

Promotion 2013 - 2014

Diplôme d'Université de Gemmologie

Présenté devant l'Université de Nantes

U.F.R des Sciences et Techniques

par

Melle. Lauriane PINSAULT

<i>Les facteurs géologiques contrôlant la qualité gemme des grenats du Massif Armoricaïn</i>

Soutenu publiquement le 3 mars 2016

**Au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers devant la
commission d'examen composée de :**

M. E. FRITSCH	Professeur	Président
M. B. RONDEAU	Maître de Conférences	Vice-Président
M. F. NOTARI	Directeur, Gemtechlab	Examineur
M. C. EWELS	Chargé de Recherches	Examineur
M. Y. MORIZET	Maître de Conférences	Examineur
M. S. KARAMELAS	Chercheur, Gübelin Gemlab	Examineur
M. B. LASNIER	Professeur émérite	Invité

Sommaire

Remerciements	- 1 -
Liste des abréviations.....	- 2 -
Chapitre 1 Introduction.....	- 3 -
Chapitre 2 États des connaissances	- 5 -
2.1 Le groupe des grenats	- 5 -
2.1.a L'almandin (Figures 5 et 6)	- 9 -
2.1.b Le pyrope (Figure 7).....	- 10 -
2.1.c La spessartite (Figures 8 et 9).....	- 10 -
2.1.d La rhodolite : variété de pyrope-almandin (Figure 10)	- 11 -
2.2 Gitologie du grenat.....	- 15 -
2.3 L'histoire du Massif Armoricaïn, en bref	- 16 -
2.4 Sélection des sites d'échantillonnage, géologie régionale	- 18 -
2.4.a Grenat de Plélauff (22) – Echantillon LP02.....	- 19 -
.....	- 20 -
2.4.b Grenat de Saint-Jacut de la mer (22) – Echantillon LP03	- 20 -
2.4.c Grenats des éclogites du complexe de Essarts (44) – Echantillon LP04 & LP07	- 22 -
2.4.d Grenat de la pointe du Raz (29) – Echantillon LP05	- 24 -
2.4.e Grenat de l'île de Groix – Echantillon LP06	- 26 -
Chapitre 3 Les facteurs géologiques susceptibles d'affecter la qualité gemmes des grenats	- 28 -
3.1 Contextes géologiques propices au développement de grenats gemmes	- 28 -
3.1.a Le métamorphisme	- 28 -
3.1.b Les pegmatites.....	- 29 -
3.1.c Le métasomatisme	- 30 -
3.2 La chimie.....	- 30 -
3.3 Epoques géologiques.....	- 31 -
Chapitre 4 Descriptions des échantillons et méthodes d'analyses.....	- 33 -
4.1 Les échantillons	- 33 -
4.2 Méthode de gemmologie classique	- 36 -
4.2.a Masse spécifique dite « densité »	- 36 -
4.2.b La microscopie optique	- 36 -
4.3 Méthodes de gemmologie de laboratoire	- 37 -
4.3.a Spectroscopie UV-Visible.....	- 37 -
4.3.b MEB (Microscope électronique à balayage).....	- 37 -
4.3.c Spectroscopie Raman	- 37 -
Chapitre 5 Résultats	- 38 -

5.1	Gemmologie classique.....	- 38 -
5.1.a	Densité.....	- 38 -
5.1.b	Microscopie optique.....	- 38 -
5.2	Gemmologie de laboratoire	- 48 -
5.2.a	Spectroscopie UV-Visible.....	- 48 -
5.2.b	Spectroscopie Raman	- 48 -
5.2.c	MEB	- 51 -
Chapitre 6	Discussion	- 53 -
6.1	Les critères de qualité	- 53 -
6.1.a	La couleur	- 53 -
6.1.b	La transparence	- 53 -
6.1.c	Dimensions de la pierre.....	- 54 -
6.2	Synthèse sur la qualité des grenats du Massif Armoricaïn	- 55 -
6.2.a	Plélauff (LP02) : Métamorphisme de contact.....	- 55 -
6.2.b	Saint-Jacut de la mer (LP03) : Pegmatite.....	- 56 -
6.2.c	La Baie des Trépassés (LP05) : Leucogranite	- 58 -
6.2.d	Grenats de contexte ultra-métamorphique (LP04, LP06 et LP07)	- 58 -
6.2.e	Grenat de chine (LP01) : contexte géologique inconnu	- 59 -
Chapitre 7	Conclusion	- 60 -
	Références bibliographiques	- 62 -

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Emmanuel Fritsch et Benjamin Rondeau pour leurs cours, leur aide et tous leurs précieux conseils.

Merci aussi à Hervé et Laurent, pour m'avoir aidé à préparer mes échantillons et surtout pour leur sympathie, ainsi qu'à Boris Chauviré pour ses aides ponctuelles.

Merci à toute les personnes que j'ai eu l'occasion de rencontrer grâce à ce mémoire : Mr Gérard Bertaud, qui a accepté de m'ouvrir les portes de sa carrière à la Gerbaudière (44) Mr John Brunet, pour m'avoir donné des échantillons et accompagné sur le terrain. Les « frangins », pour m'avoir accueilli dans leurs musées des minéraux et aidé dans mes recherches.

Merci aux membres de Géoforum¹, pour les pistes de recherche et de prospection.

Merci à tous mes collègues de Master, pour leur bonne humeur et les bons moments passés et à venir, une attention particulière pour Sarah.

Et enfin je ne remercierais jamais assez ma famille, pour leur soutien sans faille et pour me donner les moyens de réaliser ces longues études universitaires.

Merci à Mr Morizet, pour son avoir cru en moi, son soutien et ces conseils au long de la rédaction.

¹Site et forum de géologie et minéralogie : www.géoforum.fr

Liste des abréviations

cm : centimètre

nm : nanomètre

nA : nano Ampère

kV : kilo Volt

mW : milli Watt

mn : minute

MEB : Microscope Électronique à Balayage

UV : Ultraviolet

LPA : Lumière Polarisée et Analysée

LPNA : Lumière Polarisée et Non-Analysée

Chapitre 1 Introduction

L'objectif principal de la gîtologie des gemmes est la compréhension de la genèse des gisements de minéraux gemmes. Les contextes géologiques propices au développement de telle ou telle gemme sont de mieux en mieux connus, ce qui devrait permettre de rechercher plus efficacement de nouvelles localités susceptibles de contenir des gisements. En effet, pouvoir proposer des critères d'exploration est un avantage considérable pour l'industrie minière.. Cependant, l'expérience a montré que malgré ces avancées, la grande majorité des gisements sont toujours trouvés par hasard. La question du facteur gemme se pose alors : en plus du contexte géologique propice à son développement, qu'est-ce qui contrôle la qualité gemme d'un minéral ? Répondre à cette question serait un atout dans l'exploration et l'exploitation des gemmes, qui restent à l'heure actuelle essentiellement artisanales, à l'exception du diamant. Une meilleure appréhension du caractère gemme des minéraux aiderait à la modernisation des méthodes de prospection ainsi que d'exploitation.

Définissons d'abord ce qu'est une gemme, et ce qu'est un minéral. Le terme gemme s'applique à toute matière qui présente une beauté particulière. Il s'agit principalement de minéraux, mais peuvent aussi être des roches, des sécrétions animales ou végétales (Bariand et al., 1998). Une gemme doit pouvoir être utilisée en joaillerie. La rareté est souvent considérée comme un critère important (Schumann, 2009), cependant ce caractère est relatif. En effet, il est facile de voir que le diamant, qui est loin d'être la gemme la plus rare au monde, est pourtant celle qui représente le plus gros marché. Les campagnes de publicité, le « branding » (l'image de marque), apportent une dimension culturelle aux pierres qui influe sur leurs valeurs.

Un minéral est par définition une matière solide, formée naturellement dans le sous-sol, possédant une composition chimique définie et un arrangement atomique ordonné (Bariand et al., 1998). Le développement d'un minéral dans une roche implique qu'il ait été dans des conditions de formation favorables à sa croissance. Un minéral peut être gemme lorsqu'il présente les qualités requises pour cela, c'est à dire des dimensions suffisantes pour qu'il puisse être taillé, une couleur attrayante, une bonne transparence, une dureté suffisante et/ou un aspect particulier (astérisme, adulescence, etc., Bariand et al., 1998). Or on constate que pour une espèce donnée la majorité des cristaux sont non-gemmes (pour une ou plusieurs raisons) et quelques rares exceptions sont gemmes.

Cette étude s'inscrit dans l'étude du « facteur gemme » et vise à déterminer quels sont les paramètres qui contrôlent la qualité d'un minéral. Autrement dit, le but est de comprendre pourquoi un minéral qui existe sous forme gemme à certains endroits du monde et est exploité

à cette fin, ne l'est pas dans d'autres. Les causes en jeu peuvent intervenir pendant la croissance du minéral (par exemple par manque de place il sera de petite taille), ou après la croissance (fracturations, altération mécanique et chimique, ...). Le sujet est vaste, car les agents limitant de la qualité gemme seront propres à chaque minéral et à chaque localité. Pour réduire le champ d'étude, il a été choisi d'étudier un minéral en particulier : le grenat.

Le grenat est un minéral qui apparaît fréquemment gemme dans le monde entier, et dans de nombreuses gîtologies. Étant abondant sous sa forme commune dans le Massif Armoricaïn, et donc facilement accessible pour l'échantillonnage, c'est sur ce minéral que le choix de l'étude s'est porté. Malgré son omniprésence en Bretagne, il n'y est jamais de qualité gemme. Son existence dans des lithologies très variées de ce massif est un atout de taille sur l'étude de l'influence de l'environnement de développement du minéral sur son aspect. Un échantillon fera cependant office d'exception, il s'agit d'un grenat de Chine (localité précise inconnue) qui montre un zonage de qualité gemme très prononcé.

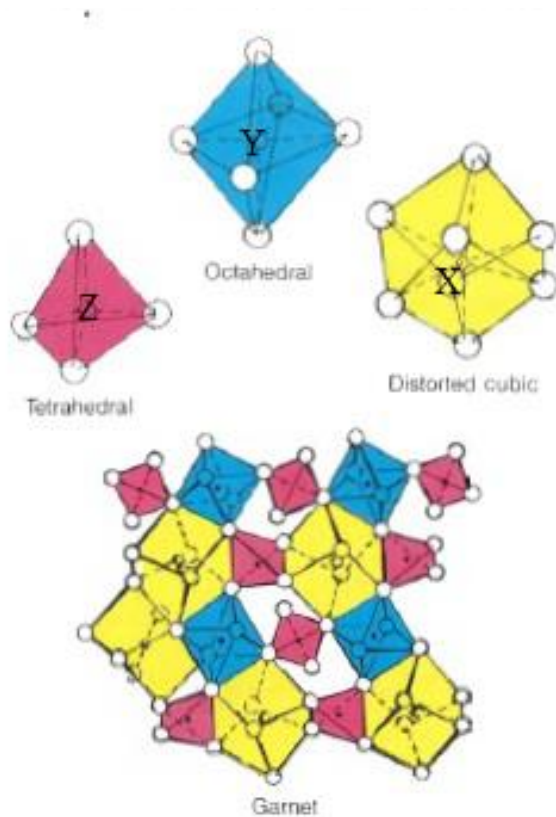
Ce mémoire a été réalisé dans le cadre du Diplôme d'Université de Gemmologie, à Nantes, encadré par Mr Benjamin Rondeau et Mr Emmanuel Fritsch. Ce travail prend la suite d'un TER (mémoire de recherche de master 1 Terre, Planète, Environnement) réalisé par Pierre Hemon dans cette même université, en 2010, puis de mon propre TER en 2014. Les motivations personnelles qui ont déterminé le choix de ce thème sont d'une part le manque d'information sur ce type de question, et de manière plus générale le manque de recherche sur la gîtologie des gemmes. Mais également l'alliance des deux disciplines auquel il fait appel qui sont maintenant indissociables pour moi : la gemmologie au service de la géologie, et vice et versa

Chapitre 2 États des connaissances

2.1 Le groupe des grenats

Le nom grenat provient du latin "granatum", qui signifie grenade, du fait de la ressemblance des grenats les plus communs (qui sont rouges) avec le fruit (Deer et al., 1982). C'est un minéral très fréquent dans le monde entier. Cependant, malgré son abondance, peu de gisements l'exploitent comme gemme, et il est rarement le produit principal d'une exploitation. En tant que sous-produit, il est utilisé comme matériau abrasif (Kievlenko, 2003). Comme gemme, l'almandin est le plus répandu (Asselborn et al., 2006), de grosses quantités sont recensées, notamment avec des dimensions importantes et des couleurs très attrayantes (Deville, 1995). Cependant, les grenats les plus prisés sont les verts, tsazorites et démantoïdes.

Les grenats font partie de la famille des silicates. Leur formule générale est $X_3^{2+}Y_2^{3+}[SiO_4]_3$ et ils présentent tous une structure cristalline cubique (Deer et al., 1982). Celle-ci est assez complexe car elle est constituée à elle seule des trois grands types de groupements structuraux généralement présents dans les gemmes: des tétraèdres, des octaèdres et des cubes déformés (Deville, 1995).



Les tétraèdres de silice, SiO_4 , alternent avec des octaèdres YO_6 , formant une charpente dont les interstices sont des cubes distordus. (Deville, 1995). Deux bords de chaque tétraèdre, et six bords de chaque octaèdre sont partagés avec un dodécaèdre, qui partage ces quatre derniers bords avec un autre dodécaèdre (Figure 1).

Figure 1: En haut: Les trois grands types de coordinations dans les gemmes. En bas : Schéma structural du grenat. Modifié de Fritsch & Rossman, 1987.

Ces nombreux partages seraient à l'origine de la densité, et de l'indice de réfraction élevé de ces minéraux (Deer et al., 1982). Les polyèdres cubiques peuvent être tordus par la taille du cation qu'ils hébergent (Robert & Bousquet, 2013). En effet, c'est au centre des dodécaèdres que le cation X va se loger. Les impuretés métalliques peuvent intégrer la structure dans les différents sites, principalement X ou Y, générant des couleurs différentes car la liaison métal-O varie d'un site à l'autre. Il est donc important d'énumérer et comprendre ces sites car ils sont à l'origine de la variété de couleur des grenats (Fritsch & Rossman, 1987-88).

La famille des grenats est divisée en deux grandes séries : celle des pyralspites, caractérisée par la présence d'un ion aluminium en Y ; et celle des ugrandites, caractérisée par la présence d'un ion calcium en X. Dans chacune de ces deux séries dominant 3 espèces, correspondant à trois pôles purs. Toutes les combinaisons intermédiaires entre ces pôles purs sont possibles. La famille des grenats silicatés se résume donc ainsi (Deer et al., 1982):

Séries des Pyralspites (grenat alumineux): $X_3Al_2[SiO_4]_3$:

- Almandin: pôle ferrique: $Fe_3Al_2[SiO_4]_3$
- Pyrope: pôle magnésien: $Mg_3Al_2[SiO_4]_3$
- Spessartite: pôle manganèse: $Mn_3Al_2[SiO_4]_3$

Séries des Ugrandites (grenats calciques): $Ca_3Y_2[SiO_4]_3$:

- Grossulaire: pôle alumineux: $Ca_3Al_2[SiO_4]_3$
- Ouvarovite: pôle chromifère: $Ca_3Cr_2[SiO_4]_3$
- Andradite: pôle ferrique: $Ca_3(Fe, Ti)_2[SiO_4]_3$

Les noms des deux séries sont forgés à partir des espèces qui les constituent (Hemon, 2010). Le terme grenat employé seul désigne le pyrope-almandin (Bariand et al., 1998). En réalité, les pôles parfaitement purs sont toujours rares, les minéraux existent sous forme de solution solide, forme transitoire entre les pôles (Deville, 1995). Des analyses chimiques sont quasiment toujours nécessaires pour déterminer avec précision quelle est la nature d'un grenat (Asselborn et al., 2006).

Les grenats cristallisent principalement sous forme de rhombododécaèdres, c'est le cas pour l'almandin et les ugrandites (Figure 2). Les pyralspites se retrouvent fréquemment sous la forme de trigonotrioctaèdre (Bariand et al., 1998).

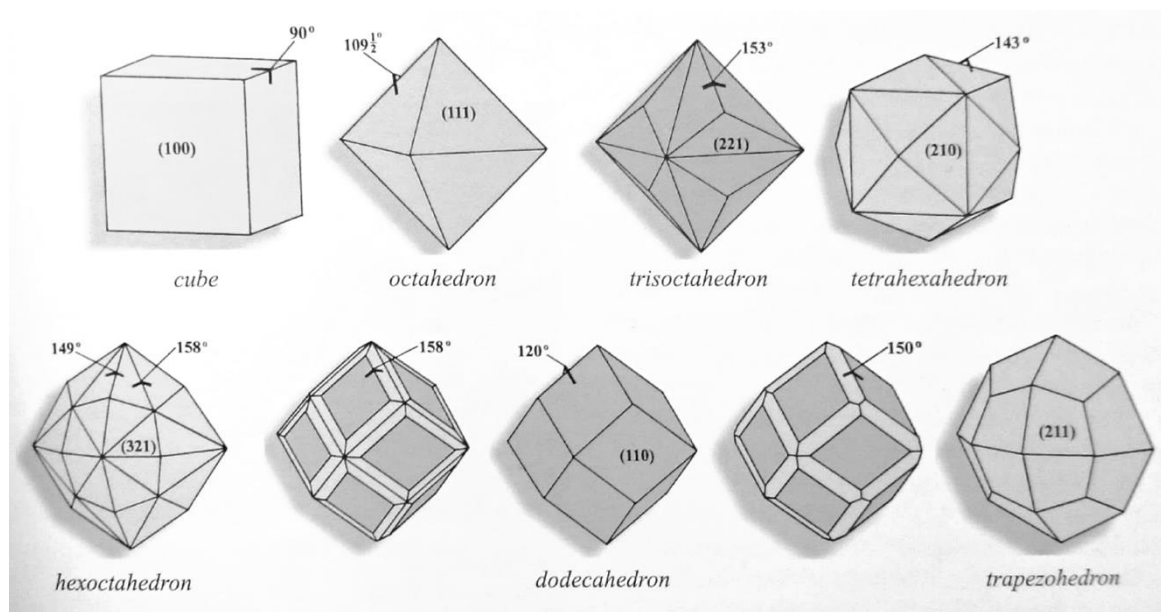


Figure 2: Différentes formes cristallines des grenats. Les plus courantes sont le rhombododécaèdre (dodecahedron sur la figure), le trapézoèdre (trapezohedron) et le trigonotrioctaèdre (trisoctahedron). D'après Gilg et al., 2008

La série des pyrospites est représentée par des grenats de couleur rouge-rose, parfois brun, alors que celle des ugrandites regroupe toutes les autres couleurs : jaune, orange, noir, vert... (Bariand et al., 1998). La seule coloration qui n'est pas présente dans la famille du grenat est le bleu (Figure 3). Il est à noter que le grenat à changement de couleur de Madagascar, variété nommée « békily », est parfois considéré comme étant le seul grenat bleu existant. Ce grenat de la série pyrope-spessartite riche en vanadium présente une couleur bleu-vert à la lumière du jour, et pourpre sous une lumière incandescente (Schmetzer & Bernhardt, 1999).



Figure 3: Les grenats prennent toutes les couleurs, excepté le bleu.
Photo ©GIA

Dans une gemme, la couleur est induite par la coordination dans laquelle un ion colorant se trouve (Fritsch & Rossman, 1987). Le fait que les grenats possèdent les trois coordinations au sein de leurs structures explique peut-être la diversité de leurs couleurs. Pour l'almandin, le pyrope et la rhodolite, le Fe^{2+} en coordination cubique déformé est responsable de la couleur. Pour la spessartine, c'est l'ion Mn^{2+} dans le site cubique déformé qui est à l'origine de la

coloration orange. Pour les grenats verts, ce sont des ions en coordination octaédrique qui les colorent (Cr^{3+} pour le démantoïde et l'uvarovite, V^{3+} pour la tsavorite, Fritsch & Rossman, 1988). Il faut préciser que la concentration des ions responsables de la couleur est un facteur primordial contrôlant l'intensité de la teinte, tout comme l'est la distance qui sépare cet ion de l'oxygène. Par exemple, le pyrope contient toujours du chrome en coordination octaédrique, lorsque sa concentration est faible la couleur du pyrope est rouge. Lorsque la concentration de chrome augmente, la distance entre cet ion et les oxygènes augmente également, ce qui implique un changement de couleur, le pyrope est alors rouge-violet intense (Fritsch & Rossman, 1987).

Les grenats peuvent présenter des phénomènes optiques qui impactent sur la qualité gemme et leurs valeurs, tel que l'astérisme. De fines inclusions en aiguilles de rutile s'orientent le long des axes de symétrie, notamment le A_4 , et réfractent la lumière provoquant l'apparition d'étoiles à quatre ou six branches (Figure 4). Ce phénomène est observé chez les almandins (Deville, 1995 ; Bariand et al., 1998)

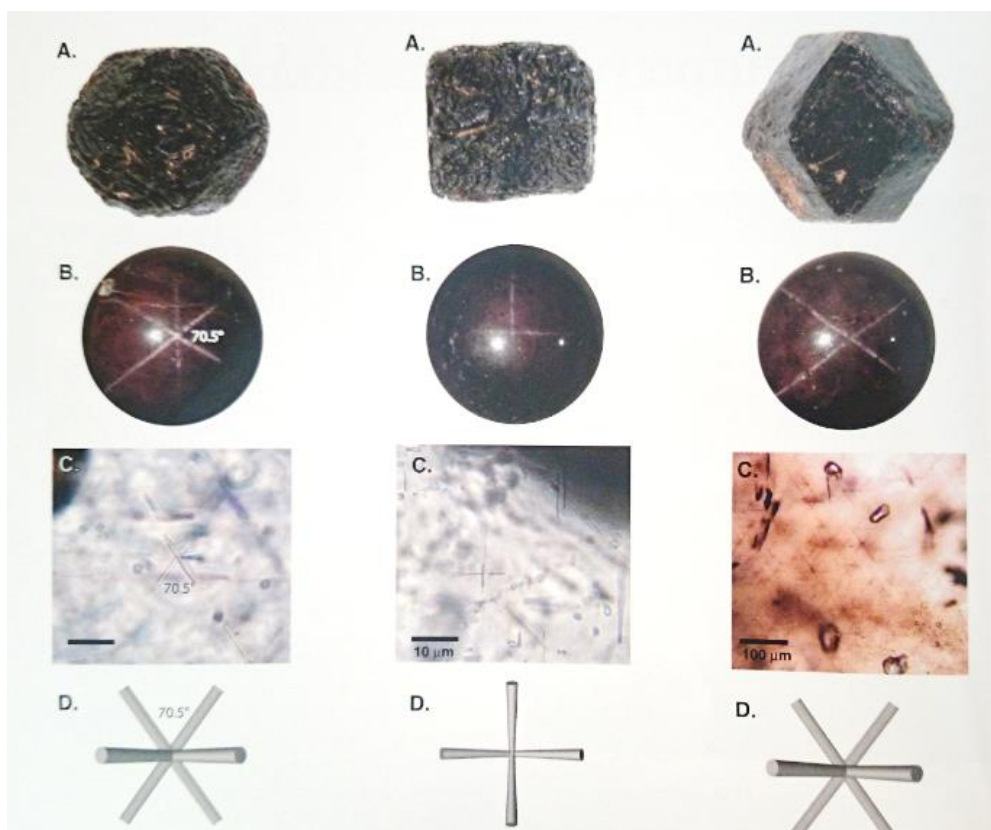


Figure 4: Sur ces grenats almandins de mauvaise qualité d'Idaho, c'est l'astérisme qui confère un caractère gemme aux pierres. En A : échantillons brut ; en B : échantillons taillés cabochon ; en C : inclusions en aiguilles observées dans ces grenats ; en D : représentation 3D des inclusions. D'après Gilg et al., 2008.

Les grenats échantillonnés dans le Massif Armoricaïn seront principalement des almandins, ou solutions solides de pyrospites. Deville répertorie aussi la présence de

grossulaire au sud de Ginguamp. Le grossulaire est un grenat ugrandite qui possède, tout comme les pyralspites, un aluminium en Y. C'est donc normal de le trouver dans cette localité car il suffit qu'une partie des ions X, fer, manganèse ou magnésium, se substitue aux ions calcium. Cependant, pour réduire le domaine de recherche de ce mémoire, ces grossulaires du Massif Armoricain ne seront pas étudiés.

Ce chapitre établira une synthèse bibliographique sur les connaissances des trois pyralspites. La rhodolite, minéral à mi-chemin entre pyrope et almandin, est une solution solide fréquente de la série des pyralspites, elle sera donc décrite ci-dessous au même titre que les trois pôles purs.

2.1.a L'almandin (Figures 5 et 6)

Le nom almandin provient de la ville d'Alabandes, en Asie mineure, qui fut un centre de taille et de commerce de ces gemmes (Bariand et al., 1998).

Par définition, un grenat Almandin contient 36.21 %poids de SiO₂, 20.48 %poids d'Al₂O₃ et 43.30 %poids de FeO (Gilg et al., 2008). Il est fréquent que les almandins contiennent 1 à 5% de MgO, et 1 à 7% de MnO. Sa densité varie de 3,94 à 4,32. L'almandin s'altère le plus souvent en chlorite (Deville, 1995). Ces occurrences les plus typiques sont le Brésil, l'Inde, Madagascar, le Sri Lanka et les États-Unis (Schumann, 2009). Toutes les caractéristiques des almandins, notamment utilisées pour leurs identifications, sont regroupées dans le Tableau 1.



Figure 5: Almandin de la mine Edwards, au Michigan. Dimension : 1,4 cm. Photo © Jeff Scovil



Figure 6: Almandin du Massachusetts. Dimension: 8.9 cm. Photo © Jeff Scovil

2.1.b Le pyrope (Figure 7)

Le nom pyrope provient du grec *pur*, qui signifie feu, et *opos*, aspect (Bariand et al., 1998). Par définition il contient 44.71 %poids de SiO₂, 25.99 %poids d'Al₂O₃ et 29.99 %poids de MgO (Gilg et al., 2008). Les pyropes contiennent fréquemment 6 à 20% de FeO, 5 à 8% de CaO, avec souvent des concentrations variables en Cr₂O₃. La densité du pyrope est comprise entre 3,60 et 3,80. Son altération donne de la chlorite ou de la képhylite (Deville, 1995). Les gisements les plus connus sont en République Tchèque, Russie, Afrique du Sud, Australie, au Brésil, Myanmar ou encore aux États-Unis (Schumann, 2009). Toutes les caractéristiques gemmologiques des pyropes sont regroupées dans le Tableau 2.



Figure 7: Pyropes de bohème, à gauche bruts, à droite taillés (la plus grosse pierre fait 3 mm de diamètre).
Photos © Jochen Schlüter

2.1.c La spessartite (Figures 8 et 9)

Nommé d'après la localité de Spessart en Allemagne (Bariand et al., 1977), la spessartite contient 36.41 %poids de SiO₂, 20.60 %poids d'Al₂O₃ et 42.99 %poids de MnO (Gilg et al., 2008). Une spessartite peut également être composée de 2 à 14% de FeO, et 1 à 4% de CaO. Sa densité est comprise entre 4,12 et 4,20. On en retrouve en Allemagne (dans le Spessart), en Italie, en Suède, au

Kenya, à Madagascar, au Mexique et aux États-Unis (Deville, 1995). Toutes les caractéristiques gemmologiques des spessartites sont regroupées dans le Tableau 3.

