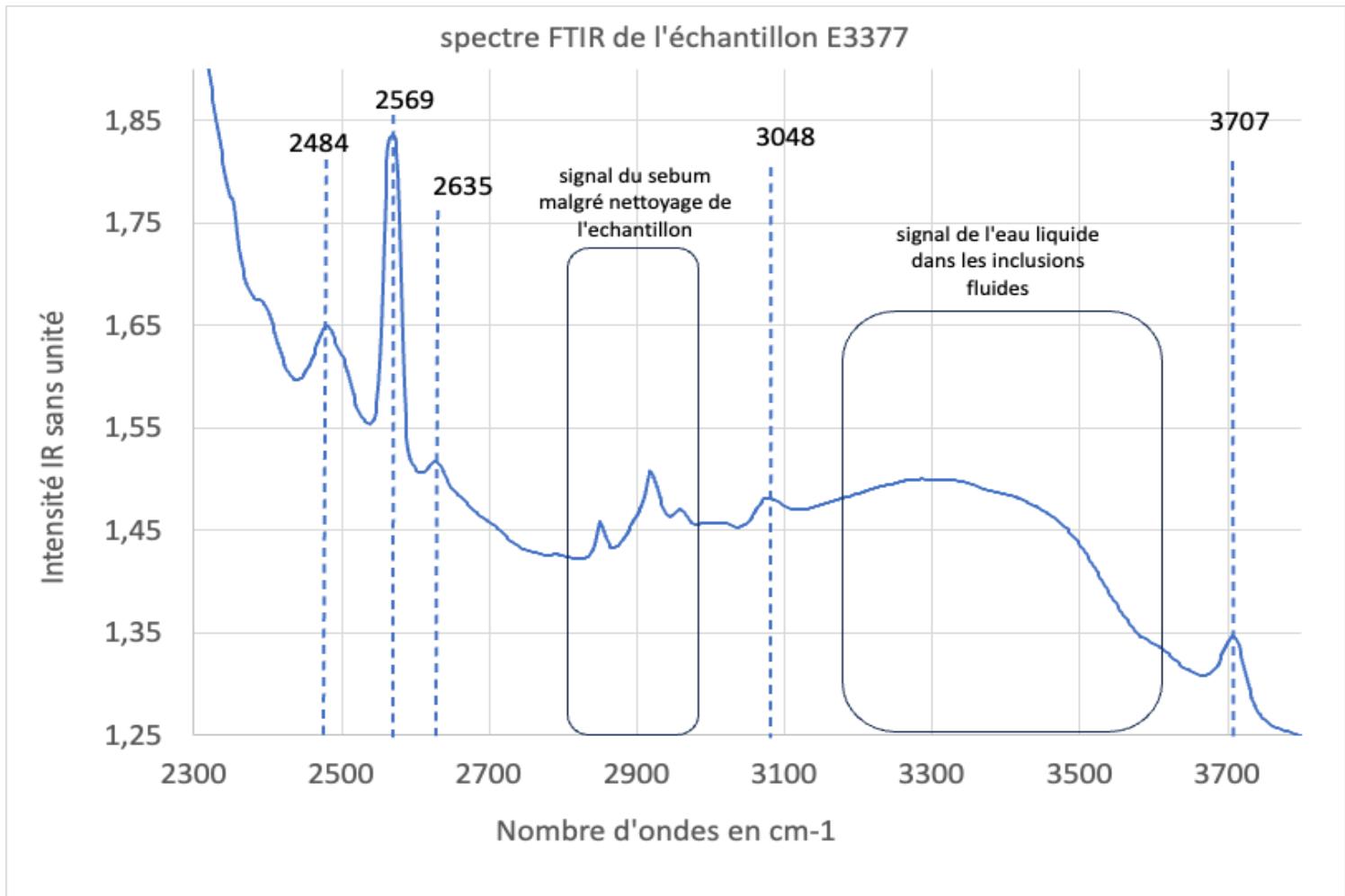


Figure 22 : spectre FTIR de l'échantillon E3377

Les bandes d'absorption à 2484 cm^{-1} , 2569 cm^{-1} et 2635 cm^{-1} sont causées par l'étirement symétrique et antisymétrique et une combinaison de la vibration du CO_3^{2-} .

Ces bandes sont aussi les signatures du CO_2 peuvent provenir soit d'une contamination par l'atmosphère ou de la présence d'inclusions, mais compte tenu de la purge stable, et de la répétabilité de l'expérience, une contamination est peu probable.

Le pic de doublement de fréquence du premier ordre du CO_3^{2-} dans les vibrations d'étirement antisymétriques se trouve près de 2963 cm^{-1} . En particulier, le pic d'absorption à 3048 cm^{-1} a été causé par la vibration d'étirement M-OH ; 3707 cm^{-1} était dû à la vibration d'étirement symétrique O-H. (Pengyu et al., 2025).

Malheureusement la spectroscopie infrarouge ne nous a pas permis de montrer la présence de chlore car en infrarouge, l'absorption est due à une liaison, pas un atome seul et isolé. Le chlore qui est entouré de 4 atomes de sodium ne fait que des liaisons ioniques qui ne sont pas ou peu visibles en infrarouge, ces mêmes infrarouges nous confirment la présence de carbonates ce qui est normal car nous sommes dans une solution solide entre la mésionite et la marialite.

IV-4- Microanalyse

IV-4- 1 -Microscopie électronique à balayage

Le MEB va nous permettre de faire une microanalyse chimique grâce à la présence d'un EDS et nous donner une proportion de différents éléments chimiques composant l'échantillon.

L'échantillon que nous avons préparé pour pouvoir être passé au MEB est le E3377 dont voici le spectre (figure 23) :

