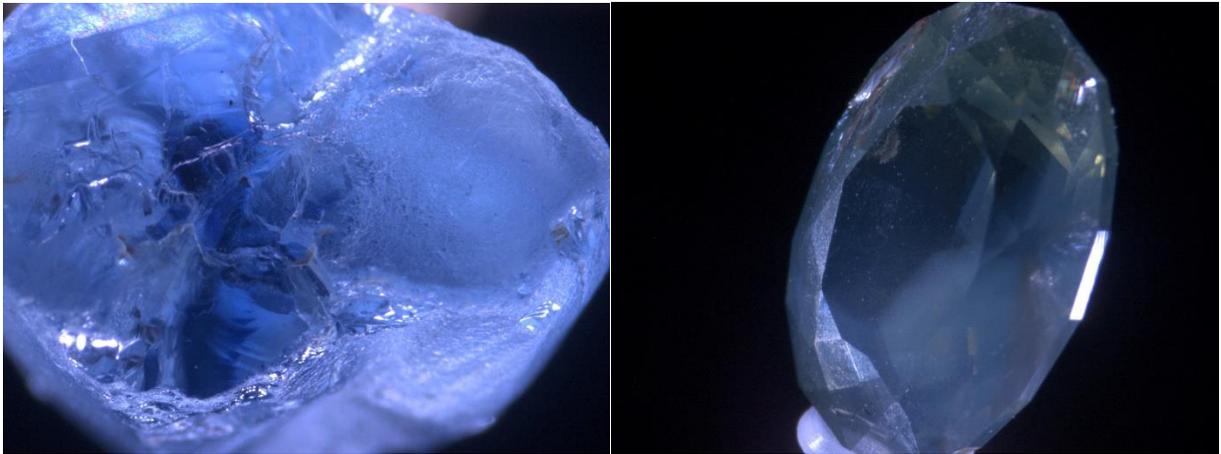


Saphirs de France, « nouveau » gisement en Livradois-Forez



Eric Blanc-Gonnet

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

Diplôme Universitaire de Gemmologie

2023

TABLE DES MATIÈRES

Partie 1 : Introduction.	4
A. Préambule.	4
B. Historique.	6
C. Géographie.	7
C. Géologie.....	7
D. Gisements des saphirs d’Auvergne	10
Partie 2 : Généralité : La magnifique famille du corindon	13
A. Étymologie et mythologie	13
B. Caractéristiques gemmologiques.	15
2-1 : Système cristallin et structure cristallographique	16
2-2 : Propriétés physiques.....	17
2-3 Propriétés optiques.....	17
Partie 3. Gîtologie du saphir à travers le monde.....	18
4-1 Les gisements primaires	18
4-2 Les gisements secondaires	19
4-3 Les gisements célèbres	19
Quelques saphirs historiques.....	24
Musée Crozatier du Puy-en-Velay.....	25
Le musée gallo-romain de Lyon	30
Le musée du Louvre (Paris)	30
Partie 4 : Etude gemmologique	34
A. Provenance des échantillons.....	34
B. Présentation des outils d’analyse.....	42
B. Résultats	44
Analyse Raman	44
Fluorescence, photoluminescence	49
Absorption optique VIS-IR.....	50
FTIR	52
XRF.....	53
Interprétations.....	56
Conclusions.....	57
Références Bibliographiques.....	57
Annexes	59

A. PRÉAMBULE.

Cette étude nous permet d'appréhender des saphirs d'un gisement non étudié à ce jour, faisant partie intégrante de la Basse Auvergne. Cette partie géographique ne mentionne pas jusqu'à présent de gisement spécifique avec un intérêt au potentiel élevé.

Dans sa publication de 1910, Ferdinand Gonnard sur les gisements du Velay et de la Basse Auvergne, je le cite, « dans les départements du Puy de Dôme les indications de gisements gemmifères sont peu nombreux nombreuses, et n'ont d'intérêt que les rapports qu'elles peuvent avoir avec celles concernant le département de la Haute-Loire, et peut-être, leur communauté, quant à l'origine des plus importantes de ces gemmes, le corindon et le zircon ». Il semble que les dernières études tendent à nous orienter vers de nouvelles perspectives plus réjouissantes quant à leur présence en Basse Auvergne. Nous allons nous référer aux travaux d'Eloise Gaillou (2003) et une autre étude gemmologique sur le saphir d'Auvergne/Issoire (auteur inconnu).

Ce gisement est de type alluvionnaire, nous allons donc pouvoir également nous référer aux travaux d'Eloise Gaillou (2003) qui a étudié :

- Les saphirs du Dôme de Menoyre
- Les saphirs du Mont Coupet
- Les saphirs alluvionnaires du Sioulot

Celle-ci a particulièrement mis en évidence des inclusions vitreuses dans les saphirs

Tableau. Résultats d'analyse en éléments traces de saphirs d'Auvergne (Gaillou, 2003)

	Sioulot		Coupet		Menoyre	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Fe	6253,488	1651,579	2736,133	970,4905	6896,7	1467,293
Cr	313,2438	140,5495	76,2	131,9823	0	0
Mg	116,0375	39,4503	31,75	18,37505	5,925	2,162753
Ga	91,34063	21,69315	120,7333	23,57606	229,225	95,99175
Ti	69,625	51,45523	21,73333	6,261257	14,275	5,386016
V	59,21875	20,57018	30,13333	14,09054	14,05	21,84346

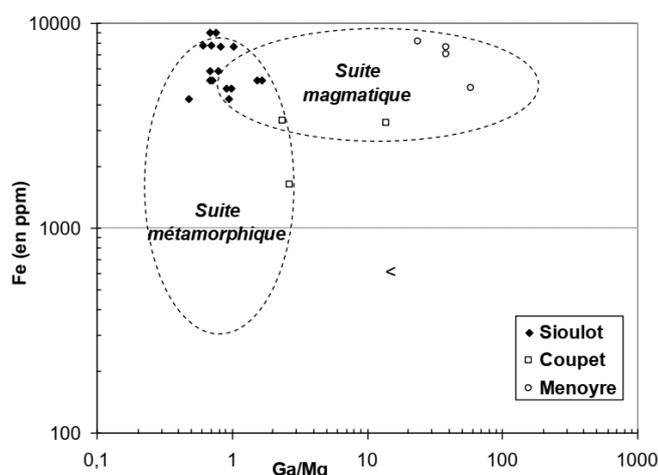


Figure 1 : Diagramme Ga/Mg vs Fe (en ppm) des saphirs du Sioulot, du Mont Coupet, et du Dôme de Menoyre (Gaillou, 2003).



Figures 1 : Gisement du Dôme de Menovre ; a : saphir BD ; b : saphir F2DLR ; saphir EM.
 Figures 2 : Gisement du Mont Coupet ; a : saphir taillé collection Bayle ; b : saphir brut, collection Bayle ; c : saphir brut, collection Gerbier ; d : zircon, collection Sdéi.
 Figures 3 : Gisement du Sioulot ; a : saphir brut ; b : saphir brut ; c : extrait d'une bâtee.

Figure 2 : Saphirs étudiés par Gaillou (2003).

Le ruisseau du Sioulot prend sa source dans le massif de l'Aiguiller (Mont Dore, Puy de Dôme). Il draine principalement des **formations volcaniques**. Les sapphirs d'une couleur verte à un bleu profond, sont

généralement très limpides, certains montrent un aspect blanchâtre et laiteux. On constate dans ce gisement que le chrome (élément trace) est présent en grande quantité (jusqu'à 570 ppm), c'est un élément important. Les saphirs présentant des morphologies particulièrement nettes, avec peu d'évidence de corrosion magmatique, on peut supposer qu'ils soient arrivés jusqu'en surface dans une lave de composition proche de celle de leur roche mère. D'autre part, ils montrent également très peu de signes d'abrasion par transport, et il paraît difficile d'admettre qu'ils aient subi un transport important, voire même été extraits par l'érosion d'une roche massive. L'hypothèse, déjà envisagée par J. Rochault (2002), que les saphirs soient des xénocristaux de produits de projection est ici reprise. En conclusion l'hypothèse d'une **origine magmatique** paraît très solide.

Dans la seconde étude, on indique un prélèvement au tamis dans une rivière autour de la ville d'Issoire sans plus de précisions.

Dans cette étude, nous retrouvons l'aspect laiteux dans certains échantillons, leur couleur est bleue à verte.

La revue de l'AFG publiée dans sa revue du 09.2005 un constat, les résultats montrent que les saphirs bleus d'origine magmatique (roche hôte basalte alcalin) ont des concentrations en fer plus élevées que celles de saphirs d'origine métamorphique.

Nous allons donc à travers nos différentes analyses découvrir ce que nous apporte ce « nouveau » gisement en rapport à ceux déjà cités, le Sioulot et une rivière autour d'Issoire (Limagne).

B. HISTORIQUE.

Nous nous situons donc en Auvergne, et plus particulièrement dans le périmètre du parc naturel régional du Livradois-Forez, qui est à cheval sur 3 départements, Le Puy-de-Dôme, la Loire et la Haute-Loire. Il s'étend sur une superficie d'environ 321 km², créée le 4 février 1986.

L'actuelle région Auvergne ne se limite pas à l'ancienne province historique, qui correspondait alors aux autres départements du Cantal (15) du Puy-de-Dôme (63) et à l'arrondissement de Brioude dans la Haute-Loire (43). Aujourd'hui la région Auvergne comprend aussi le sud du Velay (c'est-à-dire le reste de la Haute-Loire autrefois dans la province du Languedoc) et au nord le département de l'Allier (03) autrefois province du Bourbonnais.

L'Auvergne et le Bourbonnais sont rattachés à la couronne de France depuis 1531, le Velay avec le Languedoc depuis 1271.

C. GÉOGRAPHIE

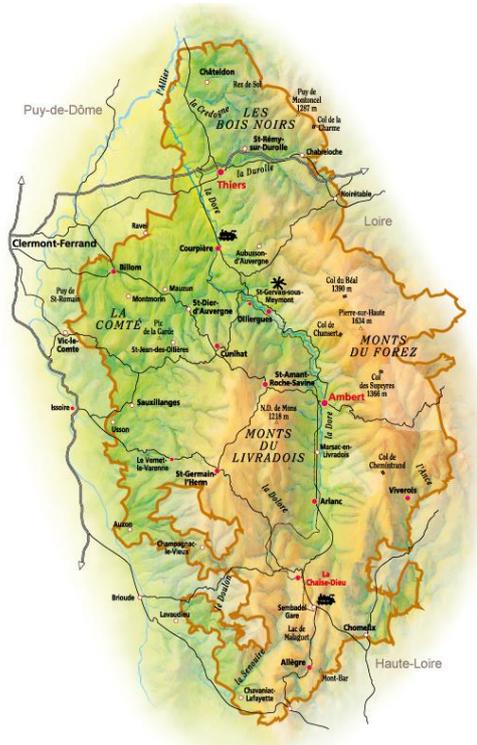


Figure 3 : Les 15 pays d'Auvergne et les 4 pays du Bourbonnais et du Velay et le parc régional du Livradois-Forez

Le Livradois-Forez partie intégrante du Massif-Central se compose de cinq entités géographiques d'est en ouest :

- Le bassin du Forez – Les monts du Forez – Le bassin d'Ambert
- Le massif du Livradois – La bordure orientale de la Limagne, La Comté.

Cet ensemble couvre environ 4000 km², s'étend entre la rivière Allier et les bassins d'Issoire et de Brioude à l'ouest, le fleuve Loire à l'est, la Montagne Bourbonnaise au nord et les confins du plateau de la Chaise-Dieu au sud.

C. GÉOLOGIE

L'Auvergne offre une grande diversité géologique issue d'une histoire longue et complexe sur plus de 400 millions d'années (Ma). Les 15 derniers millions d'années de cette histoire sont marqués par la mise en place progressive des édifices volcaniques dans le Velay, le Cantal, l'Aubrac, le Cézallier, les Monts-Dore et Sancy, et la chaîne des Puys. Un volcanisme de moindre importance ou plus dispersé voit également le jour dans le Forez, la vallée de la Sioule, les Limagne et la Comté.

Le massif du Livradois-Forez n'est qu'une étape d'une histoire géologique très longue qui démarre, il y a environ 400 millions d'années, il fait partie de la montagne hercynienne. Né de la collision entre deux supercontinents, le Gondwana au sud et la Laurasia au nord, cette chaîne de montagne culmina vraisemblablement à des altitudes similaires à celles de l'Himalaya actuel, elle s'étendait alors sur près de 6000 km² des Appalaches à la Sibérie. Dans son ouvrage H. Cubizolle (2021) nous dépeint l'histoire géologique de ce massif.

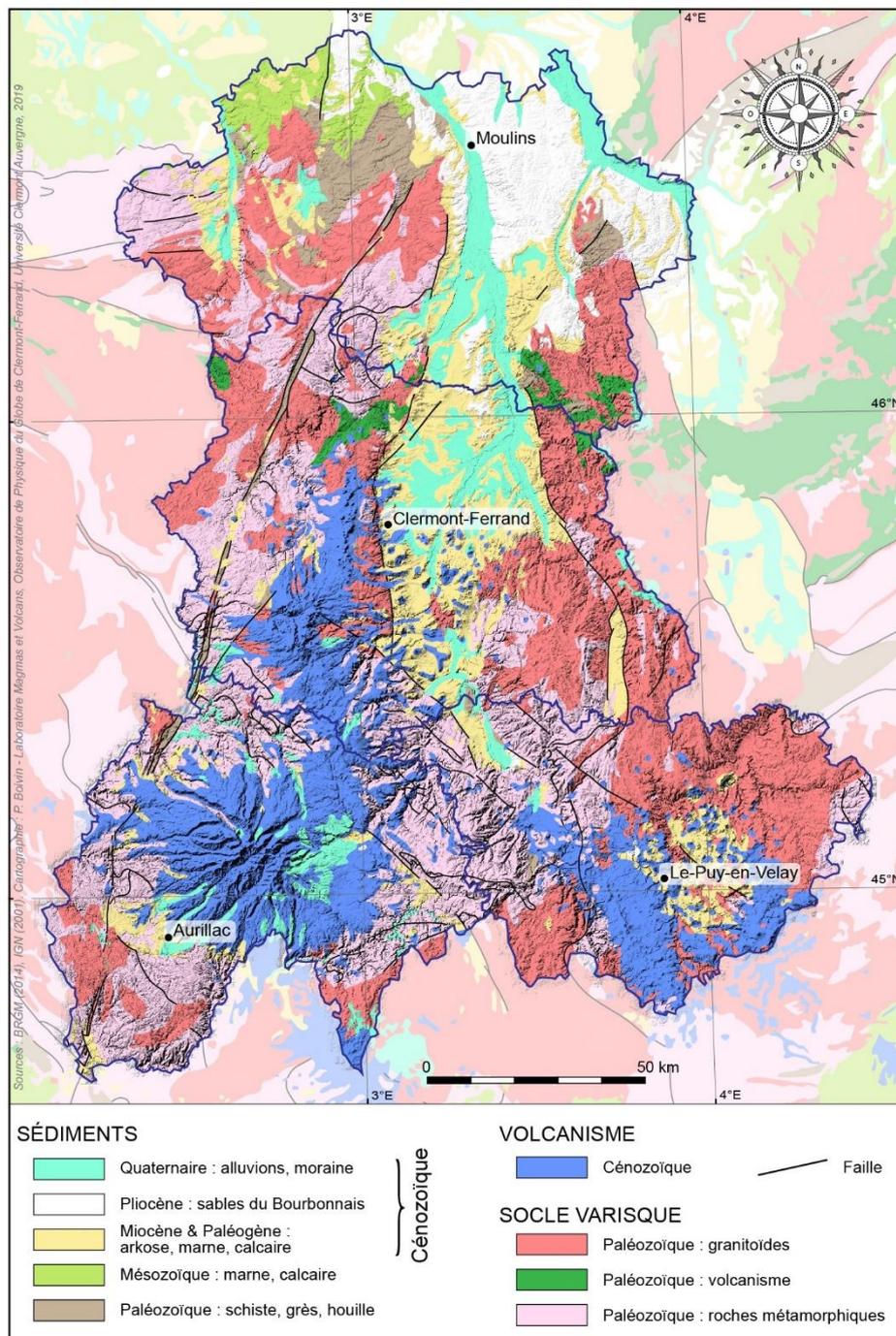


Figure 4 : Carte géologique de l'Auvergne.