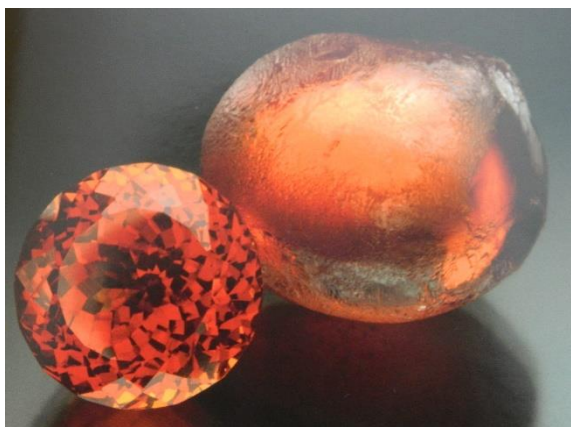


Figure 9: Grenat naturel pyrope-spessartite nommé "Malaya". La pierre taillée fait 23 carats. Photo © Jeff Scovil



Figure 8: Grenats spessartites. A gauche, pierre taillée de 6.93 carats du Nigeria. A droite, pierre brute de 3.6 cm de dimension, de Tanzanie. Photos © Jeff Scovil

2.1.d La rhodolite : variété de pyrope-almandin (Figure 10)

Le nom rhodolite provient du grec « rhodon », qui signifie rose. La rhodolite est un pyrope contenant 10 à 25% d'almandin. Sa couleur peut être rouge à pourpre clair. Les gisements réputés sont aux USA (Géorgie), à Madagascar, en Tanzanie, au Brésil et en Zambie (Deville, 1995).



Figure 10: Rhodolites brutes (au fond) et gemmes (devant). Photo : <http://www.jewelsbywoods.com/>

Tableau 1: Caractéristiques gemmologiques des almandins

Carte d'identité : Almandin $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$

Couleur: Rouge, rouge sombre, rouge tirant sur le pourpre

Densité: 3.94 - 4.32

Dureté: 7 - 7.5

I.R.: 1.775 – 1.830 (diminue avec la teneur en magnésium)

Polarisation: Isotrope, anomalies de polarisations fréquentes.

Dispersion: 0.024

Clivage: très faible sur {110}

Fluorescence: non

Pléochroïsme: non

Filtre Chelsea: Rouge

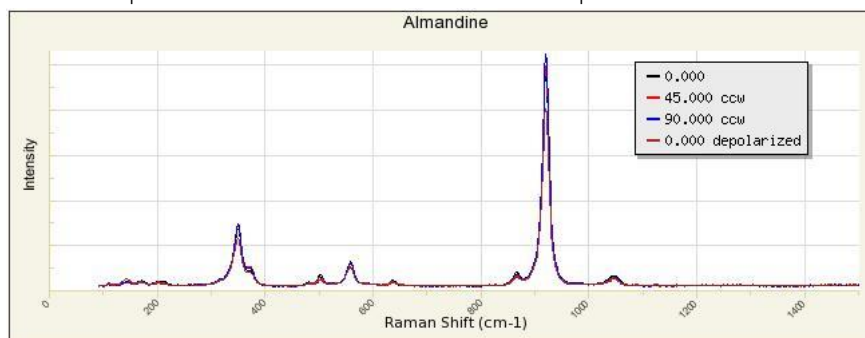
Altération: Chlorite

Spectroscopies:



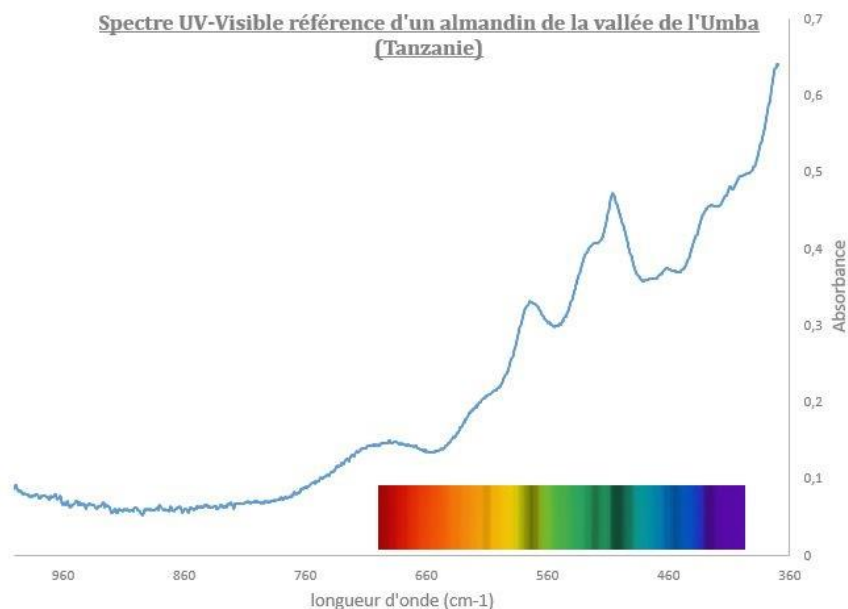
Almandin de la Fancy Gorge mine (USA). © Lou Perloff. Source : MineralAtlas.com

- Raman : Spectres du GIA sur Almandin du Canada. Laser parallèle à c. Source : ruff.info



- UV-Vis :

Spectre UV-Visible référence d'un almandin de la vallée de l'Umba (Tanzanie)



Gisements : Etats-Unis, Inde, Sri Lanka, Madagascar, Brésil, Autriche

Deer, 1982. Deville, 1995. Frediani et al., 2005. Schuman, 2009, Flies, 2008, Geminterest.com

Tableau 2: Caractéristiques gemmologiques des pyropes

Carte d'identité : Pyrope $Mg_3Al_2(SiO_4)$

Couleur: incolore (pur), rouge vif, rouge brun, noir, parfois effet alexandrite

Densité: 3.60 - 3.80

Dureté: 7.5

I.R.: 1.730 - 1.60 (variable avec la teneur en fer)

Polarisation: Isotrope

Dispersion: 0.022

Clivage: non

Fluorescence: non

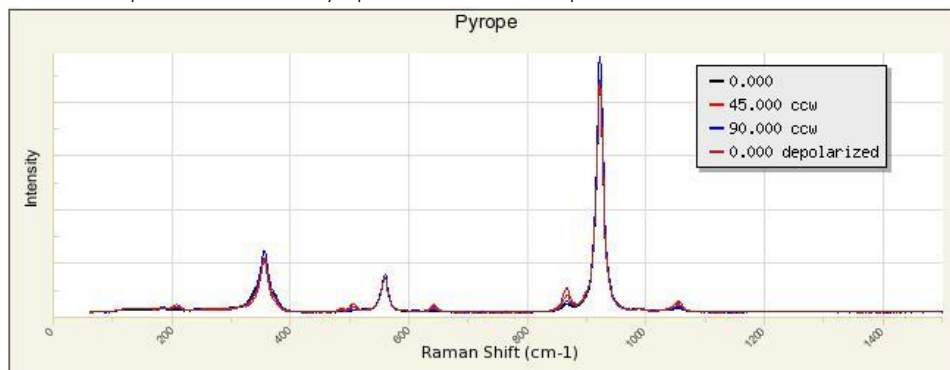
Pléochroïsme: non

Filtre Chelsea: Rouge

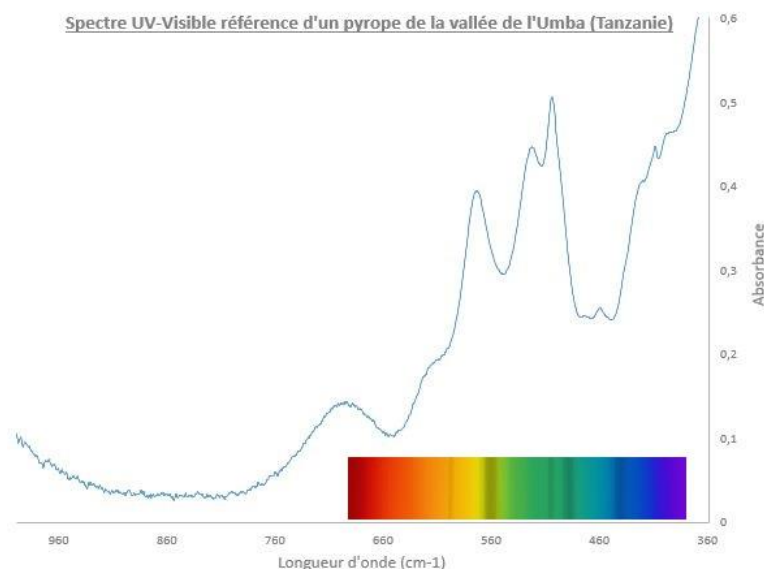
Altération: Chlorite ou képhylite

Spectroscopies:

- Raman : Spectres du GIA sur Pyrope de Tanzanie. Laser parallèle à a. Source : ruff.info



- UV-Vis :



Gisements : République Tchèque (Bohème), Etats-Unis, Afrique du sud

Deville, 1995, Frediani et al., 2005, Fritsch et al., 1988, Geminterest.com

Tableau 3: Caractéristiques gemmologiques des spessartites

Carte d'identité : Spessartite $\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$

Couleur: jaune (pur), rouge-orange, rougeâtre, brun-jaunâtre

Densité: 4.12 - 4.20

Dureté: 7 - 7.5

I.R.: 1.795 – 1.815 (variable avec la teneur en fer)

Polarisation: Isotrope avec quelques anomalies de polarisation

Dispersion: 0.027

Clivage: non

Fluorescence: non

Pléochroïsme: non

Filtre Chelsea: inerte

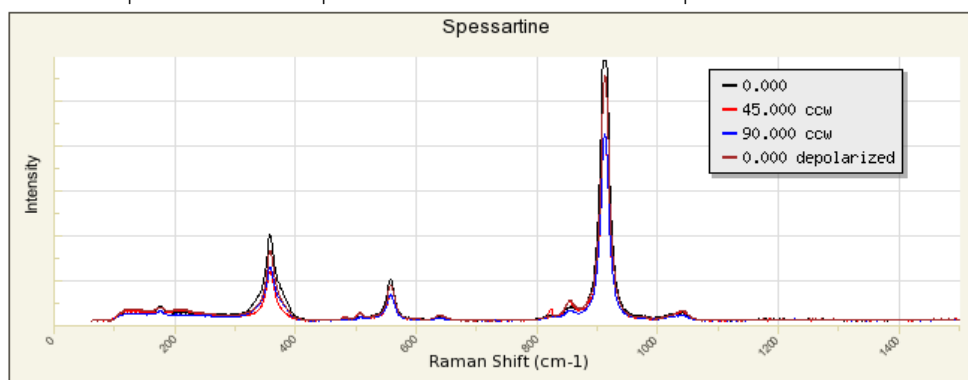
Altération :

Spectroscopies :

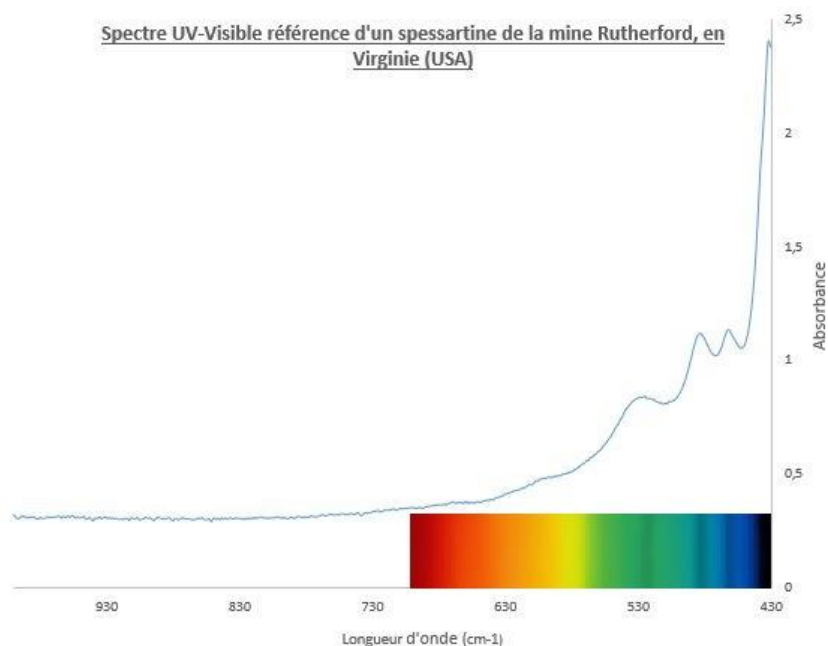


Grenat Spessartite du Pakistan. ©Lou Perloff.
Source : mineralatlas.com

- o Raman : Spectres du GIA sur Spessartine de localité inconnue Laser parallèle à c. Source : ruff.info



- o UV-Vis :



Gisements : Brésil, Chine, Etats-unis, Kenya, Madagascar, Myanmar, Pakistan, Tanzanie

Deville, 1995, Frediani et al., 2005, Fritsch et al., 1988, Flies, 2008, Geminterest.com

2.2 Gitologie du grenat

Les grenats sont des minéraux typiques du métamorphisme régional et de contact. Ces deux grands types de métamorphisme se distinguent par leur intensité et leur étendue. Le métamorphisme régional, ou général, affecte un ensemble de roche à grande échelle. Il est lié à un ou des mouvements tectoniques importants, principalement liés à la subduction, ou la collision continentale. Le métamorphisme de contact résulte de l'intrusion de magma dans un encaissant. Une auréole réactionnelle se forme alors autour du batholite. Typiquement, le métamorphisme de contact n'est influencé que par la température (Foucault & Raoult, 2010), alors que régional implique des variations de pression/température.

Comme tout minéral, le grenat est stable dans certaines conditions de pression et température. Mais chaque grenat n'a pas le même champ de stabilité (Deville, J. 1995 ; Robert & Bousquet, 2013). Dans un contexte de métamorphisme régional, les grenats cristallisent lentement lors de la déformation, ils sont dits syn-cinématiques (Deville, J. 1995). Si l'on retrouve des grenats d'origine métamorphique à l'affleurement, c'est qu'ils ont subi une exhumation. Le trajet qu'ils ont dû parcourir pour atteindre la surface implique qu'ils soient passés dans des conditions de pression/température autres que celles de leurs formations. Deux histoires sont alors possibles :

- la rétrogradation est lente et les grenats vont se déstabiliser en passant en dehors de leurs champs de stabilité. Ils vont être altérés, transformés en d'autres minéraux comme la chlorite.
- La rétrogradation est rapide, les grenats ne vont pas avoir le temps de se déstabiliser. On les retrouve à l'affleurement dans leurs états initiaux de formation. Ce sont eux qui sont gemmes dans les contextes de métamorphisme régional.

L'almandin est connu pour être le grenat typique des roches métamorphiques issues de sédiment argileux (micaschiste, gneiss, ...), dans un contexte de métamorphisme régional intense (faciès granulite ou éclogite) (Deville, J. 1995). Il est aussi fréquent dans les roches volcaniques de type andésite et dacite. Du fait de sa résistance à l'altération mécanique et chimique, on le retrouve souvent dans les gisements alluvionnaires (Bariand et al. 1998). Parfois, il est observable dans des pegmatites. Dans les leucogranites, il est interprété comme un minéral d'endomorphisme (Bariand et al. 1977), c'est à dire qu'il apparaît localement par réaction chimique avec l'encaissant (Foucault & Raoult, 2010).

Le pyrope est un des constituants principaux du manteau terrestre, c'est à dire des péridotites (jusqu'à 10%). C'est également le grenat caractéristique des kimberlites, roches connues pour être souvent porteuses de diamant. En réalité le pyrope n'est pas inclus dans les kimberlites, mais dans des xénolites de roches ultrabasiques associées à ces dernières (Deville, J. 1995). Il apparaît aussi fréquemment dans les éclogites, avec une composition riche en almandin (Bariand et al. 1977).

La spessartite existe aussi sous des contextes de métamorphisme, principalement avec apport métagénétique (changement de composition chimique, Foucault & Raoult, 2010) dans des skarns. Mais leur plus fréquente occurrence est dans les pegmatites (Bariand et al. 1998, Simmons W.B. 2007).

2.3 L'histoire du Massif Armorica, en bref

L'histoire géologique du Massif Armorica est complexe car façonnée par plusieurs événements tectoniques majeurs qui se sont superposés. Actuellement, le Moho sous le massif armorica est plat, prouvant que la chaîne de montagne a été parfaitement rééquilibrée par l'érosion. Les roches les plus anciennes du massif sont datées à 2000Ma. De par leurs natures elles sont une preuve de la présence d'une croûte continentale au paléo-protérozoïque (Balleve et al., 2013). Après cela, deux orogènes ont affecté cette région, le Cadomien (entre 620 et 540Ma), puis le Varisque (à partir de 430Ma, Thomas, 2005). Ce massif peut être divisé en trois grands domaines (Figure 13), le domaine Nord-Armorica, le domaine Centre, et le domaine Sud-Armorica. Cette ancienne chaîne de montagne résulte de la collision continent-continent entre le Gondwana et la Laurussia. La collision est polyphasée. Tout d'abord la Laurussia résulte de l'accrétion de la Laurentia, l'Avalonia et la Baltica, regroupés à la fin du Dévonien. Puis, une subduction a débuté, refermant l'océan Rhéique entre la Laurussia et le Gondwana. Durant cet événement, une microplaque s'est décrochée du Gondwana, l'Armorica (Figure 11). Ainsi, c'est la succession de naissances et de fermetures des domaines océaniques, associée à la création d'arrière arc, et la collision de microplaques, qui ont formé la chaîne Varisque.

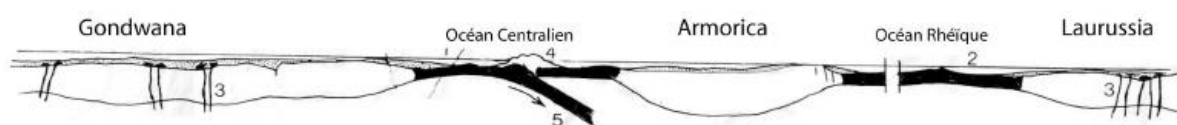


Figure 11: Représentation schématique de la configuration géodynamique des plaques à l'ordovicien – silurien inférieur (500 – 420Ma). Source : Cours C. Monnier, Université de Nantes

Domaine du Léon
Léon, Ouessant, Brest, Crozon, Ploumanac'h, Trégar, Châteaulin

Domaine nord-armoricain
la Hague, Flamanville, Cherbourg, Jersey, Montmartin, Caen

Domaine centre-armoricain
Craillonnement nord-armoricain, Remes, Craillonnement sud-armoricain, Laval, Angers, Lannux, Mauges, la Ferté-Macé, Cholet, Champigné, St Georges, Nantes, Lorient, Bots-de-Cent, I. d'Yeu, Chantonnay

Domaine sud-armoricain
Ile de Groix, Ouessant, Belle-Isle

éclogites ●
schistes bleus ■

0 20 40 60 80 100 km

A-A'
Bois-de-Ceng, les Escarts, CSA, Champgoux, Faille Nord-Est de St Georges, base de la couverture paléozoïque, CNA, la Hague

Moho

soile cadomien

soile cadomien

empilement de nappes (schistosité horizontale ou plissée), recoupé par les décrochements carbonifères

domaine plissé, à schistosité verticale

domaine plissé/écailé, non-schistosé

- 17 -

2.4 Sélection des sites d'échantillonnage, géologie régionale

Tous les grenats étudiés n'ont pas été échantillonnés (don intéressant, manque de temps, interdiction de prélèvement...), mais toutes les localisations sont connues de manière relativement précises (Figure 14), et permettent donc d'établir le contexte géologique local de chacun d'entre eux. L'échantillon provenant de Chine (LP01, Figure 13) fait exception, son étude ne sera pas mise en lien avec son origine géologique qui reste inconnue.

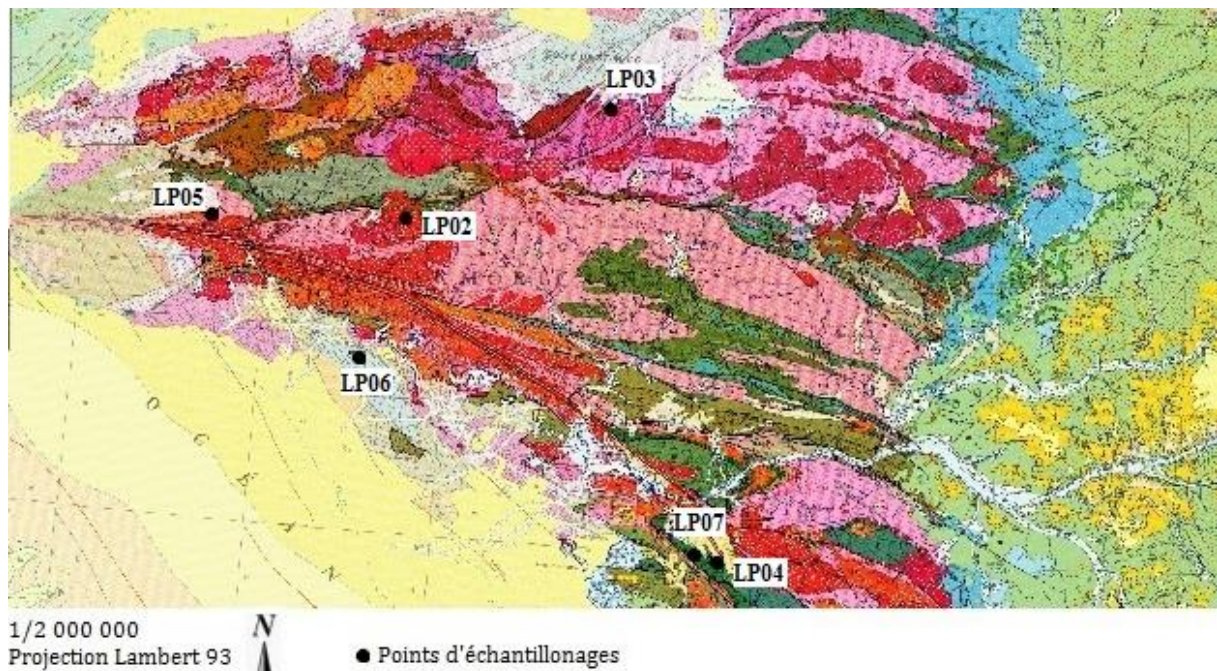


Figure 13: Carte géologique de la Bretagne (InfoTerre, BRGM) avec localisation des points d'échantillonnage

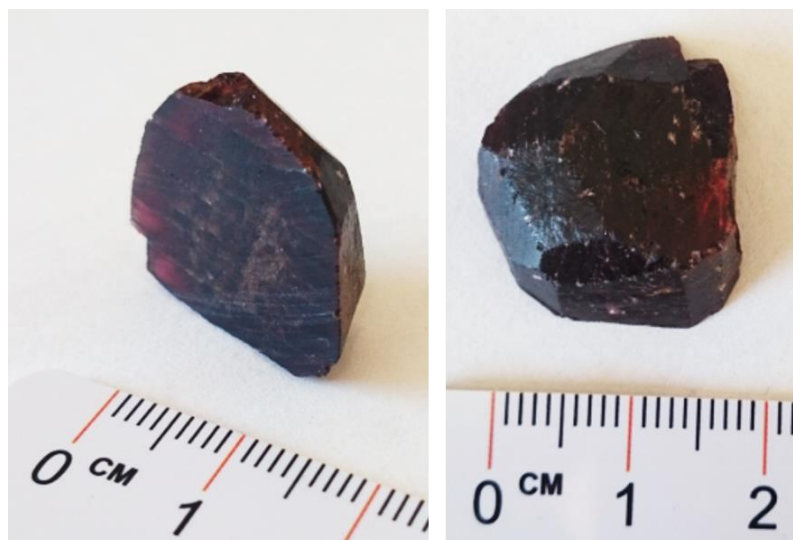


Figure 14: Echantillon LP01, grenat de Chine

2.4.a Grenat de Plélauff (22) – *Echantillon LPo2*

Plélauff est une petite commune des côtes d'Armor. Ses grenats sont réputés pour être de très belle qualité, leur couleur est rouge intense avec une transparence quasi parfaite. Ils peuvent atteindre des dimensions de plusieurs centimètres. Les grenats ont été échantillonnés précisément au lieu-dit de Régomarien, au Sud-Ouest de Plélauff (Figure 15). La roche encaissante est de couleur foncée, à grains fins, présentant une faible schistosité. Elle est composée de biotites et le quartz y forme de fines plages.

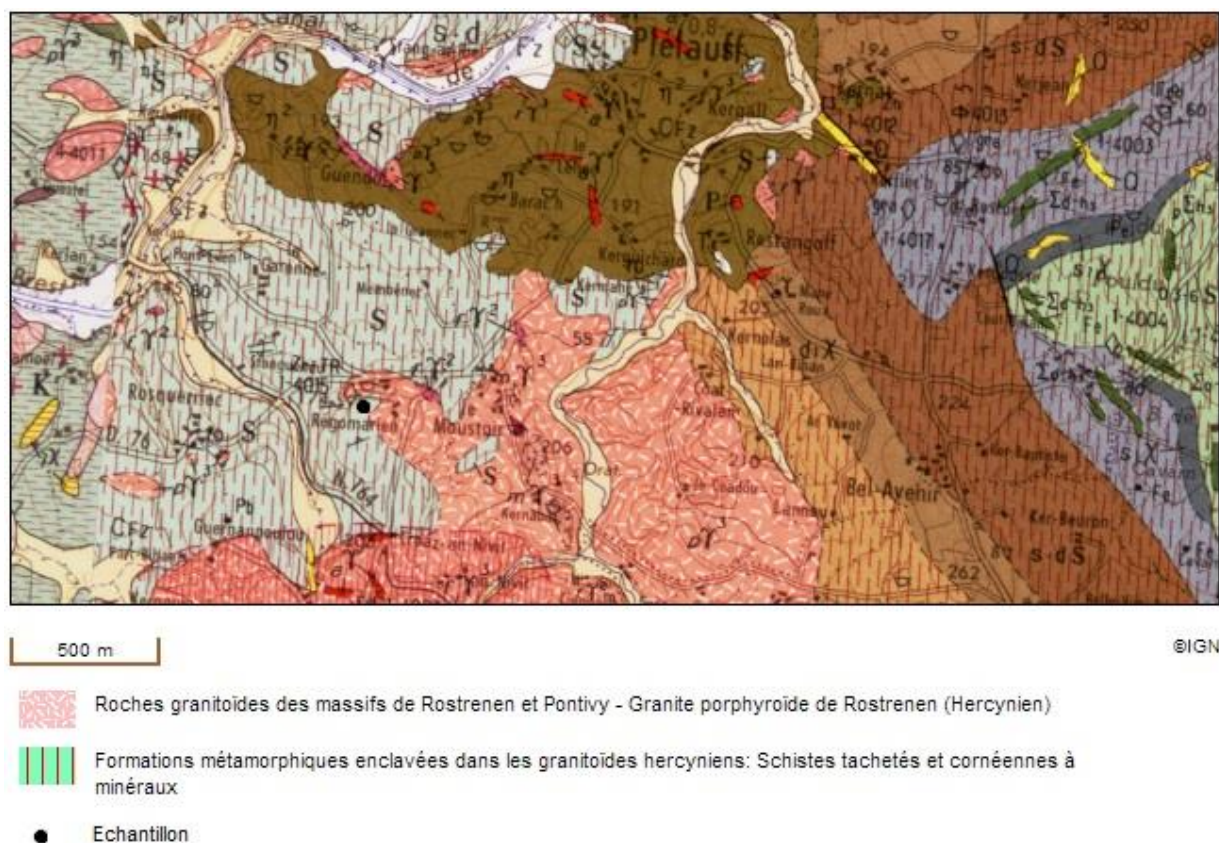


Figure 15: Carte géologique de Plélauff en Régomarien (InfoTerre, BRGM)

La carte géologique établie par le BRGM référence cette unité comme un schiste à biotite et/ou andalousite, grès feldspathique à biotite et cornéennes (indifférenciées) (infoTerre). La notice précise que cette zone est marquée par une alternance de schistes tachetés et de niveaux de cornéennes à minéraux (Bos et al. 1988). Ces grenats se sont mis en place par métamorphisme de contact (haut-grade), lors de l'intrusion du batholite granitique de Rostrenen. Le protolithe est de type sédimentaire, assises siluro-dévonniennes. Les grenats ne sont pas répartis uniformément dans toute cette unité, mais se concentrent dans les niveaux riches en fer (schistes ordovicien et grès dévoniens), en proximité directe avec l'intrusion (Bos

et al. 1988). La Figure 16 présente une roche foncée, riche en biotite. Les grenats automorphes sont entourés d'un minéral blanc laiteux, identifiés comme des feldspaths.