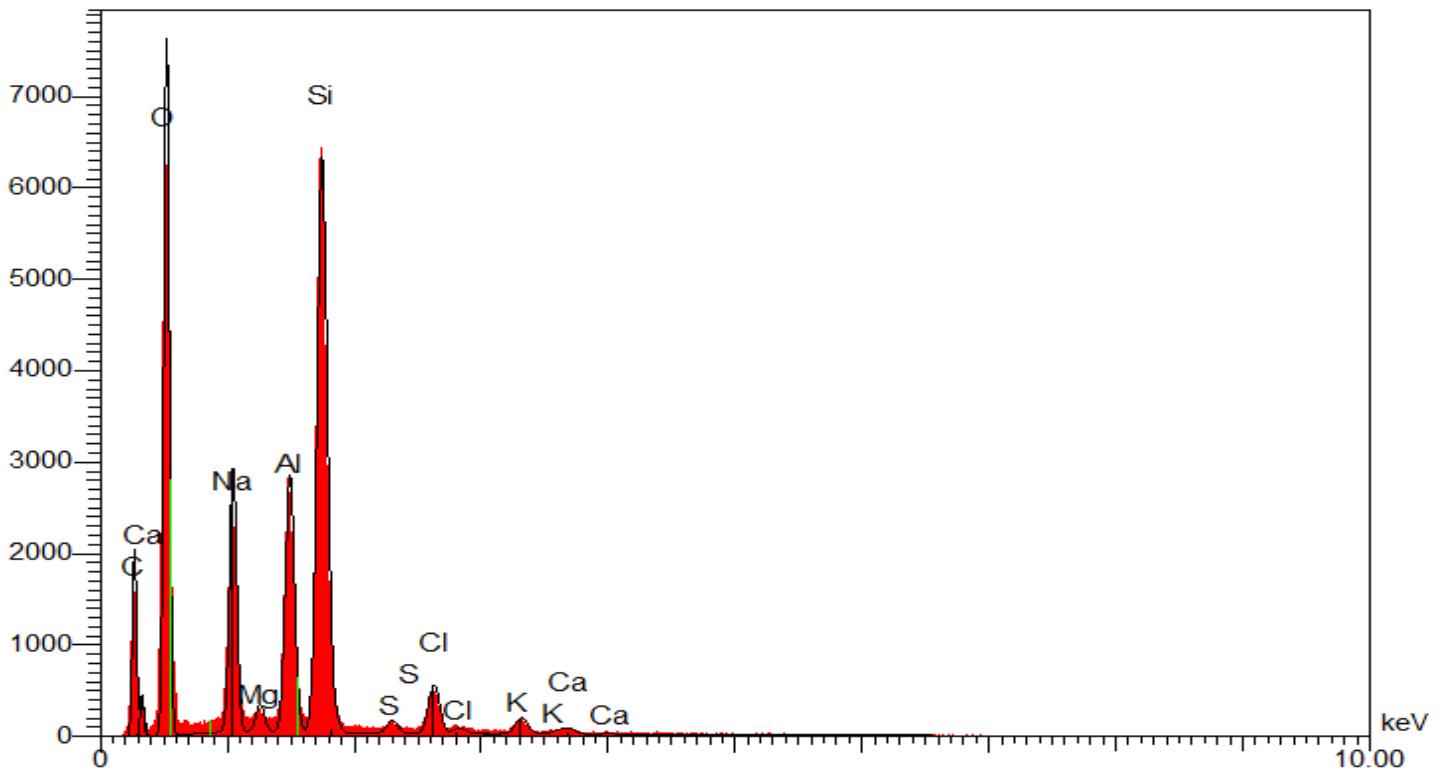


Figure 23 : Microanalyse au MEB de l'échantillon E3377

Élément	Symbole	Pourcentage (%)
Sodium	Na	10,11
Chlore	Cl	3,01
Soufre	S	0,20
Potassium	K	0,62
Oxygène	O	44,13
Calcium	Ca	0,15
Silicium	Si	28,63
Aluminium	Al	9,08
Total		96,73

Tableau 5 : proportion des différents éléments de l'échantillon E3377 en pourcentage atomique.

Dans le tableau 5 ci-dessus nous retrouvons bien les éléments constitutifs de la scapolite (aluminium, oxygène, silicium, sodium) mais aussi le chlore qui nous confirme que nous sommes en présence de marialite. Nous trouvons aussi le soufre, qui, nous le verrons plus tard va nous être utile pour la propriété de photoluminescence. Nous voyons également du carbone qui pourrait (car il y a un artefact intrinsèque lié au carbone sur le porte échantillon lors de la métallisation de celui-ci pour le préparer à l'analyse au MEB) nous indiquer la présence de carbonates et donc nous confirmer que nous sommes en présence d'une solution solide marialite/méionite. Nous n'avons malheureusement pu faire qu'une seule analyse à cause d'un MEB vieillissant.

IV-5-Spectroscopie d'absorption en UV-VIS

IV-5.1- Spectroscopie en lumière non polarisée :

Pour faire une série de mesures dans le domaine de l'UV-VIS nous avons tout d'abord utilisé un appareil mobile, la Gemmosphère™, permettant une série de mesures rapides pour nous donner un premier état des lieux.

La scapolite est presque incolore à légèrement brune, et se caractérise par un spectre d'absorbance composé d'un continuum ayant une forme caractéristique de « pied » de courbe qui traverse le domaine spectral sans maximum apparent à partir de 550 nm environ (figure 24). Nous pouvons observer des oscillations du milieu du spectre (vers 600 nm env.) qui sont des artefacts liés à la luminescence orange, la sphère intégratrice captant également ce signal.

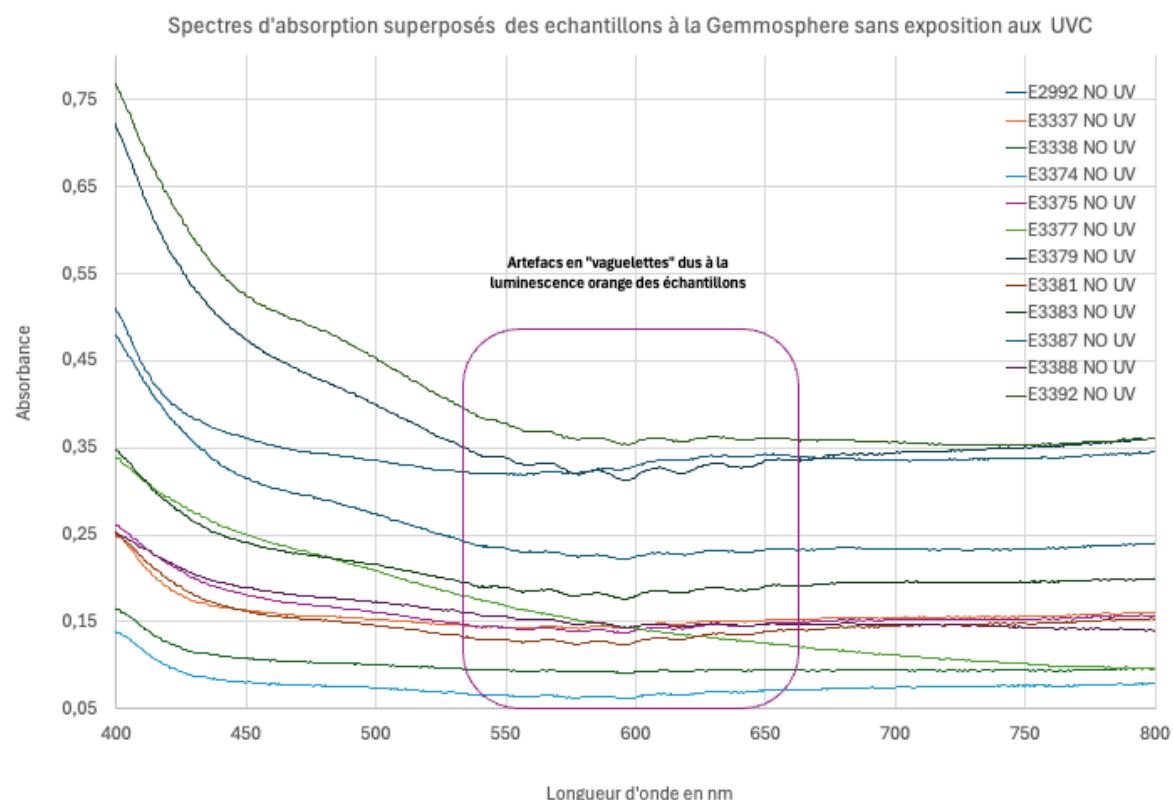


Figure 24 : Spectres d'absorption superposés en UV-Vis des différents échantillons de scapolites photochrome avant exposition aux UV, obtenus avec la Gemmosphère