Les roches plutoniques et métamorphiques y sont très largement dominantes, il faut bien entendu y ajouter les roches volcaniques, même si moins nombreuses à celles d'autres régions du Massif-Central. Une grande partie de ce massif se compose de masses granitiques :

- Les roches plutoniques, sont composées principalement de quartz, de feldspaths alcalins comme l'orthose, et des feldspaths plagioclases. Les granites proviennent de la fonte partielle de la croûte terrestre continentale, dans le cas du Livradois-Forez, les granites sont intrusifs dans les autres roches de la croûte terrestre au sein de laquelle ils se solidifient et refroidissent.
- Les roches métamorphiques, ont subi des transformations physico-chimiques lors de leur enfouissement ou de leur exhumation sous l'effet des changements de pression et de température, les plus répandues en Livradois-Forez sont :
 - Les gneiss, qui dérivent soit des granites, soit de roches sédimentaires.
 - Les migmatites, qui proviennent d'une fusion partielle de la croûte terrestre.
 - Les micaschistes, dont les protolithes sont des argiles ou des pélites.
 - Les cornéennes, qui caractérisent le métamorphisme de contact.
- Les roches volcaniques, sont classées en fonction de leur composition chimique. Une roche volcanique fait partie d'une série magmatique, c'est-à-dire un ensemble de roches ayant une même origine et s'étant formé au cours d'une même période grâce à une évolution chimique continue du magma. La roche volcanique la plus connue et la plus courante est le basalte qui constitue 95 % des laves des domaines continentaux et océaniques.

Il existe 2 grandes familles de basalte :

- Les basaltes assez riches en silice, le plus souvent sans olivine,
- Les basaltes alcalins (ou à olivine).

Ces derniers sont de très loin, les roches volcaniques les plus fréquentes en Livradois-Forez.

D. GISEMENTS DES SAPHIRS D'AUVERGNE

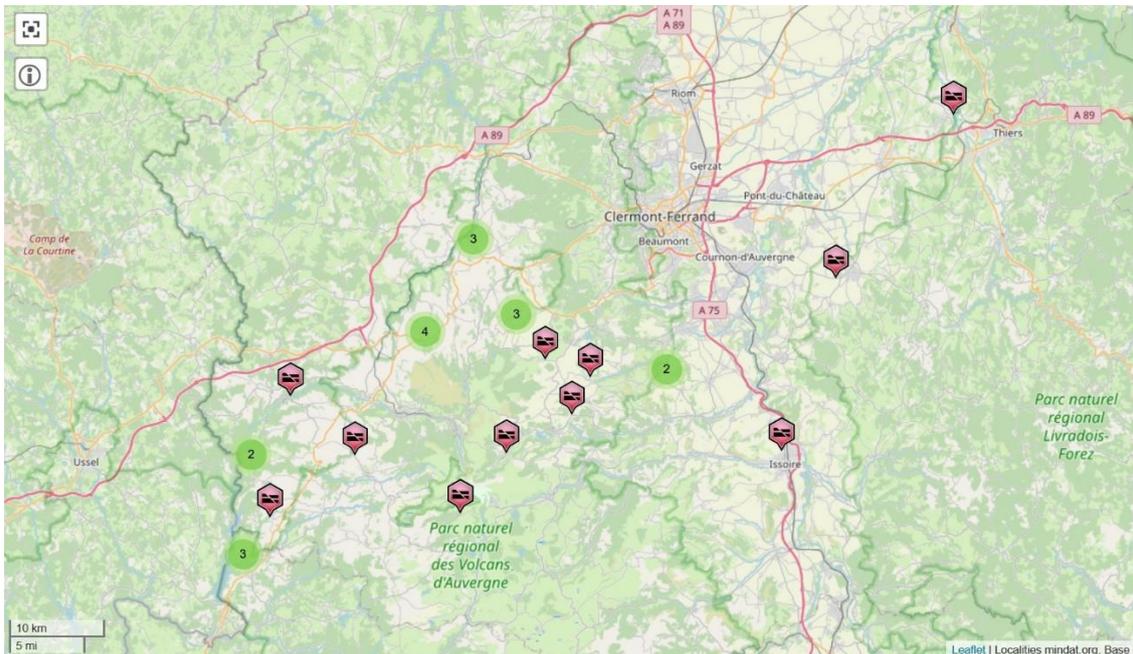


Figure 5 : Localisation des occurrences de saphirs en Auvergne (Source : Mindat).

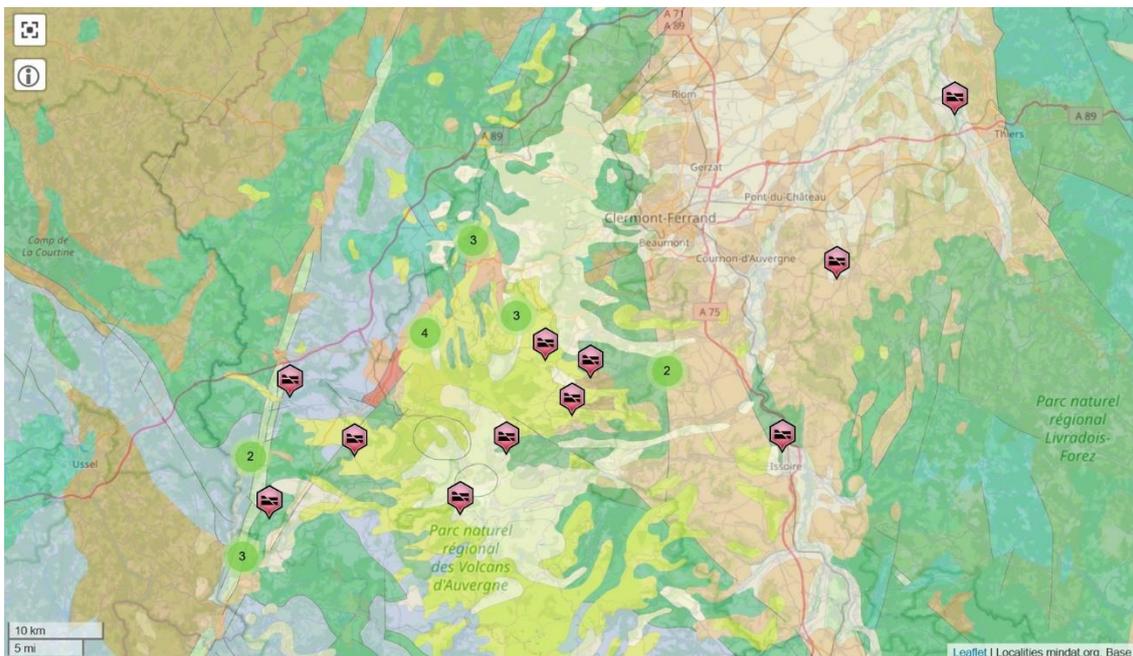


Figure 6 : Localisation des occurrences de saphirs en Auvergne sur carte géologique (Source : Mindat)

Les occurrences de saphirs en Auvergne (Source : Mindat)

Ces occurrences sont principalement données par François Périnet et Gonnard (1910)...

Nous mentionnons les gisements cités et dans cette étude et de type alluvionnaire :

- Le gisement alluvionnaire du ruisseau Sioulot (63)
 - Le gisement alluvionnaire du ruisseau Boulade (63)
 - Le gisement alluvionnaire du ruisseau Rioupéroux (63)
 - Le gisement alluvionnaire du ruisseau l'Ailloux (63)
- **Le gisement du ruisseau Sioulot** : petit ruisseau du Massif Central au sud-ouest de la chaîne des Puys, dans le département du Puy de Dôme, est un affluent gauche de la Sioule, donc un affluent de la Loire par l'Allier. Il prend sa source au-dessus du lac de Servières (lac de cratère circulaire) dans la forêt domaniale de Guéry, à l'Est du Puy de l'Ouires (1505m), à 1410m d'altitude, sur la commune d'Orcival.
 - **Le gisement du ruisseau Boulade** : très petit ruisseau qui prend sa source près de Pardines dans la proche ville d'Issoire (à priori à la base de la deuxième étude).
 - **Le gisement du ruisseau Rioupéroux** : petit ruisseau qui prend sa source près de Jollère, est un affluent de la Miouze. Celle-ci est un des principaux affluents de la Sioule, elle née sous les pentes de la Banne d'Ordanche, sommet volcanique sous forme de cratère en forme de neck.
 - **Le gisement de l'Ailloux** : non notifié dans les occurrences de saphirs en Auvergne, il fera l'objet d'un développement spécifique au cours de cette étude.

Bien entendu nous nous devons de dire quelques mots sur le plus célèbre des gisements de la région, celui du **Riou Pezzouliou** qui surgit au pied du Mont Croustet, un petit volcan situé au sud-ouest du Puy-en-Velay, en Haute-Loire à 892 mètres d'altitude.



Figure 7 : Rivière de France, compte produire une centaine de bijoux par an avec des saphirs d'Auvergne, pierres 100% naturelles. (Crédits : DR Rivière de France) Provenance de la rivière l'Ailloux

Les Saphirs du Riou Pezzouliou vus par William Péraud



Figure 8: Les saphirs du Riou Pezzouliou et leurs variétés de couleur (De Ascençao Guedes, 2010).

A. ÉTYMOLOGIE ET MYTHOLOGIE

Le corindon est une famille de gemmes qui regroupent les appellations communes de saphir, saphirs de couleur et rubis. L'espèce a été décrite par le minéralogiste John Woodward en 1725, qui l'appelle « *corinvindum* ». Le mot vient du nom hindi du minéral, *kurund*, dérivé du sanscrit *kuruvinda*, lui-même dérivé sans doute du mot tamoul *kuruntam*, signifiant « rubis », quant au saphir il est issu du grec ancien « *saphirus* » c'est-à-dire « pierre précieuse ».

Le corindon, saphir et rubis, font partie des pierres précieuses que l'on a utilisé le plus anciennement. Dans la ville fameuse de Ratnapoura au sud-ouest de Colombo capitale du Sri-Lanka, l'extraction du saphir est plusieurs fois millénaire. Les documents écrits les plus anciens concernant l'extraction des rubis datent du VI^{ème} siècle et traitent des mines de Mogok en Haute Birmanie.

Au Moyen-Âge on taillait les pierres en cabochons, car les connaissances techniques du polissage et du facettage n'étaient pas très étendues et d'autre part, et parce qu'on voulait valoriser la plus grande partie possible de la pierre.

La couronne du saint Venceslas, roi de bohême (1346) porte des saphirs et un rubis en cabochons. Ce rubis est le plus grand rubis serti dans un bijou que l'on connaisse. Sa forme est irrégulière, il pèse 250 carats. Les plus importantes collections de grands saphirs et rubis sont celles des princes indiens et du shah d'Iran.



Figure 9 : La Couronne de Saint Venceslas.

Son usage et son commerce sont très anciens, ainsi des pierres provenant du Sri Lanka étaient déjà utilisées par les grecs et les romains au Ve siècle avant notre ère.

Comme c'est le cas pour toutes les pierres gemmes les plus célèbres, le saphir bleu est présent dans bien des récits mythologiques

- Les Égyptiens vénéraient cette pierre comme étant la gemme sacrée « de la vérité et de la justice.
- Les Perses croyaient que le bleu du ciel était dû aux reflets du saphir.
- Il est le symbole de la pureté pour l'Église catholique et les cardinaux portaient à la main droite « celle qui bénit » une bague ornée d'un saphir.
- Le plus gros saphir jamais découvert, le Millénium Sapphire, pèse près de 13 kg. Taillé par l'artiste italien Alessio Boschi, il rend hommage au génie humain et inclut plus de 134 sujets de personnalités.
- Le plus gros saphir étoilé, le Star of India (536 cts) fait la taille d'une balle de golf et à la particularité de présenter une étoile sur ses deux faces.



Figure 10 : Figure gauche : Millénium Sapphire, 13 kg. ; droite : saphir étoilé, le Star of India, 536 carats.

- La pierre la plus ancienne des bijoux de la couronne britannique est le saphir d'Edouard le confesseur, qu'il portait à son couronnement en 1043, et qui a depuis été sertie sur la couronne impériale portée par de nombreux souverains britanniques.
- La plus célèbre des bagues de fiançailles est le saphir de Ceylan de 12 cts qui appartenait originellement à la princesse Diana, aujourd'hui portée par Kate Middleton, Duchesse de Cambridge.



Figure 11 : la plus célèbre des bagues de fiançailles est le saphir de Ceylan de 12 carats qui appartenait à la princesse Diana.



Figure 12 : Couronne impériale britannique avec notamment le saphir d'Edouard le confesseur et le saphir des Stewart, qui appartenait à la maison royale d'Ecosse.

B. CARACTÉRISTIQUES GEMMOLOGIQUES.

Le saphir peut présenter différentes couleurs, à l'exception du rouge qui est réservé au rubis chromifère.

Toutefois, le saphir au sens strict est bleu (la couleur la plus recherchée étant le bleu bleuet pur). Mais il peut prendre d'autres teintes et il convient alors de lui adjoindre un qualificatif :

- Le saphir incolore, appelé aussi « leucosaphir »
- Le saphir rose- orangé, appelé aussi « **padparadscha** » (fleur de lotus en cinghalais)
- Le saphir jaune, appelé aussi « topaze oriental »

- Le saphir vert, appelé aussi « péridot oriental »
- Le saphir violet
- Le saphir rose

Il existe deux facteurs concernant la couleur du corindon :

- La présence d'éléments traces, notamment les métaux de transition comme le Cr, Fe, Ti, V, Ga appelés éléments chromophores, qui se substituent aux ions Al^{3+} , dans le réseau cristallin du corindon sous la forme, Fe^{3+} , Fe^{2+} , Cr^{3+} , Ti^{3+} , Ti^{4+} .
- La présence d'inclusions minérales piégées durant la croissance, de nature contrastée, comme le rutile, la boehmite, le diaspore, le zircon, l'apatite.

C'est le fer et titane qui, en se substituant à l'aluminium (Al) donnent la couleur bleue au saphir : une teneur moindre en fer produit des saphirs jaunes et verts, le vanadium colore la gemme en violet. Le saphir est beaucoup plus répandu que le rubis, mais seuls les très beaux saphirs, dont la couleur rappelle l'encre bleue, avec une bonne transparence uniforme, sont rares. Des inclusions de rutile donnent à la pierre son éclat soyeux. Il peut présenter un phénomène d'astérisme, laissant apparaître une étoile lumineuse à six branches qui semble glissait à la surface de la pierre lorsqu'on fait tourner celle-ci. Le saphir, dit « étoilé », est alors façonné en cabochon, forme qui permet de bien voir ce phénomène optique particulier. Le saphir et le rubis existe aussi sous la forme trapiche, mot espagnol désignant une roue dentée utilisée pour broyer les minerais.

2-1 : SYSTÈME CRISTALLIN ET STRUCTURE CRISTALLOGRAPHIQUE

Le corindon appartient au système cristallin rhomboédrique, il présente plutôt des formes trapues (prismes et pyramides hexagonaux courts) pour le rubis, et des formes plus allongées pour le saphir (bipyramides hexagonales).

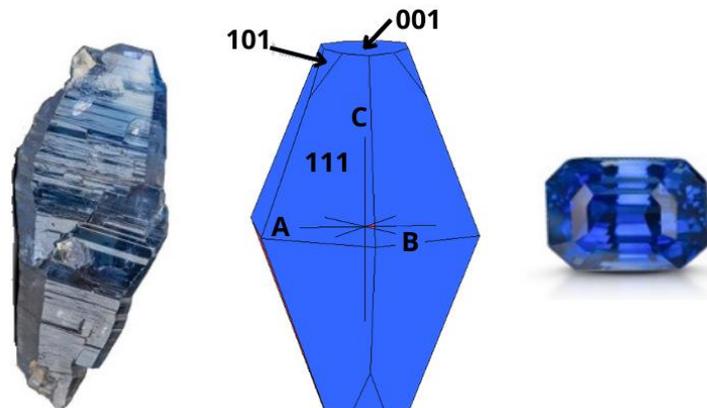


Figure 13 : corindon, système cristallin (indices de Miller), saphir facetté

Les corindons rubis et saphirs de couleurs font partie de la même famille minéralogique de formule Al_2O_3 (oxyde d'aluminium), leur coloration est allochromatique.

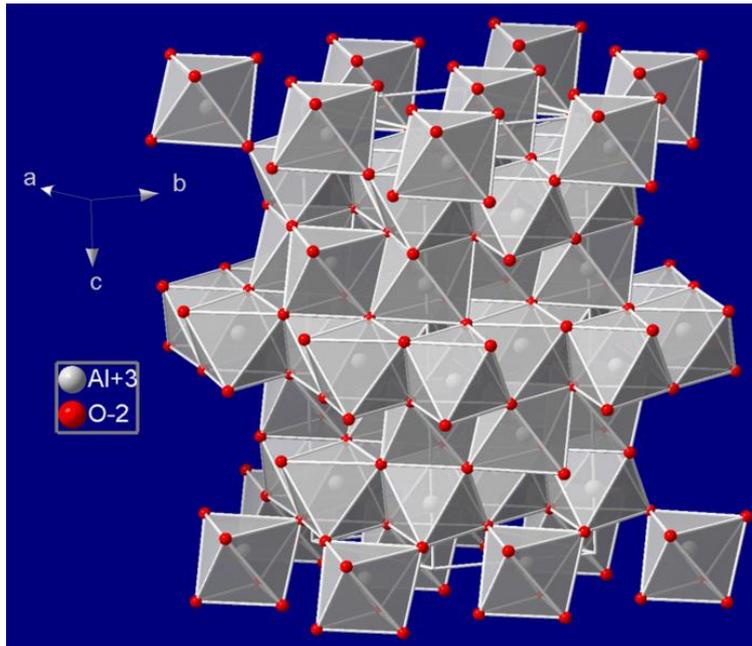


Figure 14 : formule chimique Al_2O_3 (oxyde d'aluminium) du corindon.