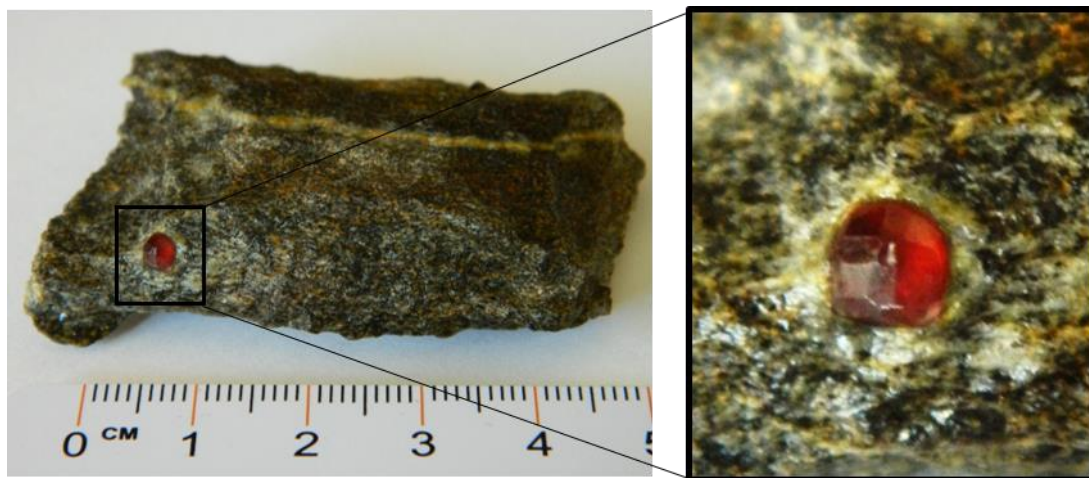


Figure 16: Roche encaissante des grenats à Plélauff.

2.4.b Grenat de Saint-Jacut de la mer (22) – *Echantillon LP03*

Saint-Jacut-de-la-mer est une provenance connue des grenats bretons. En particulier *l'îlot de la petite roche* (Figure 17), où la présence de grenats en abondance est même notée directement sur la carte du BRGM (InfoTerre). La notice géologique décrit l'affleurement comme un gneiss dans lequel sont disséminés les grenats. Ce gneiss résulterait de mouvements tectoniques intenses (superposition de plis) associés à du métamorphisme catazonal (Le Goff et al. 2009). En effet cet échantillon est né dans ce contexte tectonique du domaine nord-armoricain. Chauris, dans son ouvrage *Minéraux de Bretagne* (2013), décrit l'affleurement de *la petite roche* comme un pointement pegmatitique. Cette interprétation explique la taille importante des cristaux (de plusieurs centimètres), typique de minéralisation dans des contextes de pegmatites (Simmons, 2007). Les pegmatites dans cette zone recoupent les gneiss migmatitiques. Les fluides ayant circulé ont pour origine la fusion des sédiments protérozoïques. Le magmatisme est daté à 550 Ma (Ballevre et al., 2013).

La figure 18 montre un échantillon de Saint-Jacut, dont la gangue est composée de larges cristaux de quartz, feldspaths et muscovite.

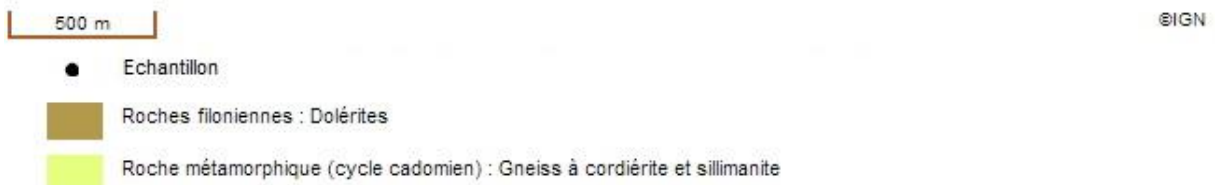
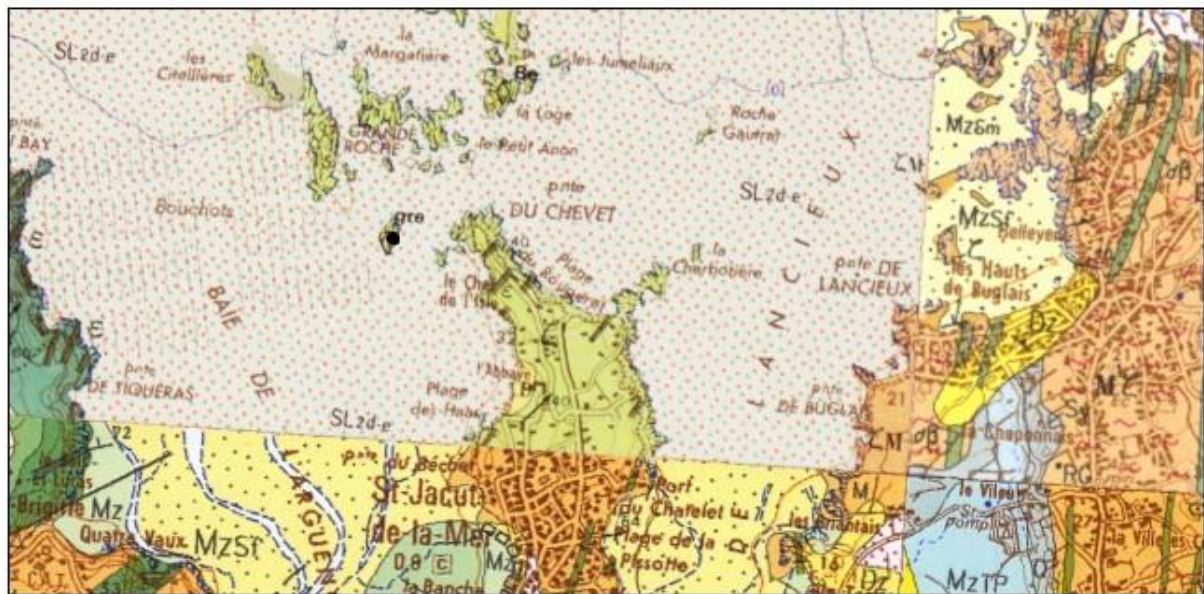


Figure 17: Carte géologique de l'île de la Petite Roche, à Saint-Jacut-de-la-mer (InfoTerre, BRGM)



Figure 18: Un grenat de Saint-Jacut, coupé en deux. Echantillon LP03 de cette étude.

2.4.c Grenats des éclogites du complexe de Essarts (44) – *Echantillon LP04 & LP07*

Le complexe des Essarts est une klippe (unité tectonique allochtone isolée par l'érosion, Foucault & Raoult, 2010) délimitée au sud par le décro-chevauchement des Essarts, et au nord par le Sillon houiller vendéen (branche sud de la faille sud-armoricaine). Ce complexe fait donc partie du domaine sud-armoricain (Figure 12 & 19). C'est une unité marquée par des faciès de haute pression, notamment des amphibolites, éclogites et serpentinites, le tout dans un encaissant gneissique (Lahondère et al., 2009). Deux éclogites ont été choisies dans cette étude, une de la Gerbaudière, échantillonnée sur le terrain, et une de la Compointerie, don de Mr Rondeau.



Figure 19: Carte géologique du complexe des Essarts (InfoTerre, BRGM), centrée sur les localisations des échantillons de la Compointerie (LP07) et de la Gerbaudière (LP04)

La carrière de la Gerbaudière se situe à Saint Philbert de Bouaine, à 30 minutes au sud de Nantes. L'éclogite y est plus ou moins amphibolitisée (infoterre). C'est donc une roche métamorphisée haute température et moyenne pression. Le métamorphisme impliqué dans la mise en place de cette éclogite est de type régional (Chauris 2013). La couleur de la roche est verte, truffée par les points rouges que forment les grenats (Figure 20). La couleur verte plus claire peut être liée à la présence de plus d'épidotes et/ou de moins d'amphiboles.

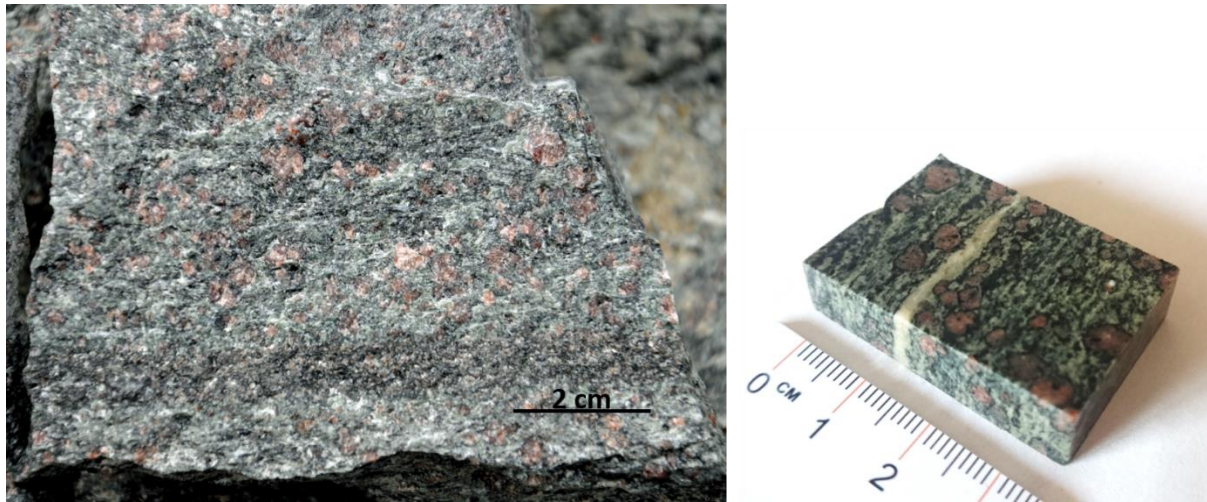


Figure 20: Eclogite de la Gerbaudière. A gauche: Roche caractéristique de la Gerbaudière, photo © Hendrik Vreken. A Droite, échantillon (LP04) utilisé dans cette étude : les auréoles noires autour des grenats sont facilement observables, l'omphacite est verte foncée.

La taille et le nombre des grenats sont logiquement corrélés au taux de nucléation et à l'espace disponible, ce qui s'observe dans cette roche : il y en a peu lorsqu'ils sont gros, et beaucoup lorsqu'ils sont petits. On peut aussi remarquer qu'à proximité de veines de quartz, les grenats sont plus nombreux et petits. Ceci est cohérent, les veines étant des zones préférentielles de circulation des fluides lors du métamorphisme.

Dans le complexe des Essarts, les éclogites les plus fameuses sont celles du chemin de la Compointerie, à Saint-Philbert-de-Grand-Lieu. Elles ont indéniablement la même origine que celles de la Gerbaudière (Figure 19), cependant elles présentent un aspect très différent. Elles sont d'un vert beaucoup plus clair, avec des grenats rouge-rouille de dimensions importantes (parfois pluri-centimétriques), et du disthène bleu (Figure 22 & 21). Une auréole noire est souvent observable autour des grenats (Figure 22). Les éclogites à disthène sont peu abondantes, ce sont les plus magnésiennes (Bambier et al. 1982).



Figure 21: Photo d'une éclogite caractéristique de la Compointerie. Photo © Hendrik Vreken

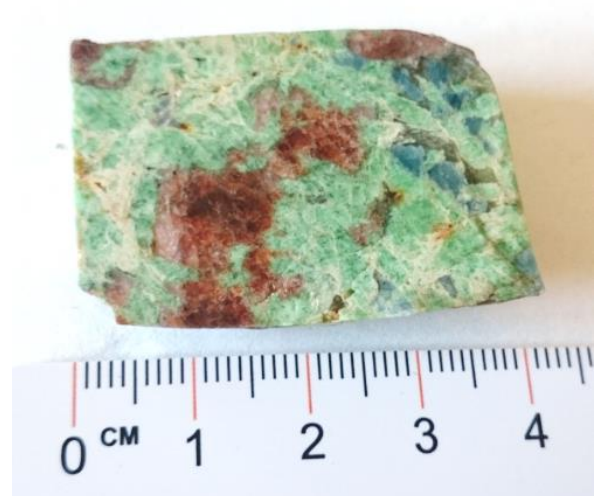


Figure 22: Echantillon de la Compointerie utilisé dans cette étude (LP07). Les trois minéraux principaux sont bien distinguable : en vert l'omphacite, en brun le grenat et en bleu le disthène

Les éclogites de ce complexe sont des lentilles étirées dans un encaissant de gneiss feuilleté. Leurs protolithes sont mafiques, basaltes ou gabbros. Leur chimie à tendance subalcaline les classe dans les tholéiites abyssales (Bambier et al. 1982). Même après métamorphisation, il est possible de retrouver les termes de la lignée tholéiitique. Les éclogites les plus magnésiennes, souvent d'un vert clair, sont les termes les plus primitifs, c'est le cas des éclogites de la Compointerie. Les termes moyens de la lignée, qui ont des concentrations en terre-rare typique des MORB, sont les éclogites ordinaires, à omphacite, grenat et quartz. Les termes les plus évolués sont verts foncés, enrichis en terres rares, présentant en plus de la paragenèse normale de la clinozoïsite (Lahondère et al. 2009). A priori, la Gerbaudière se classe comme une éclogite ordinaire. L'origine de ces éclogites est une ancienne croûte océanique. Celle-ci a d'abord subi un métamorphisme hydrothermal océanique avant de passer partiellement en subduction. Cet événement a donné lieu à un métamorphisme prograde de haute pression. A ce moment, les grenats commencent à cristalliser et les amphiboles se transforment en omphacites : la roche devient une éclogite. Une déformation plastique a donné naissance à la foliation actuellement visible dans ces éclogites. Puis, une phase de rétrogradation a eu lieu. L'amphibole est réapparue, c'est l'amphibolitisation partielle à totale des éclogites en présence d'eau. Cette rétrogradation est à l'origine de la pseudo-morphose de l'omphacite en symplectite de clinopyroxènes et oligoclase (nommé kélyphitisation par Bambier et al. 1982). L'apparition d'une couronne sombre autour des grenats, composée d'amphiboles et plagioclases, en est aussi une conséquence (Lahondère et al. 2009). Ballevre et al. (2013), estime les conditions de pression/température à au moins 1.6 GPa et 700°C. La datation du métamorphisme sur les monazites donne un âge d'environ 375 Ma.

2.4.d Grenat de la pointe du Raz (29) – *Echantillon LP05*

Mr Brunet, qui a fait don de l'échantillon, atteste que la provenance est la Baie des Trépassés, à proximité de la Pointe du Raz, dans le Finistère (Figure 23). Le leucogranite riche en grenat affleurerait sur la plage (Figure 24). La notice du BRGM note cette unité comme une intrusion d'orthogneiss leucogranitique qui recoupe un ensemble d'orthogneiss, micaschistes et migmatites (Barrière et al. 1985). Elle ne relève pas la présence de grenats, mais l'origine de cette encaissant porte à penser qu'ils sont issus d'un métamorphisme de contact.

2.4.e Grenat de l'île de Groix – Echantillon LPO6

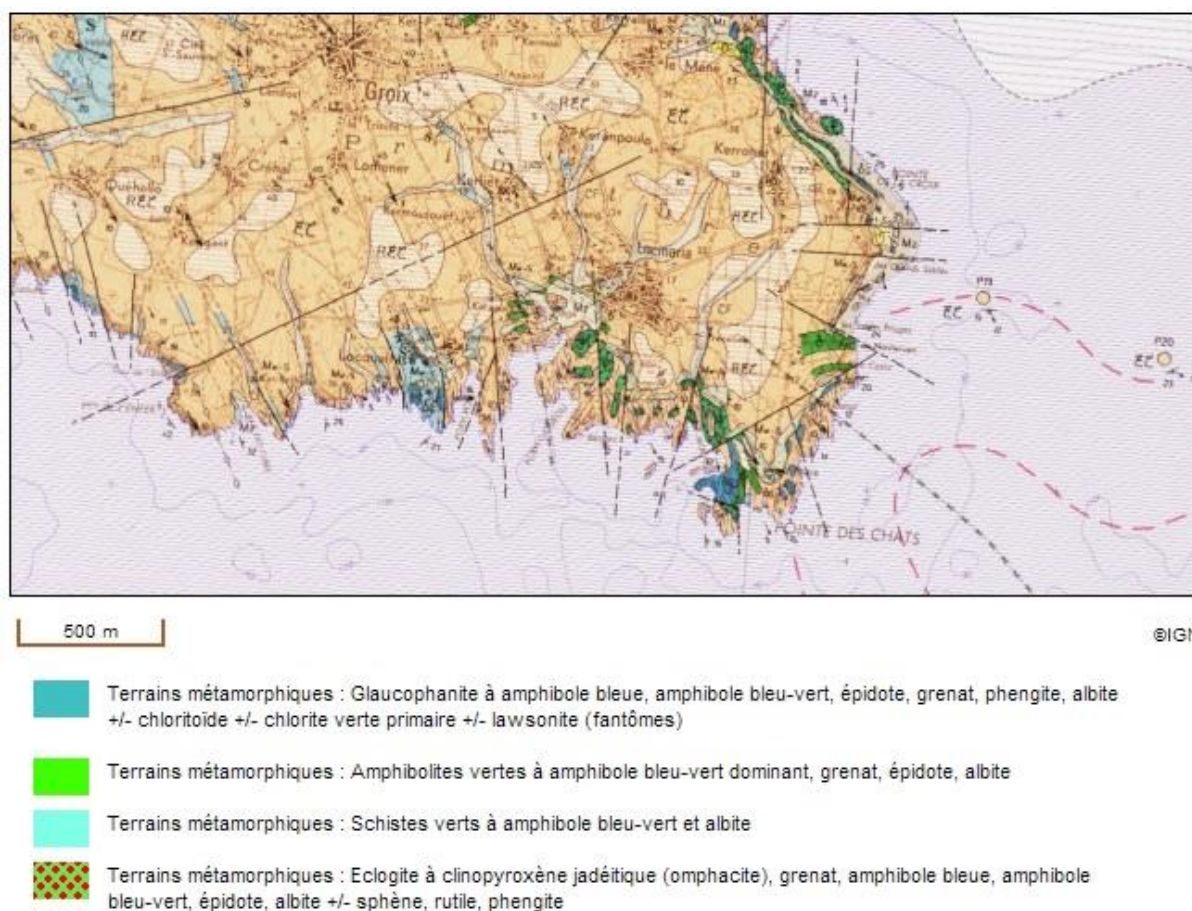


Figure 25: Carte géologique de l'île de Groix (InfoTerre, BRGM).

Sur l'île de Groix, les grenats sont présents dans presque toutes les unités géologiques : schistes verts, schistes bleus, micaschistes et gneiss. L'échantillon étudié, don de Mr Rondeau issu de la collection minéralogique de l'Université, est une glaucophanite (schiste bleu, Figure 26) à grenat. L'échantillon provient probablement du nord-est de l'île, zone la plus riche en éclogites (Figure 25). Les grenats dans les glaucophanites de Groix sont syntectoniques, ils contiennent de nombreuses inclusions (quartz, épidote, amphiboles, opaques, etc). Les glaucophanites ont pour protolithe des roches basiques. Leur chimie montre qu'il s'agit principalement de basaltes tholéïtiques (caractère intraplaque, Audren et al. 1993). Elles ont pour origine des laves océaniques passées en subduction, métamorphisées haute pression, puis rétrotransformées lors de l'exhumation (Balièvre et Robert). L'association minéralogique dans ces schistes bleus suggère un enfouissement entre 40 et 60km et une température autour de 450°C. La datation de l'épisode haute pression qu'ont subi ces roches, par méthodes Rb-Sr et Ar-Ar donne un âge aux alentours de 370-360Ma (Balleivre et al. 2013).

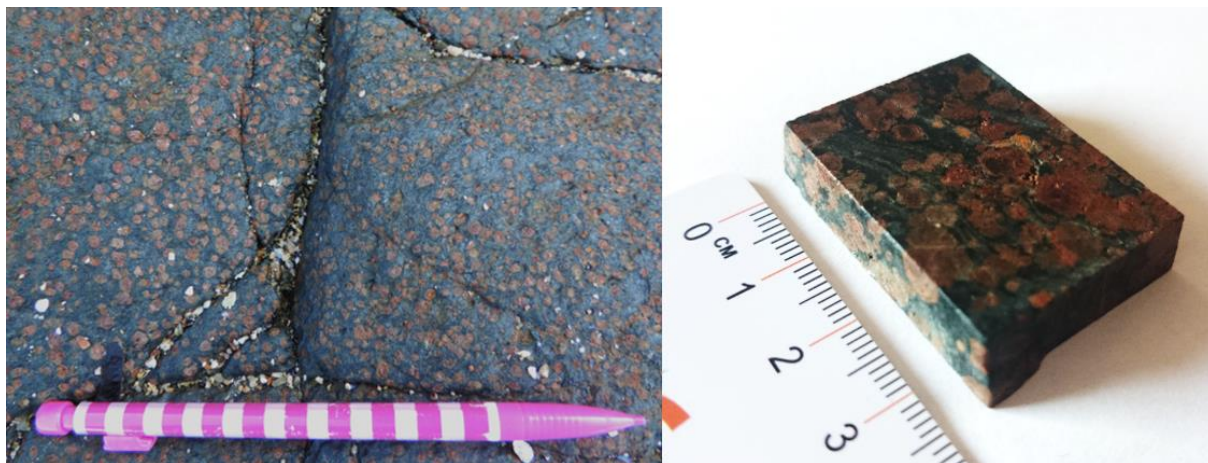


Figure 26: Schiste bleu à grenat de l'île de Groix. A gauche: photo de L.Pinsault, Groix 2014. A droite : échantillon LP06 de cette étude.

Chapitre 3 Les facteurs géologiques susceptibles d'affecter la qualité gemmes des grenats

L'échantillonnage des grenats du Massif Armoricaire montre une petite partie de l'étendue des contextes géologiques dans lesquelles les grenats cristallisent. Dans ces échantillons, les grenats pyralspites proviennent de différents orogènes, différentes époques géologiques, et de processus variables (métamorphisme régional ou de contact, pegmatites, etc.). Cependant aucun n'est utilisé, ni commercialisé en tant que gemme, car leur qualité ne le permet pas. Le contexte n'est donc, a priori, pas à lui seul un facteur déterminant sur la qualité d'un minéral. Le cœur de ce travail est de comprendre quels autres facteurs géologiques sont susceptibles d'affecter la qualité gemmes de minéraux.

Il est nécessaire de garder à l'esprit que cette question scientifique repose sur le critère totalement subjectif de « la beauté » d'un minéral. La qualité, et par suite la valeur monétaire d'une gemme, se calcule sur quatre critères principaux : la couleur, la transparence, la qualité de la taille et la masse (carat). La qualité de la taille est un facteur anthropique. L'intensité de la couleur, le passage de la lumière à travers la pierre, et la dimension du minéral sont des caractères objectifs sur lesquels nous pouvons donc fonder notre conception du terme « qualité ».

3.1 Contextes géologiques propices au développement de grenats gemmes

Bien que comme dit précédemment, le contexte géologique ne soit pas un facteur déterminant de qualité pour les grenats, certaines origines vont être plus favorables (ou défavorables) que d'autres sur les trois critères retenus.

3.1.a Le métamorphisme

Le métamorphisme est un contexte propice à la cristallisation du grenat, mais il peut aussi être une entrave à la qualité gemme. Notamment dans le cas du métamorphisme régional, les fortes contraintes liées aux mouvements tectoniques peuvent engendrer des fracturations sur les minéraux déjà cristallisés. Plus le métamorphisme est intense, l'enfouissement est profond, plus le temps d'exhumation sera long, facilitant le développement d'altération des minéraux. Cependant, la rétrogradation peut aussi être un atout sur la qualité gemme, par exemple lorsque le grenat contient du titane. Ce titane devient instable lors de la remontée, il va chercher à sortir du grenat, soit en formant une auréole de rutile autour, soit en formant des cristaux de rutile allongés le long des axes A4 du grenat. Dans ce dernier cas le grenat a alors un aspect étoilé (astérisme) ce qui est une caractéristique prisée sur le marché.

Des grenats gemmes dans des contextes métamorphiques existent (grenat de Bohème). Cependant il semble que les phénomènes de métasomatose locaux associés au métamorphisme soient les agents majeurs de la qualité des grenats.

3.1.b Les pegmatites

Les pegmatites sont des gîtes favorables au développement de cristaux gemmes de grandes dimensions. En effet, ce sont des gisements classiques de gemmes de nombreuses espèces, courantes et rares.

Les pegmatites se forment en filon à la périphérie d'un massif, le plus souvent granitique, leur composition chimique varie avec l'éloignement au massif (Foucault & Raoult, 2010). La cristallisation d'un pluton granitique implique toujours des fluides, résidu de fusion. Ces fluides sont enrichis en éléments incompatibles, dit volatils, qui se font exclure lors de la cristallisation du magma. La présence d'éléments volatils permet aux fluides de mieux circuler (viscosité abaissée) et de cristalliser à des températures plus basses. Ils remontent le long de fractures et y cristallisent. La présence de ces volatils a aussi pour conséquence d'abaisser le taux de nucléation et d'augmenter la diffusion, ainsi moins de cristaux se développent, mais lorsqu'ils le font, ils sont plus gros. Les gemmes se localisent généralement dans des poches, à l'intérieur du cœur de pegmatites dites complexes. Les poches sont créées dans les zones où les fluides riches en volatils s'exsolvent. Les poches peuvent être primaires, résultant des fluides de phase finale de cristallisation du pluton, ou secondaires, par recristallisation tardives (eaux hydrothermales ou météoriques) (Simmons, 2007). Les grenats s'observent dans les poches primaires, les poches secondaires contiennent typiquement d'autres types de minéraux, comme les phosphates. L'almandin est identifié dans certaines pegmatites, mais en tant que gemme ce sont essentiellement les spessartites qui y cristallisent. Elles apparaissent dans des pegmatites riches en calcium, lithium et titane (Simmons, 2007). Les pegmatites sont sources de minéraux constitués d'éléments rares, ou peu courants. Le grenat est composé d'éléments courants, abondants dans la nature, comme l'aluminium et la silice. Il est possible que si les grenats sont peu représentés dans les pegmatites, c'est parce que les éléments les composants, comme le fer et le magnésium, vont avoir tendance à rester dans le magma primaire et donc dans les minéraux qui cristallisent les premiers. Ainsi les éléments qui constituent les grenats ne sont pas les plus propices à migrer avec les résidus de fusion. Le manganèse est lui un élément moins fréquent, peut-être plus incompatible qui migre en assez grosse concentration dans les résidus de fusion pour cristalliser sous forme de spessartites dans les pegmatites. En Californie, près de la ville de Ramona, des mines exploitent de la spessartite issu de petites poches de pegmatites. En 2001, il a été estimé qu'entre 40 000 et 50 000 carats de pierre ont été extraits (Laurs & Knox, 2001).

3.1.c Le métasomatisme

Depuis quelques années, l'un des grenats les plus fameux est la rhodolite. Très présente au Kenya, la plupart de ces gemmes sont le résultat de phénomène de métasomatose, altération de roche porteuse de grenat. Les gîtes sont trouvés soit dans des zones de cisaillement affectant des gneiss à grenat-biotite-sillimanite, soit dans des zones de contact entre ce type de gneiss ou des pegmatites et une roche ultramafique. Dans les deux cas la rhodolite est incrustée dans une poche, ou veine, de biotite altérée. Cette altération métasomatique implique une hydratation, un ajout de magnésium et un départ de silice. La roche ultramafique semble avoir un rôle important notamment dans l'apport d'éléments tels que le magnésium, nickel et chrome (Simonet & al., 2000).

Il est indispensable de citer les grenats verts, démantoides (variété d'andradite) et tsavorites (variété de grossulaire), qui, lorsqu'ils sont gemmes, peuvent atteindre des prix très élevés pour des grenats. Au Kenya, les tsavorites se concentrent dans des dépôts métamorphiques, elles sont colorées par le vanadium. Simonet et al. (2000) note qu'il existe obligatoirement une relation entre du gneiss graphitique et du marbre pour les former, et donc des processus de métasomatose. Un gisement remarquable de démantuide est celui de Madagascar, près d'Antetazambato. Ils sont métasomatiques, résultent de l'altération d'un skarn par circulation hydrothermale. L'andradite s'est déposée dans les cavités. Leur cristallisation a été rendue possible par l'absence de titane dans le protolithe sédimentaire, en effet, s'il y avait eu du titane, l'andradite formée aurait été une mélanite, forme plus courante (Pezzotta, 2010).