Lorsque nous exposons aux UV courts (254 nm) les mêmes échantillons pendant une durée de 3 minutes ils deviennent bleus plus ou moins intense (figure 25)

Voici leurs spectres superposés dans les mêmes conditions :

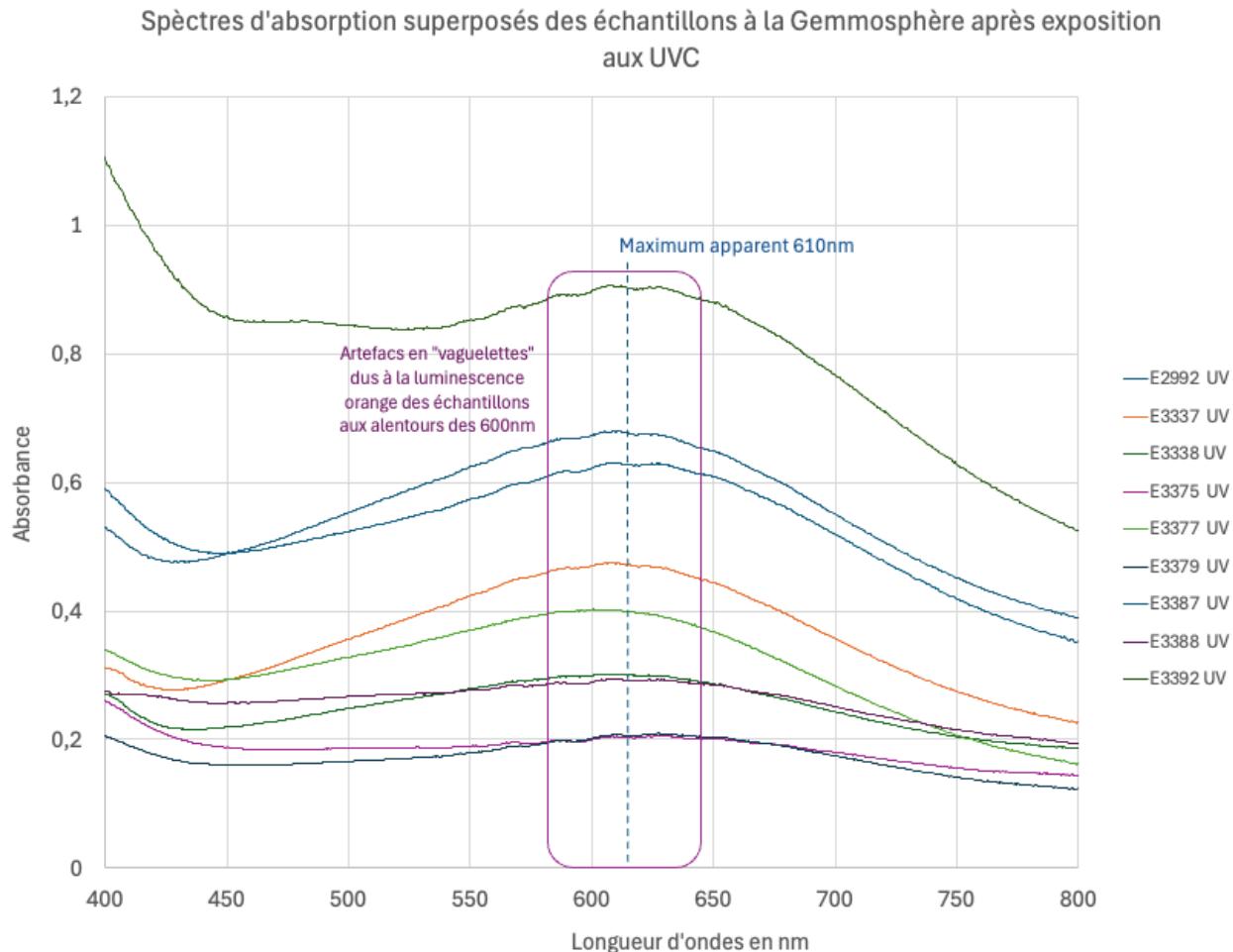


Figure 25 : spectres d'absorption UV-Vis superposés des différents échantillons de scapolites photochromes après 3min d'exposition aux UVC, obtenus avec la Gemmosphère.

Le spectre d'absorption est alors différents. Ceux-ci présentent une bande large d'absorption dont le maximum se situe à environ 610 nm. Ceci confirme ce que nous voyons, c'est à dire qu'en absorbant dans le rouge orangé la gemme laisse passer le violet et le bleu et nous parait bleue à l'œil nu.

Nous retrouvons les artefacts oscillatoires dus à la luminescence de la pierre toujours vers 600 nm

Nous avons comparé les spectres de la même pierre, avant et après exposition aux UVC pendant au moins trois minutes.

L'exemple ci-dessous (figure 26) concerne l'échantillon E3377, il est représentatif de tous les autres échantillons.

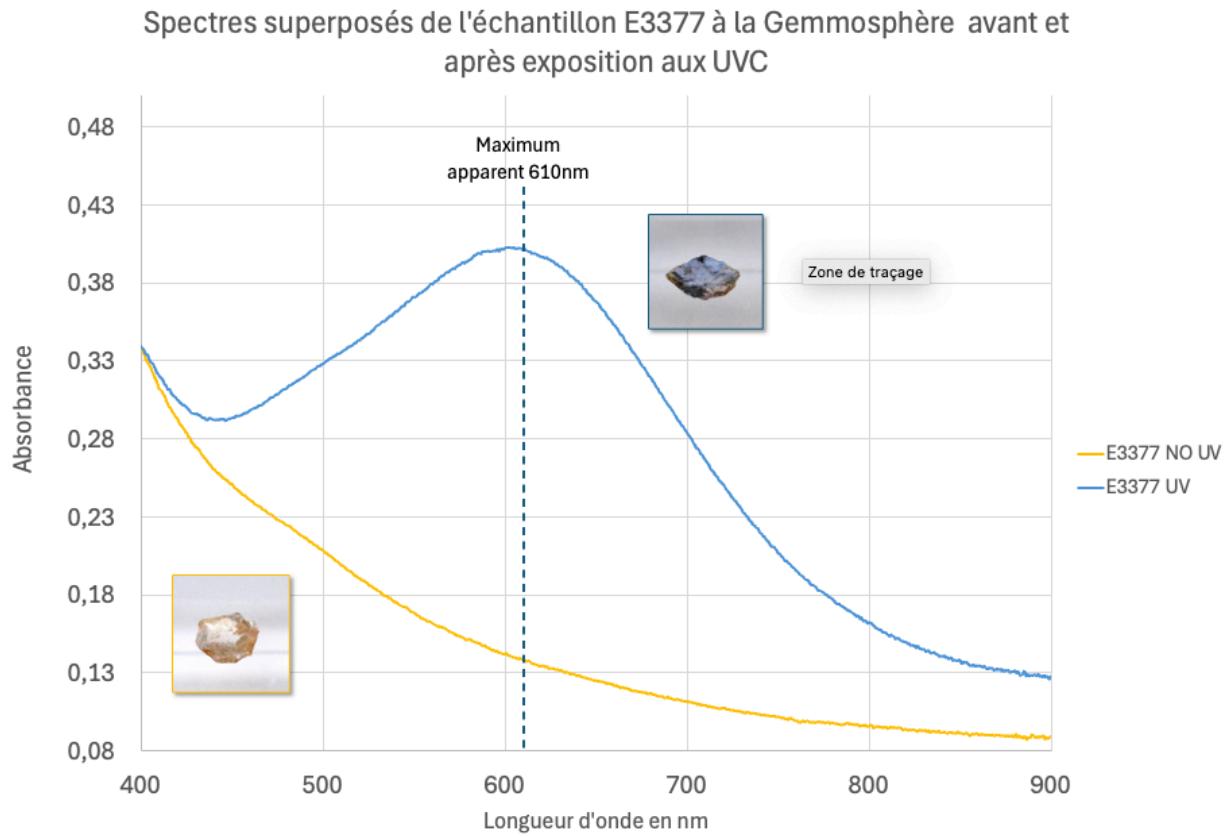


Figure 26 : Spectres d'absorption UV-VIS de l'échantillon E3377 avant et après exposition durant 3 minutes aux UVC