Chimiquement purs, les corindons sont incolores (leucosaphirs). Ce sont certains éléments métalliques (éléments chromogènes) tels que, le fer, titane, chrome, vanadium qui sont les causes de la couleur, on peut également citer le gallium et le magnésium. Plus il y aura de fer, plus la pierre sera foncée. Ces éléments chimiques chromogènes s'incorporent dans la structure cristallographique lors de leur formation et qui leur donnent leur couleur.

2-2 : PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Dureté : 9

Densité : 4 (variant de 3.8 à 4.06)

Clivage : nul

Cassure : légèrement conchoïdale

Résistance aux chocs et à la chaleur : bonne (Température fusion = 2050°C)

2-3 PROPRIÉTÉS OPTIQUES

Système cristallin : rhomboédrique

Caractère optique : uniaxe négatif **U-**

Indices de réfraction : n augmente en fonction de la concentration de fer

- n_p ou n_e = 1.757 à 1.770
- n_g ou n_o = 1.765 à 1.779

Biréfringence : 0.008 à -0.009

Dispersion : faible

Eclat : vitreux à subadamantin

Transparence : transparent à opaque

Dichroïsme :

Rubis : moyen à net (rouge à orange)

Saphir : net (bleu à gris vert)

Saphir de couleurs : faible à net suivant la couleur

PARTIE 3. GÎTOLOGIE DU SAPHIR À TRAVERS LE MONDE

Le corindon se forme principalement dans la zone de limite entre le manteau et la croûte terrestre. La profondeur varie en moyenne entre 20 et 60 km et atteint parfois même plus de 80 km. Son point de fusion se situe à 2050°.

Le corindon se crée au gré des mouvements de l'écorce terrestre. Ce sont les forces générées, pression et température qui permette au corindon de naître, mais uniquement à certaines conditions. Il faut en effet, dans un premier temps que la roche mère soit riche en silicium et aluminium, mais pas que. L'autre point important est la présence d'un élément de transition, c'est cet élément qui détermine la couleur d'un corindon. Une fois ces conditions réunies, du magma pauvre en silicium va peu à peu s'introduire dans la roche mère, permettant ainsi aux différents éléments de se combiner afin de donner naissance à du corindon.

C'est une gemme particulièrement résistante (9 sur l'échelle de relative Mohs), elle est d'ailleurs de ce fait très utile dans l'industrie, dans les secteurs de l'armée et l'aérospatial. Sa résistance mécanique, résistance à l'impact et à la corrosion, stabilité dimensionnelle, durabilité sous des pressions extrêmes et son excellente conductivité thermique, associé à une très haute résistance à la chaleur en font un matériau de pointe exceptionnel, (A Martin).

4-1 LES GISEMENTS PRIMAIRES

On considère deux environnements favorables à la formation des saphirs :

- Dans des ceintures **métamorphiques** de faciès amphibolite à granulite de moyenne pression où la lithologie favorable est riche en aluminium et / ou pauvre en silice.
- Associé au **volcanisme basaltique alcalin**, dans un environnement de rifting continental.

D'un milieu magmatique (basaltes), les cristaux parviennent à la surface par des remontées magmatiques, activités volcaniques. Il s'agit de la première source mondiale de saphirs jaunes, verts et particulièrement des saphirs « bleus » en Australie, Thaïlande, Laos, Vietnam, Kenya, Nigéria, Cameroun, Ethiopie... C'est le cas également des saphirs d'Auvergne.

D'un milieu métamorphique (marbre, gneiss), ce sont alors les mouvements des plaques qui les ont faits remonter en créant des reliefs par collusion, comme par exemple au Myanmar, Sri Lanka, Cachemire, Madagascar, puis au Pakistan.

4-2 LES GISEMENTS SECONDAIRES

Les saphirs des gisements secondaires proviennent de l'érosion et du transport des gisements primaires (d'origines magmatique ou métamorphique).

- Exploitations éluvionnaires : « placers » ou concentrations des cristaux qui se forment par érosion, sur place, de la roche mère/du gisement primaire, qui est donc connu.
- Exploitations alluvionnaires : « placers » ou concentrations des cristaux qui sont éloignés après érosion de la roche mère/du gisement primaire par le transport des eaux de rivière.
- Cordons littoraux : dépôts sédimentaires.

Les corindons des gisements secondaires sont le plus souvent des cristaux érodés, ce qui rajoute une difficulté à leur identification, par rapport à leur forme originelle.

L'identification de l'origine géologique des gemmes des poches alluvionnaires est par conséquent plus complexe : elles résultent en effet de gisements primaires dégradés variés, mélangés et parfois très éloignés de leur source primaire ; c'est alors au gemmologue de remonter la chaîne des indices pour en déterminer l'origine.

4-3 LES GISEMENTS CÉLÈBRES

- Saphirs du Cachemire, les mines de Padder et le site historique de Sumjam. Saphirs au bleu velouté incomparable
- Saphirs du Myanmar, ex Birmanie, région de Mogok.
- Saphirs du Sri Lanka, Ratnapura, Rakwana.
- Saphir bleu et les fameux Papparadscha

Nous citerons de nos jours les gisements alluvionnaires du Cambodge (Pailin) et de Thaïlande (Chanthaburi), le Kenya, et bien sûr Madagascar qui représente de nos jours un acteur très important de la fourniture des saphirs et de saphirs de couleur.

Les gisements de saphir dans le monde



Sources : Shigley, J. & alli (2010) ["Gem localities of the 2000s", GEMS & GEMOLOGY, Vol. 46, No. 3, pp. 188-216] et bibliographie associée.

Figure 15 : Les principaux gisements de saphir dans le monde

4-4 TRAITEMENTS ET SYNTHÈSES

Les saphirs de cette étude contrairement à beaucoup d'autres sur le marché mondial, sont naturels non chauffés.

En effet environ 95 % des saphirs naturels facettés du marché sont aujourd'hui chauffés. Ce processus est utilisé pour modifier la couleur de la gemme, c'est une pratique admise par le marché. Bien entendu cela peut affecter la présence d'inclusions dans la pierre, inclusions si précieuses et qui parfois caractérisent non seulement ses origines géographiques mais également le gisement d'où elles sont issues.

Une des inclusions la plus célèbre, givres en **ails de papillon**, caractérise les saphirs du Sri Lanka, on peut citer pour ce pays, de longues aiguilles de rutile, des cristaux négatifs, des zonations de couleur. Pour d'autres provenance on peut citer ; des zonations laiteuses « milky », des nuages de soies courtes très denses, des zones sirupeuses, des aiguilles de boehmite.



Figure 16 : inclusion caractéristique du saphir, aile de papillon

On définit par traitement l'ensemble des opérations humaines visant à améliorer la qualité d'une pierre en reproduisant les phénomènes naturels, en masquant ou en éliminant les défauts.

A- TRAITEMENTS :

Le traitement thermique est une technique faite pour améliorer leur apparence, du traitement traditionnel (Le Bata Kubala) au traitement plus complexe sous atmosphères contrôlés.

- **Le remplissage** : ce traitement consiste à introduire du verre à haut indice de réfraction dans les fissures (glass-filling) afin d'améliorer la transparence de la gemme.
- **Les diffusions** : simple ou en profondeur (au béryllium).
 - Simple, permet de modifier la couleur en provoquant la diffusion d'éléments chromophores, au titane notamment, mince zone à la surface de la pierre.
 - En profondeur, par diffusion de composés à base de béryllium (Be). Le Be est un ion plus petit et plus volatile que le Fe ou le Ti, il peut ainsi diffuser plus profondément il agit comme catalyseur. Ce traitement nécessite de très hautes températures.
- **L'imprégnation** : ce procédé est pratiqué depuis l'Antiquité, trempage dans une solution colorante.
- **L'irradiation** : ce traitement est pratiqué avec des hautes énergies électromagnétiques des gemmes incolores pour foncer leur couleur.

B- SYNTHESSES :

On définit par gemme de synthèse, une pierre fabriquée par l'homme tout en étant de même composition chimique, de même structure atomique, de même apparence visuelle que sa contrepartie dans la nature.

Le procédé Verneuil (1902) fut le premier à voir le jour à l'aube du XXe siècle, le principe de sa méthode a été repris dans de nombreuses techniques. Les procédés qui s'en sont inspirés ont cependant lieu dans une enceinte hermétique sous atmosphère contrôlée à partir d'un bain liquide, garantissant un meilleur contrôle de l'environnement de croissance.

- **La flamme-fusion (ou Verneuil)** : ce procédé permet de reproduire des saphirs et rubis, spinelles. La poudre d'alumine et de titane est fondue, tombent sur un socle rotatif, ce qui forme une boule de saphir synthétique.
- **Synthèse par tirage : procédé Czochralski** : ce procédé consiste à fondre à 2050°, les éléments chimiques à base d'oxyde d'aluminium pur et de colorants appropriés (Cr, Fe, Ti) dans un creuset en iridium dont la température de fusion est 2442°. Un germe est abaissé dans la solution en fusion avec un mouvement rotatif puis retiré. Le cristal ainsi formé se développe vers le bas dû à l'attraction naturelle de l'apesanteur.

Il existe d'autres variantes de ces 2 premiers procédés :

- Procédé, Edge-defined Film-fed Growth (EFG)
- Procédé, Kyropoulos
- Procédé, Bagdasarov



Figure 17 : carottes de saphir de synthèse

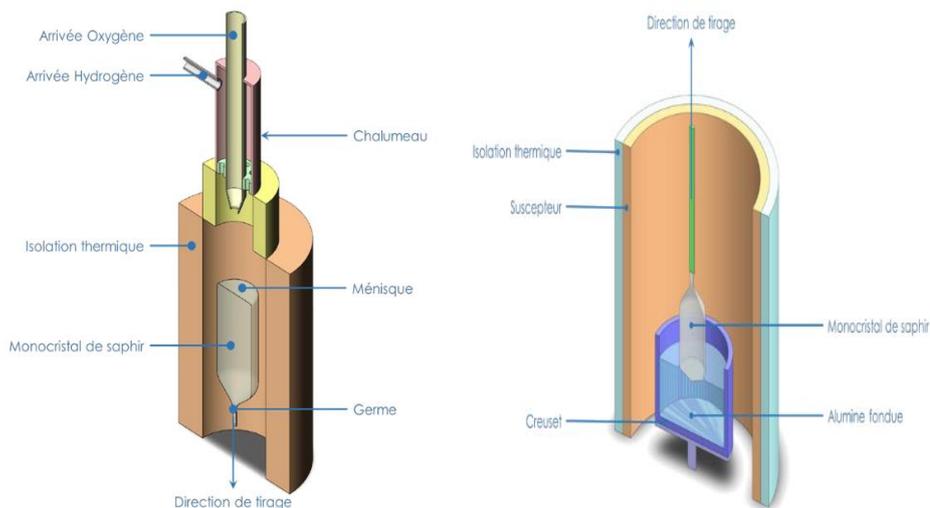


Figure 18 : schéma du procédé Verneuil (J. Muzy) et : schéma procédé Czochralski (J. Muzy)

- **Procédé par dissolution anhydre**, on ajoute aux éléments chimiques de base du corindon des fondants (flux) ou sels catalytiques (oxyde de lithium, vanadium), permettant une synthèse sans eau et à des températures inférieures à 2050°. Les températures avoisinent les 800° à 1200°. La durée de ce procédé peut varier de 3 à 12 mois.
- **Procédé par dissolution hydrothermal**, ce procédé utilise des fragments d'alumine cristalline « nutriments » qui sont situés à la base d'un autoclave. Celui-ci est fermé et rempli d'une solution aqueuse alcaline, sa base étant chauffée à 400 ° et son sommet à environ 350°. Sous l'effet de la pression et à ces températures, des courants se forment à la base de l'autoclave et dissolvent les grains d'alumine. Lorsque la solution atteint la partie de l'alumine, la solubilité de celle-ci diminue et ainsi elle cristallise sur les germes. Par convection, la solution appauvrie en alumine retourne dans la partie chaude de l'autoclave et dissout à nouveau les nutriments.
- **Le doublet corindon fin, corindon synthétique**, ce procédé est constitué de corindon naturel (plutôt du saphir vert à jaune) dans sa partie supérieure, et du corindon synthétique Verneuil pour sa partie inférieure.

Technique de cristallisation	Dimensions des cristaux	Avantages	Inconvénients
Verneuil	Cylindres : Diamètre max. ≈ 4 cm Longueur max. ≈ 16 cm	Procédé peu coûteux Possibilité de dopage Production de masse	Faible qualité cristalline (mosaïcité inévitable)
Czochralski	Cylindres : Diamètre max. ≈ 20 cm Longueur limitée par la hauteur de l'installation	Diamètre précis et constant Bonne qualité cristalline	Difficulté de dopage homogène
EFG	Profilés Épaisseur max. ≈ 1 cm Longueur limitée par la hauteur de l'installation	Géométries complexes Peu d'usinage Bonne qualité cristalline	Dopage difficile
Kyropoulos	Lingots massifs limités par la taille du creuset	Excellente qualité cristalline Grandes dimensions	Procédé long et coûteux Usinage de cristaux massifs
Bagdasarov	Lingots prismatiques de la taille du moule Largeur max. ≈ 20 cm	Bonne qualité cristalline Géométrie prismatique	Utilisation d'un moule par cristal Inclusions provenant du moule

Tableau avantages et inconvénients de quelques procédés de croissance de monocristaux de saphir, J.Muzy thèse 2020

Nous citerons la société, **RSA Le Rubis**, qui nous a ouvert ses portes au printemps 2023 dans le cadre du D.U de gemmologie. En effet celle-ci est implantée dans le bassin grenoblois et produit depuis 1925 du corindon synthétique. Sa maîtrise du procédé historique Verneuil, lui permet de collaborer auprès des plus grandes maisons horlogères, clients primordiaux de ces cristaux. Les rubis sont notamment employés dans les mécanismes horlogers en tant que pivots et palettes d'ancre. Les cristaux transparents qui habillent les montres haut de gamme « inrayables », sont appelés glaces.



Figure 19 : Rampe de cristallisation Verneuil, composée de 45 fours

QUELQUES SAPHIRS HISTORIQUES

Notre remontée dans le temps se bornera au Moyen-Âge. Seul le bassin méditerranéen, le Moyen-Orient et les Indes au sens large étaient des sources possibles de gemmes. Ceylan, le Siam (Thaïlande), la Chine, étaient des mondes fabuleux que révélaient à peine les grands voyageurs comme Marco Polo (1254-1324), l'Amérique était inconnue comme l'Afrique du Sud.

Les gisements de saphirs et autres gemmes du Velay sortirent des pierres qui entraient dans les plus grands trésors de la chrétienté, y compris celui de la papauté. Sur des milliers de pièces extraites, quelques dizaines durent être des pierres remarquables.

Dans son ouvrage de référence, François-Hubert Forestier (1993) date la ressource en gemmes connue depuis le XIIIème siècle.

Martine de Bertereau, Baronne de Beausoleil (1590-1643), une femme ingénieur des mines au XVIIe siècle (A. Chermette). Elle sillonna la France avec son époux, elle devait découvrir plus de 150 mines. Dans son inventaire figurent nombre de gîtes minéraux dont l'existence a dûment été contrôlée depuis.

- En Auvergne, au lieu-dit de Pégu une mine d'améthystes, proche de Langeac et Brioude une mine d'antimoine qui fut explorée au XIXe siècle.
- En Velay, proche du Puy, à Expailly, dans un ruisseau du pays, « Lou Riou Pegoulou », se trouvent une quantité de pierres.

- En Dauphiné, c'est une mine d'or a la montage « d'Auriau », très probablement Auris au-dessus de Bourg d'Oisans, ou l'existence de minerais aurifères a bel et bien été constatée au XVIIIe et au XIXe siècles.
- En Forez, citation d'une mine de vernis (plomb argentifère), Saint-Julien, dûment exploitée au XVIIe siècle.
- En Vivarais, à Saint-Laurent-les-Bains un filon de fluorine, la plus ancienne allusion à l'existence de ce type de gisement dans notre pays.

Nous citons deux ouvrages majeurs de Martine de Bertereau, la « Véritable déclaration de la découverte des mines et minières de France » qui est de 1632, et la « restitution de Pluton » qui est de 1640. Cette femme hors du commun ; dont le plus grand tort fut d'avoir devancé de trois siècles son temps, mérite que l'on salue son rôle de novatrice.

En effet des études récentes effectuées par Gérard Panczer (2019) sur le « talisman de Charlemagne IXème siècle » nous indiquent que le saphir principal de 139 cts bleu-gris de type Geuda est originaire de Ceylan (Sri Lanka).

La question est celle-ci : depuis quelle époque les saphirs du Velay sont exploités et quels bijoux ornent-ils ?