3.2 La chimie

Comme pour tous autres minéraux, le caractère gemme d'un grenat va dépendre des éléments chimiques disponibles (contrôlant sa chimie) et des facteurs géologiques locaux. Deville (1995) remarque que c'est généralement lorsqu'ils cristallisent sous de fortes températures (fasciés granulite ou éclogite) que les grenats tendent à avoir une composition chimique homogène, de pôle pur. La pureté chimique peut être un atout pour la qualité gemme. Par exemple le fer dans la structure du grenat (soit le nombre de molécules d'almandin), est un élément connu pour être un frein au passage de la lumière à travers le minéral. Réduire la concentration du fer dans le grenat augmente sa transparence.

Les grenats de Bohème sont réputés pour leur couleur rouge feu, facteur qui a permis leur commercialisation intensive malgré le fait qu'uniquement de petites pièces, en moyenne 0,10 carat après taille, en soit extraites. Pour ces pyropes, la qualité gemme est donc contrôlée par l'origine de leur couleur, qui est la présence de chrome dans leur structure. Les roches hôtes de ces grenats sont des péridotites du manteau terrestre, amenées à la surface lors de l'orogénèse alpine (Schlüter & Weitschat, 1991).

Dans le cas des pegmatites, la chimie semble aussi être discriminante. Les pegmatites à composition granitique contiennent des gemmes alors que celles à composition felsique ou alcaline n'en contiennent que rarement (Nguyen-Bui et al., 2013).

L'absence (fer), comme la présence (chrome, vanadium, manganèse) d'éléments, semblent être des facteurs contrôlant souvent la qualité gemme des grenats, car influençant leurs couleurs. Ces éléments sont apportés par circulation de fluides, fréquemment liés au métasomatisme. Il faut d'ailleurs préciser que les réactions métamorphiques s'accompagnent quasiment systématiquement de phénomène de métasomatisme, dont il est difficile d'estimer l'importance (Simonet et al., 2000). Les éléments relativement rares, comme le chrome et le vanadium, sont des avantages indubitables pour la couleur de minéraux gemmes.

3.3 Epoques géologiques

Les minéralisations, de quelque type qu'elles soient, sont en lien avec la tectonique globale de la Terre. C'est parce que la Terre fonctionne par cycle de Wilson que des continents rentrent en collision, que des plaques océaniques plongent en subduction, et engendrent du métamorphisme, du volcanisme, etc. Les minéralisations, au sens large, sont associées aux grands événements de ce cycle. Dans le domaine de la métallogénie, des époques métallogéniques ont pu être déterminées, car le cycle de Wilson, la géodynamique, a évolué au cours des temps géologiques.

Il serait intéressant d'essayer d'adopter la même démarche concernant les minéralisations gemmes. Des exemples existent d'ailleurs déjà, par exemple il a été observé que les pegmatites à gemmes se sont formées au Paléoproterozoïque et au Néoproterozoïque (Nguyen-Bui et al., 2013). Les diamants ne se rencontrent que dans des cratons anciens, ce qui est le premier guide pour leur prospection. Giuliani et al. (dans Groat, 2014), ont travaillé sur ce concept de distribution globale dans le temps et l'espace des *High-Value Colored Gemstones* (HVCG). Ils ont ressorti de cette étude que la distribution spatiale des gisements est liée à la tectonique (rift, subduction, collision), et que les trois périodes principales favorables au développement des HVCG sont (basées sur les corindons) : l'orogène

Panafricaine, l'orogène Himalayenne et l'ère Cénozoïque avec les extrusions de basaltes alcalins continentaux.

On pourrait imaginer travailler sur la datation des grenats gemmes afin de déterminer si certaines époques ont été favorables à leur formation. Cependant, il faut nuancer cette idée, en effet la plupart des grenats gemmes se forment par métasomatose, circulation de fluides, ce qui est plus difficilement datable, et peut être très postérieure à la mise en place des roches encaissantes.

Chapitre 4 Descriptions des échantillons et méthodes d'analyses

4.1 Les échantillons

Tous les échantillons ont été préparés en lame épaisse, de 600 à 40µm, afin de déterminer quelle(s) propriété(s) font que chaque grenat n'est pas gemme.

Les caractéristiques des échantillons sont répertoriées dans le tableau des échantillons (Tableau 4a et 4b). L'échantillon LP01, prêt de Mr Benjamin Rondeau, est l'exception dans cette série de grenats étudiés. Il provient de Chine, mais son contexte géologique n'est pas connu. L'intérêt de ce grenat dans le sujet est la présence d'un cœur sale, non-gemme, entouré par une périphérie de couleur rose, transparente. Hormis les fractures, ce contour est parfaitement gemme. La coexistence sur une pierre des différentes qualités est très intéressante car elle permet d'étudier pour une même chimie les autres critères qui déterminent la qualité gemme d'un minéral.

Dans l'échantillon LP03, les oxydes de fer et les inclusions sont en quantité tellement importante que l'on peut se demander à première vue s'il ne s'agit pas d'une pseudo-morphose de grenat. La photo dans le Tableau 4a montre un unique grenat de plus de 4 cm de diamètre complètement opaque. Les zones orange sur cette photographie sont les inclusions de quartz, incolore, qui laissent passer la lumière.

Pour l'échantillon LP06, glaucophanite de l'île de Groix, la transparence des grenats est tellement mauvaise qu'il a été nécessaire de réaliser une lame mince afin de faire passer la lumière.

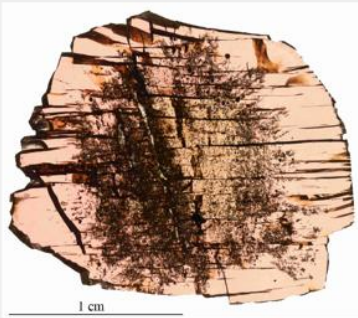
Tableau des échantillons							
L'échantillon					Le(s) Grenat(s)		
N°	Photographie	Provenance	Roche mère et contexte métamorphique	Lithopréparation	nombre	couleur	transparence
LP01		Chine	/	Lame à faces parallèles, épaisseur 550µm	1	Rose intense	Mauvaise au centre, bonne sur le pourtour
LP02		Régomarien Plélauff, Côtes d'Armor, France	Cornéenne Métamorphisme de Contact	Lame à faces parallèles, épaisseur 900µm	4	rouge rosé	Bonne
LP03		Îlot de la Petite-Roche Saint-Jacut-de-la-mer, Côtes d'Armor, France	Gneiss Pegmatite ou métamorphisme régional	Lame à faces parallèles, épaisseur 650µm	1	Brun/noir	Aucune, opaque

Tableau 4a: Tableau des échantillons

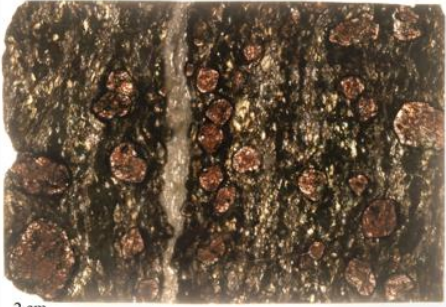
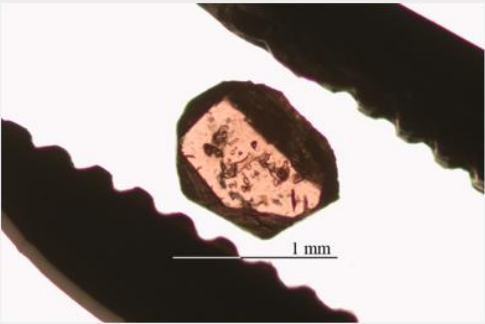
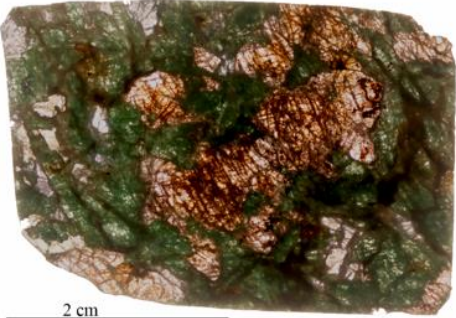
LP04		La Gerbaudière Saint-Philbert-de- Bouaine, Loire- Atlantique, France	Eclogite (amphibolitisé) Métamorphisme régional	Lame à faces parallèles, épaisseur 370µm	>30	Rose orangé	Mauvaise
LP05		Baie des Trépassés Pointe du Raz, Finistère, France	Leucogranite Métamorphisme de contact (endomorphisme)	Lame à faces parallèles, épaisseur 600µm	1	Rose	Bonne
LP06		Ile de Groix, Morbihan, France	Glaucophanite Métamorphisme régional	Lame mince, épaisseur 40µm	>30	Brun rougeatre	Très mauvaise
LP07		La Compointerie Saint-Philbert-de- Grand-Lieu, Loire- Atlantique, France	Eclogite Métamorphisme régional	Lame à faces parallèles, épaisseur 400µm	~8	Rose pale, bruni par l'altération	Mauvaise

Tableau 4b: Tableau des échantillons (suite)

4.2 Méthode de gemmologie classique

4.2.a Masse spécifique dite « densité »

Non destructive, la densité est une mesure très efficace dans la détermination d'une gemme car elle est intrinsèque à chaque espèce. La mesure de la densité à partir d'une balance hydrostatique repose sur le principe physique de la poussée d'Archimède. Le calcul est simple:

$$d = \frac{M_{air}}{M_{air} - M_{eau}}$$

Avec *M_{air}* la masse de la pierre dans l'air et *M_{eau}* la masse de la pierre dans l'eau.

Dans cette étude, seulement deux densités ont pu être réalisées. En effet, pour les autres échantillons il n'a pas été possible d'extraire les grenats de leurs encaissements. La balance utilisée est une balance hydrostatique Mettler Toledo XS104, température de l'eau à 25°C.

4.2.b La microscopie optique

La gemmologie classique fait beaucoup appel à l'observation à l'aide de microscope optique ou binoculaire, afin notamment de déterminer les inclusions et/ou de détecter les éventuels traitements et synthèses. Mais le microscope optique est aussi un instrument essentiel en laboratoire, et pour l'étude scientifique de pierres. Ce travail sur la qualité des grenats se fonde essentiellement sur cette technique d'observation. Elle a permis d'observer les fractures, le développement des matériaux d'altération, ainsi que les différentes inclusions. Pour l'échantillon LP06, elle a aussi permis de déterminer la nature pétrologique des composants de la lame.

Plusieurs appareils d'observations ont été utilisés :

- Microscope Wild Makroskop M420, oculaire x1,25, zoom jusqu'à 32x. Appareil photo canon. Microscope utilisé pour les photos des échantillons du tableau 1.
- Microscope de pétrologie Leitz, Laborlux II pols, oculaire x10, zoom jusqu'à x40. Microscope utilisé pour l'observation précise des inclusions et la détermination pétrologique des minéraux de l'échantillon LP06.
- Microscope Olympus BH-2, utilisé pour les photos d'inclusions observées au préalable sur le Leitz.

- Microscope numérique VHX-5000 de Keyence. Les images obtenues sont l'accumulation d'une vingtaine de clichés à différents points focaux, chaque image ayant une profondeur de champ très réduite, de façon à augmenter la profondeur de champ (technique du z-stack).

4.3 Méthodes de gemmologie de laboratoire

4.3.a Spectroscopie UV-Visible

La spectroscopie UV-Visible est une méthode permettant la mesure dans les longueurs d'onde de l'ultraviolet, du visible, et du proche infra-rouge, du spectre d'absorption d'une pierre. Pour cela, il faut que la pierre soit transparente (l'échantillon LP03 n'a donc pas pu être utilisé), car un faisceau de photons (lumière) va la traverser et être mesuré après transmission. L'appareil utilisé est un Cary 5G, de la marque Varian. La plage des longueurs d'onde va de 300 à 1000 nm, avec un balayage de 200nm par minute, et un pas d'échantillonnage de 1nm. Les artefacts liés aux changements de filtres, ou lampes, ont été corrigés sur les spectres en annexe.

4.3.b MEB (Microscope électronique à balayage)

Le microscope électronique à balayage permet l'observation des échantillons à des grossissements beaucoup plus élevés qu'avec un microscope optique (jusqu'à un million de fois), puisqu'il utilise un faisceau d'électrons. Grâce à cette technologie, il est possible d'avoir une image nette de la surface avec une résolution du nanomètre, ainsi qu'une information sur la masse atomique moyenne de la matière (qui est fonction de l'énergie de l'électron renvoyée au détecteur). Mais pour ce travail, c'est surtout la possibilité d'obtenir la composition chimique de l'échantillon, avec une résolution de 0,1% atomique sur les éléments majeurs, en un point précis, qui a été exploitée. Le MEB utilisé est un JEOL 58000LV. Les paramètres sont 15kV en tension d'accélération et 0,5nA de courant.

4.3.c Spectroscopie Raman

La spectroscopie Raman consiste à mesurer la diffusion de la lumière engendrée par la vibration des molécules qui constituent l'échantillon. Les vibrations sont intrinsèques à la structure du cristal, ce qui permet donc une identification de l'espèce. L'appareil utilisé est un raman dispersif, de la marque Jobin Yvon, modèle Labram HR, permettant l'obtention de spectres précis d'inclusions, avec contamination par le signal du minéral hôte. La longueur d'onde de l'excitatrice est 514 nm (laser argon), avec une puissance du laser de 150 mW. Les scans ont duré 30 secondes et ont été répétés entre 3 et 5 fois. La résolution est de 4 cm⁻¹.

Chapitre 5 Résultats

Ce chapitre détaillera les observations et résultats des expériences par techniques. Tous ces résultats sont regroupés en annexe par échantillons, afin de fournir deux lectures différentes pour les mêmes données.

5.1 Gemmologie classique

5.1.a Densité

Deux densités ont été mesurées, celle de l'échantillon LP01 et celle de l'échantillon LP02, qui sont respectivement à 4,07 et 4,22. Elles rentrent toutes deux dans la gamme des almandins.

Les autres échantillons ne se prêtent pas à la mesure de la densité.

5.1.b Microscopie optique

Pétrologie (Planche 1)

La détermination pétrographique par microscopie a été utilisée pour l'échantillon LP06. Cette lame mince est essentiellement composée d'amphiboles, principalement des glaucophanes qui se déstabilisent localement en hornblende. L'échantillon est aussi riche en quartz, épidotes, opaques et oxydes (goethite). Des sphènes de grandes dimensions sont aussi notables. De la chlorite se développe en périphérie des grenats (Figure 27). Les grenats représentent 40% de la lame. Ils montrent un hélicitisme remarquable (Figure 28). L'hélicitisme est le nom donné à une disposition en spirale des inclusions dans un minéral attestant que ce minéral a subi une rotation progressive durant sa croissance (Foucault & Raoult, 2010). Ces grenats sont donc syn-cinématiques, ils se sont formés et ont cristallisé en même temps que la déformation.

Les fractures (Planche 2)

La qualité gemme d'un minéral est intimement liée à sa transparence. La transparence est entravée lorsque des obstacles se positionnent sur le trajet de la lumière dans la pierre. Les barrières les plus fréquentes sont les fractures. Ces fractures sont visibles dans tous les échantillons en plus ou moins grande quantité, excepté le LP05 qui en est totalement dépourvu.

De plus, les fractures sont des zones préférentielles pour le développement des oxydes. Cela est bien visible dans plusieurs échantillons, où des grandes plages brunes mettent en

évidence les contours des fractures (Figure 29 & 31). Par abus de langage, on parle souvent de fractures « oxydées », car elles contiennent des nano-minéraux ferriques complexes, de couleur orange-rouille.

Les fractures peuvent aussi être le lieu de recristallisation d'autre minéraux, lorsque de l'espace est créé. Dans l'échantillon LP01, ce phénomène est facilement observable, du quartz a recristallisé dans l'importante fracture au centre (Figure 30).

Plusieurs générations de fractures, liées à des événements différents, peuvent se superposer. Par exemple, dans l'échantillon LP01, la fracture contenant du quartz au centre a une direction quasiment perpendiculaire aux autres, et n'affecte pas le grenat en entier. On peut donc penser que cette fracture est antérieure aux autres, ces dernières étant des événements tardifs (Annexe 1).

Les échantillons LP04 et LP07, élogites, sont extrêmement riches en fractures (Figure 29 & 31). L'observation au microscope a mis en évidence que cette densité de fractures, alliée au développement des oxydes, est probablement la cause majeure de la mauvaise qualité gemme des grenats. L'échantillon LP03 est aussi très fracturé. Mais ce ne sont pas ces fractures qui rendent cet échantillon complètement opaque.

Les inclusions (Planche 3)

Les inclusions sont présentes dans tous les échantillons. Il est rare de trouver des minéraux dans la nature qui en soient totalement dépourvus. Même sur des pièces gemmes, les inclusions sont quasi toujours présentes, même si elles sont petites et peu nombreuses. La nature des inclusions est importante sur la transparence des grenats. Toutes les inclusions sont des obstacles au passage de la lumière dans la pierre, mais si elles sont colorées elles auront en plus un impact, positif ou négatif, sur la couleur du grenat. Le relief de l'inclusion, différence de réfraction entre l'inclusion et le grenat, joue également un rôle important : plus le relief sera fort, plus l'inclusion sera visible et donc « gênante ».

Dans l'échantillon LP01, des inclusions solides se concentrent au cœur dans des proportions extrêmement importantes, la lumière ne peut pas traverser. Alors qu'en périphérie où les inclusions sont absentes, la lumière passe facilement, et le grenat est bien gemme. Les inclusions sont principalement transparentes, vertes ou opaques. Elles sont de toutes les tailles, les plus grosses pouvant faire plusieurs millimètres. La Figure 32 montre bien que ce sont les inclusions opaques qui limitent le plus la lumière, puis celles colorées. Plusieurs espèces sont en inclusion, déterminées par l'observation et/ou confirmées par les mesures au Raman et au MEB : du quartz, des zircons, des chlorites, des ilménites et des apatites sont présentes.

Dans l'échantillon LP05, les inclusions occupent une bonne partie du grenat. Mais elles sont transparentes, et n'influencent donc pas la couleur rose du grenat. Cependant, elles représentent un frein à la qualité des grenats de par leurs fort reliefs, qui les rend très visibles (Figure 37).

Dans le LP02, des inclusions fibreuses en grosse quantité sont bien visibles (Figure 33). Grâce au microscope numérique qui scanne toute la hauteur de la lame pour projeter en 2D les inclusions, il a été possible d'avoir une représentation de la densité de ces lignes dans la pierre (Figure 34). Elles sont omniprésentes, et se superposent en prenant plusieurs orientations. Leur présence semble avoir un impact, léger, sur la transparence. Cependant, du fait de leur très petite dimension, il n'a pas été possible de mesurer leur indice de réfraction afin de confirmer cela. Par ailleurs, une telle abondance d'inclusions pourrait laisser penser que le grenat ne devrait pas du tout laisser passer la lumière, or cet échantillon breton est celui qui rejoint le plus une gemme de qualité. Des inclusions d'autres types sont aussi présentes dans l'échantillon LP02, incolores et opaques, de taille micrométrique (Annexe 2).

L'échantillon LP03 est riche en inclusions de quartz. Ce sont d'ailleurs ces minéraux qui laissent passer la lumière, à l'inverse du grenat qui est opaque. Pour les échantillons LP04 et LP07, de grosses inclusions vertes sont visibles à l'intérieur. Elles sont un gros frein à la transparence, car leur couleur, contraire à la composante rouge du grenat, « ternisse » le minéral. D'autres inclusions, beaucoup plus petites, et transparentes sont aussi présentes. Celles-ci n'ont aucune implication sur la qualité des grenats (Figure 35 & 36). Dans l'échantillon LP06, les inclusions, de taille micrométrique, sont présentes en grosse quantité. Ce sont principalement des quartz, glaucophane, opaques et oxydes (sphènes, goethite).

Planche 1: Pétrologie

Figure 28: LP06 (Groix)

Observation en lumière polarisée non-analysée des amphiboles, principalement des glaucophanes (violet) et quelques hornblendes (marron), qui dessinent une forte schistosité. Le chlorite (verte) résulte de la déstabilisation du grenat (rose clair). De nombreux opaques sont présents. Il est également possible d'observer des épidotes, des oxydes (goethites) et des sphènes dans la lame. Tous ces minéraux se retrouvent également en inclusions dans les grenats.)

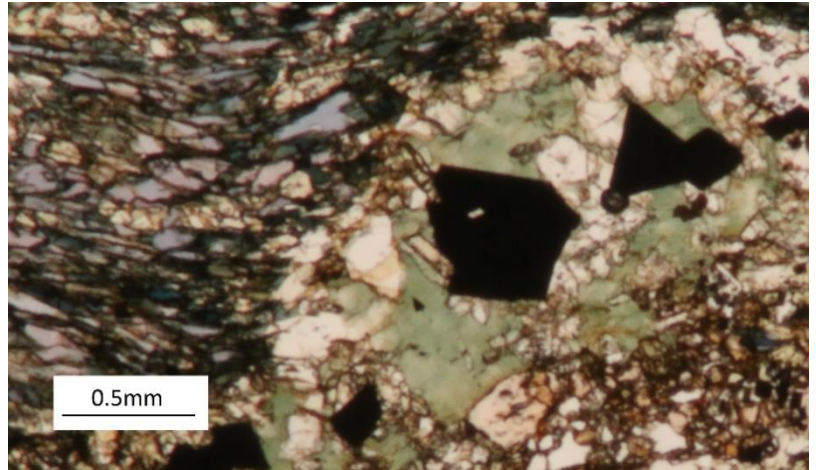


Figure 27: LP06 (Groix)

Hélicitisme dans un grenat de LP06. Photo en lumière polarisée et analysée

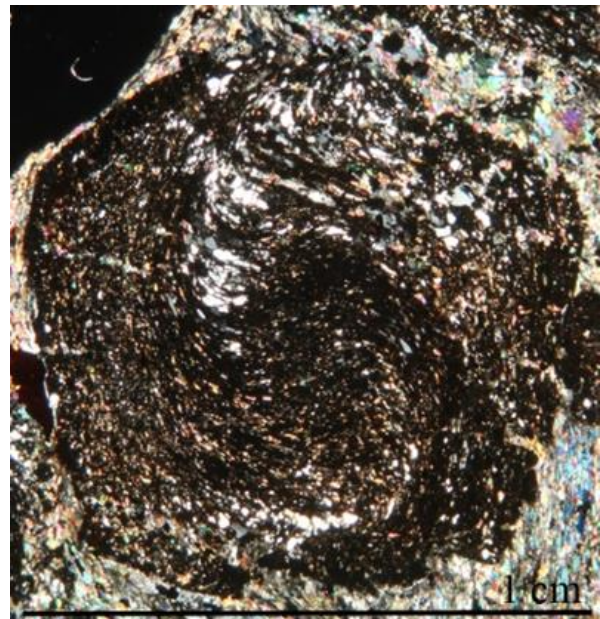


Planche 2: Fractures

Figure 29: LP02

Fractures oxydées dans un grenat de l'échantillon LP02. Les fractures de ces grenats se croisent au centre, qui est alors beaucoup moins transparent que les bordures.

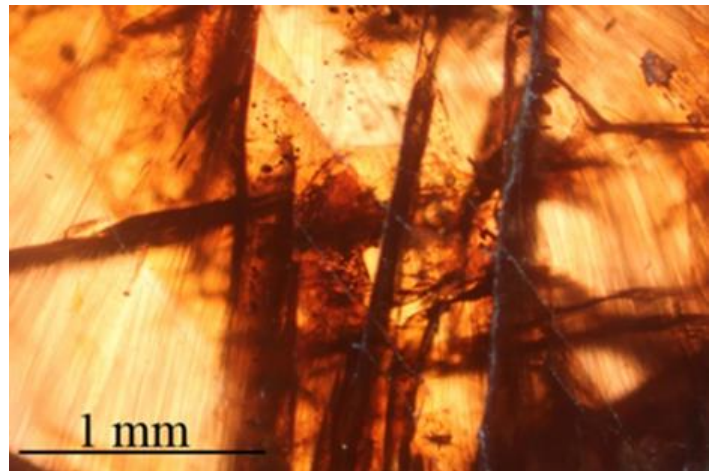


Figure 30: LP01

Du quartz a cristallisé dans la fracture sub-verticale au centre. Cette dernière n'atteint pas les bordures de la pierre, alors que les fractures horizontales la traversent de part en part.

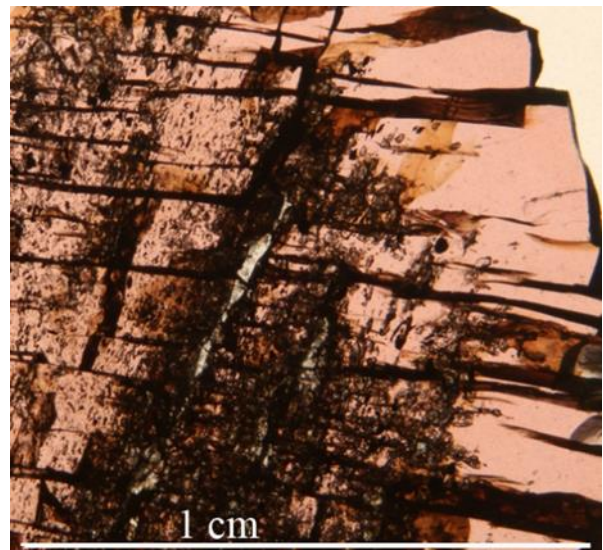


Figure 31: LP04

Important réseau de fractures dans l'échantillon de la Gerbaudière. Ces fractures sont très oxydées, assombrissant énormément la pierre.

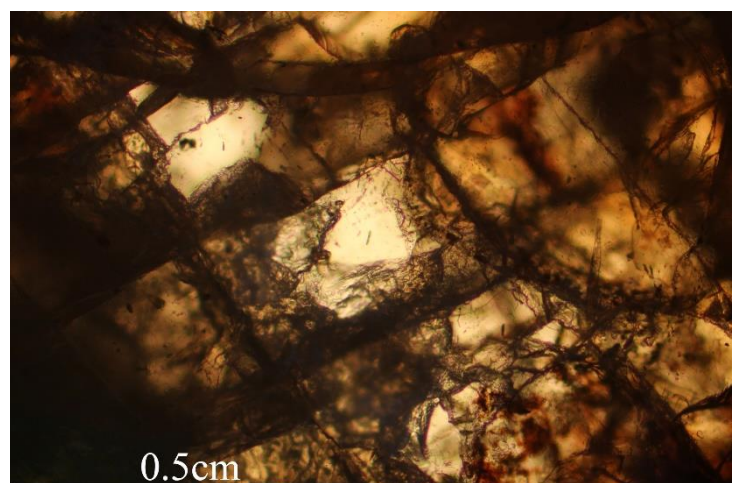


Planche 3: Inclusions

Figure 33: LP01

Inclusions dans le grenat de Chine. On observe différentes couleurs (incolore, vert, noir) et taille de ces inclusions, affectant ainsi plus ou moins la transparence de la pierre.

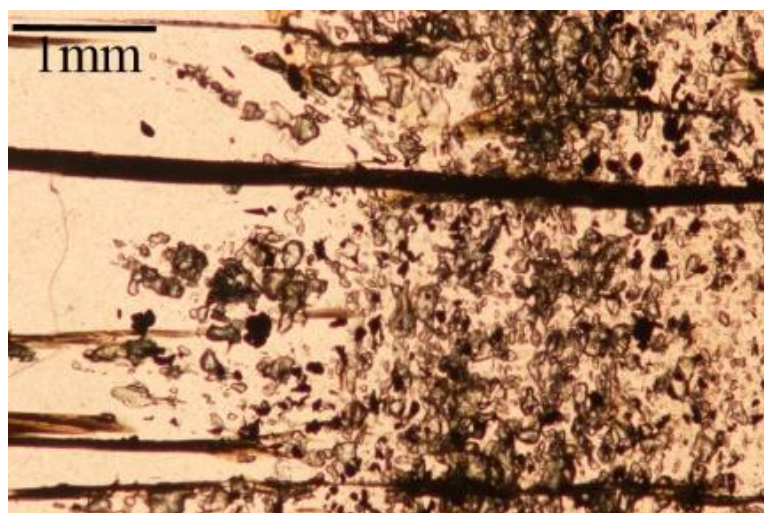


Figure 34: LP02

Inclusions fibreuses dans le grenat de Plélauff.