Nous constatons bien que le photochromisme de certains échantillons est très marqué en spectroscopie d'absorption UV-VIS.

IV-5.2 Spectroscopie d'absorption UV Visible en lumière polarisée

Pour ces mesures nous avons utilisé un spectromètre adapté à des spectres en lumière polarisée, de la marque Perkin Elmer (voir section matériaux et méthodes).

Nous avons obtenu deux spectres d'absorption bien distincts correspondants aux deux couleurs observées du dichroïsme de la scapolite photochrome. Pour des raisons de maintien de la couleur instable nous avons réalisé ces mesures dans une pièce noire, en évitant ainsi un retour rapide à la forme incolore à brun clair initiale de la scapolite.

Grâce à ce dispositif nous avons obtenu les spectres suivants présentés en lumière polarisée avec E perpendiculaire à c (figure 27) :

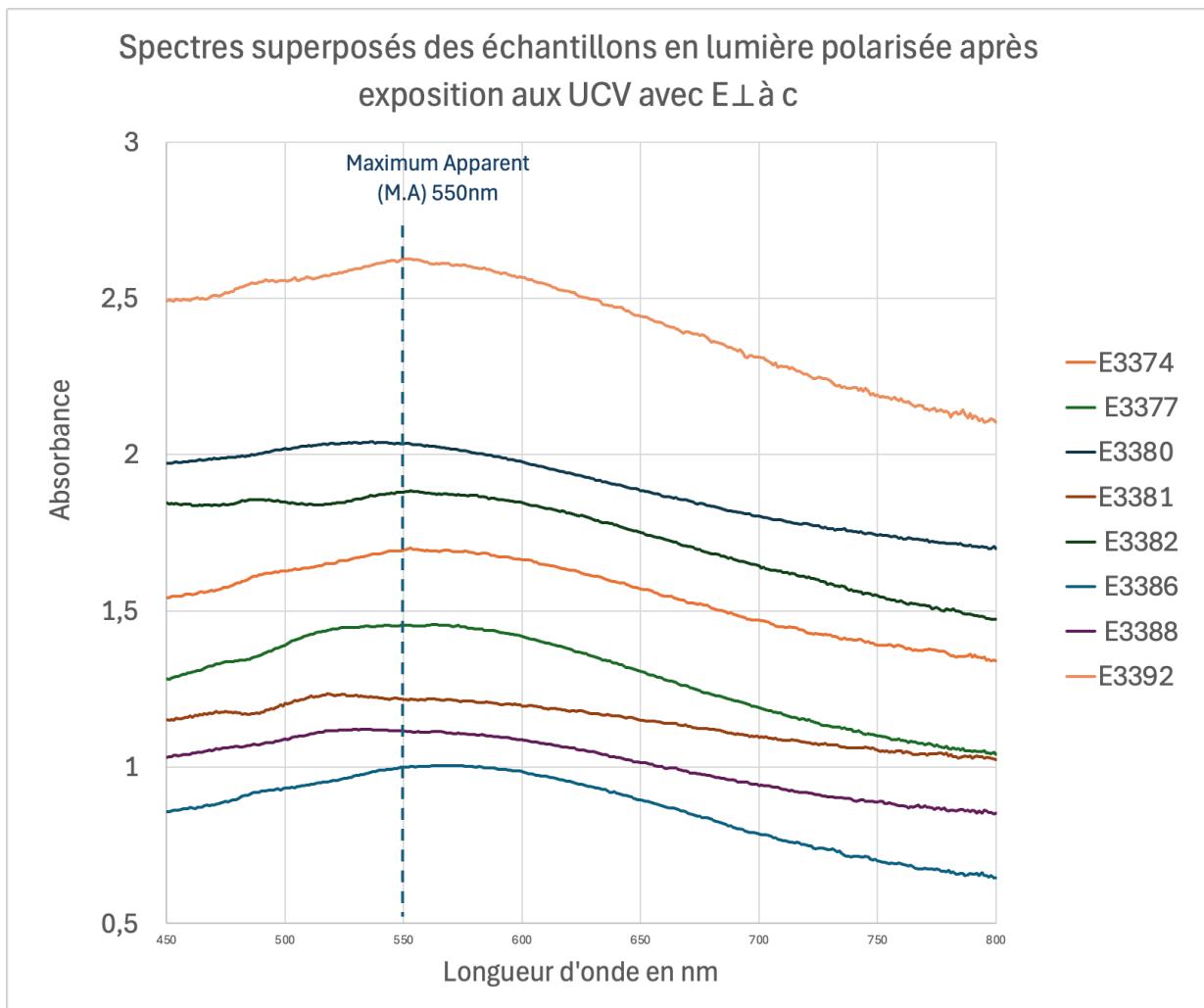


Figure 27 : Spectres d'absorptions superposés des différents échantillons après 3 min d'exposition aux UVC. Spectres obtenus avec E perpendiculaire à l'axe c des échantillons, donc dans la direction pourpre.

Nous constatons une large bande d'absorption entre 500 et 650 nm avec un maximum apparent à 550 nm, correspondant à la couleur pourpre du pléochroïsme de la scapolite. Nous observons également des artefacts en vaguelettes correspondant toujours à la luminescence de la pierre.

Lumière polarisée avec E parallèle à c (figure28) :