Figure 20 : le talisman de Charlemagne

Nous vous présentons quelques bijoux illustrant ces propos et certains dont les saphirs proviendraient de ce territoire. La prudence est de mise, ces gemmes ont-ils fait l'objet d'études scientifiques, concernant ceux du musée Crozatier, la réponse est négative.

MUSÉE CROZATIER DU PUY-EN-VELAY

Le musée Crozatier du Puy-en-Velay nous a transmis les photos des bijoux ci-dessous :

- Une bague, anonyme, Moyen Age, cuivre et saphir
- Une croix du Velay, pendentif, anonyme, 17^e siècle ou 18^e siècle ? Or, saphirs
- Une croix du Velay, pendentif, anonyme, 17^e siècle ou 18^e siècle ? Or, saphirs
- Une bague, anonyme, 19^e siècle, les saphirs proviendraient du Riou Pezzouillou



Figure 21 : Musée Crozatier © Luc Olivier, une bague, Moyen Age, cuivre et saphir



Figure 22 : Musée Crozatier © Luc Olivier, une croix du Velay, pendentif, 17^{ème} ou 18^{ème} ? or et saphirs



Figure 23 : Musée Crozatier © Luc Olivier, une croix du Velay, pendentif, 17ème ou 18ème siècle ? or, saphirs



Figure 24 : Musée Crozatier © Luc Olivier, une bague, 19ème siècle, les saphirs proviendraient de riou Pezzouillou d'après Mr Cortial.

Un collier avec saphirs et peltes, trésor des Lazaristes, empire romain trésor fin IIe siècle. Les saphirs sont en partie translucides et irisés. Ils sont, bleu marin foncé à bleu marine translucide et à noir irisé. Ce sont des pierres lenticulaires sans être circulaires, plus larges que hautes, or et saphirs.

La présence de certaines pierres, doit nous interpeller donc sur l'exploitation des saphirs dans notre région et depuis quelle époque ?

Ce collier issu du trésor des Lazaristes a fait l'objet d'une mémoire par Chlotilde Feydiou (2012). Cette étude soulève la question de la technique du perçage de ces pierres, connaissant la dureté élevée du saphir de 9 sur l'échelle relative de Mohs seul le diamant à une dureté supérieure de 10 sur cette même échelle.



Figure 25 : © photo : Jean-Michel Degueule, Christian Thio/Lugdunum, collier à perles de saphirs et peltes, trésor des Lazaristes, Musée Lugdunum

Le fermail dit Fermail de saint- Louis (1325-1367), 2^{ème} quart du XIVe siècle, avec saphirs

Fermail dit de saint Louis :

Fermail en argent doré, en forme de losange. Il est bordé d'une moulure à plusieurs ressauts soulignés d'un double perlé. Un cordon de pierreries (rubis et saphirs) le cerne, délimitant un espace entièrement couvert de fleurs de lis champlevées sur un fond d'émail bleu sombre. Au-dessus de ce fond, une grande fleur de lis s'épanouit, elle est faite d'une plaque d'argent doré découpée, sur laquelle sont fixés de gros cabochons (améthystes, prismes d'émeraude, rubis) ; les pétales latéraux de la fleur renflés, se retroussent à leur extrémité.

La plupart des pierreries sont serties dans des bêtes de forme évasées ou conique, la pointe en bas, venant former autour de la pierre une sorte de collerette striée. >La pierre elle-même est maintenue par une bande de métal lisse qui s'emboîte dans la partie inférieure du chaton. Les cabochons les plus importants sont de surcroît retenus par des griffes.

Les bêtes plus simples qui apparaissent sur la bordure et sur la fleur peut-être dues à l'intervention de l'orfèvre Jean de Picquigny qui, en 1365-1367, fut chargé de ressertir et vérifier les pierreries.

Ce n'est pas avant la fin du XVIIe siècle que le fermail fut considéré comme celui du manteau royal de saint Louis puis, aux XIXe et XXe siècles, comme fermail du sacre de Charles V. Cependant, aucun élément historique ne vient appuyer cette affirmation. En dépit de la présence d'une fleur de lis, ce type de fermail n'était pas réservé au sacre ni à la personne du roi : il pouvait être porté par des princes et princesses, ou même par certains dignitaires ecclésiastiques.

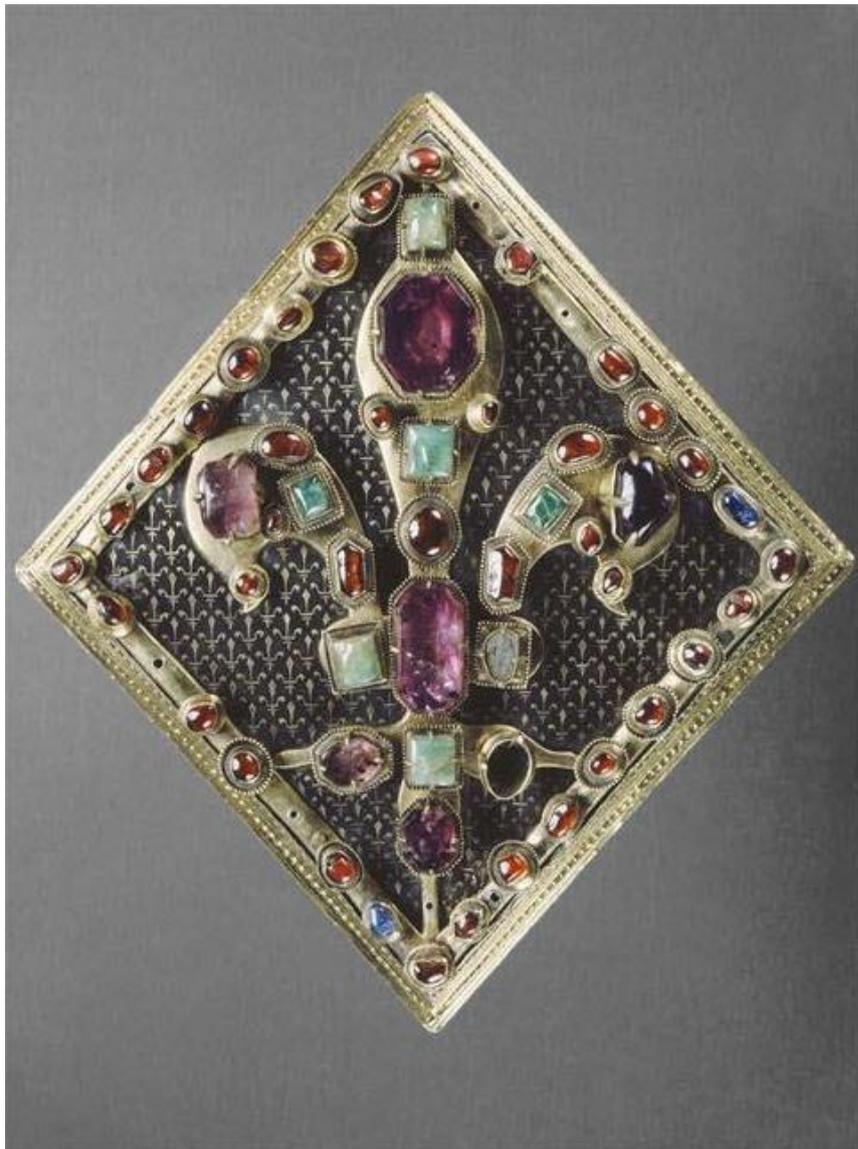


Figure 26 : © 1990 RMN-Grand Palais (musée du Louvre) Daniel Amaudet, fermail dit de saint Louis (1325/1367), musée du Louvre.

La Main de Justice réalisé par Martin-Guillaume Biennais (1764/1843), avec l'anneau que l'on appelait de « saint Denis » (début XIIIe siècle), avec en son centre un saphir de 14 mm de diamètre.



Figure 27 : © 1990 RMN -Grand Palais (musée du Louvre), Peter Willi, Main de Justice en ivoire du Sacre de Napoléon (1804) ; D : Détail de l'anneau dit de « saint-Denis » (début XIIIe siècle), de ses gemmes et de son saphir central.

Dans l'ouvrage de de F.H Forestier (1993) il indique ceci : B. Morel rappelle qu'à l'occasion du sacre de Napoléon 1^{er}, on s'aperçut qu'il n'y avait plus de main de justice et on décida d'en créer une nouvelle. Au moment de créer l'objet, dans le milieu de l'année 1804, et afin de lui donner un cachet ancien, Vivant Denon, directeur de muséum (futur musée du Louvre), fournit un bijou très ancien : l'anneau dit de Saint Denis et trois pierres gravées qui avaient été préservées de la dispersion du trésor de l'abbaye.

La Main de Justice en ivoire conservée au Louvre est une version du XIX^{ème} siècle réalisée en vue du sacre de Napoléon en 1804. En effet, la main de Justice médiévale (XIII^{ème} siècle ?), qui servait avant la Révolution au sacre des rois e France, était conservée au trésor de Saint Denis ; elle nous est connue par une aquarelle de Gaignières (Paris, BnF, Fr.2000) et une gravure, inversée, de l'ouvrage de Dom Bernard de Montfaucon, Les Monuments de la monarchie Française (I,1729, pl.III). Elle était formée d'une main droite faisant un geste de bénédiction, « d'ivoire de licorne », c'est-à-dire taillée dans une défense de narval ; cette main était fixée en haut d'un bâton d'orfèvrerie. Emportée avec le reste du trésor en 1793, elle ne fut pas conservée.

Mais Napoléon 1^{er} ayant décidé que certains des régalia, autrefois au trésor de Saint Denis, devaient figurer à son sacre. Vivant Denon confia à l'orfèvre Martin-Guillaume Biennais le soin de refaire une Main de Justice. Leur source d'inspiration fut la gravure de Montfaucon, sans qu'ils prennent garde à l'avertissement de l'auteur signalant que la gravure est inversée : c'est ainsi que la nouvelle Main de Justice, sculptée dans un morceau d'ivoire d'éléphant, est une main gauche. Elle fut fixée sur un bâton de cuivre doré, enrichi d'un nœud d'orfèvrerie formé par le chaton médiéval de « l'anneau de saint Denis », auquel furent ajoutés deux camées en cristal de roche et une intaille d'améthyste provenant aussi de Saint Denis et qui reçurent une monture imitant celle de l'anneau.

La Main de Justice, passant dès lors pour celle du trésor de Saint Denis, figura parmi les « Honneurs de Charlemagne » au sacre de Napoléon 1^{er}, puis fut utilisée pour le sacre de Charles X.

Nous venons de citer le gisement du Riou Pezzouliou qui depuis des lustres attire l'attention par la présence d'une grande quantité de gemmes concentrées dans les alluvions. Ce ruisseau célèbre surgit au pied du mont Croustet, un volcan situé au sud-ouest du Puy-en-Velay (43) culminant à 892 mètres d'altitude. Il appartient au vaste plateau du Devès, connu pour ses puissants empilements de basaltes, ses multiples cônes stromboliens et maars, ainsi que ses enclaves de pédidotites qui trahissent l'origine profonde du magma.

Il se comporte comme un énorme réceptacle qui va recevoir des alluvions résultant de l'érosion des formations géologiques proches, en particulier de la coulée de lave qui couronne le plateau. La concentration des gemmes semble s'être produite à certaines époques en liaison avec des conditions de mise en place torrentielles. Le piégeage de ces minéraux lourds à l'intérieur de couches sablonneuses s'est fait apparemment dans les parties du ruisseau où les conditions de dépôts étaient possibles (replats, cavités, ressauts)



Figure 28: Saphir sur biotite

Les échantillons que nous vous présentons sont issus de deux confiés :

- ✓ Échantillons 1, 2, 3, 5, et 6 : pierres taillées (société Rivière de France, saphirs d'Auvergne).
- ✓ Échantillon 7 pierre taillée : par la société Gemfrance (saphir d'Auvergne, Rioupéroux).
- ✓ Échantillons A,B,C,D,E,F pierres brutes (société Rivière de France, saphirs d'Auvergne).

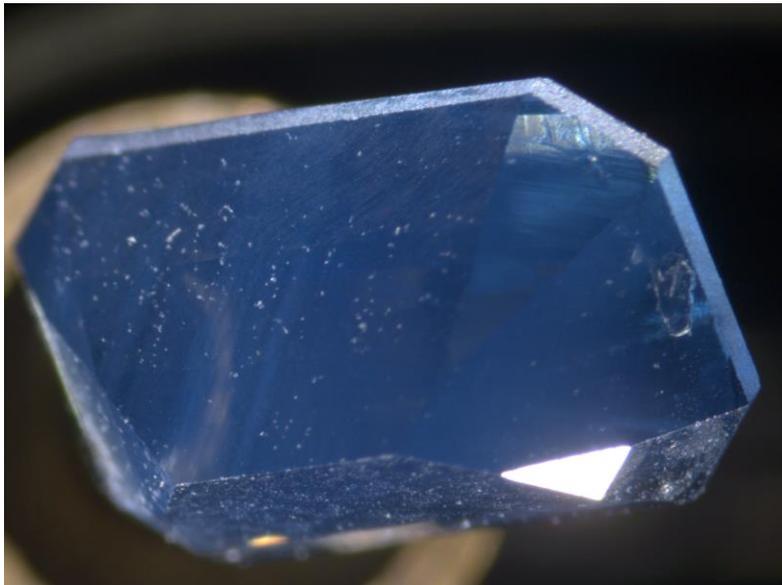


Figure 29 : saphir 1 avec zone de croissance et inclusions

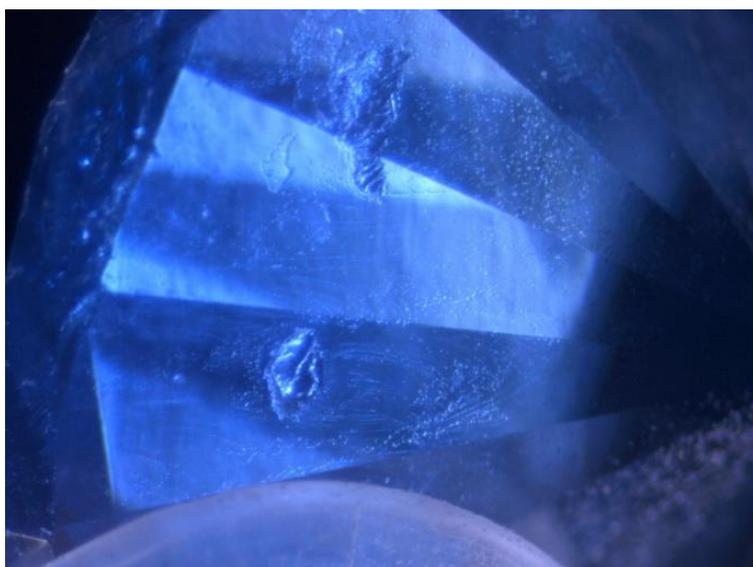


Figure 30 : saphir 5 avec inclusions

- ✓ Echantillons facettés : (société Rivière de France et Gemfrance).



Figure 31 : saphirs étudiés ; en haut de gauche à droite, saphirs 7,6,5, en bas de gauche à droite, saphirs 2,3,1.

L'ensemble des photos des échantillons présentés, réalisé avec stéréomicroscope Zeiss Stemi 2000 C

- ✓ Échantillons Bruts : (société Rivière de France, saphirs d'Auvergne).

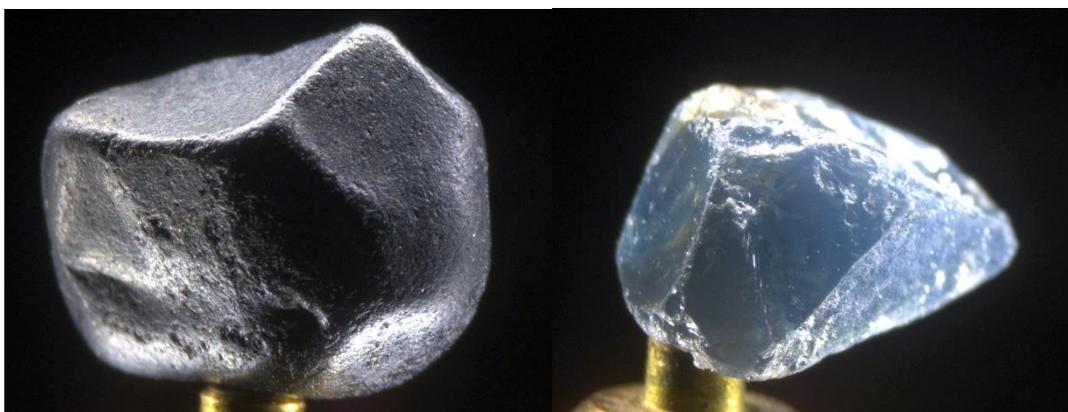


Figure 32: saphir brut B

Figure 33: saphir brut C

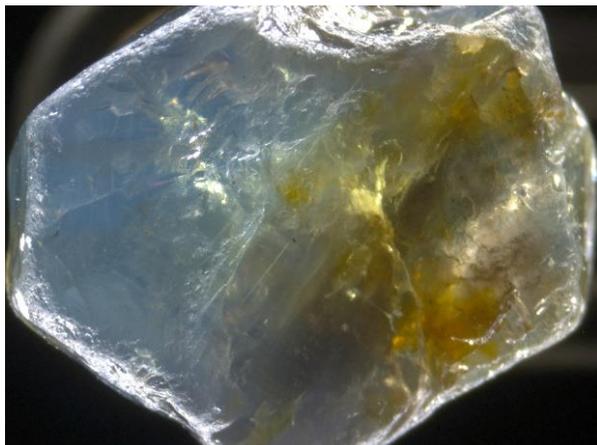


Figure 34 : saphir brut D



Figure 35 : saphir brut E



Figure 15 : saphir brut F



Figure 37 : saphir brut A



Figure 38 : saphir 5 le plus représentatif de l'échantillon, bleu soutenu

Puisque nous parlons de la couleur du saphir, quelles sont les nuances de bleu les plus recherchées :

- Les saphirs originaires de Birmanie, un bleu profond, soutenu et velouté
- Les saphirs originaires du Sri Lanka, un bleu plus métallique avec une pointe de violet
- Les saphirs du Cachemire, un bleu de tonalité plus clair, bleuet

Il existe également des saphirs avec effet changement de couleur (color change). Ils présentent cette particularité avec plus ou moins d'intensité en fonction de la source lumineuse, lumière du jour, lumière artificielle, et des éléments présents dans les gemmes.