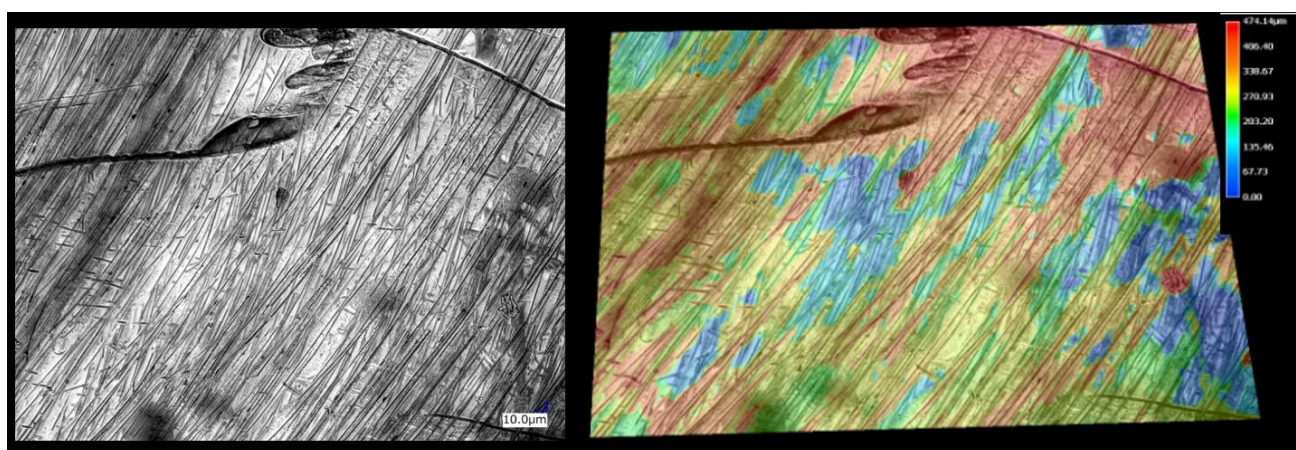
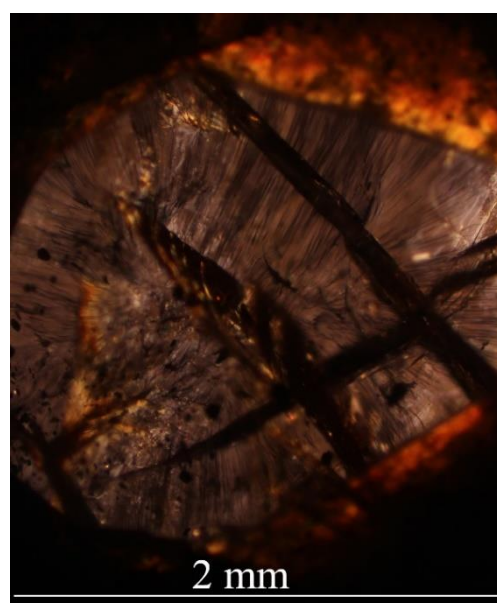


Figure 32: LP02

Inclusions fibreuses dans le grenat de Plélauff. Photo acquise avec un microscope numérique, superposant plusieurs images, de plusieurs épaisseurs, sur une même section de la pierre. On a ainsi une bonne représentation de la densité de ce réseau de fibre. A gauche : photo des images accumulées. A droite : les couleurs représente une certaine profondeur de champ, on peut ainsi voir qu'à une couleur est associée une orientation des fibres, et qu'il y a au moins deux orientations successives (une en bleu et une en rouge).

Figure 35 : LP07

Inclusions dans le grenat de Grand-Lieu. Petites et transparentes, elles entravent peu le trajet de la lumière dans la pierre. Les inclusions d'oxydes sont au contraire de gros obstacles.

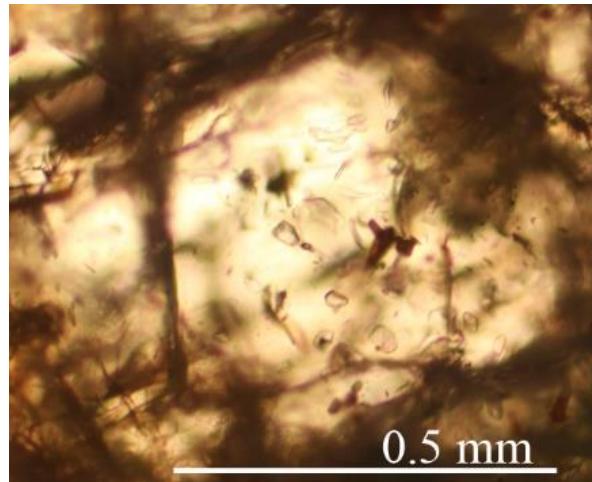


Figure 36: LP04

Inclusions dans le grenat de la Gerbaudière. Les inclusions y sont semblables à celles du grenat LP07 (figure 16).

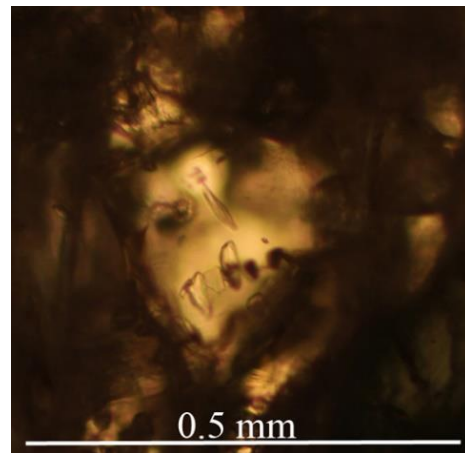
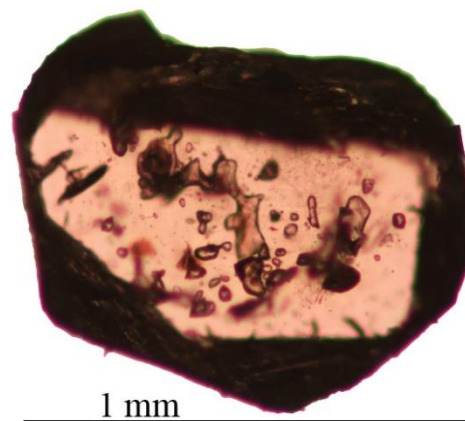


Figure 37: LP05

Inclusions dans le grenat de la baie des Trépassés. Ces inclusions sont transparentes, mais nombreuses et grosses pour la taille de la pierre, ce qui en affecte donc sa qualité.



Zonage de qualité (Planche 4)

L'échantillon LP01 montre un zonage de qualité, uniquement lié à la densité des inclusions présentes à l'intérieur (Figure 38).

Les trois grenats des roches hautes températures (LP04 en Figure 40, LP06 en Figure 39 et LP07 en Figure 41) montrent un zonage de couleur et de transparence. Elles sont toutes plus belles en périphérie qu'au centre. Cela est mieux visible sur l'échantillon LP06, la lumière passant mieux en lame mince (Figure 39). Ce zonage est lié à des différences de conditions durant la croissance. L'hélicitisme, signe que le grenat est syn-cinématique, prouve que ces minéraux ont grandi sous l'action de déformation cisailante. Dans un second temps ces contraintes ont dû se relâcher, laissant le grenat pousser avec moins de fractures.

La couleur n'est pas la même entre le centre et la périphérie dans ces cas de zonation de qualité. Pour l'échantillon LP07, le MEB permettra de déterminer s'il existe une différence chimique, possiblement à l'origine de la couleur. Dans cet échantillon, le centre est très inclus, et beaucoup plus fracturé que la périphérie. Les fractures ont probablement favorisé le développement des oxydes, ce qui donne une couleur plus brune au grenat rose (Figure 41).

Altération (Planche 5)

L'altération d'un minéral réduit sa qualité gemme. Dans les échantillons de ce travail, les altérations ont été bien observables par microscope.

Le grenat se déstabilise en d'autres minéraux, notamment la chlorite, comme sur l'échantillon LP06 (Figure 43). La chlorite est un produit d'altération fréquent du grenat, qui apparaît pendant la rétrogradation (exhumation) de la roche encaissante lors du métamorphisme.

Un autre type d'altération typique des éclogites est la présence d'une bordure noire autour des grenats, comme sur les échantillons LP04 et LP07 (Figure 42). Cette couronne sombre est aussi une conséquence de la rétrogradation de la roche encaissante.

Planche 4: Zonage de qualité

Figure 38: LP01

Le zonage de qualité dans le grenat de Chine est essentiellement une différence dans la densité des inclusions. Au centre, les inclusions se superposent et empêchent entièrement le passage de la lumière. En périphérie, les inclusions se font plus rares jusqu'à complètement disparaître sur le pourtour de la pierre. Un changement d'orientation des inclusions entre le centre et la périphérie est d'ailleurs remarquable. Photo en LPA.

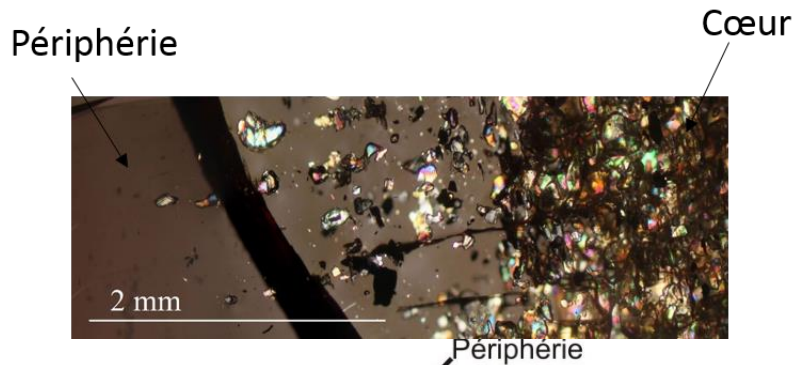


Figure 39: LP06

Zonage de qualité dans le grenat de Groix. La zone périphérique du grenat est propre, elle ne porte pas d'inclusions. Elle est fracturée, mais beaucoup moins que la zone au cœur. Le cœur du grenat est lui extrêmement fracturé et très inclus. Les fractures ne rendent pas la lecture du grenat aisé, mais l'on peut estimer que les inclusions représentent 20 à 30% du cœur du grenat.

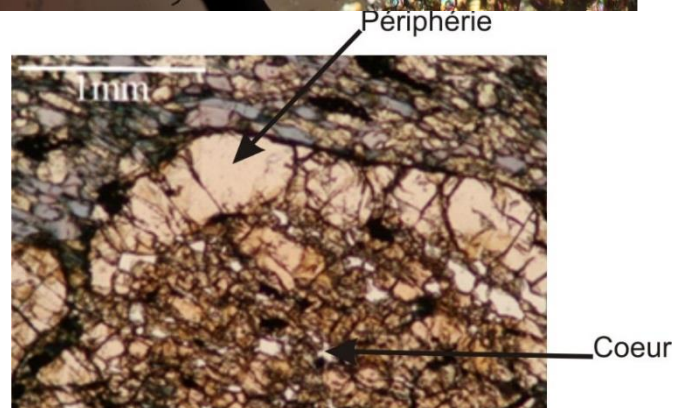


Figure 40: LP04

Zonage de qualité dans le grenat de la Gerbaudière. La différence entre les deux zones est la densité de fracture. La couleur est peut-être différente entre les deux parties, mais les fractures bloquent trop la lumière pour permettre une bonne distinction de cette couleur.

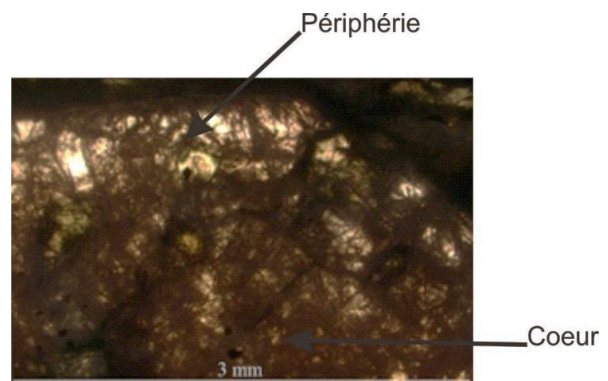


Figure 41: LP07

Zonage de qualité dans le grenat de Grand-Lieu. La différence entre les deux zones est la densité de fracture ainsi que la couleur. On ne peut pas vraiment dire qu'une des zones soit de meilleure qualité, la périphérie est très fine et autant fracturée que le centre du grenat. Cependant la couleur rose ressort plus sur le tour, ce qui attesterait d'une oxydation moins forte en périphérie qu'au centre.

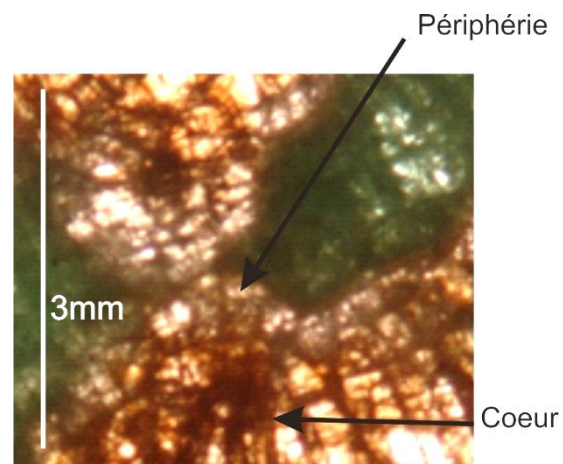


Planche 5: Altération

Figure 42: LP04

Développement d'une bordure sombre (kélyphitisation), autour des grenats écloitiques de la Gerbaudière.

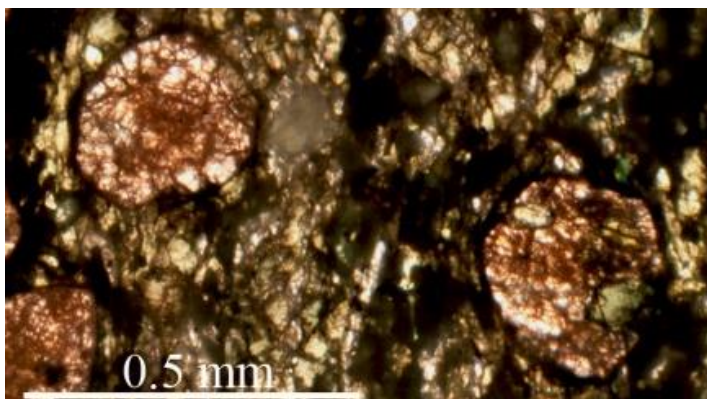


Figure 43: LP06

Déstabilisation du grenat en chlorite dans les grenats des schistes bleus de l'île de Groix.



5.2 Gemmologie de laboratoire

5.2.a Spectroscopie UV-Visible

Ces spectres permettent de mesurer les absorptions dans le visible des échantillons et donc de comprendre l'origine de leur couleur. Hormis le LP03, opaque, tous les échantillons ont donné un spectre typique des grenats « almandin », avec des pics d'absorption à 505, 571 et 428 nm. La Figure 44 montre les spectres superposés de tous les échantillons, ainsi que deux spectres références de pyrope et d'almandin (Rossman, 2008). Tous les spectres présentent un artefact lié à l'instrument aux alentours de 800 nm, son origine n'est pas connue. Il est à noter que le spectre de l'échantillon LP06 est légèrement différent, les pics à 505 et 571 nm ne sont pas clairement visibles, cette zone est une bande d'absorption large.

Les spectres montrent que les grenats absorbent les longueurs d'ondes du vert, et jaune, ainsi qu'une partie du bleu et du violet. La couleur qui en résulte est donc principalement rouge, nuancée par du orange, un peu de bleu et du violet. Cela est cohérent avec la couleur rouge-rose des échantillons.

5.2.b Spectroscopie Raman

L'échantillon LP06 n'a pas donné de résultat exploitable. Etant une lame mince, il est collé sur une lame de verre par de la colle époxy qui ramanise beaucoup trop fort pour laisser paraître le spectre des composants de la lame.

La Figure 45 montre que tous les spectres se superposent très bien. Dans le détail, les différences sont de légers décalages entre les pics, de l'ordre de 1 à 5 cm^{-1} , ce qui est dans la résolution spectrale de l'instrument (4 cm^{-1}). Sur la figure, le nombre d'onde attribué à un pic est une moyenne des mesures observées sur les échantillons. Parmi les pics caractéristiques du grenat almandin on trouve normalement ceux à 1040, 917, 501 et 344 cm^{-1} . Cela se corréle avec les résultats pour certains pics, cependant il est à noter qu'aucun spectre Raman de ces grenats n'a donné de pic à 917 cm^{-1} , mais toujours à une longueur d'onde légèrement plus basse.

La spectroscopie Raman a aussi permis la détermination de certaines inclusions. Du quartz a ainsi été identifié dans tous les échantillons sauf le LP07 (Annexes). Dans le LP04, de l'anatase et du rutile ont aussi été détectés (Annexe 4). Dans le LP07, ce sont essentiellement les inclusions d'omphacite qui sont ressorties (Annexe 7).

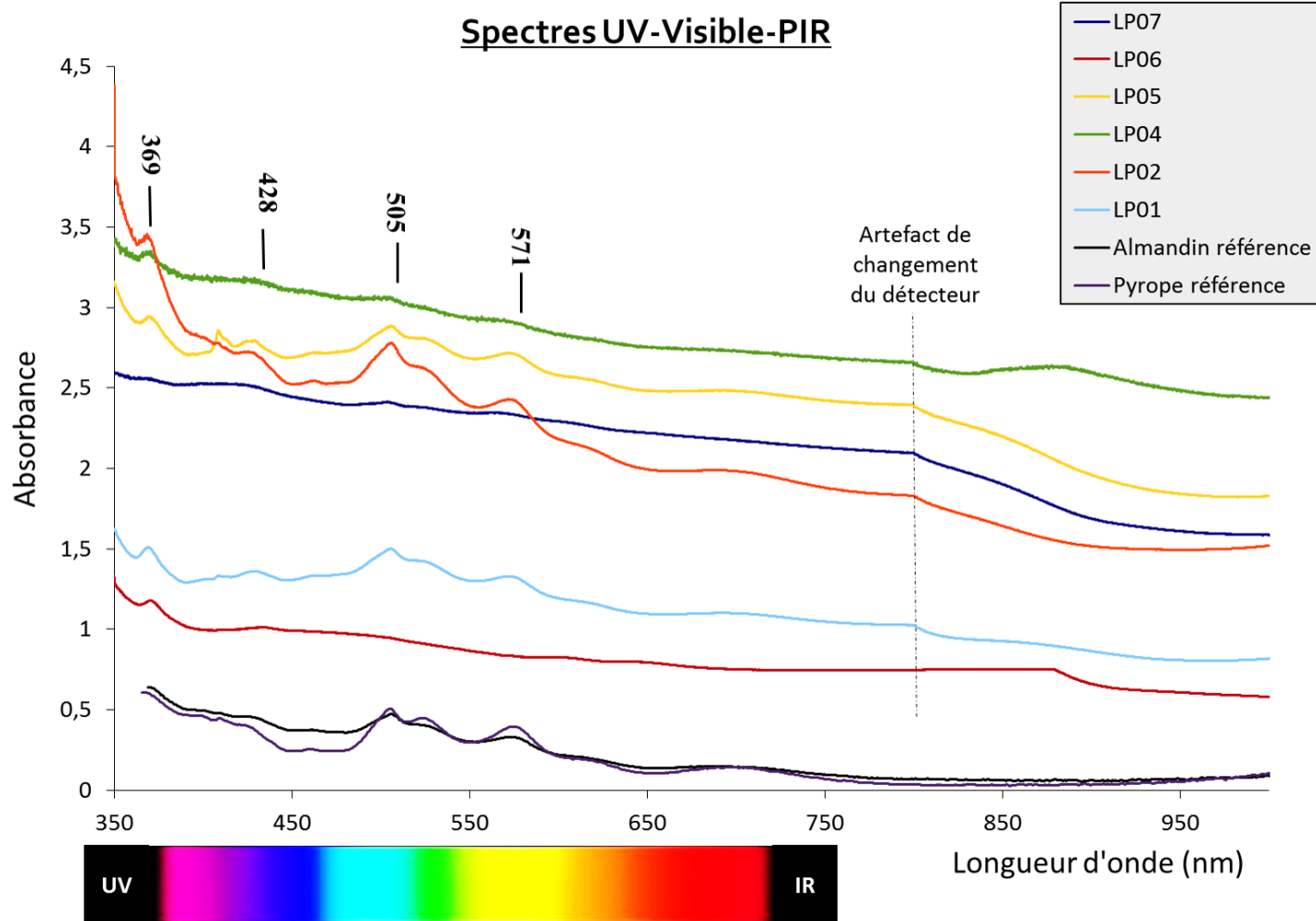


Figure 44: Superposition des spectres de tous les échantillons laissant passer la lumière. Les spectres LP06 et LP07 paraissent très plats, à cause de l'échelle. Des zooms sur ces spectres en annexe permettent de mieux observer leurs signatures de grenat (Annexe 6 et 7). Les deux spectres de références sont issus du site Mineral Spectroscopy Server (Rossman, 2008)

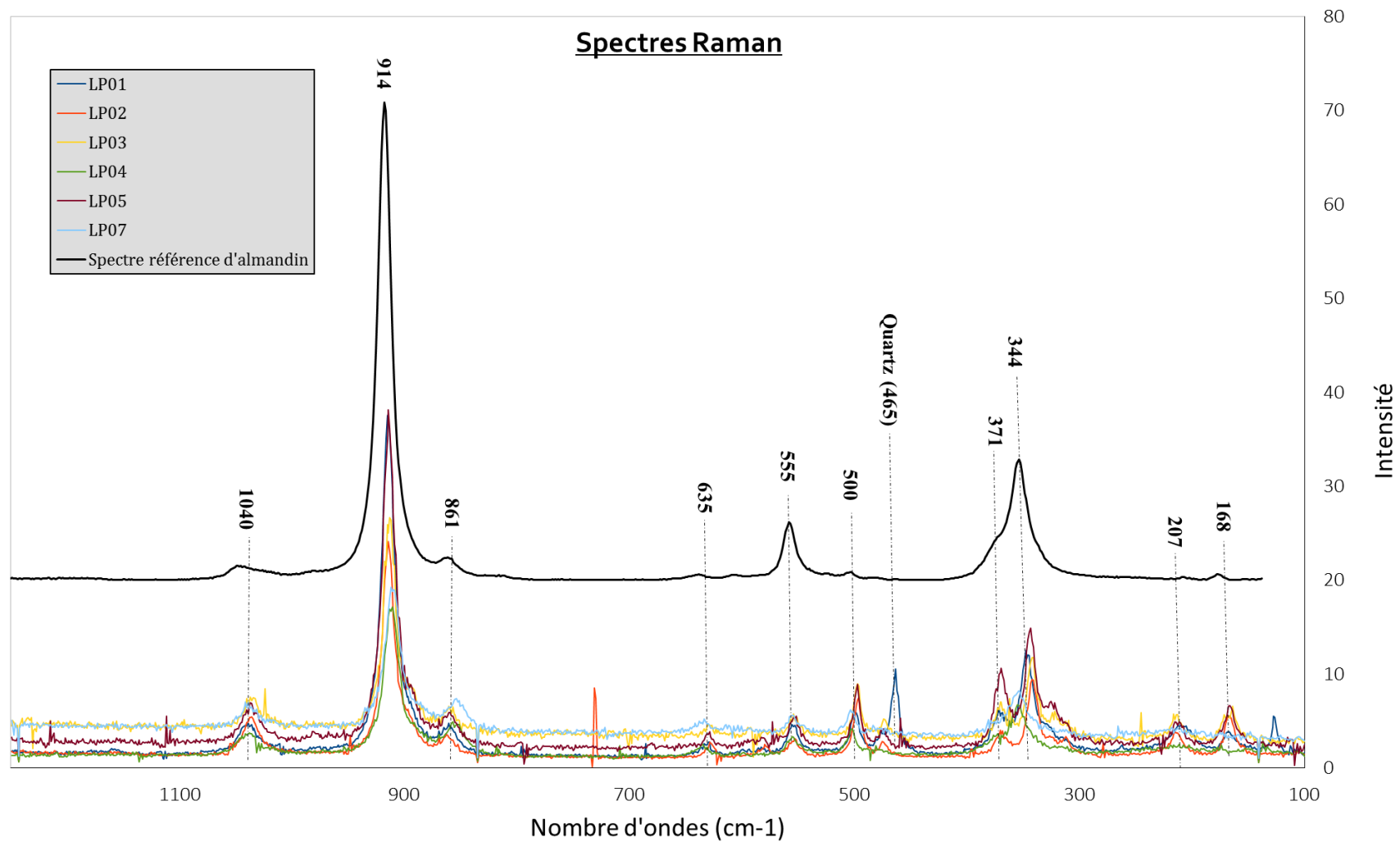


Figure 45: Superposition des spectres Raman de tous les échantillons. Le spectre de référence (Base de données RRUFF) a été pondéré d'un facteur 20

5.2.c MEB

Quatre échantillons ont été passés au MEB, le LP01, LP02, LP03 et LP07. Leurs compositions chimiques quantifiées sont répertoriées dans le Tableau 5.

Le microscope électronique à balayage apporte plusieurs informations. La première concerne la composition chimique des grenats : l'échantillon LP03 est un almandin légèrement spessartite, le LP07 est un pyrope légèrement plus magnésien sur les parties roses, et les LP01 et LP02 sont des almandins.

L'imagerie MEB a également permis de se rendre compte de la densité du réseau de fractures de l'échantillon LP03, ainsi que des recristallisations associées. Le grenat ne représente qu'environ 50% de la surface. Ces zones de grenat sont entourées de chlorite et biotite. La chlorite et la biotite sont en feuillets, elles ont enregistré les déformations qui sont bien visibles en photo (figure 46).

Pour le LP02, le MEB a permis d'identifier des inclusions de quartz, d'ilménite, de zircon, et de monazite (phosphate de terre-rare) thorifère. Dans l'échantillon LP01, des inclusions de quartz, zircon, ilménite, apatite et chlorite ont été identifiées (Annexe 1).

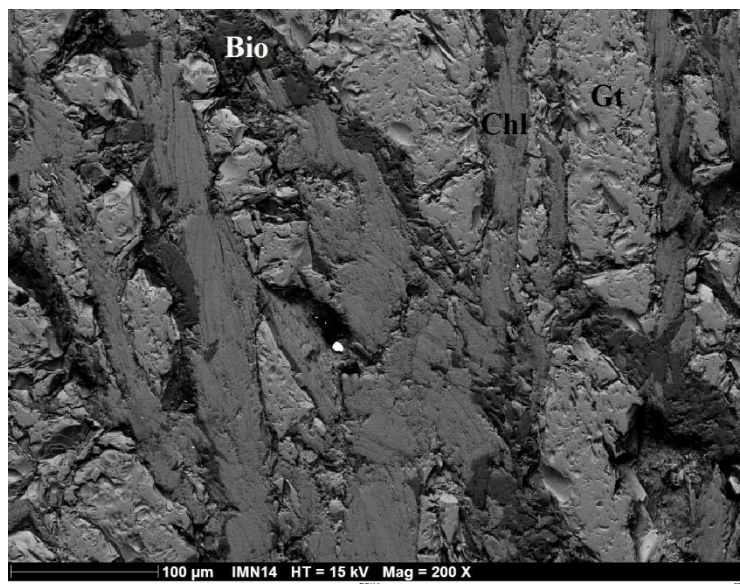


Figure 47: image de la surface du grenat LP03. Le réseau de fracture, et la déstabilisation du grenat en biotite et chlorite sont bien visible.