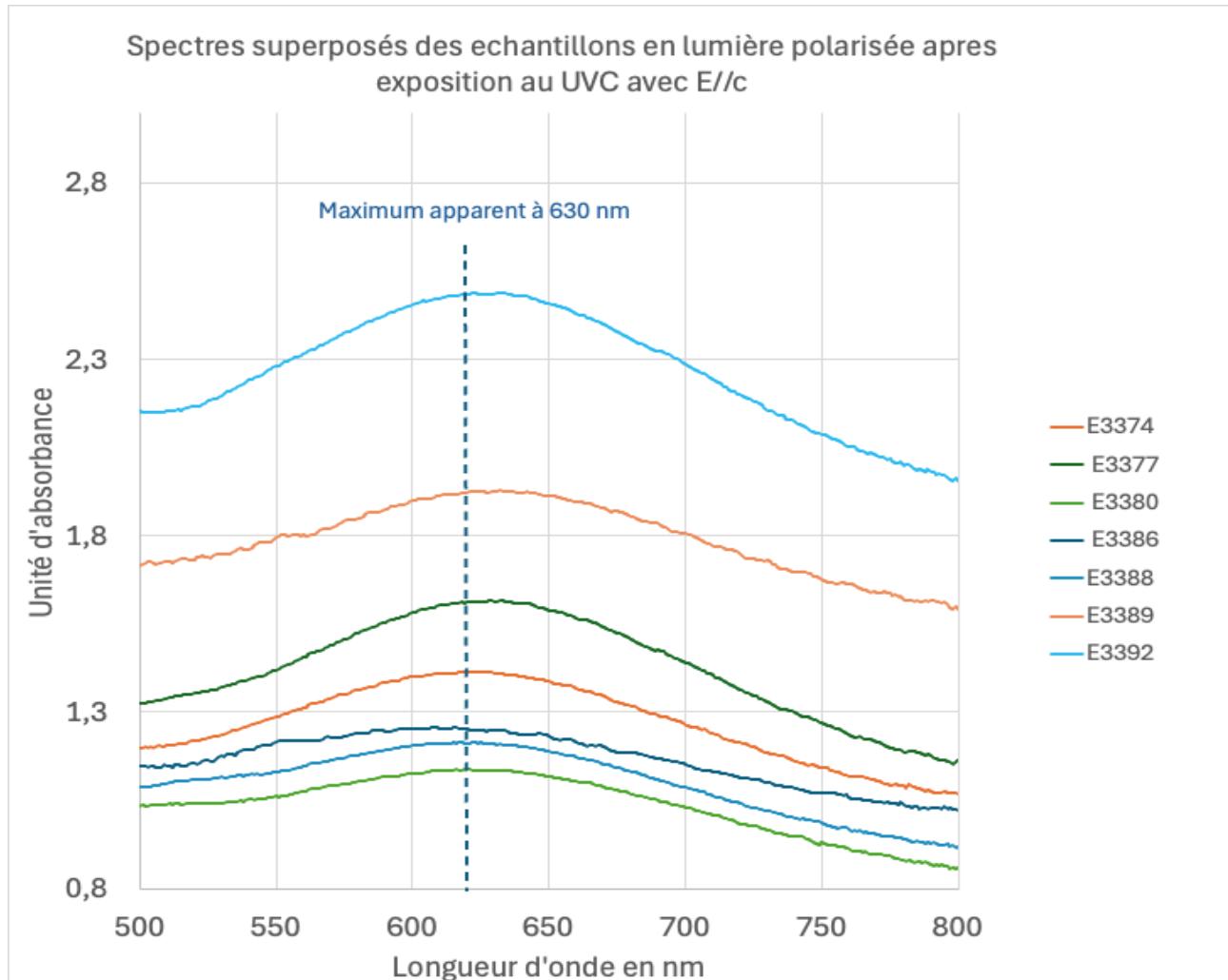


Figure 28 : Spectres d'absorptions superposés des différents échantillons après 3 min d'exposition aux UVC. E orientée parallèlement à l'axe c des échantillons, donc dans la direction bleue.

Nous constatons une large bande d'absorption entre 570 et 670 nm avec un maximum apparent à 610 nm, correspondant à la couleur bleue du pléochroïsme de la pierre.

Les artefacts de luminescence sont toujours visibles également.

Si nous isolons les deux courbes de notre échantillon de référence E3377 voici ce que nous obtenons une fois qu'elles sont superposées (figure 29)

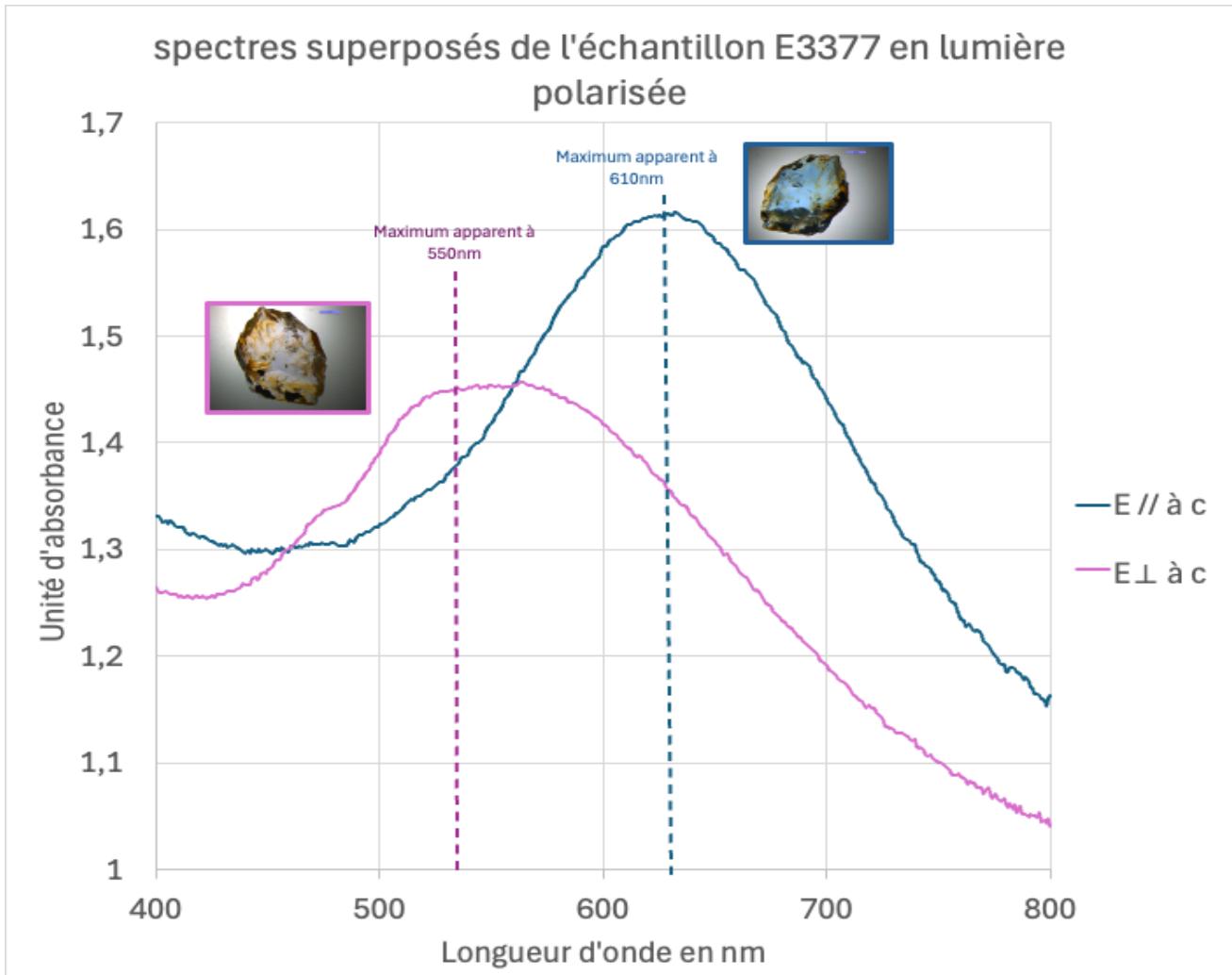


Figure 29 : Superposition des spectres d'absorption UV-Vis polarisés de l'échantillon E3377

Nous constatons bien une absorption avec une zone maximale aux alentours de 550 nm lorsque le polariseur est en position perpendiculaire à l'axe c et une absorption avec une zone maximale aux alentours des 620- 630 nm lorsque le polariseur est en position parallèle à l'axe c. En position horizontale à 550 nm la gemme absorbe dans le vert et le jaune c'est pour cela que la pierre paraît pourpre (elle laisse passer le rouge et le bleu-violet). En position verticale à 620-630 nm la gemme absorbe dans le rouge, elle nous apparaît donc plus bleue.