Figure 16 : saphir brut et taillé, provenant de l'Ailloux



Figure 40 : logos Rivière de France

Rivière de France nous permet donc de découvrir ce gisement et apporte une approche éthique à son exploitation. En effet, ce gisement a été redécouvert il y a une dizaine d'années, mais les pierres extraites dans la plus grande illégalité, vendues sans garantie d'origine.

Depuis, une filière officielle s'est mise en place, proposant une traçabilité totale des pierres précieuses en accord avec les propriétaires du gisement. Pour chaque pierre vendue, un certificat est délivré avec photo, numéro de parcelle et signature du propriétaire.

La grande caractéristique de ces saphirs du Livradois au-delà de leur exploitation éthique, écologique issus du commerce équitable, c'est leur grande qualité et pureté.



Figure 41 : gemmes provenant de l'Ailloux

Nous allons donc en priorité faire un focus sur les saphirs proposés par Rivière de France, car ceux-ci font partie d'un « nouveau gisement » non étudié à ce jour. Ce gisement se situe aux alentours de Sugères département du Puy-de Dôme, elle s'étend dans le périmètre du parc naturel régional du Livradois-Forez. Cette commune est traversée par un cours d'eau L'Ailloux, un affluent de l'Eau Mère en rive droite, donc un sous-affluent de l'Allier puis de la Loire (Site du Sandre). Il parcourt 37,2 km depuis sa source dans les monts du Livradois à 956 mètres d'altitude, près du village du Buisson (commune d'Echandelys), celle-ci se trouve près du bois de Mauchet (1095 mètres). Le ruisseau s'oriente d'abord nord-ouest jusqu'au lieu-dit éponyme ; il prend ensuite la direction ouest et s'enfonce dans des gorges. Après Sugères il bifurque au sud-ouest puis au sud jusqu'à sa confluence en rive droite avec l'Eau Mère, à la limite des communes d'Aulhat-Saint-Privat et de Parentignat. Il aura donc traversé ou longé 8 communes, toutes situées dans le Puy-de-Dôme, collecté 15 affluents référencés parmi lesquels : ruisseaux de la Praderie, de Rangoux, etc. Il est important de se focaliser sur les ruisseaux en amont et en partie en aval de Sugères.

Les saphirs ne sont pas les seules gemmes que l'on retrouve dans ce cours d'eau l'Ailloux, le quartz fumé et le zircon sont également récoltés au sein de celui-ci.

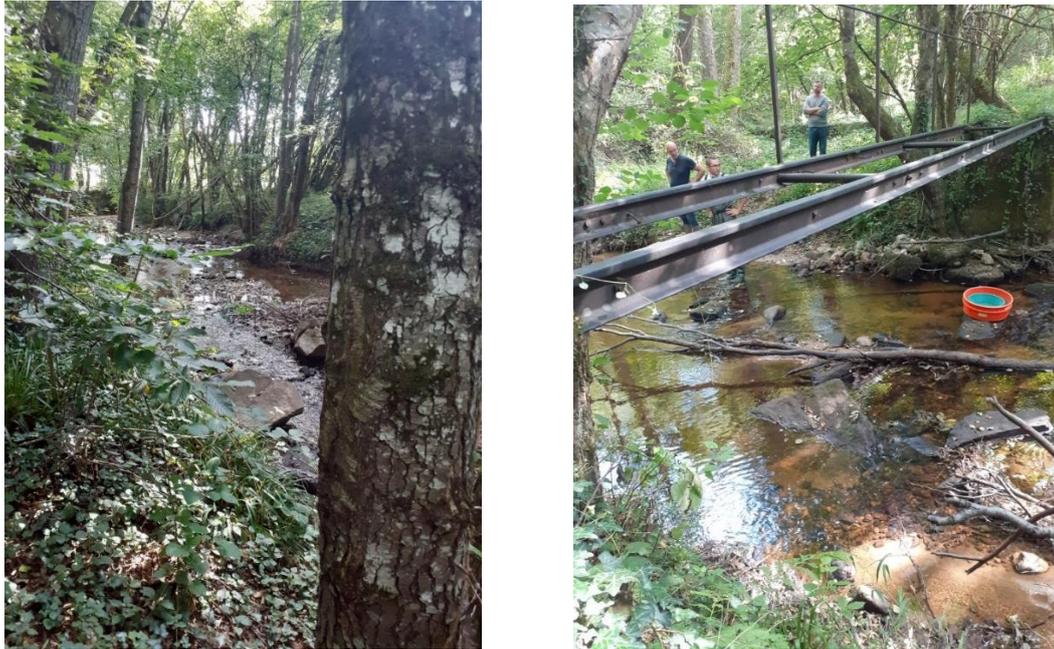


Figure 42 : le cours de l'Ailloux et installations

La feuille d'Issoire s'inscrit sur deux entités géographiques bien distinctes, le Comté d'Auvergne à l'ouest en bordure de l'allier, et le Livradois à l'est. Elles sont séparées, grosso modo, par une série de dépressions alignées entre Saint-Didier et Sauxillanges. Le Livradois n'est étudié que dans son extrémité occidentale (BRGM 1982). L'altitude généralement supérieure à 700m croit vers le sud-est ou elle dépasse 1000m. Les dépressions de Saint-Dier, Estandeuil, Sugères, Manglieu, Sauxillanges, assurent une certaine transition entre la montagne et la Comté. Du point de vue géologique, le socle cristallin occupe plus de la moitié de la feuille, il est constitué de granites.

Les granites du groupe Livradois, distribués entre trois entités :

- Le massif de Saint-Dier, le plus important en volume où affleurent les faciès les plus précoces, à biotite seule, ainsi que des zones muscovitisées d'évolution plus tardive.
- Le massif de Saint-Eloy-Fournols, qui ne comprend que des granites à deux micas, parmi lesquels dominant les faciès à muscovite primaire.
- Les apophyses du secteur Sugères – Brousse – Condat – Sauxillanges, constituées de chonolites de granites à deux micas, et muscovite généralement primaire.

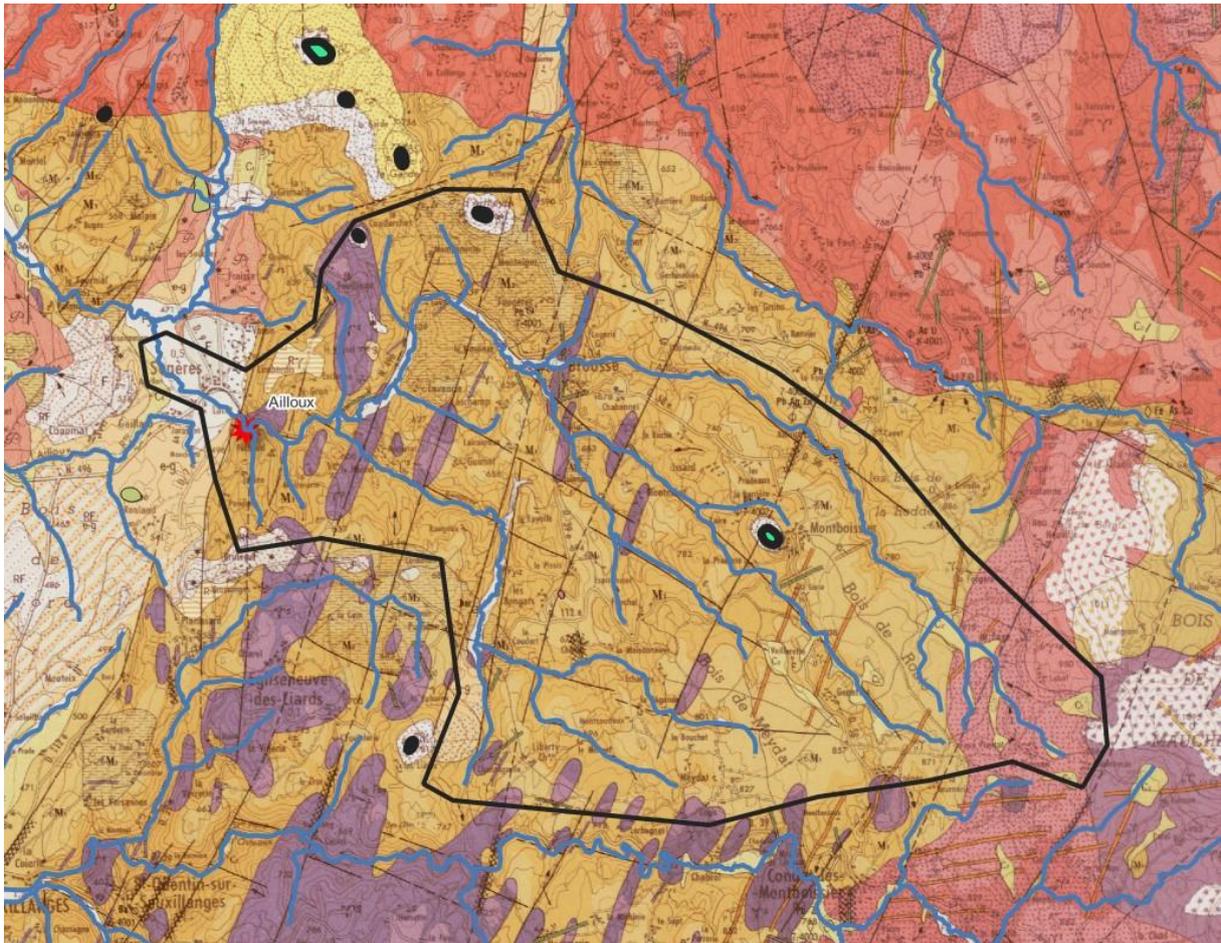


Figure 43 : carte géologique à l'Est de Sugères

Nous allons donc en amont et en partie en aval de Sugères, suivre le cours de l'Ailloux et de ces affluents pour appréhender une partie de son bassin et identifier les pistes probables, source des saphirs, carte IGN. L'Ailloux vers l'est en amont de Sugères, longe notamment au nord le Grun d'Artheyre (761m) à sa droite le Puy de Diou (758m), plus à l'est également à sa droite le Puy de la Rodde (869m) et enfin arrive à sa source vers le hameau le Buisson (950m).

En amont de Sugères et de l'Ailloux vers l'est bassin sud :

- ✓ Ruisseau de Rangoux, source près du bois des Liars (804m), alimenté à l'est par 2 cours d'eau :
 - Ruisseau du Mornet, source près du hameau de Meydat (798m)
 - Ruisseau de Chelles, source près du hameau de Meydat (800m)
- ✓ Ruisseau le Charlet, source près du hameau la Veillerette (800m), alimenté à l'est par 1 cours d'eau :
 - Ruisseau de la Praderie, longe le village de Montboissier, source près du hameau les Epines (869m).

En aval de Sugères et de l'Ailloux vers l'ouest bassin nord :

- ✓ Ruisseau de Flassac, alimenté au nord par 2 cours d'eau :
 - Ruisseau de Plassat au nord, il longe à sa gauche le Puy Faucher (624m), à sa droite le Pic de la Garde (781m), plus loin à gauche le sommet de Courdeloup (789m), source près de Chavarot (614m).
 - Ruisseau des Rivas, il longe à sa droite le Puy Faucher (624m) sa source.
- ✓ Ruisseau Rayat, qui longe à sa droite le Puy Faucher, prend sa source au pied du sommet de Courdeloup (789m).

Dans le contexte Auvergnat de notre étude, les cristaux parviennent à la surface par des remontées magmatiques, activités volcaniques. Cette configuration typologique nous permet d'émettre des hypothèses concernant les potentialités de certains sites pourvoyeurs de saphirs. Nous remarquons également le peu d'évidence de corrosion des saphirs bruts, il en découle qu'ils sont arrivés jusqu'à la surface dans lave de composition proche de la roche mère.

Bien entendu une étude géologique complète semble indispensable pour nous aider à appréhender ce gisement.

La question est donc la suivante, les saphirs proviennent-ils de l'Ailloux lui-même ou d'un ou des affluents de celui-ci ? Nous émettons quelques pistes possibles en fonction de la typographie géologique du bassin.

A partir de la carte ci-dessus 36, nous nous focaliserons donc sur le bassin Est de l'Ailloux en amont de Sugères. Voici donc les pistes possibles :

- ✓ Le village de Montboissier (816m) au sud-est, le neck basaltique, un très ancien lac de lave, rivière de l'Ailloux et ruisseau de la Praderie.
- ✓ Le sommet des Liards, Eglise-neuve-des-Liards (804m) au sud, cette montagne est composée en bonne partie de basalte, ruisseau de Rangoux.
- ✓ Le Grun d'Artheyre (761m) et un sommet proche (687m) au nord-est, rivière de l'Ailloux.
- ✓ Le Pic de la Garde (781m) et deux sommets proches au nord, prismales basaltiques d'un ancien lac de lave, ruisseau de Flassac.

Le Pic de la Garde est un volcan caractéristique du volcanisme régional, représenté essentiellement par des diatrèmes de maar (mise en place dans des milieux humides) ou bien par des lacs de lave dans les cratères d'édifices stromboliens. C'est ce dernier type qui a donné le Pic de la Garde.

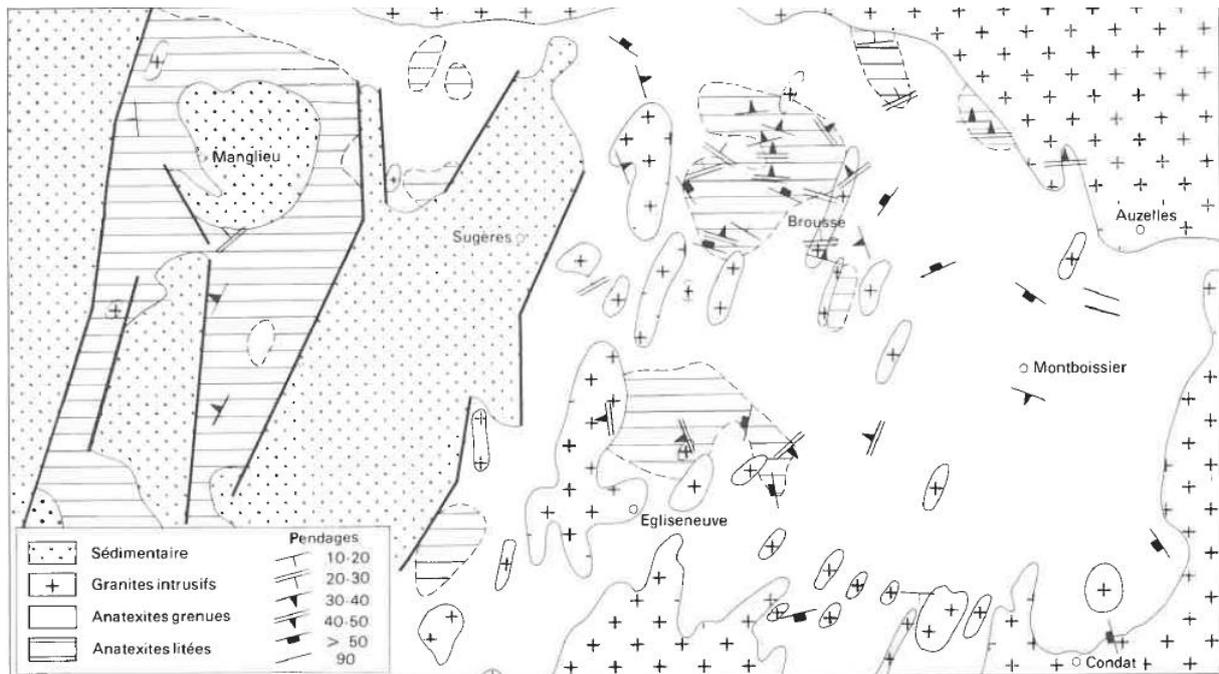


Figure 44 : Foliation des anatexites (d'après R Saint-Joanis 1975). Etude géologique du socle cristallin du Bas – Livradois (Thèse)

B. PRÉSENTATION DES OUTILS D'ANALYSE.

Analyses gemmologiques conventionnelles : polariscope et réfractomètre

- **Saphir A** : brut, de couleur vert/gris/bleu Polariscope : Rétablit tous les $\frac{1}{4}$ de tours
IR : 1.760-1.777
- **Saphir 7** : pierre taillée, de couleur bleue Pas de mesures disponibles
- **Saphir 1** : pierre taillée, de couleur bleue, Polariscope : rétablit tous les $\frac{1}{4}$ de t, grise, 0.42 ct
IR : 1.772-1779
- **Saphir 2** : pierre taillée, de couleur verte, grise, nuance de jaune, laiteux polariscope : rétablit tous les $\frac{1}{4}$ de tours, 0.77 ct, IR : 1.770-1778
- **Saphir 6** : pierre taillée, de couleur bleue polariscope : Rétablit tous les $\frac{1}{4}$ de tours, 0.61 ct, IR : 1.762-1770
- **Saphir 3** : pierre taillée, de couleur verte, polariscope : Rétablit tous les $\frac{1}{4}$ de tours, grise, nuance de jaune, laiteux, IR : 1771-1779, 1.18 ct
- **Saphir 5** : pierre taillée, de couleur bleue, polariscope : Rétablit tous les $\frac{1}{4}$ de tours, 0.36 ct, IR : 1.762-1770

Les mesures faites au réfractomètre (IR) et polariscope, nous apportent des réponses structurales.