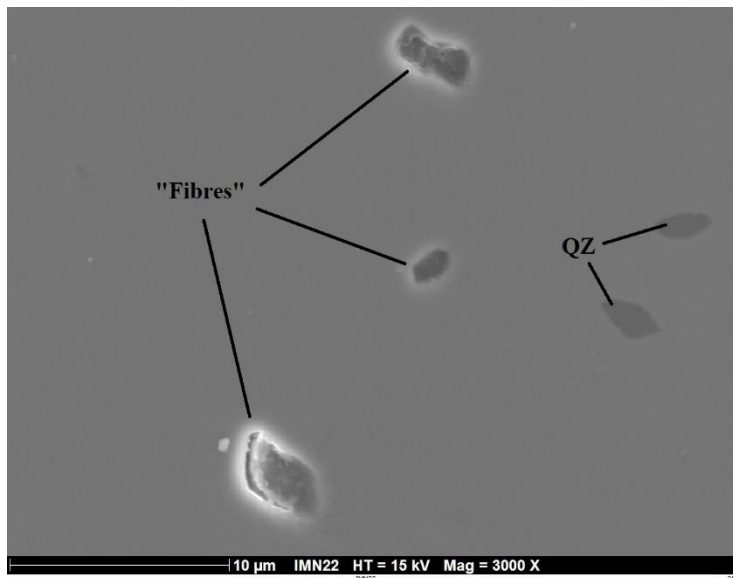


Figure 46: image de la surface du grenat LP02. Les « fibres » sont en réalité creusets. On peut observer un effet de charge à leur affleurement.

Le MEB a également permis de résoudre la question de la nature des inclusions « fibreuse » du grenat LP02. Ces fibres, dont le diamètre ne dépasse pas 2 µm, n'ont renvoyé aucun signal caractéristique au MEB : la composition chimique mesurée sur ces fibres est celle

du grenat. Cependant, des effets de charge sont visibles à l’affleurement des fibres (Figure 47). Les effets de charges sont des artefacts présents lorsque la surface n’est pas lisse. L’affleurement des fibres est alors interprété comme une dépression à la surface du minéral, et les fibres en elles-mêmes peuvent être considérées comme étant des tubes creux.

Tableau 5 : Résultat du MEB, avec calcul des formules structurales pour chacun des grenats analysés

	LP01	LP02	LP03	LP07
O				
Mg	3	0,63	0,91	7,13
Al				
Fe	11,77	15,13	13,81	5,72
Si				
Ca	0,95	0,42	0,03	4,08
Mn				
Ti	0	0	0,02	0
Cr				
K	/	/	/	/
Na				
				
Total Fe + Mg + Mn + Ca	16,6	16,9	17,6	16,9
% Almandin: Fe ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	70,9	89,5	78,5	
% Pyrope: Mg ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃				42,1
% Spessartite: Mn ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	5,4	4,3	16,1	0,0
% Grossulaire: Ca ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃				24,1

	LP01_Ilménite	LP03_biotite	LP03_chlorite	LP07_ZoneBrune	LP07_ZoneRose
O					
Mg	0,78	0,45	1,7	7,13	10,06
Al					
Fe	20,8	1,63	15,89	5,72	8,67
Si					
Ca	0,02	0	0,04	4,08	3,08
Mn					
Ti	21,53	0,02	0,02	0	0
Cr					
K	0	5,8	0	0	0
Na					
					
	Total Fe + Mg + Mn + Ca			16,9	21,8
	% Almandin: Fe ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃			33,8	39,8
	% Pyrope: Mg ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃			42,1	46,1
	% Spessartite: Mn ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃			0,0	0,0
	% Grossulaire: Ca ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃			24,1	14,1

Chapitre 6 Discussion

6.1 Les critères de qualité

La qualité d'un minéral désigne le fait d'estimer s'il est possible de l'utiliser en joaillerie, et donc le commercialiser pour sa beauté. Cette qualité peut s'évaluer sur trois critères : la couleur, la transparence, et la dimension du minéral. Un quatrième critère, la qualité de la taille, est utilisé dans l'estimation en joaillerie, mais il n'est pas intrinsèque au minéral brut et n'est donc pas envisagé ici.

6.1.a La couleur

A l'exception du diamant, la couleur est un facteur essentiel pour qu'un minéral soit gemme. Des couleurs intenses, c'est-à-dire une clarté moyenne associée à une saturation élevée, sont très appréciées. Néanmoins une couleur trop foncée devient un frein à la transparence. La couleur nécessite donc un dosage équilibré. La spectroscopie UV-Visible a montré qu'elle est contrôlée dans les grenats almandins ou pyropes, comme ceux trouvés dans le massif armoricain, par des absorptions à 408, 505 et 571nm. Ces bandes sont liées à la présence de Fe^{2+} . Le MEB a confirmé la présence de cet élément dans tous les échantillons testés. D'autres éléments sont responsables de la couleur, par exemple le chrome. En petite quantité dans un pyrope, le chrome est réputé pour donner une couleur rouge sang très prisée, comme c'est le cas pour les grenats de Bohême. Les analyses MEB ont révélé la présence de chrome dans les grenats pyropes des éclogites de Saint-Philbert-de-Grand-Lieu (LP07). Pourtant, ces grenats sont loin d'une belle couleur gemme. Les éléments colorants sont donc un facteur contrôlant la qualité gemme, mais ils ne sont pas les seuls.

6.1.b La transparence

Le deuxième facteur contrôlant la qualité d'un minéral est la transparence. Plus la transparence est bonne, plus la lumière traverse facilement, et une bonne interaction entre la pierre et la lumière fait gagner en esthétique. Plusieurs agents peuvent affecter la transparence.

Les **fractures**, si elles sont très nombreuses, deviennent gênantes. Un échantillon qui démontre bien ce phénomène est celui de Groix, le LP06, car avec sa zonation, on peut voir facilement que le cœur très fracturé est de mauvaise qualité alors que la périphérie, moins fracturée à une meilleure couleur, et est de meilleure qualité. Mais les fractures ne sont pas pour autant déterminantes, il existe des gemmes qui en contiennent absolument toujours. C'est le cas de l'émeraude, une des quatre grandes gemmes, dont les traitements ont été adaptés à

cette particularité. Les fractures sont de vraies limites surtout quand elles s'accompagnent de recristallisation, et/ou du développement d'**altérations**. Elles sont des zones préférentielles pour la circulation de fluides, c'est pourquoi dans des minéraux ayant subi du métamorphisme, il est fréquent d'y observer de grandes plages brunes d'oxydes, comme dans l'échantillon LP02, ou des cristallisations de chlorite, biotite (échantillon LP03) et autres minéraux issus de la déstabilisation du grenat (kélyphitisation dans l'échantillon LP04).

Les **inclusions** cristallines sont des freins à la transparence, en fonction de leur nature, leur densité et leur taille. Des inclusions opaques sont évidemment très néfastes sur la qualité d'un minéral (échantillon LP06), surtout dans des proportions importantes. Mais les échantillons ont révélé que même des inclusions incolores peuvent poser problème sur la transparence, comme dans le grenat du Finistère, LP05. Dans le grenat de Chine (LP01), ces inclusions sont grosses et beaucoup trop présentes, elles sont des obstacles au passage de la lumière car elles se superposent. Dans l'échantillon de Plélauff (LP02), les fibres se sont avérées être des tubes vides, elles sont quand même des obstacles du fait de leur abondance. Mais les inclusions peuvent aussi être à l'origine de la qualité d'une gemme. Par exemple, les grenats astériés ne sont gemmes que parce qu'ils montrent ce phénomène optique, qui résulte de l'interaction d'inclusions de rutile avec la lumière.

6.1.c Dimensions de la pierre

Les échantillons ont montré que la dimension est elle aussi importante, mais pas déterminante. En effet, le plus gros des échantillons, le LP03, est aussi celui de plus mauvaise qualité. A l'opposé, les grenats du Finistère, comme l'échantillon LP05, ont une bonne couleur mais leur petite taille fait qu'ils ne peuvent être considérés comme gemmes.

La dimension des pierres est à relier directement au contexte géologique. Celui-ci est aussi influent sur la quantité des pierres. Dans les échantillons, le grenat de Plélauff, par sa bonne transparence, dimension, et sa couleur rouge intense est le plus proche d'une qualité gemme. Cependant peu de grenats se trouvent dans cette localisation, ce qui fait que même ayant une qualité gemme, il ne serait jamais intéressant économiquement de les utiliser en joaillerie. A l'opposé, le grenat LP03 de Saint-Jacut a une dimension remarquable de 4 cm de diamètre. Mais son opacité lui ôte toute qualité gemme.

6.2 Synthèse sur la qualité des grenats du Massif Armoricain

Ce sujet traitant des agents affectant la qualité des grenats du Massif Armoricain, il est bon de faire un point sur les échantillons, et de se poser la question : quel(s) est (sont) leur(s) problème(s) ?

6.2.a Plélauff (LP02) : Métamorphisme de contact

Les grenats de Plélauff (LP02) sont rouge intense et d'un diamètre de l'ordre du centimètre. Ce sont des almandins à 90 %. Ils ont cristallisé dans un contexte de métamorphisme de contact, lors de l'intrusion granitique de Rostrenen dans des formations sédimentaires.

Leur transparence est plutôt bonne, malgré de nombreuses inclusions de plusieurs natures. Des opaques, quartz, ilménites, zircons, et monazites, sont présents, mais pas dans des proportions très néfastes pour la qualité. Par ailleurs, des inclusions tubulaires abondantes et dont la nature reste inconnue ont été observées et entravent légèrement le passage de la lumière. Ces inclusions apparaissent fibroradiées (Figure 48), et leurs orientations sont variables dans l'épaisseur de la lame comme le microscope numérique l'a révélé (Figure 34).

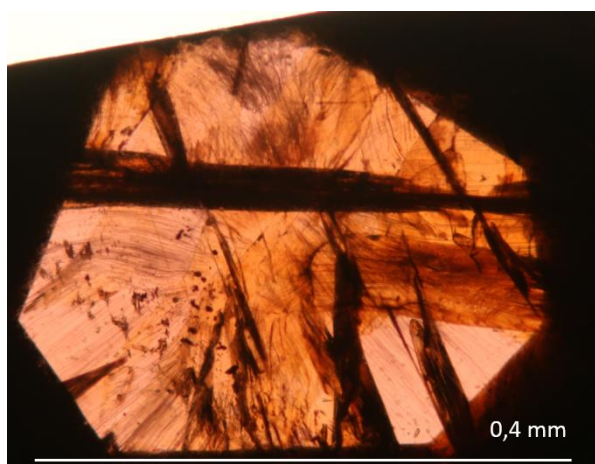


Figure 49: Grenat de Plélauff (LP01) et ses inclusions fibreuses.

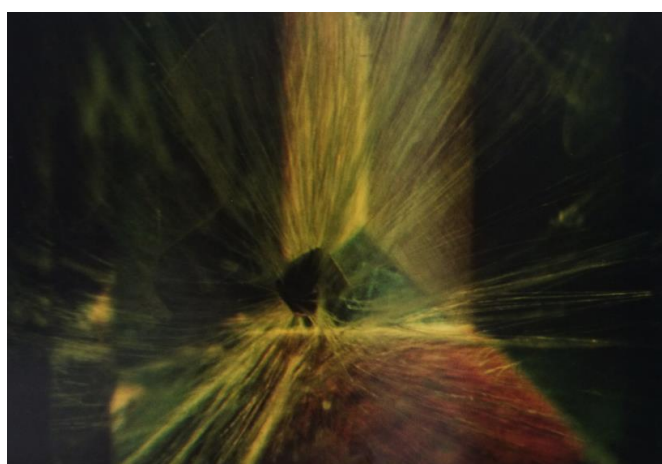


Figure 48: Inclusions fibroradiées de chrysotiles en "queue de cheval" dans un démantioïde. Vu d'environ 3.2 mm. Photo © John I.

Le diamètre à l'affleurement de ces fibres est de moins de 2 μm , ce qui n'a pas permis la mesure de leurs indices de réfraction. Du fait de cette dimension, l'analyse Raman a également été compliquée, et n'a au final pas révélée de signal autre que celui du grenat. Au MEB, les fibres ont montré des effets de charges, démontrant la présence de dépressions à la surface du grenat au niveau de leur affleurement. Là encore, les mesures au MEB sur ces inclusions n'ont révélé

que le signal chimique du grenat. Ces inclusions font penser aux filaments de chrysotiles, inclusions en « queue de cheval » caractéristiques des grenats démantoides riches en chrome (Figure 49). Aucune bibliographie trouvée ne révèle la présence de telles inclusions dans des grenats almandins. Cependant, le chrysotile étant un silicate de magnésium, son signal au MEB a pu se perdre derrière celui du grenat et la faible dureté de ce phyllosilicate expliquerait les dépressions à la surface. D'autres explications seraient que ces inclusions sont fluides ou creuses. Si ces inclusions sont vides, il peut s'agir de phénomènes de dissolution le long de dislocations du réseau cristallin. Néanmoins, des inclusions creuses seraient beaucoup plus visibles du fait d'un indice de réfraction très différent avec le grenat.

De grandes fractures traversent les grenats de Plélauff, mais elles sont peu nombreuses. De l'oxydation se développe à proximité des fractures. Ce sont ces fractures avec l'oxydation qui posent le plus problème pour la qualité de ces grenats. Si elles n'étaient pas présentes, les grenats de Plélauff pourraient être considérés comme étant gemmes.

Leurs dimensions millimétriques et leurs couleurs rouges foncées les rendent comparables, en termes d'apparence, aux grenats de Bohême. La différence de qualité entre les grenats de Plélauff et ceux de Bohême réside dans la présence des inclusions fibreuses et des fractures, qui sont à mettre en lien avec des contextes géologiques respectifs très différents.

6.2.b Saint-Jacut de la mer (LP03) : Pegmatite

Les grenats de Saint-Jacut-de-la-mer sont des almandins (à 80%) légèrement spessartites (à 16%). Leurs dimensions sont remarquables : l'échantillon LP03 fait 4 cm de diamètre. Selon la bibliographie, les grenats de Saint-Jacut sont dans un gneiss et résultent d'un métamorphisme catazonal (haute pression/température). Chauris (2013) décrit lui cette occurrence de grenat comme un pointement pegmatitique. L'échantillon, de par sa taille, sa composition chimique (spessartite) et sa gangue, semble en effet être issu d'une pegmatite de composition granitique.

En dehors de sa dimension, qui est un critère très avantageux pour une gemme, ce grenat n'a aucune qualité gemme. Sa couleur est brune, il est complètement opaque, et ses inclusions sont extrêmement grosses. Il est entièrement fracturé, et ces fractures sont comblées par de la chlorite et de la biotite.

Ce grenat a pu croître dans une pegmatite, d'origine granitique, avant de subir un métamorphisme intense qui l'a fracturé et déstabilisé. Il est impossible de savoir si ce grenat était de bonne qualité avant le métamorphisme, mais il est possible d'estimer le degré de métamorphisme qu'il a subi.

En effet, en partant de l'équation : Almandin + Phlogopite = Grenat-Mg + Biotite ; Deer et al. (1982) a construit un diagramme montrant le degré du métamorphisme en fonction des rapports (Mg/Fe) du grenat et de la biotite. L'échantillon LP03 étant passé au MEB, il est possible de le placer sur le diagramme de Deer (Figure 50). Il se situe entre la zone de métamorphisme à disthène/staurotide et celle à sillimanite. C'est donc un métamorphisme très intense. Cela correspondrait bien au métamorphisme catazonal décrit à Saint Jacut dans la notice du BRGM.

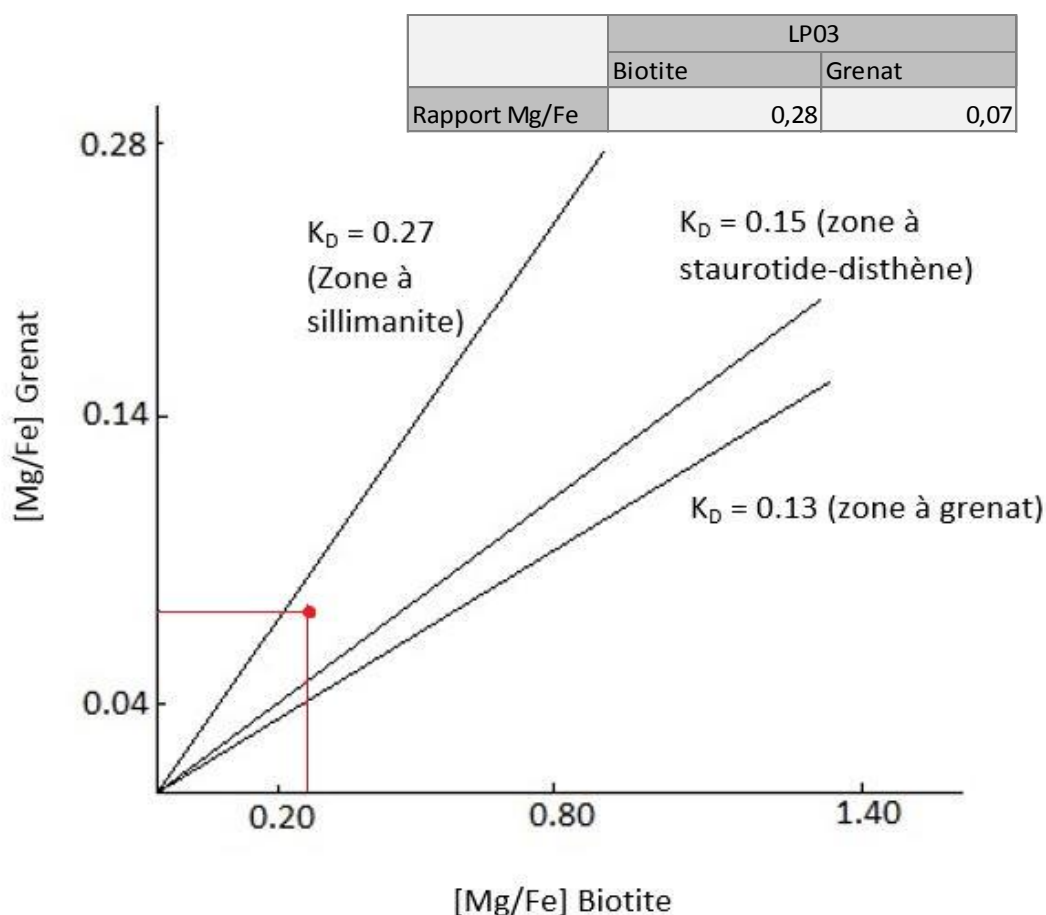


Figure 50: Diagramme de Deer (1982), avec les valeurs de l'échantillon LP03 (point rouge).

Dans le domaine nord-armoricain, et plus précisément l'unité de Saint-Malo dont provient le grenat de Saint-Jacut, la présence de migmatites est fréquente (Ballèvre et al., 2013). L'origine des pegmatites dans cette zone peut donc aussi être métamorphique, issu des fluides d'anatexies et non de fluides granitiques.

6.2.c La Baie des Trépassés (LP05) : Leucogranite

Le grenat de la Baie des Trépassés (LP05), se rapproche d'une qualité gemme. Sa couleur est un rose prononcé, et sa transparence est très bonne. L'encaissant de ces grenats est un leucogranite de la zone broyée Sud Armoricaïne. La mise en place des grenats est supposée être endomorphique, c'est-à-dire liée à une réaction au sein du leucogranite, ou résultante d'un métamorphisme de contact.

Plusieurs inclusions de quartz sont présentes dans l'échantillon LP05, elles sont de dimensions importantes et de fort relief, ce qui les rend bien visible et peu esthétiques. Mais le principal frein à une qualité gemme pour ces grenats est leur dimension. En effet, les grenats de ce leucogranite sont localement très abondants, mais sont millimétriques, ce qui est inexploitable en joaillerie.

6.2.d Grenats de contexte ultra-métamorphique (LP04, LP06 et LP07)

Les échantillons LP04 et LP07 proviennent du même complexe, nommé Essarts. Ce sont des grenats issus du métamorphisme éclogitique d'une croûte océanique. L'analyse MEB du LP07 a révélé qu'il s'agissait d'un pyrope. Ils peuvent être mis en relation avec l'échantillon LP06, de l'île de Groix, qui est une glaucophanite dont l'origine est la même.

Les grenats de ces trois échantillons n'ont pas des couleurs attrayantes à l'œil, bien que leurs spectres UV-Visible soient typiquement ceux d'almandin-pyrope. C'est leur transparence, altérée par des fractures extrêmement abondantes dans lesquelles se sont développés des oxydes, qui pose le plus de soucis sur leur qualité. Ils sont aussi très déstabilisés du fait de la rétrogradation : chloritisation et kéliphitisation. La lame mince de l'échantillon LP06 a permis d'observer de magnifiques grenats hélicitiques, attestant des contraintes (rotation) que les grenats ont subies durant leur croissance. Ces grenats ont assimilé de nombreux minéraux, comme la glaucophanite, en inclusions durant leur croissance. Cette abondance d'inclusions colorées est un facteur limitant la qualité gemme.

Ces trois échantillons ont pour protolithe un basalte tholéitique, passé en subduction puis exhumé. Avant le passage en subduction de la croûte océanique, le magnésium est présent principalement dans l'olivine. C'est durant le métamorphisme que ce magnésium passe dans les autres phases qui se développent, tels que les grenats ou les amphiboles. Il existe des pyropes gemmes dans des contextes de métamorphisme. En effet, les grenats de Bohême, qui ont une composition chimique similaire, ont aussi encaissé du métamorphisme lors de l'orogénèse alpine. La différence est que le protolithe de ces roches est une péridotite, qui contenait déjà du grenat avant d'être ramené à la surface par des mouvements tectoniques. Il

serait intéressant de voir s'il existe des localités dans le monde où un grenat né durant un métamorphisme régional de très haute pression/température présente une qualité gemme.

6.2.e Grenat de chine (LP01) : contexte géologique inconnu

Le dernier des échantillons, LP01, ne vient pas du Massif Armoricaïn. Sa couleur est un rose très pur, et sa transparence est parfaite dans les zones dénuées d'inclusions. Sa qualité est principalement entravée par l'abondance des inclusions. Il est intéressant de remarquer que ces inclusions prennent deux directions. Au centre, elles s'alignent selon un plan, tandis qu'à un endroit précis elles changent complètement de direction et partent en « étoile » tout autour (Annexe 1). On peut penser qu'au début de sa croissance, le grenat était soumis à des contraintes, un mouvement qui orientait les inclusions dans une direction. Ce même mouvement a pu être à l'origine de la fracture centrale, qui suit la même direction que les inclusions. Puis, les contraintes ont cessé, laissant le grenat se développer sans fracture, emprisonnant des inclusions qui n'étaient plus orientées. A la fin de sa croissance, le grenat a cessé d'emprisonner des inclusions. Un événement tardif a engendré les fractures horizontales qui traversent de part en part le grenat. C'est donc à cause de conditions défavorables au début de sa croissance, puis d'un événement tardif, que ce grenat n'est pas gemme.

Le contexte géologique d'origine de ce grenat n'est pas connu, mais de ces observations, on peut facilement dire que ce grenat n'est pas issu d'un contexte ultra-métamorphique. Le grenat almandin n'est pas une espèce typique des pegmatites, cependant trop peu d'informations sur ce grenat sont disponibles pour écarter la possibilité d'une origine pegmatitique. Plusieurs ressemblances sont notables entre cet échantillon et celui de Plélauff : almandin à plus de 70%, de couleur foncée, très inclus et fracturé tardivement. Ainsi, une origine géologique dans le métamorphisme de contact semble être l'histoire la plus plausible avec les informations et observations dont nous disposons.

Chapitre 7 Conclusion

Les grenats du Massif Armoricaïn ne sont donc pas gemmes soit parce que leurs conditions de croissance n'ont pas été favorables, soit parce que des événements ultérieurs à leur croissance les ont affectés. Ce sont les grenats du métamorphisme de contact, liés à des intrusions tardives de granites, qui sont les plus proches d'une qualité gemme. Les grenats les plus éloignés d'une qualité gemme sont ceux formés durant un métamorphisme régional. En effet les échantillons LP02 et LP05 sont tous deux le résultat d'un métamorphisme de contact, lié à une intrusion granitique. Ils se situent dans le domaine centre armoricaïn du massif. Ces intrusions sont des événements tardifs de l'histoire du massif armoricaïn, ce qui explique le peu de fracturation présente. Ce type de contexte est propice au développement de minéraux de bonne qualité, car l'intrusion d'un batholithe s'accompagne généralement de métasomatisme. Ici il apparaît clairement que les grenats issus de ce contexte ont une couleur et une transparence de meilleure qualité que les autres. On peut facilement extrapoler que ces observations ouvrent des perspectives en termes d'étude d'autres contextes géologique similaire, pour les grenats mais pas seulement. Par exemple, il a déjà été mentionné dans la littérature que la qualité exceptionnelle des rubis de la région de Mogok pouvait être liée à la présence d'une intrusion granitique, source de chaleur et d'éléments chimiques (Garnier et al. 2008).

En dehors du diamant, une gemme de qualité est un minéral ayant une couleur attrayante, une interaction esthétique avec la lumière (soit une transparence qui met en valeur la couleur, les feux de la pierre, etc., soit un phénomène optique tel que l'astérisme), et une dimension suffisante pour être utilisée en joaillerie. La couleur est liée à la chimie et la structure des minéraux. Pour avoir un grenat avec une belle couleur, il va falloir chercher un environnement de formation susceptible de mettre à disposition les éléments chimiques nécessaires, et avec un dosage équilibré. De ce fait, les fluides ont très souvent un rôle majeur dans la cristallisation de minéraux gemmes car ils sont vecteurs d'éléments chimiques. Pour obtenir un grenat de dimension suffisante pour être taillé, il faut qu'il cristallise dans un environnement où il aura la place et le temps de se développer. Enfin, les minéraux gemmes doivent être dépourvus au maximum d'inclusions et de fractures, freins à la transparence ainsi que la résistance de la pierre. C'est pourquoi les pegmatites sont des environnements propices au développement de minéraux gemmes. A l'inverse, les minéraux ayant cristallisé dans des contextes métamorphiques, et ainsi subi des contraintes pendant ou après leur croissance, sont plus difficilement gemmes. Dans ces conditions, c'est très souvent le métasomatisme, et donc la circulation de fluide, qui favorise le développement de cristaux gemmes.

Ainsi, les grenats voient leur qualité soit directement liée à leurs conditions de formation, donc géologique, soit affectée par des événements ultérieurs. Ce travail s'est attardé sur la définition de la qualité de chacun des grenats étudiés. Il pourrait être poursuivi par la recherche plus poussée sur la géodynamique des milieux de formation et sur les conditions thermodynamiques de formation des grenats. Il serait également important de réfléchir à plus grande échelle que celui du Massif Armoricain, notamment par une synthèse des gisements de grenats gemmes liée à leurs contextes géologiques autour du monde.

De manière plus générale, l'étude des facteurs affectant la qualité des minéraux, et donc des contextes géologiques dans lesquelles les gemmes se forment, pourraient permettre de créer des guides de prospection si elle était réalisée de manière systématique lors de la découverte et l'exploitation d'un gisement. En effet, pour l'or et les métaux, l'exploitation s'accompagne la plupart du temps de l'étude des dépôts qui permet ainsi de créer des métallotectes. Un métallotecte se définit comme un objet géologique dont la présence ou l'absence peut annoncer un gîte (Jébrack et Marcoux, 2008), ce peut être des anomalies géochimiques, des minéraux d'altération, des éléments structuraux, etc. Les métallotectes sont ensuite utilisés dans la prospection de nouveaux gisements, à petite échelle lors d'étude de terrain, comme à grande échelle avec de l'analyse spatiale prédictive. En reprenant ce principe, par l'étude des gisement gemmes, nous pourrions créer un ensemble de « gemmotectes », facteurs géologiques propre à chaque minéral gemme et ayant un impact positif ou négatif sur la probabilité de trouver un gîte. Cela permettrait à l'échelle mondiale de réaliser des cartes de favorabilité des gisements gemmes. A l'échelle d'un gisement, les « gemmotectes » seraient des guides dans la compréhension des mécanismes de formation.