Pour comparer tous les spectres nous avons superposé les deux spectres polarisés et le spectre non polarisé dans le graphique (figure 30) ci-après :

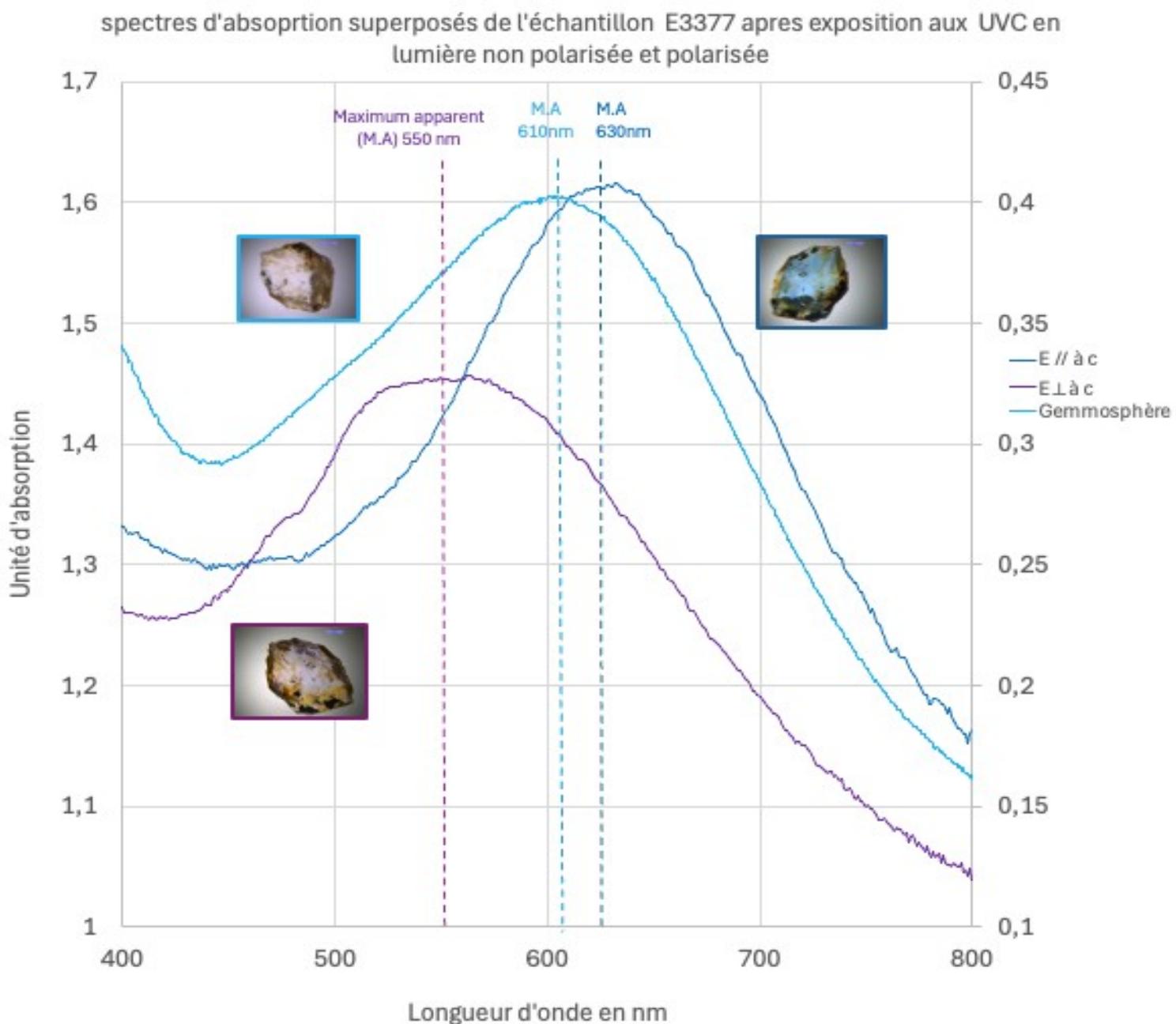


Figure 30 : Superposition des différents spectres non orienté et orientés de l'échantillon E3377

Le spectre non polarisé représente une combinaison des spectres polarisés. Les deux courbes correspondent à la somme des spectres dans les deux orientations de l'axe c (parallèle et perpendiculaire à E). Ceci explique la largeur de la bande d'absorption de la gemme mesurée en mode « non polarisé ».

Ces résultats constituent une contribution originale, dans la mesure où les spectres polarisés d'absorption UV-Visible des scapolites photochromes ne sont disponibles dans aucune publication, pas plus que la description de leur pléochroïsme.

A quoi correspondent ces absorptions ? La scapolite possède une structure assez semblable à celle de la sodalite, très étudiée. Comme mentionné plus haut, on y trouve des cages contenant le groupement Na_4Cl (Blumentritt, 2021). Dans la sodalite, ce groupement absorbe la lumière visible si le chlore est absent, c'est à dire si l'on a une lacune de chlore Cl^- .

Le photochromisme de l'hackmanite est probablement dû à un électron allant et venant de la lacune de chlore à un site non encore déterminé (Blumentritt et Fritsch, 2021), sous l'effet du rayonnement visible ou ultraviolet.

On peut donc penser par analogie qu'un phénomène semblable est à l'œuvre dans la scapolite : une lacune de chlore dans laquelle un électron va et vient sous l'effet du rayonnement UV, causant le photochromisme

IV. La spectrofluorimétrie

La luminescence des scapolites

Tous nos échantillons, en plus de leur propriété photochrome ont également une propriété de photoluminescence, ils luminescent jaune-orange lorsqu'ils sont exposés à une lumière ultraviolette (figure 31). Cet aspect du groupe des scapolites est bien connu et bien documenté. En effet, la luminescence jaune-orange du groupe des scapolites a été définitivement liée aux activateurs (S_2^-). Ces activateurs sont piégés dans des cages carrées $[Na_4]$ au sein de la structure de la scapolite (Blumentritt et al., 2020).