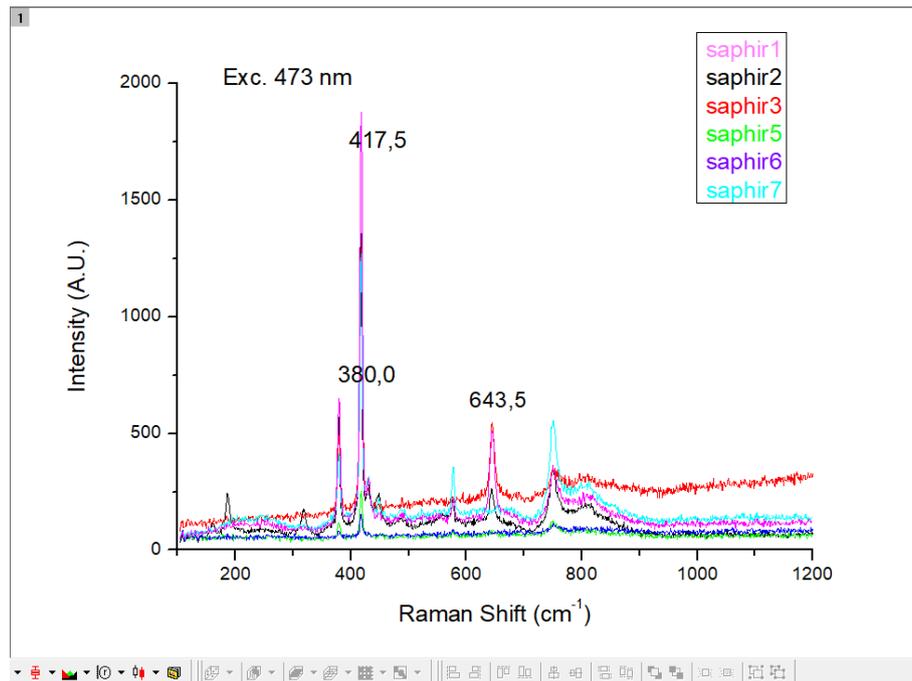
Analyses gemmologiques scientifiques :

- **Spectroscopie Raman**, est une méthode d'analyse structurale appliquée pour caractériser les modes de liaisons atomiques présentes dans des matériaux. Cette méthode non invasive (non

destructive), permet d'accéder aux niveaux vibrationnels (excité par laser) caractéristiques d'une structure et donc de déterminer la nature minérale d'une gemme.
Spectromètre, Aramis, marque Horiba, 2 excitations, 2 lasers 473 et 633 mn.

- **Spectrométrie d'absorption infrarouge FTIR**, est une technique qui mesure les modes de vibrations des atomes ou des molécules dans le réseau d'une gemme. Elle apporte une identité chimique de l'échantillon.
Spectromètre, Themo, marque Nicolet, modèle IS 20.
- **Spectrométrie d'absorption optique VIS-IR**, est une méthode de spectroscopie électromagnétique utilisée pour déterminer les éléments absorbants dans un matériau en mesurant l'intensité du rayonnement électromagnétique qu'elle absorbe dans le domaine UV, visible et proche infrarouge. Elle rend compte de la couleur des gemmes (spectre de transmission).
Spectromètre, Océan Optics, USB 2000, réflexion diffuse.
- **Spectrométrie de photoluminescence ou Fluorescence**, est une émission lumineuse provoquée par l'excitation des électrons d'un ion luminescent, par absorption d'un photon (source laser) immédiatement suivie d'une émission spontanée.
Spectromètre, Aramis, marque Horiba.
- **La spectrométrie de fluorescence X (XRF)** est une technique analytique non destructive utilisée pour identifier la composition élémentaire des matériaux. Elle permet de déterminer la composition chimique d'un échantillon en mesurant les rayons X fluorescents (ou secondaires) émis lors de son excitation par une source de rayons X (éléments majeurs et traces).
Spectromètre, marque Niton, XL3 Gold+

ANALYSE RAMAN



Spectre globale Raman des saphir étudiés

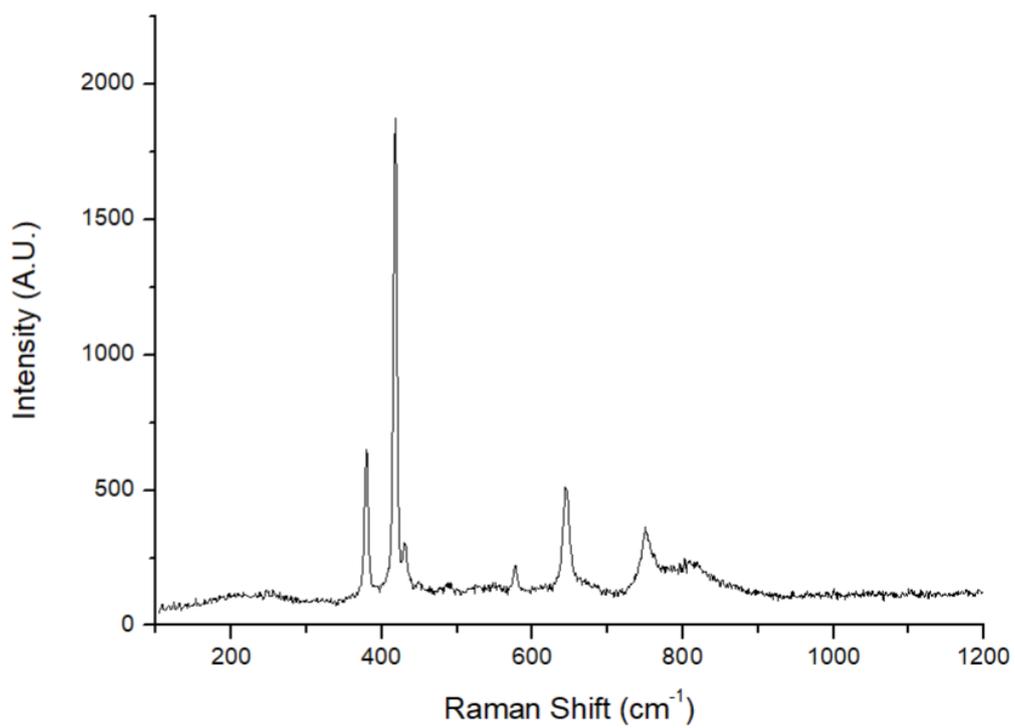
Le pic à 380 cm^{-1} est associé à une vibration de torsion de type A_g , indiquant une symétrie antisymétrique dans la structure cristalline du saphir. Cette vibration confirme la présence de la structure hexagonale de l'alumine (Al_2O_3), composant principal du saphir. En terme gemmologique, ce pic confirme l'identité du matériau en tant que saphir, en mettant en évidence sa structure cristalline spécifique.

Le pic à $417,5\text{ cm}^{-1}$ est attribué à la vibration symétrique de liaison Al-O-Al, qui est une caractéristique distinctive du saphir. Cette fréquence met en lumière la force de la liaison chimique entre les atomes d'aluminium et d'oxygène dans la structure cristalline du saphir. Du point de vue gemmologique, la présence de ce pic renforce l'identification du matériau en tant que saphir et permet d'évaluer la qualité de sa structure cristalline.

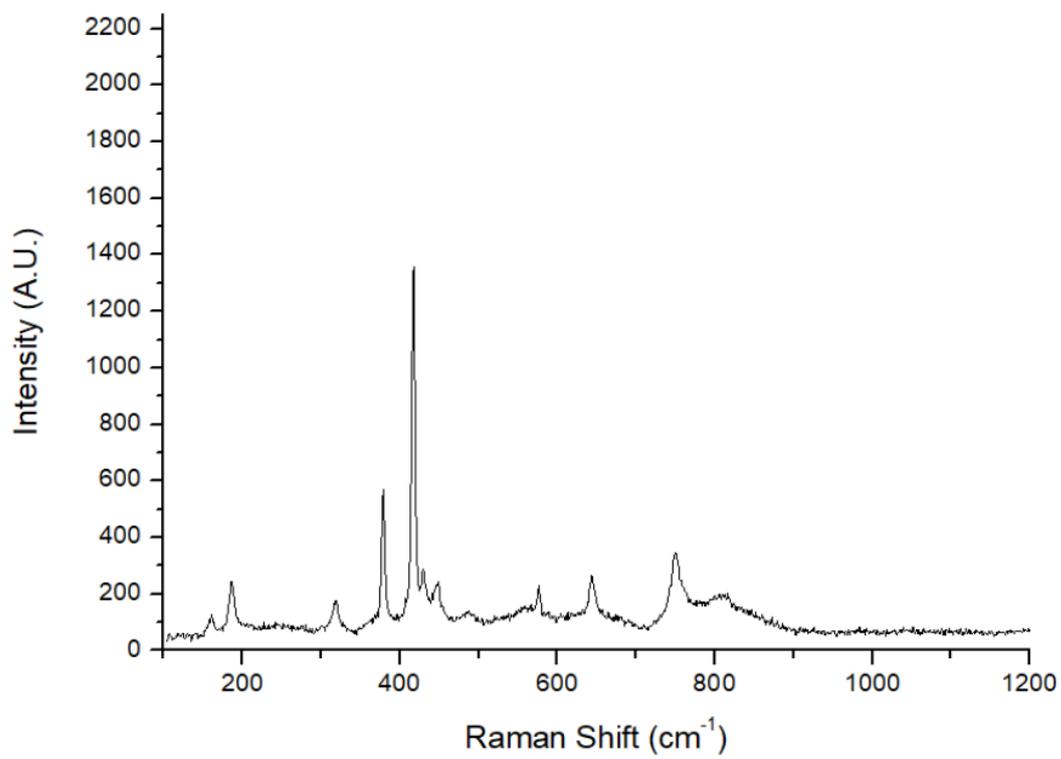
Le pic à $643,5\text{ cm}^{-1}$ peut être relié à des modes de vibration de déformation dans le réseau cristallin du saphir, offrant des informations sur la symétrie et la cohérence de la structure. D'un point de vue gemmologique, l'analyse de ce pic est utile pour évaluer la qualité globale du cristal de saphir, en particulier en ce qui concerne la présence éventuelle d'imperfections ou de distorsions dans la structure.

Enfin, le pic à 750 cm^{-1} est généralement associé à des vibrations de déformation des liaisons Al-O, fournissant des indices sur la disposition des atomes d'aluminium et d'oxygène dans la structure cristalline du saphir. Sur le plan gemmologique, ce pic est crucial pour évaluer la pureté du saphir, car tout déplacement de ce pic vers des fréquences plus élevées peut indiquer la présence d'impuretés ou de défauts dans le matériau.