Asselborn, É., Chiaperro, P.-J., Glavier, J., (2006). *Les minéraux*. Editions Artemis. p 199.

Audren C., Triboulet L., Chauris L. Lefort J.P., Vignerresse J.L., Audrain J., Thiéblemont D., Goyallon J., Jégouzo P., Guennoc P., Augris C., Carn A., (1993), *Notice explicative de la feuille Ile de Groix à 1/50 000*. Editions du BRGM, 101 p.

Ballevre, M., Bosse, V., Dabard, M. P., Ducassou, C., Fourcade, S., Paquette, J. L., ... & Pitra, P. (2013). Histoire géologique du Massif armoricain: actualité de la recherche. *Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne*, 500, 5-96.

Balièvre et Robert, panneau d'informations sur les sentiers de l'île de Groix.

Bariand, P., Cesbron, F., Geffroy, J. (1977). *Les minéraux, leurs gisements, leurs associations* (Vol.1). Minéraux et fossiles., p 85-87.

Bariand, P., Poirot, J. P., Duchamp, M., & Bariand, N. (1998). *Larousse des pierres précieuses: fines, ornementales, organiques*. Larousse.

Barrière M., Chauris L., Fouquet Y., Guilcher A., Lefort J.P., Pelhate A., (1985), *Notice explicative de la feuille Pointe du Raz à 1/50 000*. Editions du BRGM, 38 p.

Bambier A., Chantraine J., Godard G., Greber Ch. Limasset O., Viaud J.M., Visset L., (1982), *Notice explicative de la feuille Saint-Philbert-De-Grand-Lieu à 1/50 000*. Editions du BRGM, 79 p.

Bos P., Chantraine J., Laville P., Sagon J.P., (1988), *Notice explicative de la feuille Pontivy à 1/50 000*. Editions du BRGM, 77 p.

Bos P., Castaing C., Clément J.P., Chantraine J., Lemeille F. (1997), *Notice explicative de la feuille Rostrenene à 1/50 000*. Editions du BRGM, 132 p.

Chauris L. (2013). *Minéraux de Bretagne*. Les éditions du Piat.

Deer W.A., Howie R.A. and Zussman J., (1982) *Rock Forming minerals*, Volume 1A. P 470-700

Deville, J., (1995). *Les Grenats*. Minéraux et fossiles, Hors-série N°1. 67 p.

Frediani J.C., (2005) *Les Grenats, 1er partie*. Revue de Gemmologie, n°154, 2 p.

Fritsch, E., Rossmann, G. R. (1988). *An update on color in gems. Part 3: Colors caused by band gaps and physical phenomena*. *Gems & gemology*, 24(2), 81-103

Foucault A., Raoult J-F. (2010). *Dictionnaire de géologie*, 7e Edition. Dunod

Garnier, V., Giuliani, G., Ohnenstetter, D., Fallick, A. E., Dubessy, J., Banks, D., ... & Bakhsh, K. A. (2008). Marble-hosted ruby deposits from Central and Southeast Asia: Towards a new genetic model. *Ore Geology Reviews*, 34(1), 169-191.

Gilg, H. A., Kile, S., Liebetrau, S., Modreski, P., Neumeier, G., & Staebler, G. (2008). Garnet: Great balls of fire. *East Hampton, CT: Lithographie*.

Groat, L. A. (Ed.). (2014). *The geology of gem deposits*.

Le Goff E., Guennoc P., Hallegouët, Lebreton P., Thomas E. (2009), *Notice explicative de la feuille Saint-Malo à 1/50 000*. Editions du BRGM, 199 p.

Hemon, P. (2010). *La « gemmitude » des grenats almandins du Massif Armoricaïn*. Travail d'Etude et de Recherche, Master 1. Université de Nantes, France. 24 p.

Jébrak, M., & Marcoux, É. (2008). *Géologie des ressources minérales* (p. 668). Ministère des ressources naturelles et de la faune.

Kievlenko E.Y. (2003). *In Geology of gems*, Ocean Picture Ltd

Lahondère D., Chèvremont P., Béhennec F., Bouton P., Godard G., Stussi J.M., (2009), *Notice explicative de la feuille Palluau à 1/50 000*. Editions du BRGM, 173 p.

Laurs B.M., Knox K. (2001), *Spessartine garnet from Ramona, San diego County, California*, *Gems & Gemology*, v.37, N°4, p 278-295

Nguyen-Bui H.A., Fritsch E., Rondeau B. (2013) *Les origines géologique et géographique des gemmes*. *Géochronique*, n° 128, pp. 37-43.

Pezzotta, F. (2010). *Andradite from Antetzezambato, North Madagascar*. *Mineral. Rec*, 41, p 209-229.

Pinet, M., Smith, D. C., & Lasnier, B. (1992). *La microsonde Raman en gemmologie*. *Revue de Gemmologie*, Hors série, p 38.

Robert, C., & Bousquet, R. (2013). *GÉOSCIENCES La dynamique du système Terre*, Edition Belin p 131-132

Schmetzer, K., & Bernhardt, H. J. (1999). Garnets from Madagascar with a color change of blue-green to purple. *Gems Gemol*, 35, 196-201.

Schlüter J. & Weitschat W. (1991), *Bohemian Garnet – Today*, *Gems&Gemology*, p168-173.

Schumann, W. (2009). *Guide des pierres précieuses: pierres fines et ornementales*. Delachaux et Niestlé. 2 pages consultées.

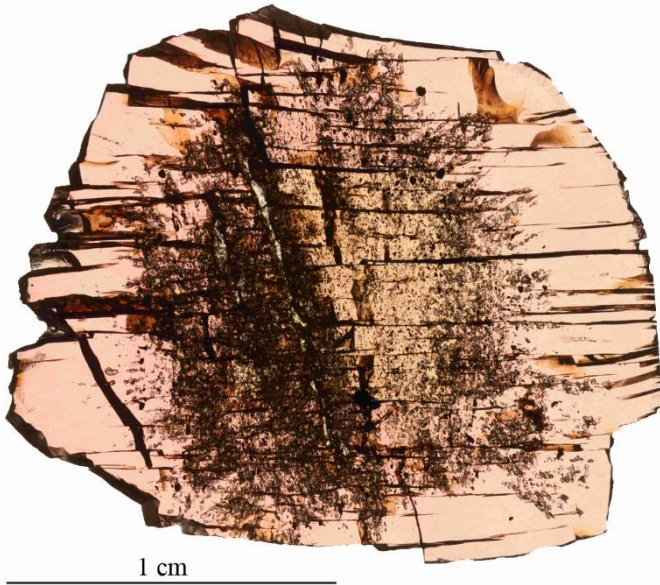
Simmons, W. B. (2007). Gem-bearing pegmatites. *Geology of Gem Deposits. Mineralogical Association of Canada*, 37, p 169-206.

Simonet, C., Okundi, S., & Masai, P. (2000, November). *General setting of coloured gemstone deposits in the Mozambique belt of Kenya—Preliminary considerations*. In *Proceedings 9th Conference of the Geological Society of Kenya*, Nairobi, Kenya, p 123-138.

Rossmann G. R. (2008) Mineral spectroscopy
<http://minerals.gps.caltech.edu/FILES/Visible/Garnet/Index.html> (page consultée le 26/05/2014)

ANNEXES

Annexe 1 : Echantillon LP01



Origine géographique : Chine

Origine géologique : Inconnue

Cause apparente de non-qualité gemme :

transparence mauvaise. Cœur sale, périphérie propre.

Préparation : lame épaisse de 0,55mm

Densité : 4,073

Couleur : Rose-rouge

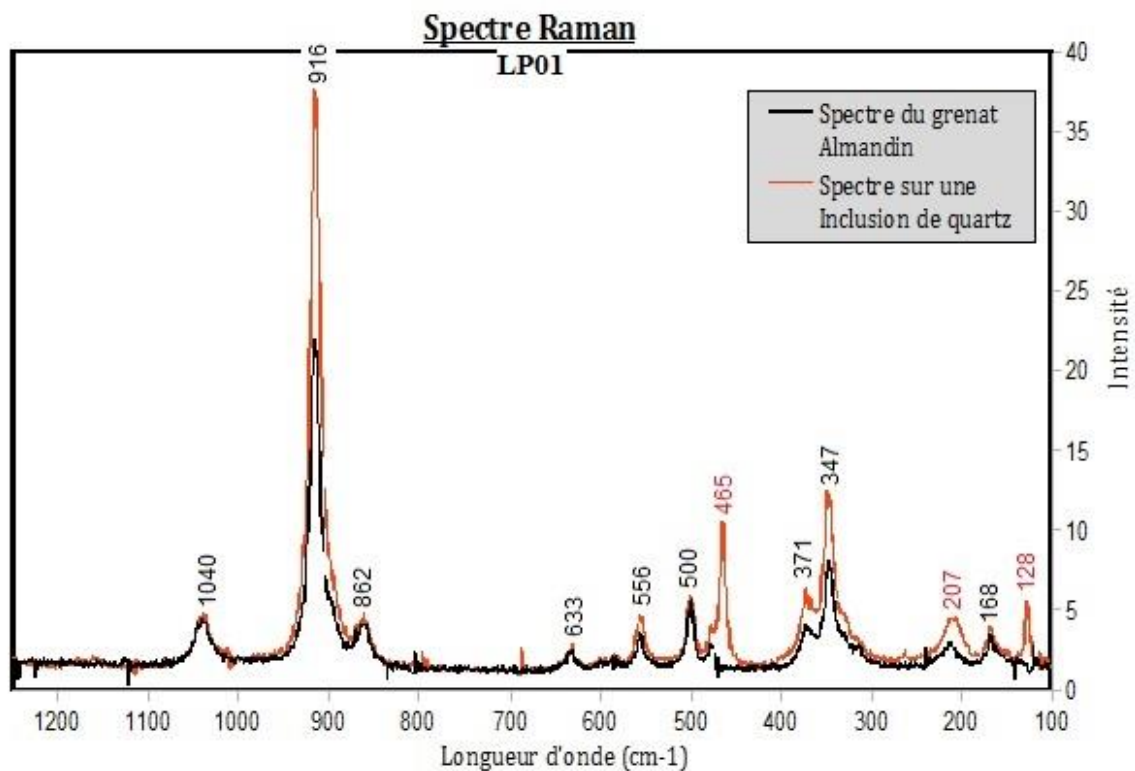
Variété de grenat : Almandin

Composition exacte : Almandin 70%, pyrope 20%,
spessartite 5%, grossulaire 5%

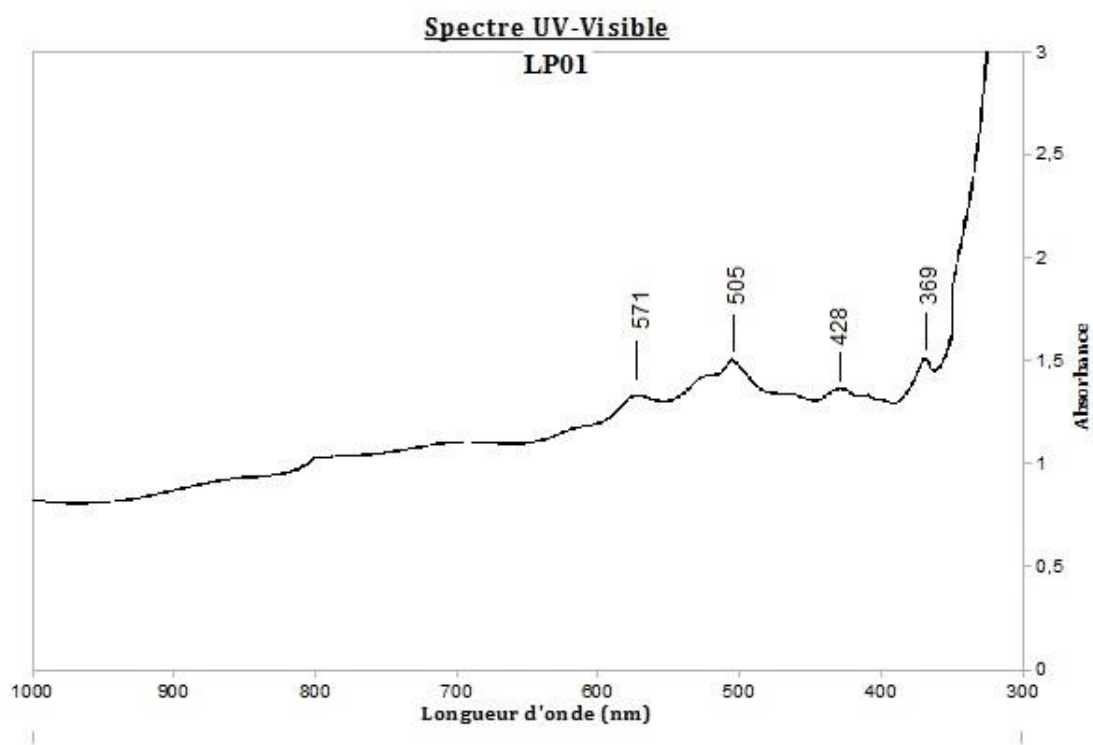
Inclusions : Quartz, zircon, chlorite, ilménite, apatite

Résultats

Raman

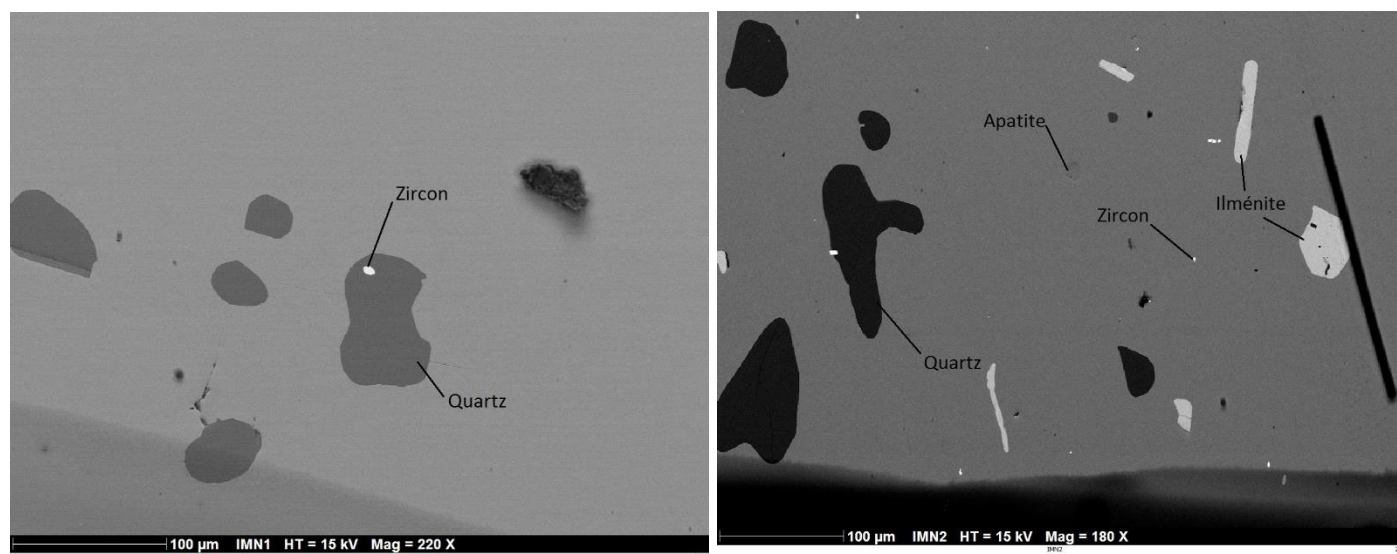


Uv-visible



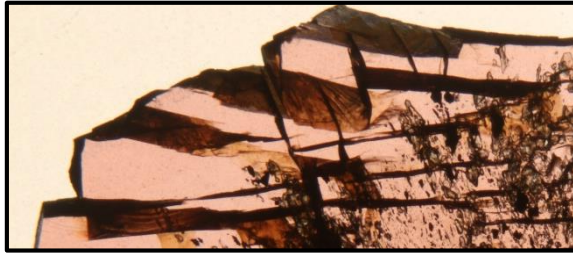
MEB

La surface lisse et nette de couleur grise uniforme atteste d'une composition homogène.

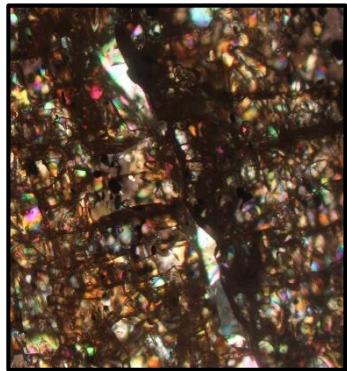


	<u>% Atomique</u>	<u>% Poids</u>	<u>Formule structurale</u>		<u>% Poids Oxydes</u>	
O	56,49	36,27	Total Fe + Mg + Mn + Ca	16,6	SiO ₂	39,85
Mg	3	2,93	% Almandin: Fe ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	70,9	Al ₂ O ₃	21,20
Al	10,37	11,22	% Pyrope: Mg ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	18,1	FeO	33,94
Fe	11,77	26,38	% Spessartite: Mn ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	5,4	MgO	4,86
Si	16,53	18,63	% Grossulaire: Ca ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	5,7	MnO	2,54
Ca	0,95	1,52			CaO	2,13
Mn	0,89	1,97			Total Oxydes	104,52

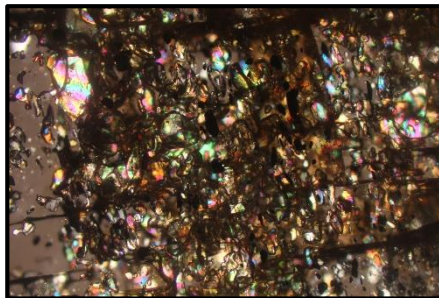
Observations microscopique 2 types de fractures & 4 zones de qualités différentes.



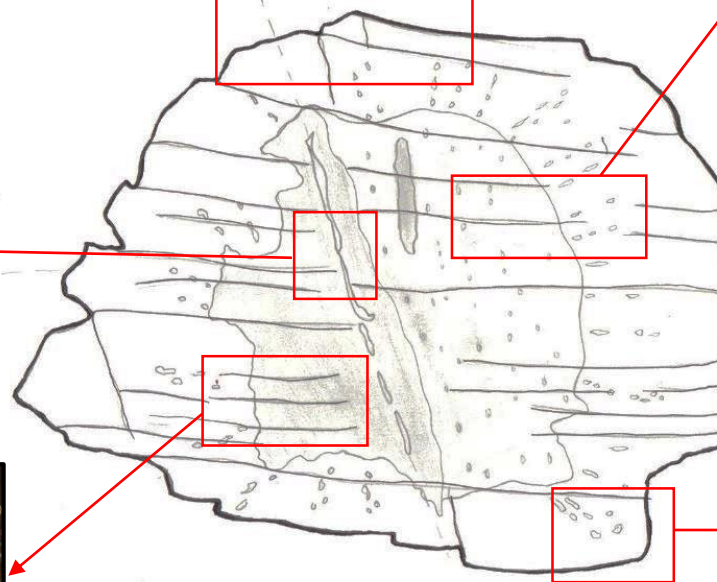
Fractures tardives, oxydés



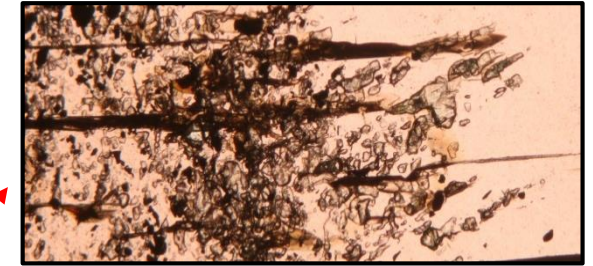
Fracture précoce, avec recristallisation de Quartz



Zone 1 : Qualité extrêmement mauvaise, superposition de très nombreuses inclusions

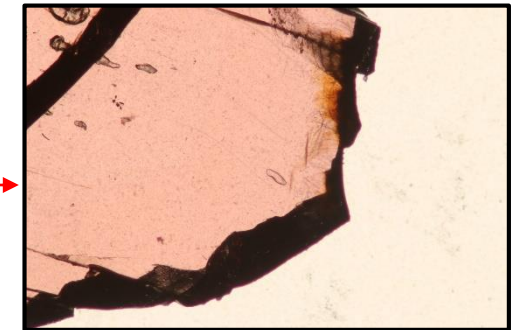


2 cm



Zone 2 à Droite : Les inclusions sont moins nombreuses mais toujours gênantes pour le passage de la lumière

Zone 3 à Gauche : Changement d'orientation de inclusions



Zone 4 : Qualité quasi- gemme (trop foncée), couleur rose et transparence parfaite

Conclusion sur le caractère non-gemme : La dimension de ce grenat est très favorable à une utilisation en joaillerie, pour une pierre de 1 à 2 carats. On peut parler de qualité gemme sur la périphérie (couleur et transparence parfaites), bien que la couleur soit un peu trop foncée. La pierre dans sa globalité ne peut être utilisée en joaillerie car son centre est trop inclus, ce qui assombrit l'ensemble de la pierre. D'autant plus que les fractures tardives la fragilisent.

Annexe 2 : Echantillon LP02



Origine géographique : Plélauff, Côtes d'Armor, France

Origine géologique : Métamorphisme de contact (Cornéenne).

Cause apparente de non-qualité gemme : Fractures. Couleur très foncée.

Préparation : lame épaisse de 0,9 mm

Densité : 4,22

Couleur : Rouge intense

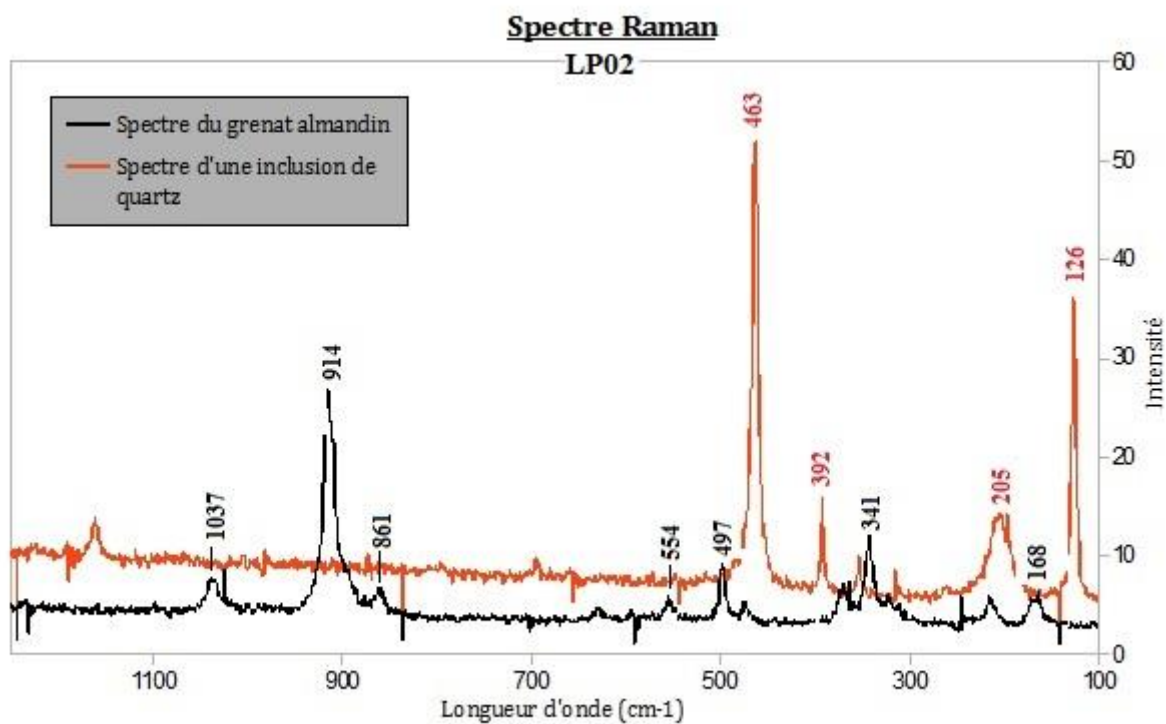
Variété de grenat : Almandin

Composition exacte : Almandin 90%, Spessartite 4%, pyrope 4%, grossulaire 2%

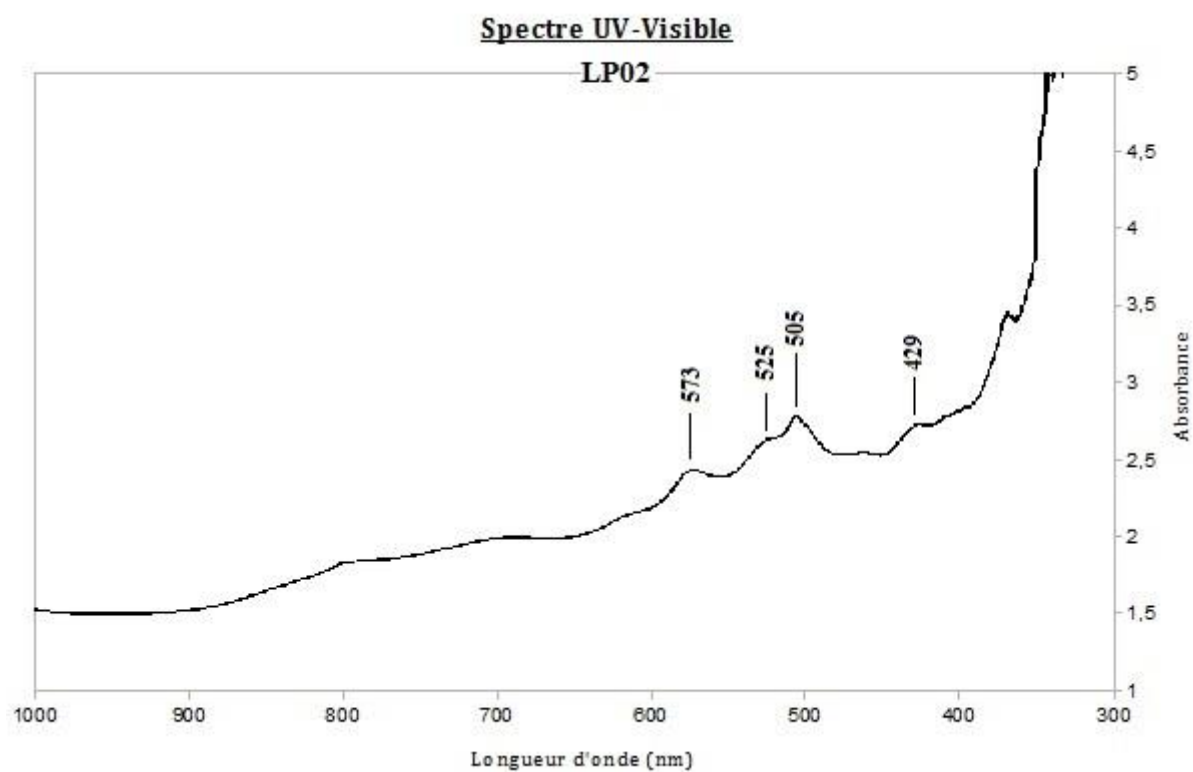
Inclusions : Quartz, monazite, ilménite, zircon, tubes ou fibres de 2 μm de diamètre.