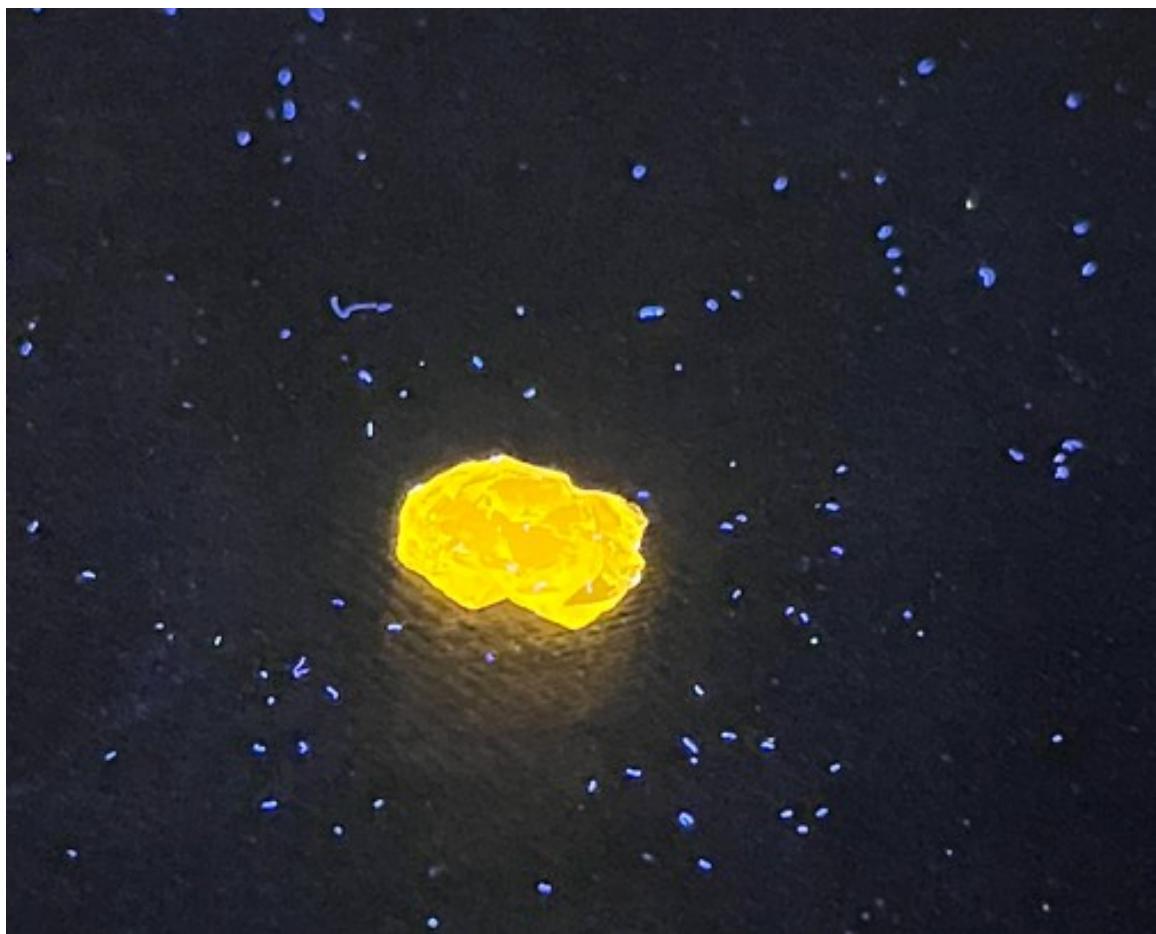


Figure 31 : luminescence de l'échantillon E3377 sous UVC

Pour l'échantillon de référence, nous avons gardé l'échantillon E3377 qui est représentatif du lot étudié. (Figure 32)

E3377 FLUORIMÈTRE

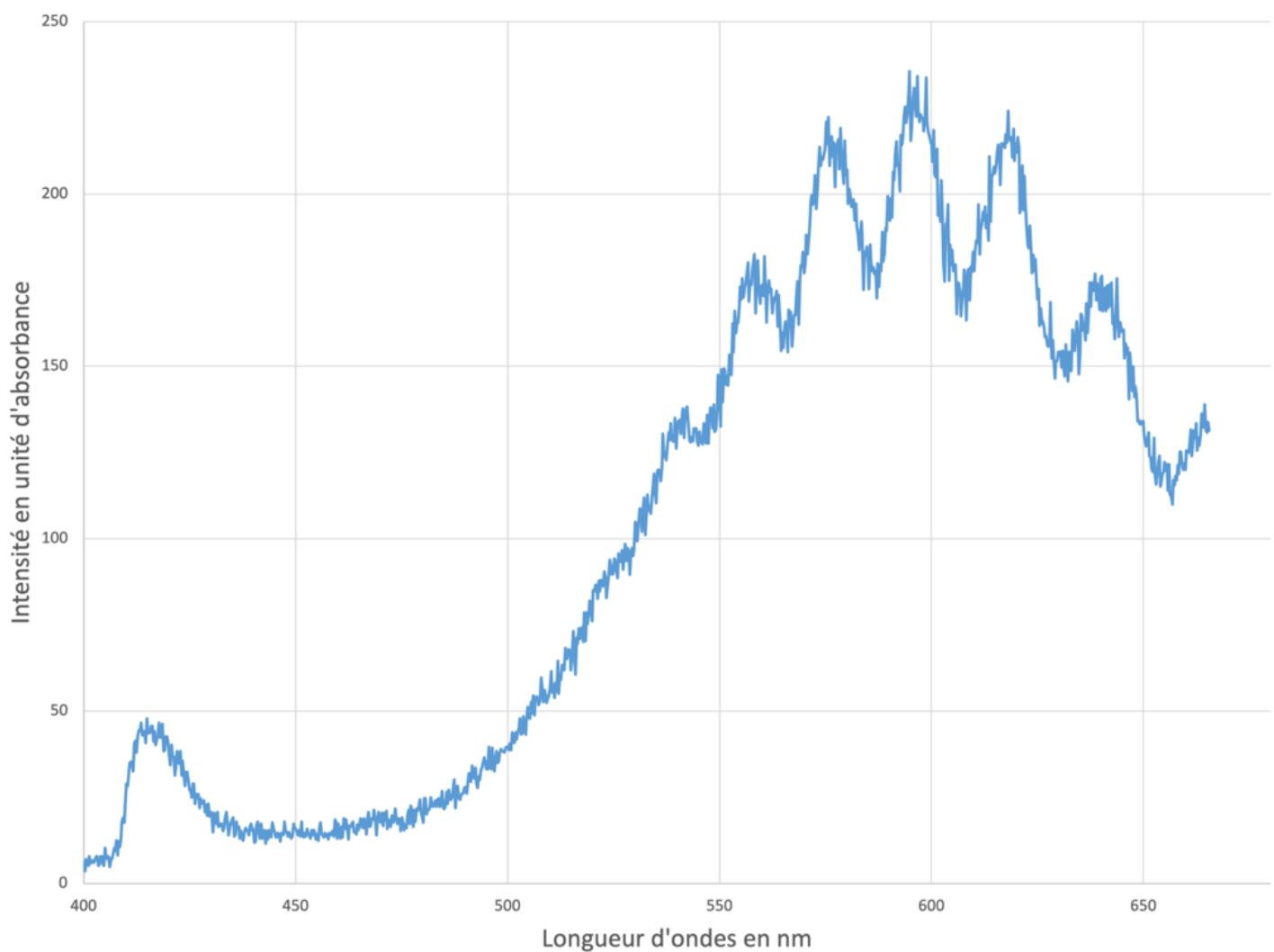


Figure 32 : Spectre d'émission de l'échantillon E3377 avec un maximum dans le jaune orange

Le pic principal aux alentours des 600 nm correspond bien à une luminescence orange que l'on retrouve dans tous nos échantillons, les vaguelettes que l'on observe dans le spectre sont causées par la structure vibronique bien connue de cette émission.