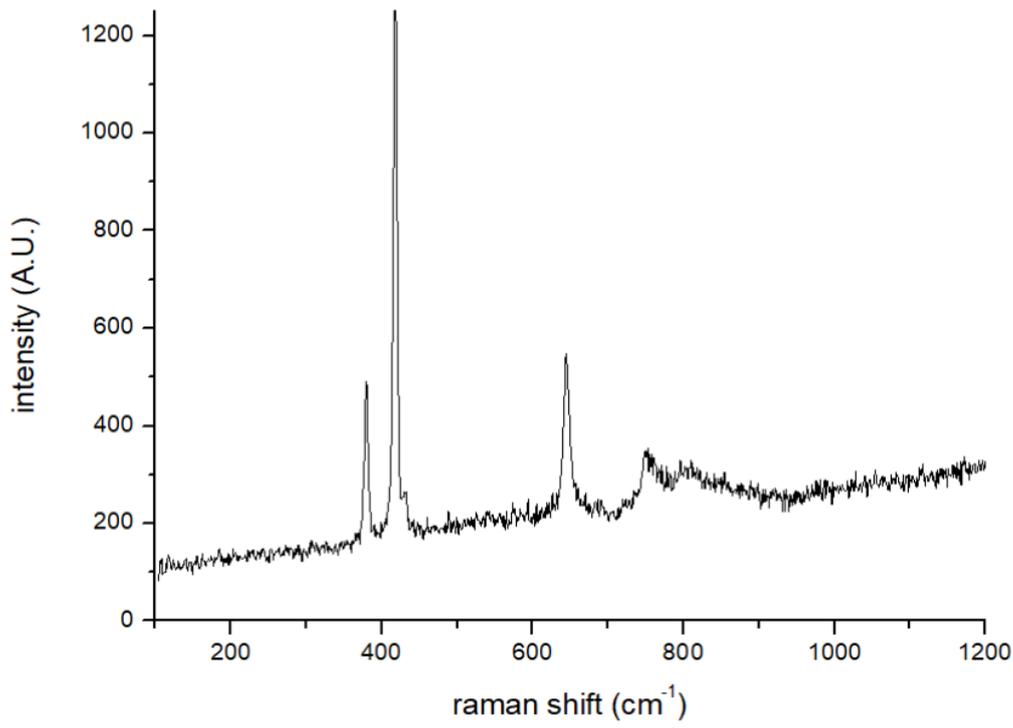
Saphir 1



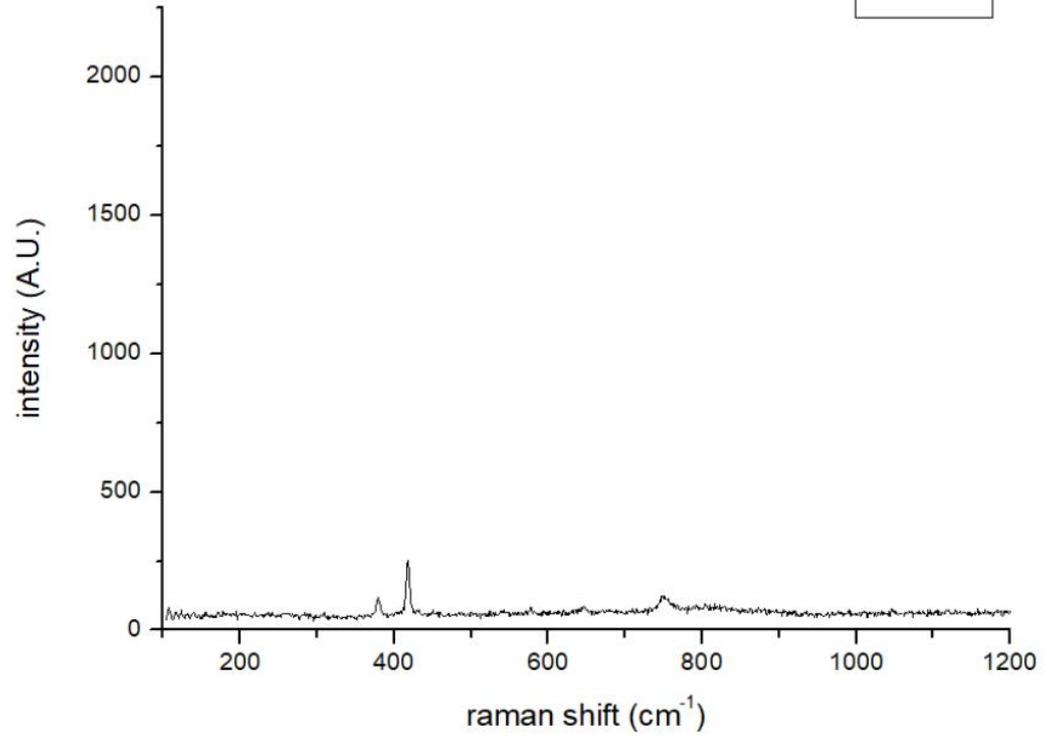
Saphir 2



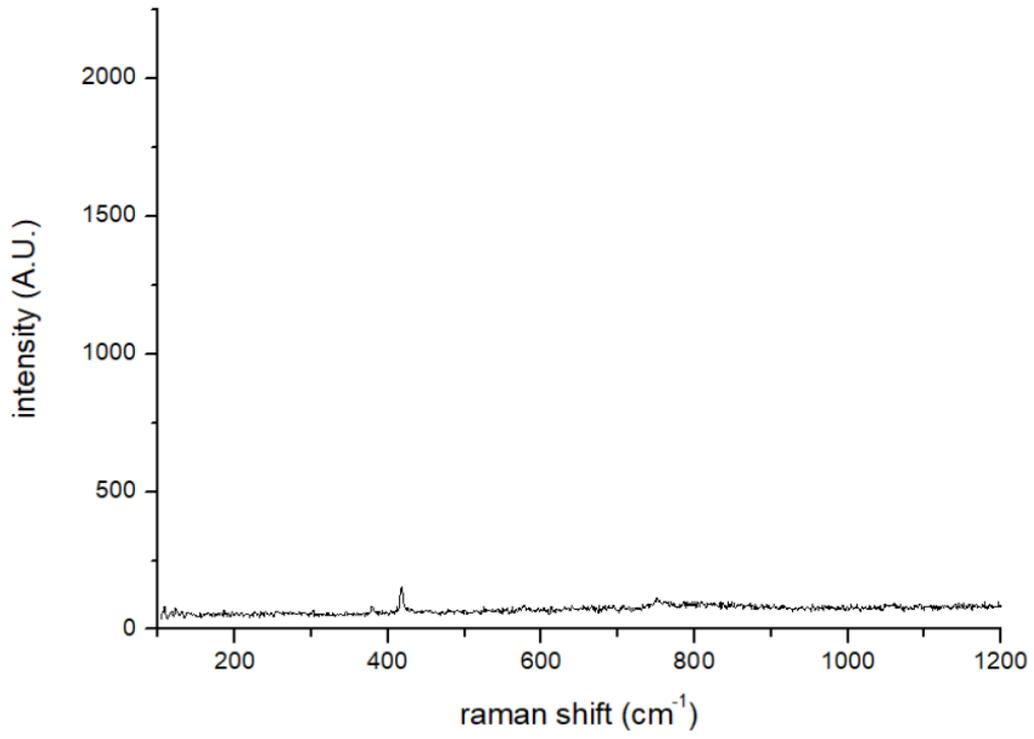
Saphir 3



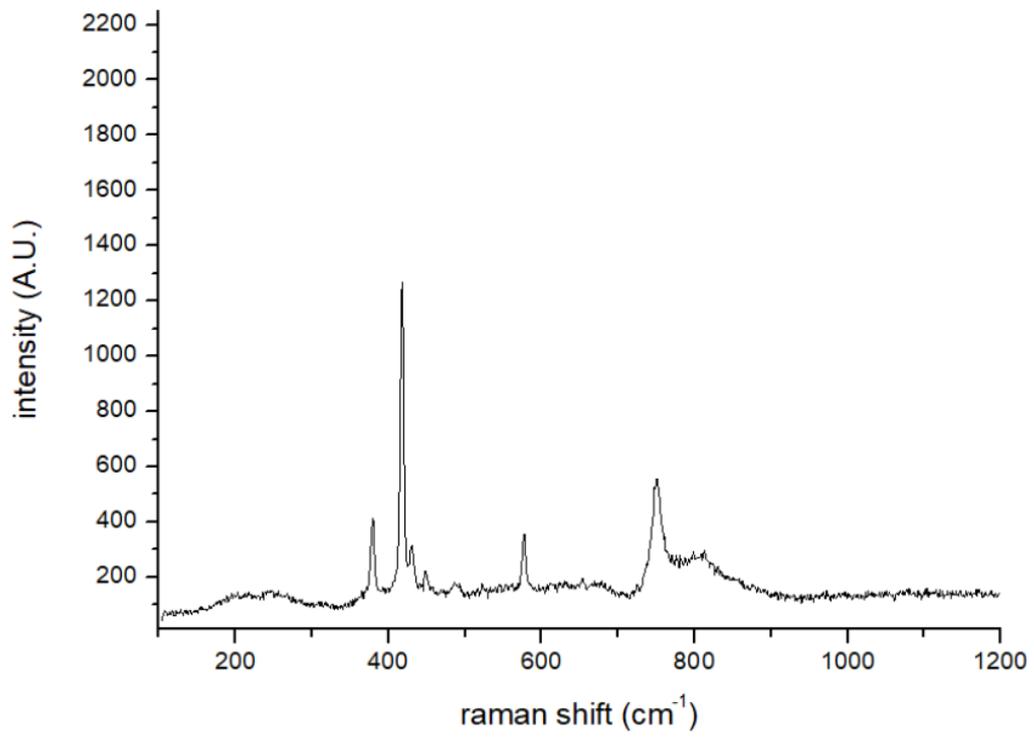
Saphir 5



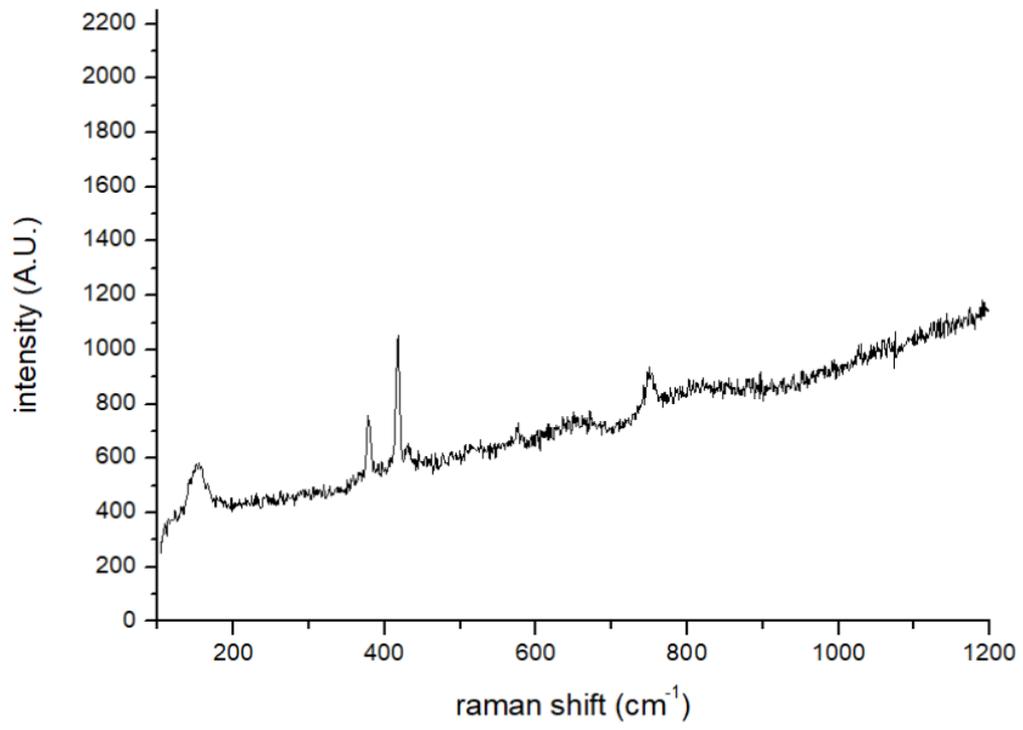
Saphir 6



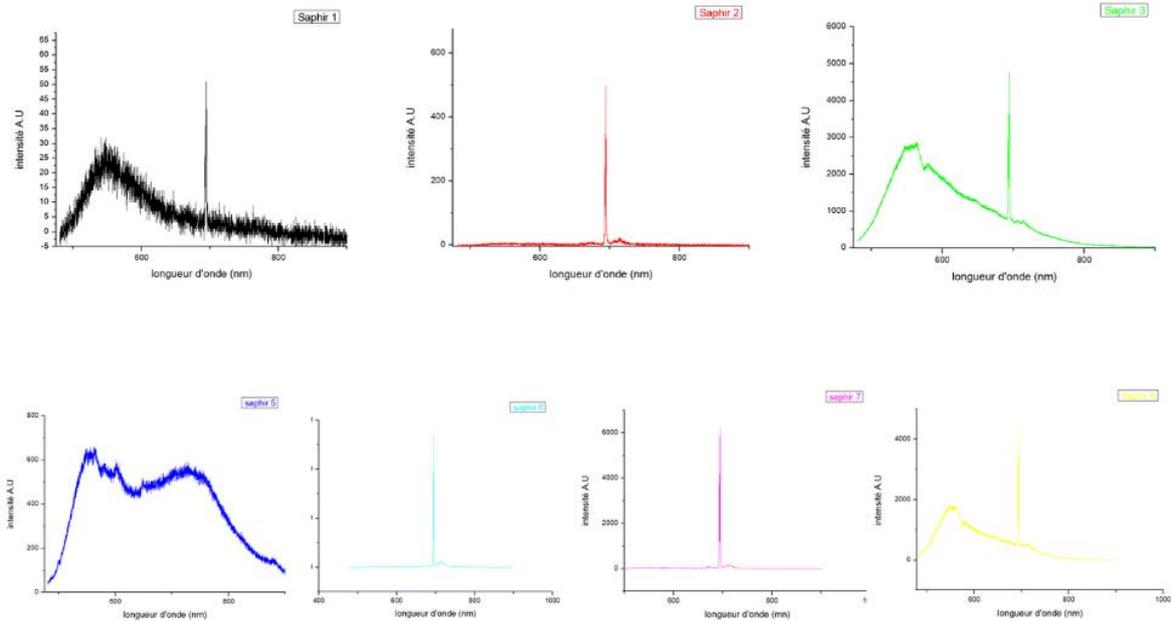
Saphir 7



Saphir A



courbes photo luminescence des échantillons



Spectre luminescence des saphirs étudiés

Les spectres de luminescence des saphirs étudiés révèlent plusieurs pics caractéristiques qui sont associés à des interactions complexes entre les éléments chimiques. Ces pics ont un impact significatif sur la couleur du saphir. Voici quelques-uns des pics de luminescence caractéristiques du saphir et leur effet sur la couleur :

Pic de luminescence bleue à environ 420 nm :

Effet sur la couleur : Ce pic est associé à la présence de titane (Ti) dans le saphir. Une concentration plus élevée de titane favorise la création de ce pic et contribue à la couleur bleue caractéristique notamment du saphir n° 5. Plus la concentration en titane est élevée, plus la couleur du saphir sera intense.

Pic de luminescence verte à environ 550 nm :

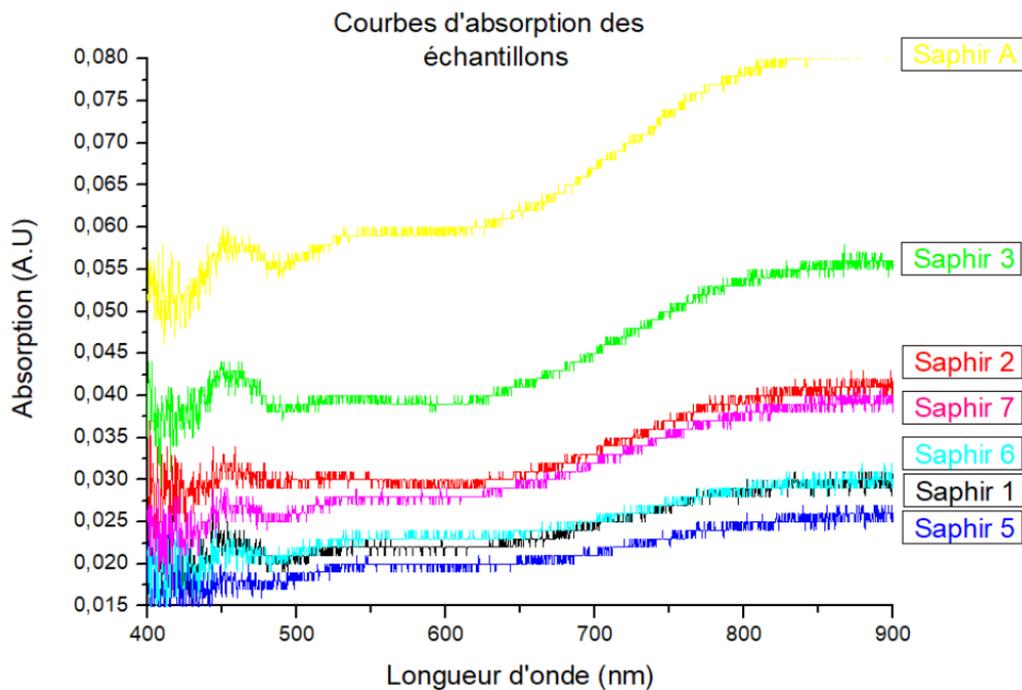
Effet sur la couleur : Ce pic est généralement lié à la présence de fer (Fe) dans le saphir. La combinaison du fer et du titane peut donner lieu à des teintes vert jaunâtre notamment dans le saphir n°3.

Pic de luminescence rouge à environ 680 nm :

Le pic de luminescence à 680 nm dans le spectre de luminescence des saphirs numéros, 1, 2, 3, 6, 7 et 8 est généralement associé à une gamme de couleurs allant du jaune au bleu verdâtre. Cette variation

chromatique est le résultat de la présence simultanée de titane et de chrome dans la structure cristalline du saphir.

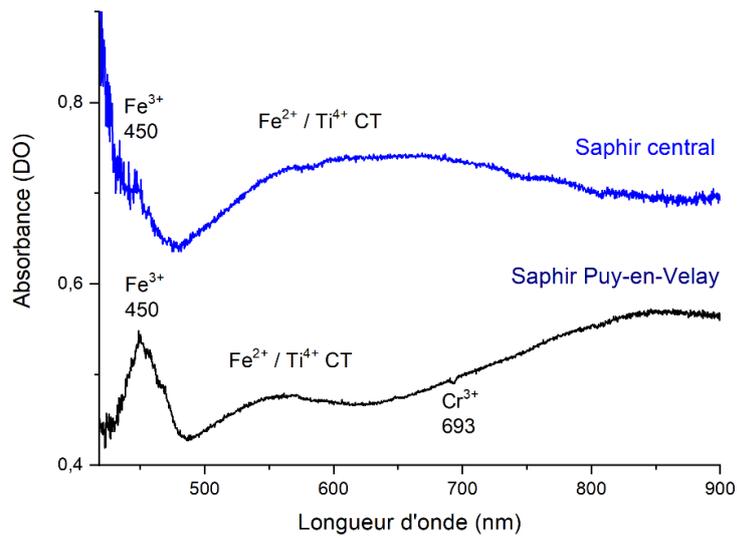
ABSORPTION OPTIQUE VIS-IR



Spectre d'absorption des saphirs étudiés

Le pic à 450 nm correspond à une absorption située dans la plage de la couleur bleue, et il est étroitement associé à la structure cristalline de l'alumine, le composant principal du saphir. Cette absorption dans le bleu est une caractéristique intrinsèque du saphir en raison de sa composition chimique.

Le pic à 475 nm révèle une absorption dans la région du bleu-vert. Cette absorption peut être attribuée à la présence de certains éléments traces, tels que le fer ou le titane, qui sont incorporés dans le cristal de saphir. Ces éléments trace peuvent influencer la couleur et l'apparence du saphir en ajoutant des nuances de bleu-vert à sa teinte globale.

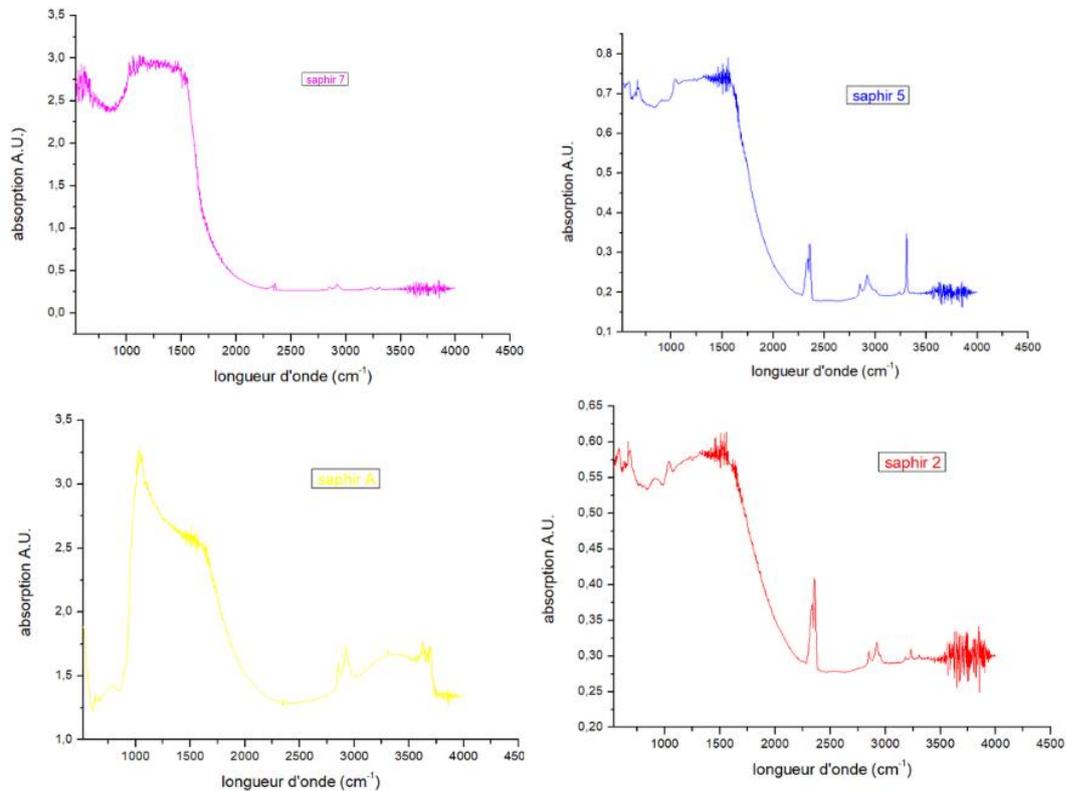


Spectres d'absorption comparé du saphir central du Talisman de Charlemagne et celui d'un saphir du Puy-en-Velay (Panczer et al., 2017 ; 2019)

Le saphir central du Talisman de Charlemagne (Panczer et al., 2017 ; 2019) présente un spectre d'absorption typique d'un saphir avec une large bande d'absorption par transfert de charge $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$, ainsi qu'une absorption très faible à 450 nm du fer trivalent Fe^{3+} . Par comparaison, l'absorption de Fe^{3+} apparaît beaucoup plus marquée dans le cas d'un saphir français de Haute-Loire (Puy-en-Velay). De plus, aucune raie d'émission de Cr^{3+} à 693 nm n'est visible. Ceci est confirmé par la totale absence de fluorescence rouge sous illumination aux UVL (365 nm).

Le spectre d'absorption obtenu correspond à celui d'un saphir d'origine métamorphique, il est raisonnable de penser que ce saphir du Talisman est bien d'origine de Ceylan (Sri Lanka) et qu'il peut être de même nature que les saphirs Geuda. L'hypothèse d'un saphir d'origine française (Haute-Loire) est invalidée sachant que ces saphirs sont d'origine magmatique.

courbes spectropie infrarouge FTIR



Spectre FTIR des échantillons étudiés

Pic à environ 3300 cm^{-1} :

Ce pic est associé aux vibrations des groupes hydroxyles (OH) dans la structure de l'alumine. La présence de ce pic peut indiquer la présence de trace d'eau ou de groupes hydroxyles notamment dans le saphir numéro 2.

Pic à environ 650-600 cm^{-1} :

Ce pic est une empreinte caractéristique des liaisons Al-O-Al dans la structure de l'alumine. Il confirme la présence de l'alumine dans le saphir et est l'une des caractéristiques les plus distinctives des spectres FTIR du saphir.

Pic à environ 400-300 cm^{-1} :

Cette plage de longueurs d'onde est également associée aux vibrations des liaisons Al-O-Al dans l'alumine. Les pics dans cette région renforcent davantage la présence de l'alumine dans le saphir.

Le magnésium, élément léger ne peut être dosé par XRF quand il est à trop faible concentration.

ppm	saphirs 7 facetté ebg Moyenne	saphirs 1 à 6 facettés ebg Moyenne	saphirs A à F brut EBG Moyenne	saphirs Puy en Velay (références G. Panczer)
Nb de mesures	4	6	7	2
Cr	447	<LOD	44	17
<i>Cr Error</i>	± 33		± 59	± 14
Fe	7364	5134	4967	4362
<i>Fe Error</i>	± 419	± 307	± 682	± 184
Ga	155	129	138	190
<i>Ga Error</i>	± 27	± 22	± 22	± 19
Ti	299	130	1760	957
<i>Ti Error</i>	± 42	± 48	± 99	± 51
V	<LOD	<LOD	421	<LOD
<i>V Error</i>			± 44	

Tableau : Résultats d'analyses des éléments traces (ppm) moyennés des saphirs étudiés

➤ Titane :

Les données révèlent des variations significatives de la teneur en titane dans les différents échantillons de saphirs étudiés.

Les saphirs 7 facettés, avec une moyenne de 299 ppm de titane, montrent une concentration modérée de cet élément. Cela peut expliquer des teintes variées, allant du bleu au vert dans certains cas.

Les saphirs 1 à 6 facettés, avec une moyenne de 130 ppm de titane, présentent une teneur en titane plus basse. Cette différence de concentration peut contribuer à la palette de couleurs allant du jaune au vert dans ces échantillons.

Les saphirs bruts (A à F), affichant une concentration moyenne élevée de 1760 ppm de titane, sont plus riches en titane. Cette concentration élevée peut expliquer des teintes plus intenses, allant du bleu foncé au vert gris.

Quant aux références de saphirs de Puy en Velay, avec une moyenne de 957 ppm de titane, leur teneur en titane se situe entre les échantillons 7 facettés et bruts. Cela peut contribuer à une gamme de couleurs variée, avec des nuances de bleu et de vert.

Nous soulignons que les saphirs 2/3/4 présentent une teneur double en titane par rapport à leurs homologues de la même série, ils présentent un aspect laiteux et des teintes tirant vers le vert et avec une pointe de jaune.

En résumé, la teneur en titane joue un rôle essentiel dans la détermination de la couleur des saphirs, avec des variations qui vont du bleu au vert en fonction de la concentration de cet élément.

➤ **Chrome :**

Les saphirs 7 facetté, les saphirs 1 à 6 facettés, les saphirs bruts (A à F), et des références de saphirs provenant de Puy en Velay (références G. Panczer).

Les résultats de l'analyse XRF dévoilent des informations significatives concernant la concentration en chrome (Cr) dans les divers échantillons de saphirs étudiés :

Pour le saphir 7 facetté, caractérisés par une concentration élevée de chrome à 447 ppm, cette présence contribue à expliquer les teintes bleu distinctives de ce saphir.

Concernant les saphirs 1 à 6 facettés, où la concentration en chrome est inférieure à la limite de détection (<LOD), cette non détection de chrome peut expliquer la teinte bleu verdâtre. Dans ces échantillons, la couleur est principalement influencée par la teneur en titane, expliquant ainsi la variabilité de leurs teintes.

Le saphir brut D, avec une détection de 44 ppm de chrome, présente des nuances de couleur bleu gris distinctives. La coexistence de chrome et de titane dans cet échantillon peut donner lieu à ces teintes particulières, ce qui suggère une possible influence de facteurs géologiques spécifiques sur la composition de ce saphir.

Les références de saphirs provenant de Puy en Velay présentent une concentration moyenne de chrome de 17 ppm, bien inférieure à celle du saphir 7 facetté, à 447 ppm. Cette différence significative de teneur en chrome suggère des variations géologiques distinctes entre ces deux sources de saphirs, ce qui influe sur leur composition chimique et, par conséquent, sur leur couleur et leur valeur gemmologique.

➤ **Fer :**

Pour le saphir 7 facetté, avec une moyenne de 7364 ppm de fer, la présence substantielle de cet élément peut contribuer à des teintes bleues. Le fer peut agir comme un chromophore, influençant la couleur en fonction de sa concentration.

Les saphirs 1 à 6 facettés, avec une moyenne de 5134 ppm de fer, présentent également une teneur en fer significative. Cette concentration peut expliquer la palette de couleurs observée, allant du jaune au bleu.

Les saphirs bruts (A à F), avec une moyenne de 4967 ppm de fer, affichent une concentration en fer similaire aux saphirs 1 à 6 facettés, ce qui peut contribuer à des teintes comparables allant du jaune au bleu.

En ce qui concerne les références de saphirs provenant de Puy en Velay, avec une moyenne de 4362 ppm de fer, la concentration en fer est légèrement inférieure à celle des échantillons facettés. Cependant, le fer peut toujours jouer un rôle important dans la détermination de la couleur, contribuant ainsi à des teintes qui varient du jaune au bleu.

	Sioulot		Coupet		Menoyre	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Fe	6253,488	1651,579	2736,133	970,4905	6896,7	1467,293
Cr	313,2438	140,5495	76,2	131,9823	0	0
Mg	116,0375	39,4503	31,75	18,37505	5,925	2,162753
Ga	91,34063	21,69315	120,7333	23,57606	229,225	95,99175
Ti	69,625	51,45523	21,73333	6,261257	14,275	5,386016
V	59,21875	20,57018	30,13333	14,09054	14,05	21,84346

Tableau. Résultats d'analyse en éléments traces de saphirs d'Auvergne (Gaillou, 2003)

Quels enseignements et observations pouvons-nous tirer de ces analyses en rappelant les informations principales qu'elles nous apportent :

- Spectrométrie Raman, information sur la structure de l'échantillon
- Spectrométrie d'absorption infrarouge FTIR, information sur l'identité chimique
- Spectrométrie d'absorption VIS-IR, information d'ordre chimique
- Spectrométrie de fluorescence, une information chimique
- Spectrométrie de fluorescence X (XRF), une information chimique.

Nous focaliserons sur la technique scientifique (XRF) pour les informations importantes sur les éléments traces quelle permet de comparer entre eux. Ces éléments nous apportent des informations qui permettent de mieux comprendre la couleur des saphirs vue de l'œil humain.

Nous pouvons également nous référer à l'étude d'Eloise Gaillou et notamment sur le gisement alluvionnaire du Sioulot.

Le Chrome est présent de façon significative dans les échantillons étudiés du Sioulot, ainsi que dans l'échantillon 7 du ruisseau Rioupéroux. Par contre il est peu présent ou en très faible quantité, aussi bien dans les échantillons facettés ou bruts de l'Ailloux.

On peut donc constater que cette faible quantité de l'élément trace chrome est caractéristique de notre échantillon d'étude aussi bien pour les facettés que les bruts.

Le titane est présent de façon significative dans l'échantillon 7, plus modestement pour les saphirs du Sioulot, et faiblement pour les saphirs facettés de notre étude, par contre important pour les saphirs bruts de l'Ailloux.

Concernant l'élément fer, une mesure est surprenante avec une mesure de 164645 ppm, échantillon brut B. En observant ce saphir on constate sa couleur très sombre. Cette observation confirme donc que cet élément en forte proportion assombrit la gemme.

CONCLUSIONS ET PROSPECTIVES

Lors de cette étude, il a été mis en évidence des points communs entre les différents gisements notamment les gisements alluvionnaires par leurs caractères magmatiques volcaniques. Des investigations et études géologiques semblent indispensables pour déterminer et localiser la source ou les sources de ce gisement, non répertorié à ce jour.

Nous avons évoqué quelques pistes à étudier, reste toutes les autres à découvrir.

Le saphir fascinant notamment par les palettes de ses couleurs, suscite cette réflexion en conclusion. Nous savons que les éléments traces présents dans leurs combinaisons et proportions déterminent en partie leur couleur finale. La multiplicité des configurations, ouvre des potentiels de travaux notamment d'une nomenclature typologique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

Chermette A., Martine de Bertereau (1590-1643), une femme ingénieur des mines au 17^è siècle, publications de la Société Linnéenne de Lyon 1985, 54-10, pp.69-80

Cubizolle Hervé (2021) Curiosités géologiques du Livradois-Forez et de ses bordures, BRGM éditions.

De Ascençao Guedes Roger (2010) Des histoires pour le saphir du riu Pezzouliou. *Le règne minéral*, numéro 93.

Devouard, B., Paquette, J.L., Ricci, J., Médard, E., Boivin, P., Gaillou, E., Vielzeuf, D. and Rochault, J. (2010) Saphirs et zircons gemmes d'Auvergne (Massif Central français) : occurrences, pétrogenèse et géochronologie. 23^{ème} Réunion des Sciences de la Terre (RST 2010), Bordeaux, 25-29 octobre 2010. Session 4-1 : Gemmologie.

Étude gemmologique, le saphir d'Auvergne/Issoire, auteur inconnu, cité dans son rapport E. Gaillou, Mme Cristol et Mr Offrant.

Feydiou Chlotilde (2012) Analyse gemmologique sur site de la collection de bijoux antiques du musée Gallo-Romain de Lyon, DUGEM.

Forestier François-Hubert (1993) Histoire de l'un des gisements de gemmes le plus anciennement connu d'Europe occidentale : saphirs, grenats et hyacinthes du Puy-en-Velay (43). *Cahiers de la Haute-Loire*, pp. 81-148.

Gaillou Eloïse (2003) Les saphirs du Massif Central : Etude minéralogique des saphirs du Sioulot, du Mont Coupet et du Menoyre. Détermination de leur origine. DEA Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

Gonnard Ferdinand (1910) Sur les gisements gemmifères du Velay et de la basse Auvergne, leur distribution géographique dans ces 2 régions et leurs rapports au point de vue des associations qu'ils renferment. *Bulletin de la Société française de Minéralogie*, volume 33, 3-4, pp. 152 161.

Martin Alexandre, <https://mediamsuisse.ch>, le saphir : fiche technique, géologie et considérations gemmologiques 2020.

Muzy Jessica, Thèse 2020, Caractéristique mécanique du saphir en fonction de son élaboration et de sa qualité cristalline, Université Grenoble Alpes, dirigé par Marc Fivel, Directeur de recherche , CNRS, et codirigé par Thierry Duffar, professeur, Grenoble INP/UGA.

Or du monde, <https://www.wordumonde.com>, gemmologie, saphir.

Panczer G., Riondet G., Forest L., Krzemnicki M.S., Faure F. (2019) The Talisman of Charlemagne: New historical and gemological discoveries. *Gems & Gemology*, 55, 1, 30-46.

Panczer G., Riondet G., Forest L., Krzemnicki M.S., Faure F. (2017) Le talisman de Charlemagne : nouvelles découvertes historiques et gemmologiques. *Revue de Gemmologie*, 199, 18-25.

Pégère G. (1994) Le Mont-Coupet dans le volcanisme de Saint-Georges-d'Aurac, Haute-Loire, sa magmatologie, sa faune fossile, ses pierres gemmes, *Almanach de Brioude, Haute-Loire*, pp. 193–211.

Perinet F. (1995) Les microcristaux du Riou Pezzouliou (Hte Loire). *Le Cahier des Micromonteurs*, 95(1), 7-21.

Rochault J. (2002) Pétrographie des saphirs du Massif Central : L'exemple du Sioulot. Mémoire de Maîtrise, Travail d'Etude et de Recherche, Université de Clermont-Ferrand.

Servant L. (2010) Des saphirs dans le bassin de Paulhaguet, entre Allier et Sènoire, Haute-Loire. *Le Règne Minéral*, n°93, pp 42-47.)

Site du Sandre, géoportail IGN, <https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1810265>.

ANNEXES

Résultats d'analyse élémentaire XRF de chaque saphir étudié

Résultats d'analyse élémentaire du saphir facetté bleu 7 (Gem France)

ppm	saphir 7 ebg	saphir 7 ebg	saphir 7 ebg	saphir 7 ebg	saphir 7 ebg moyenne
Cr	629	266	<LOD	<LOD	447
Cr Error	43	25	30	35	33
Fe	6872	6140	8267	8177	7364
Fe Error	829	273	237	338	419
Ga	116	101	208	195	155
Ga Error	50	16	17	23	27
Ti	93	136	486	482	299
Ti Error	36	33	40	59	42
V	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
V Error	24	22	19	26	23

Résultats d'analyse élémentaire des saphirs facettés 1 à 6 (Gem France)

ppm	saphir 1 ebg	saphir 2 ebg	saphir 3 ebg	saphir 4 ebg	saphir 5 ebg	saphir 6 ebg	saphir 1 à 6 ebg moyenne
Cr	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
Cr Error	40	32	38	32	31	46	36
Fe	6339	5368	4758	4696	5358	4283	5134
Fe Error	361	276	313	280	287	327	307
Ga	141	112	120	126	150	124	129
Ga Error	25	18	23	21	22	25	22
Ti	<LOD	187	128	181	72	82	130
Ti Error	81	39	43	43	34	51	48
V	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD
V Error	26	26	22	21	21	29	24

Résultats d'analyse élémentaire du saphir brut

ppp	saphir a ebg	saphir A EBG	saphir B EBG	saphir C EBG	saphir D EBG	saphir E EBG	saphir F EBG	saphir A à F EBG moyenne
Cr	<LOD	<LOD	<LOD	44	<LOD	<LOD	<LOD	44
Cr Error	37	26	215	19	32	32	53	59
Fe	4440	5602	164645	5061	5248	2432	7020	27778
Fe Error	220	256	3215	239	264	211	370	682
Ga	107	146	91	148	143	187	145	138

<i>Ga Error</i>	16	19	31	18	20	25	24	22
Ti	1161	2659	5927	1124	539	271	641	1760
<i>Ti Error</i>	68	105	278	68	52	46	76	99
V	<LOD	<LOD	421	<LOD	<LOD	<LOD	<LOD	421
<i>V Error</i>	26	47	91	34	30	28	51	44