Nous observons également une petite émission dans le violet avec maximum apparent vers 420 nm peut être liée à des défauts intrinsèques de la scapolite et qui ressemble à l'émission bleue que l'on peut trouver dans la sodalite (Blumentritt et al., 2021).

V. DISCUSSION

Une question essentielle s'est rapidement imposée au cours de cette étude : quelle est l'origine exacte de la photochromie observée dans ces scapolites ? En nous appuyant sur la littérature, il semble raisonnable de supposer qu'il s'agit du même centre coloré observé sous deux orientations différentes. Le parallèle avec la sodalite hackmanite s'impose naturellement et suggère l'implication d'une lacune de chlore. Le changement de couleur pourrait alors résulter du comportement d'un électron passant de cette lacune à un autre site du réseau cristallin sous l'effet du rayonnement ultraviolet. L'absorption observée dans la zone orange-rouge qui donne visuellement la teinte bleue correspondrait à un transfert électronique entre un donneur et cette lacune de chlore (Blumentritt, 2022).

En ce qui concerne les scapolites irradiées, l'expérience montre que l'irradiation d'une scapolite incolore produit un effet très limité. Les tests gemmologiques n'ont révélé qu'une différence notable : une légère intensification de la photochromie, ce qui pourrait indiquer que la pierre avait déjà subi une irradiation préalable.

L'aspect général de la gemme n'est pas significativement modifié par ce traitement : la couleur peut sembler un peu plus brune que celle des spécimens naturels, mais la différence n'est réellement perceptible qu'à l'échelle d'un lot entier (Allen et al., 2014).

Cette observation conforte l'idée que la scapolite et plus particulièrement sa variété marialite réagit à la fois à la présence d'une lacune de chlore et à l'énergie apportée par le rayonnement UV, dans un mécanisme comparable à celui mis en évidence pour la hackmanite.

VI. CONCLUSION

Au terme de cette étude, nous avons pu confirmer que les scapolites photochromes présentent bel et bien un pléochroïsme, conformément à leur structure quadratique et donc anisotrope. Ce comportement, jusqu'alors non décrit dans la littérature, constitue une observation nouvelle qui mérite d'être soulignée.

Nos analyses ont démontré que seules les scapolites de type marialite présentent cette propriété photochrome. Les spectres d'absorption UV-Visible obtenus en lumière non polarisée concordent avec les données déjà publiées, mais notre travail a permis d'y ajouter une contribution originale : la mise en évidence du comportement différencié en lumière polarisée.

Nous avons ainsi pu mesurer, pour la première fois, deux bandes d'absorption distinctes correspondant aux deux couleurs du pléochroïsme :

- une bande large centrée vers 610 à 630 nm, à l'origine de la teinte bleue lorsque le vecteur électrique E est parallèle à l'axe c ;
- une bande centrée vers 550 nm, responsable de la teinte pourpre lorsque E est perpendiculaire à cet axe.

Ce phénomène s'expliquerait par un transfert électronique entre une lacune de chlore et un site donneur, sous l'effet du rayonnement ultraviolet, selon un mécanisme analogue à celui observé dans la sodalite hackmanite.

En définitive, cette étude met en lumière la complexité et la richesse d'un minéral souvent sous-estimé. La marialite photochrome d'Afghanistan s'impose ici comme un exemple remarquable d'interaction entre structure cristalline, défauts du réseau et comportement optique.

VII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abreal, A. (2018). *Les grenats : nature, structure et propriétés*. *Journal of Personal Mineralogist*, 11, 151–227.
- Allen, T., Renfro, N., & Nelson, D. (2014). Tenebrescent irradiated scapolite. *Gems & Gemology*, 50(1), 91–92.
- Blumentritt, F. (2021). *Matériaux à propriétés ciblées par minéralomimétisme : le photochromisme de la sodalite et de la scapolite* [Thèse de doctorat, Université de Nantes].
- Blumentritt, F., & Fritsch, E. (2021). Photochromism and photochromic gems: A review and some new data. *The Journal of Gemmology*, 37(8), 780–800. <https://doi.org/10.15506/JoG.2021.37.8.780>
- Blumentritt, F., Latouche, C., Morizet, Y., Caldes, M.-T., Jobic, S., & Fritsch, E. (2020). Unravelling the origin of the yellow-orange luminescence in natural and synthetic scapolites. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 11, 4591–4596. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.0c00712>
- Blumentritt, F., Vigier, M., & Fritsch, E. (2021). Blue persistent luminescence (phosphorescence) of sodalite. *The Journal of Gemmology*, 37(6), 571–573. <https://doi.org/10.15506/JoG.2021.37.6.571>
- Bour, I. (2019). *Les solutions solides*. Récupéré sur <https://ivanbour.wordpress.com>
- Culka, A., & Jehlička, J. (2019). A database of Raman spectra of precious gemstones and minerals used as cut gems obtained using a portable sequentially shifted excitation Raman spectrometer. *Journal of Raman Spectroscopy*, 50, 262–280. <https://doi.org/10.1002/jrs.5504>
- Dunn, P. J., Perrault, G., & Ramik, R. A. (1978). Chemical composition of scapolites. *The Canadian Mineralogist*, 16(1), 15–22.
- Gorobets, B., & Rogojine, A. (2002). *Luminescence spectra and properties of minerals*. Springer.
- Liguerrri, L., Komiha, N., Fabian, J., & Rosmus, P. (2008). Electronic states of the ultramarine chromophore S_3^- . *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 222(1), 163–176. <https://doi.org/10.1524/zpch.2008.222.1.163>
- Marfunin, A. S. (1979). *Spectroscopy, luminescence, and radiation centers in minerals*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67112-8>
- McClure, S. F., Rossman, G. R., & Shigley, J. E. (2005). Tenebrescent scapolite from Afghanistan. *Gems & Gemology*, 41(4), 269–270.

Milisenda, C. C. (2015). Non-polarized UV-visible absorption spectra of scapolites. *The Journal of Gemmology*, 34(1), 45–52.

Pengyu, Y., Yi, Z., Bo, X., & Jiaqi, S. (2022). A study on the mineralogy and volatile fraction of scapolite from Mogok, Myanmar. *Crystals*, 12, 1779. <https://doi.org/10.3390/crust12121779>

Piard, J. (2013). Le photochromisme : définition et applications. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, 107(954), 549–559.

Pradat, T. (2012). Scapolite : de la marialite à la méionite. *Revue de l'Association Française de Gemmologie*, 181.

Shaw, D. M. (1960). Chemical index of scapolites and mineralogical composition. *American Mineralogist*, 45(4), 583–596.

Sidike, A., Aierken, A., & Zhang, L. (2008). S_2^- center in scapolite. *Physics and Chemistry of Minerals*, 35(2), 137–145. <https://doi.org/10.1007/s00269-007-0205-3>

Stockton, C. M., & Manson, D. V. (1985). A proposed new classification for gem-quality garnets. *Gems & Gemology*, 21(4), 205–218.

Superchi, M., Pezzotta, F., Gambini, E., & Castaman, E. (2010). Yellow scapolite from Ihosy, Madagascar. *Gems & Gemology*, 46(4), 274–279. <https://doi.org/10.5741/GEMS.46.4.274>