Résultats

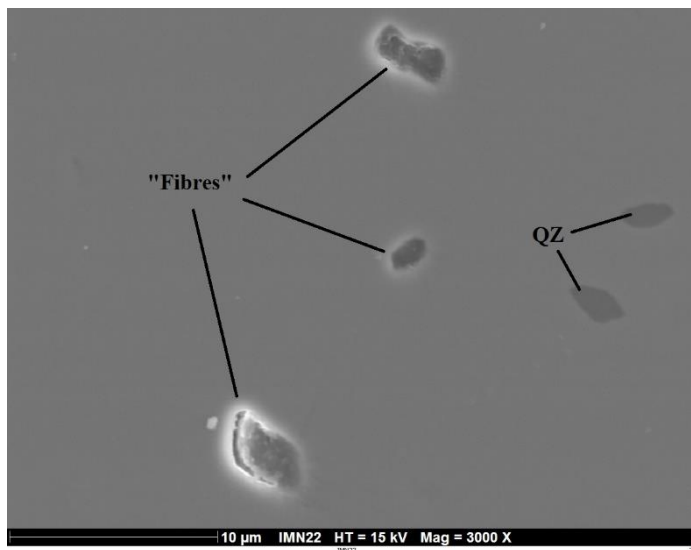
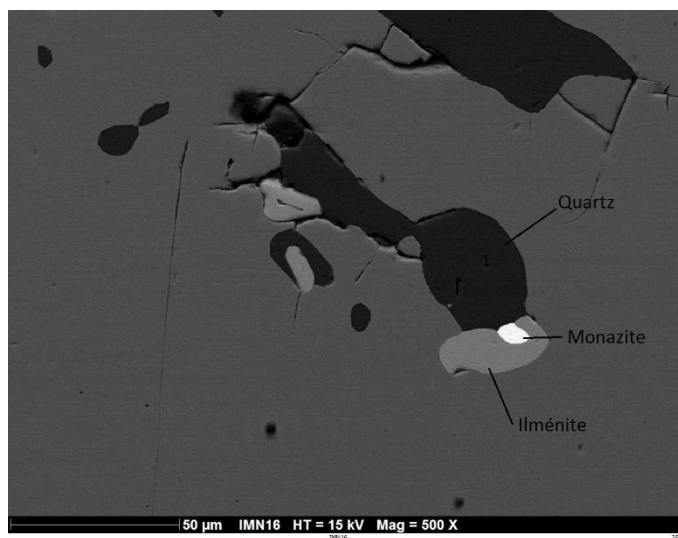
Raman



Uv-Visible



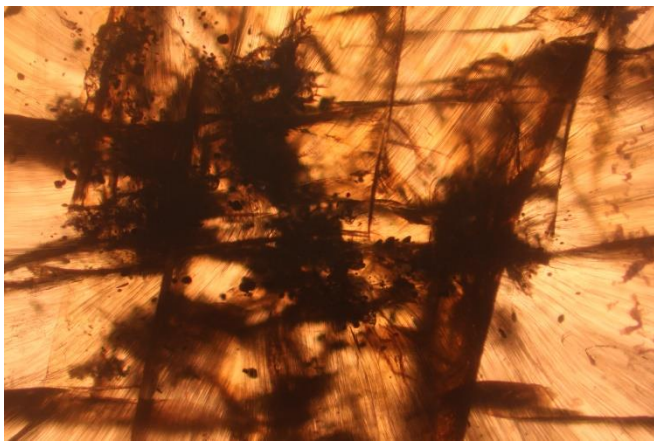
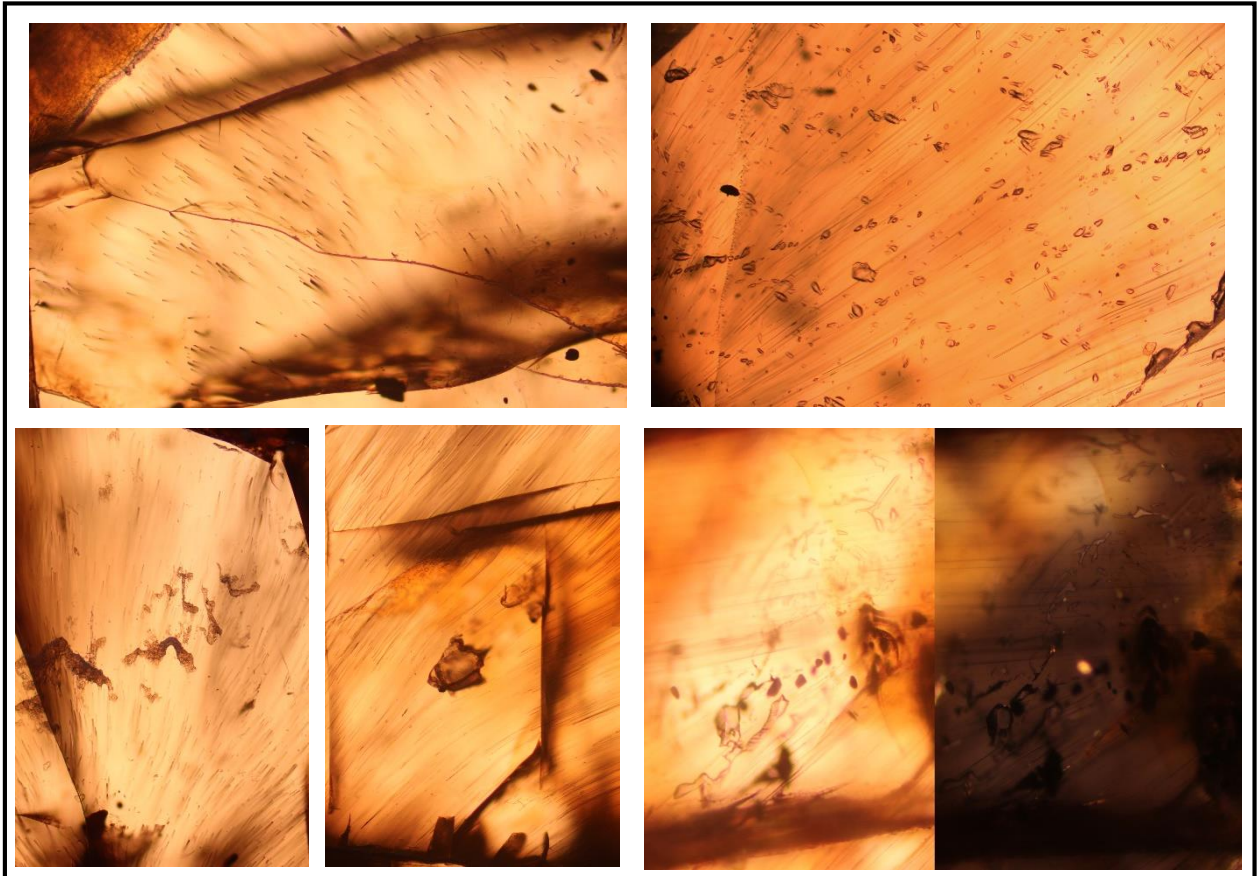
MEB



	<u>% Atomique</u>	<u>% Poids</u>	<u>Formule structurale</u>		<u>% Poids Oxydes</u>	
O	55,25	32,16	Total Fe + Mg + Mn + Ca	16,9	SiO ₂	37,20
Mg	0,63	0,55	% Almandin: Fe ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	89,5	Al ₂ O ₃	20,09
Al	10,83	10,63	% Pyrope: Mg ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	3,7	FeO	39,56
Fe	15,13	30,75	% Spessartite: Mn ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	4,3	MgO	0,91
Si	17,02	17,39	% Grossulaire: Ca ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	2,5	MnO	1,87
Ca	0,42	0,61			CaO	0,85
Mn	0,72	1,45			Total Oxydes	100,48

Observations microscopiques

Différentes inclusions : Photos x10

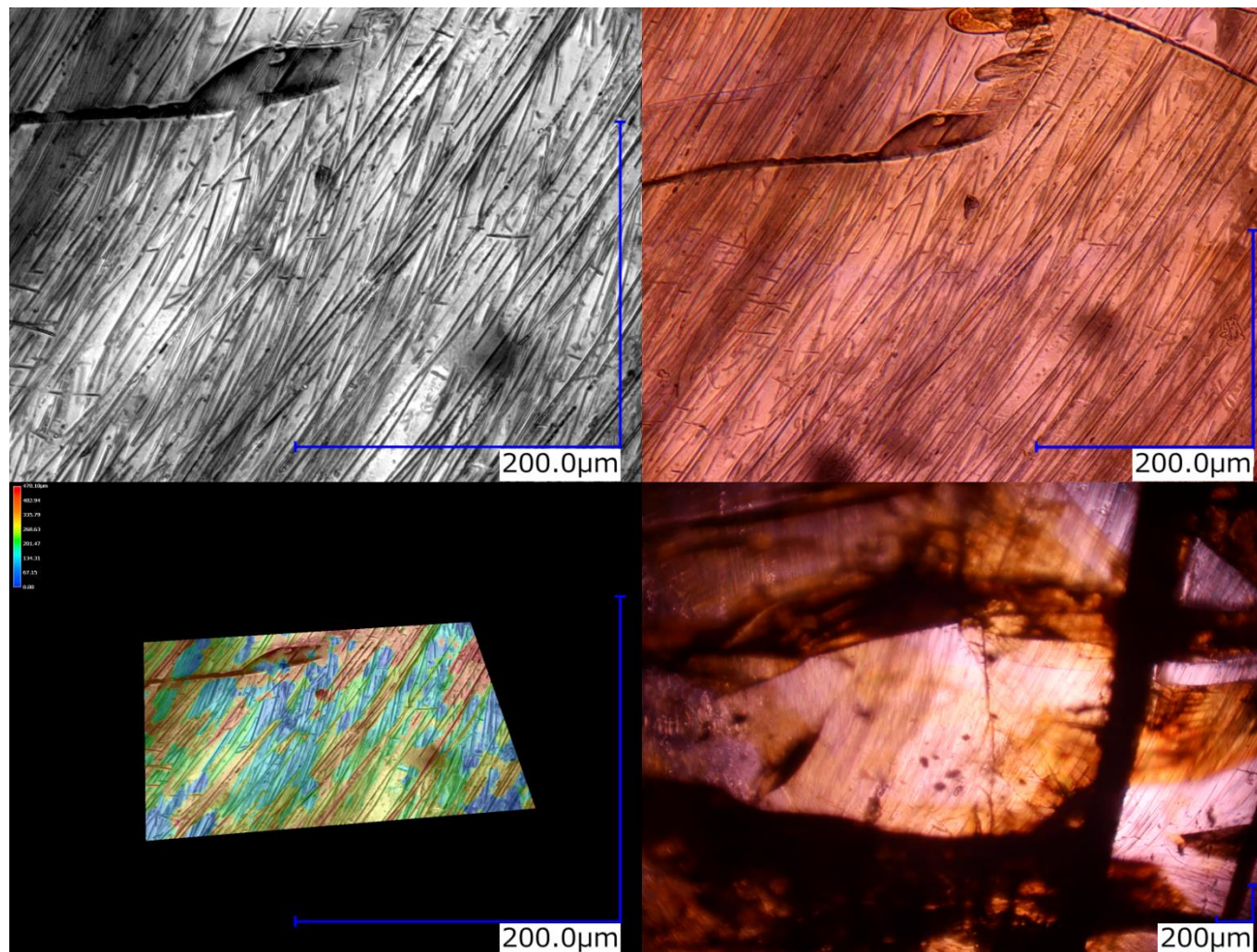


Amas d'inclusions et de fractures au centre d'un grenat : Photo x4



Amas de fractures oxydées au centre d'un grenat : Photo x4

Observations au microscope numérique



Conclusion sur le caractère non-gemme : La couleur rouge intense de ces grenats est leur atout de qualité. Leurs tailles est correcte pour être utilisé en joaillerie. Les inclusions sont nombreuses mais peu gênantes (tubes creux de 2µm). Le facteur pouvant limiter leur utilisation en joaillerie est la présence de fractures oxydées.

Annexe 3 : Echantillon LP03



Origine géographique : Saint-Jacut de la Mer, Côtes d'Armor, France

Origine géologique : Pegmatite granitique

Cause apparente de non-qualité gemme : aucune transparence

Préparation : lame épaisse de 0,65 mm

Densité : 3,45

Couleur : Brun foncé.

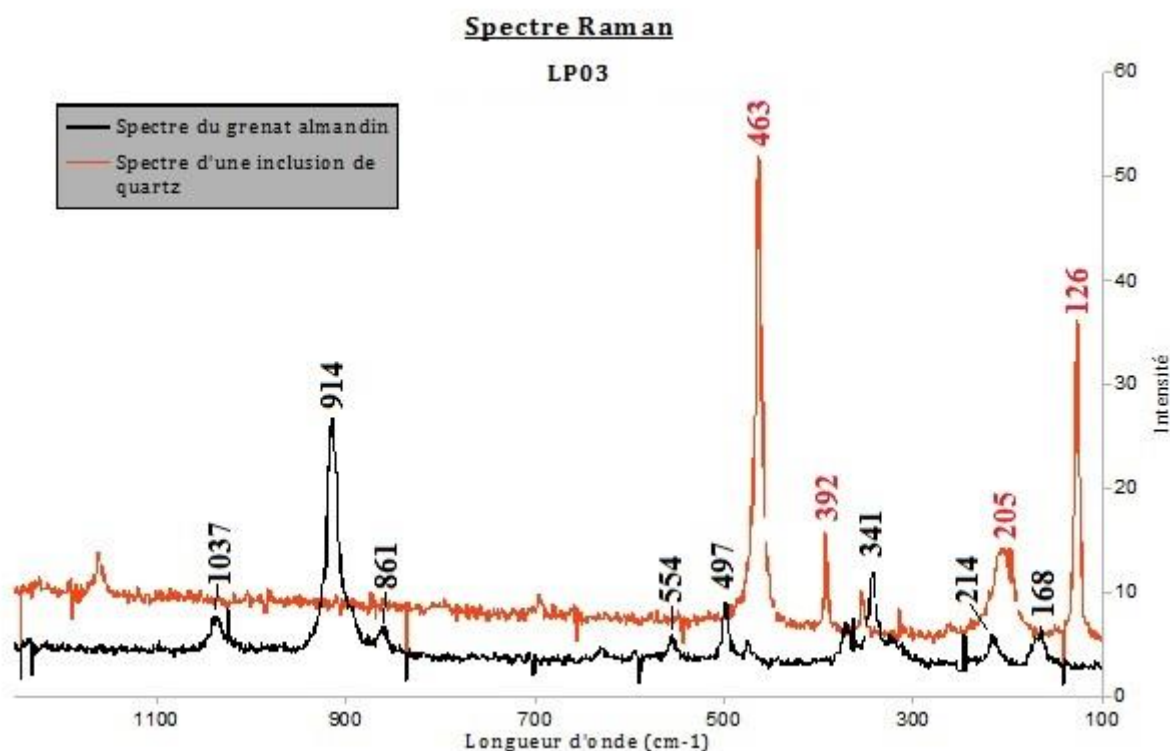
Variété de grenat : Almandin

Composition exacte : Almandin 79%, spessartite 16%, pyrope 5%

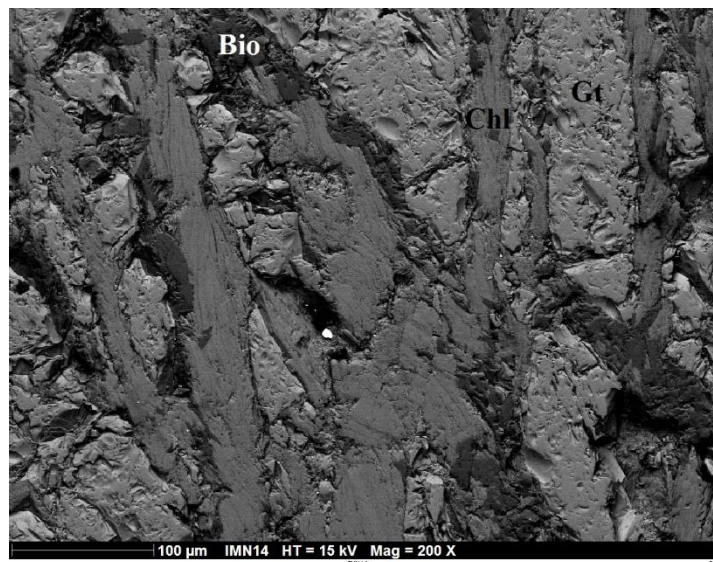
Inclusions : Quartz, chlorite, biotite, oxydes de fer

Résultats

Raman



UV-Visible : Impossible, la lumière ne traverse pas.



Bio = Biotite

Chl = Chlorite

Gt = Grenat

	% Atomique	% Poids	Formule structurale		% Poids Oxydes	
O	53,39	31,72	Total Fe + Mg + Mn + Ca	17,6	SiO2	39,81
Mg	0,91	0,82	% Almandin: $\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$	78,5	Al2O3	21,13
Al	11,16	11,18	% Pyrope: $\text{Mg}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$	5,2	FeO	36,86
Fe	13,81	28,65	% Spessartite: $\text{Mn}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$	16,1	MgO	1,36
Si	17,85	18,61	% Grossulaire: $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$	0,2	MnO	3,67
Ca	0,03	0,05			CaO	0,07
Mn	2,84	2,84			TiO2	0,05
Ti	0,02	0,03			Total Oxydes	102,94

Observations microscopiques

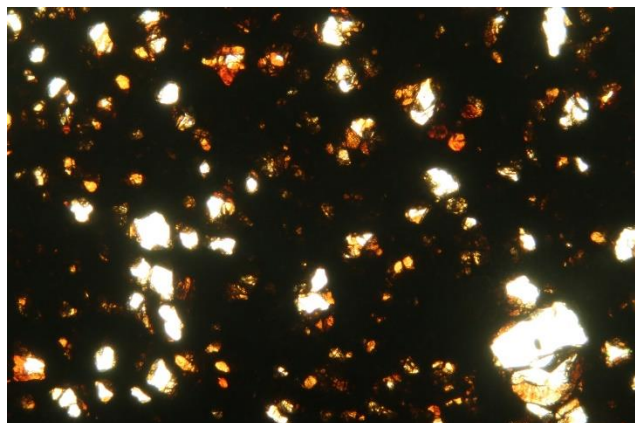
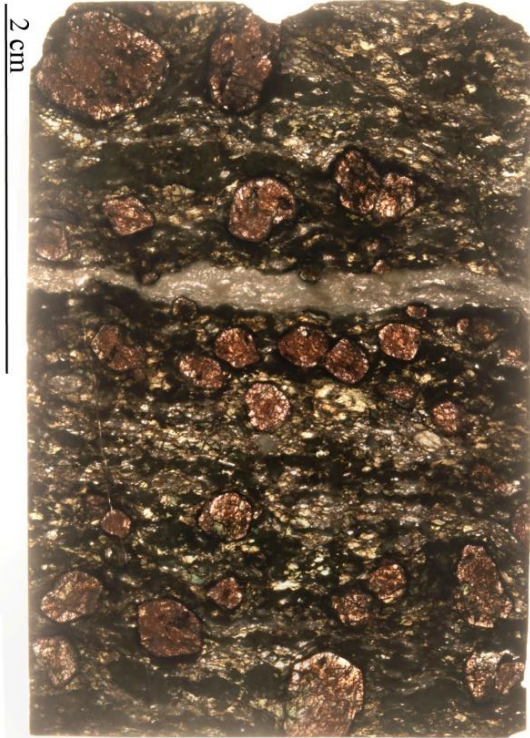


Photo x4. La lumière ne traverse que les inclusions de quartz. Le grenat est opaque. Des oxydes de fer sont visibles.

Conclusion sur le caractère non-gemme : La taille de ce grenat est un fort atout. Mais sa transparence est nulle, et les inclusions occupent autant d'espace que le grenat.

Annexe 4 : Echantillon LP04

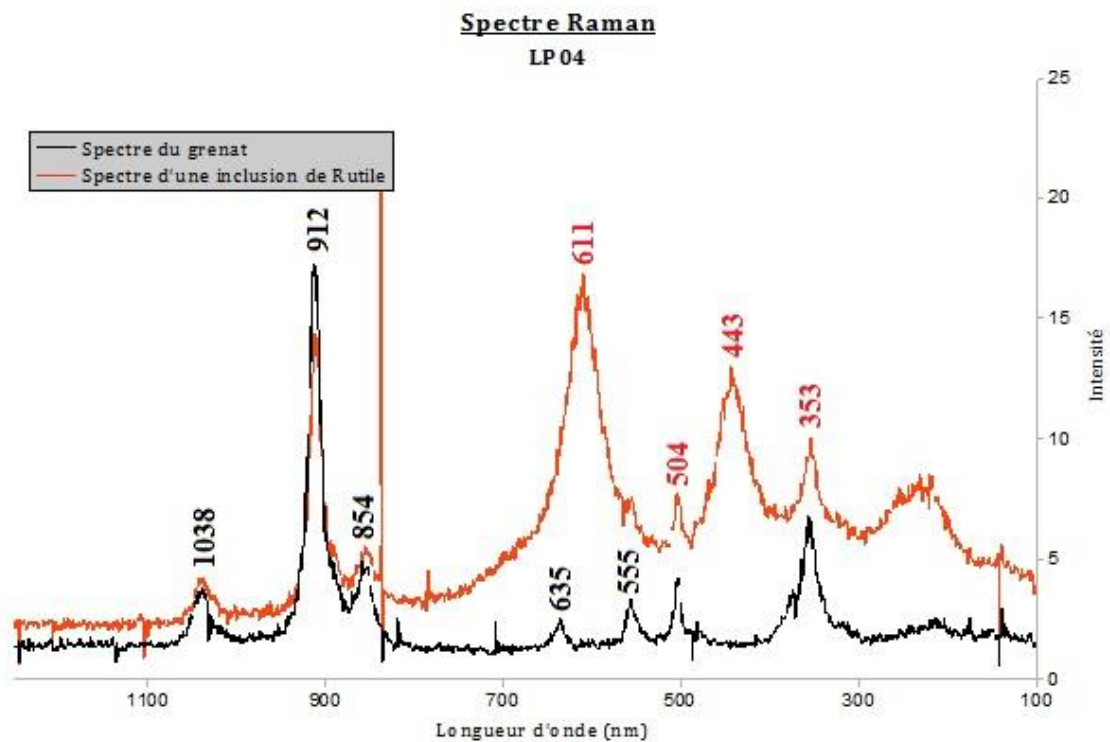


Origine géographique : La Gerbaudière, Loire-Atlantique, France
Origine géologique : Métamorphisme régional (Eclogite).
Cause apparente de non-qualité gemme : Transparence mauvaise
Préparation : lame épaisse de 0,37 mm

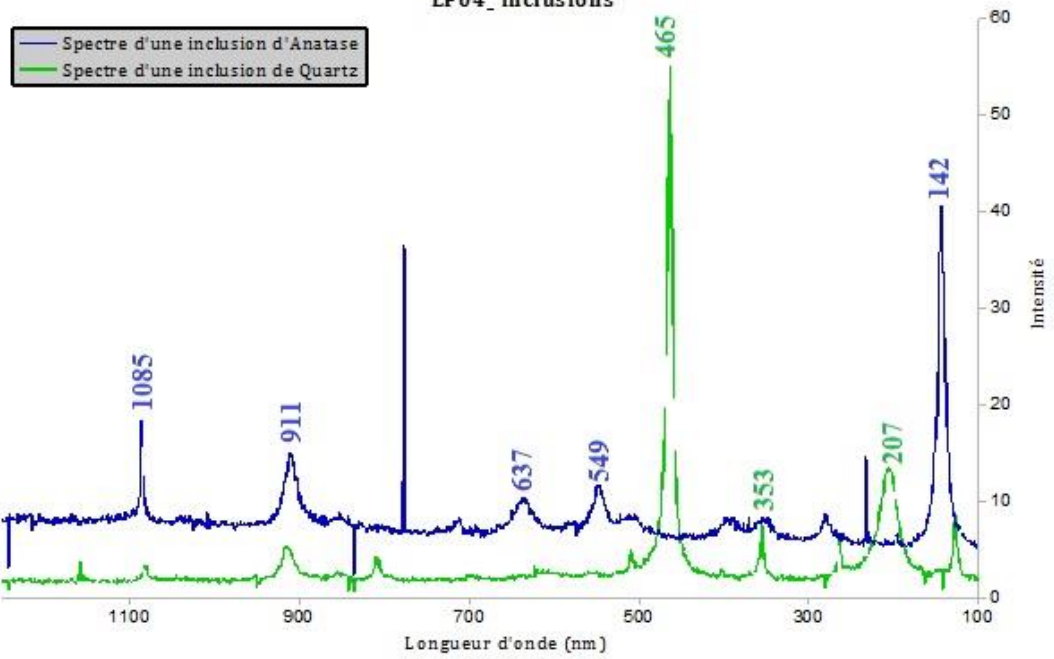
Densité : Non-analysée
Couleur : Rose
Variété de grenat : Pyrope (grenat d'éclogite)
Composition exacte : Non-analysée
Inclusions : Quartz, omphacite, anatase, rutile

Résultats

Raman

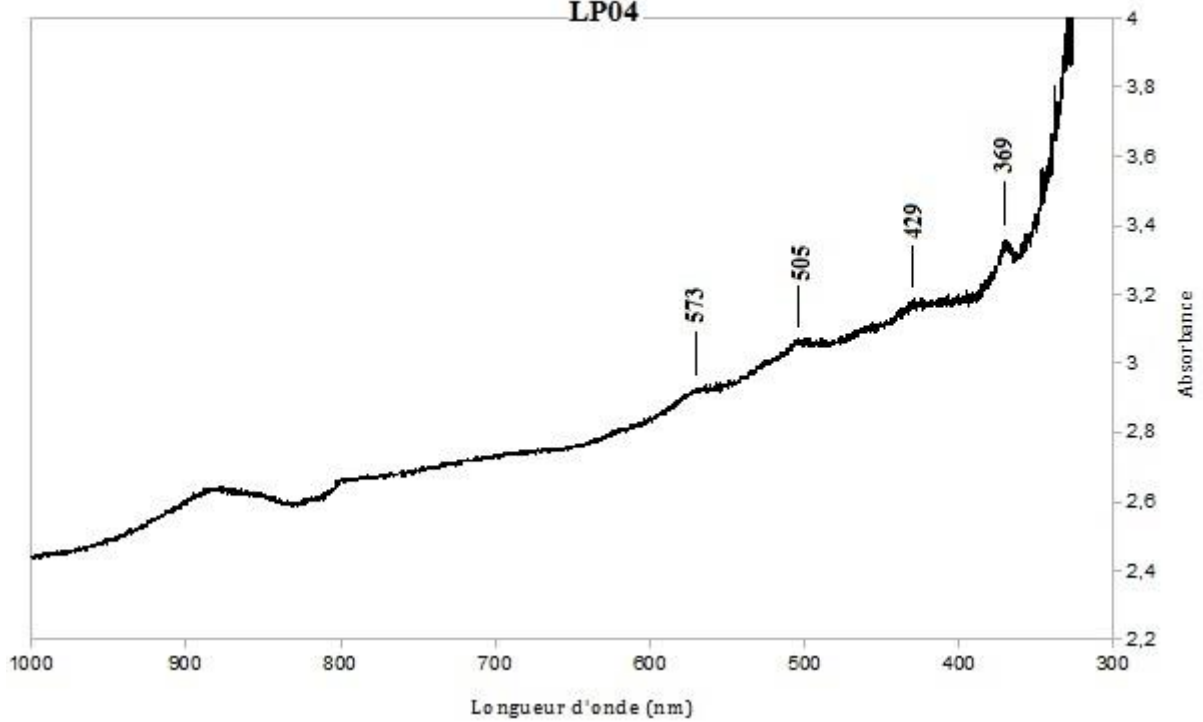


Spectre Raman
LP04_inclusions

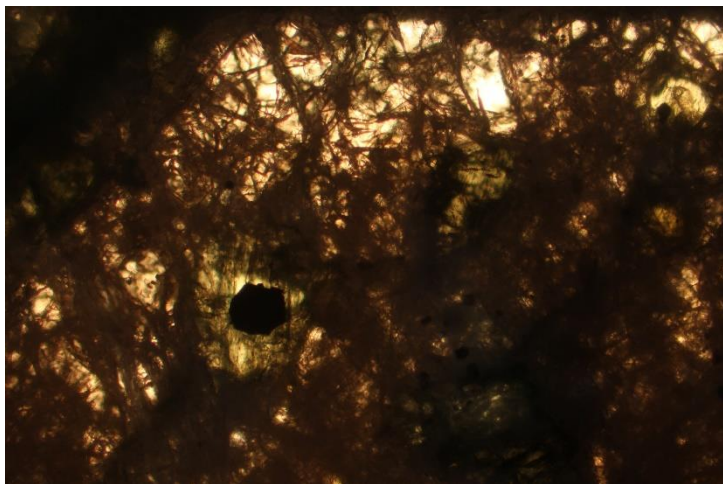


UV-Visible

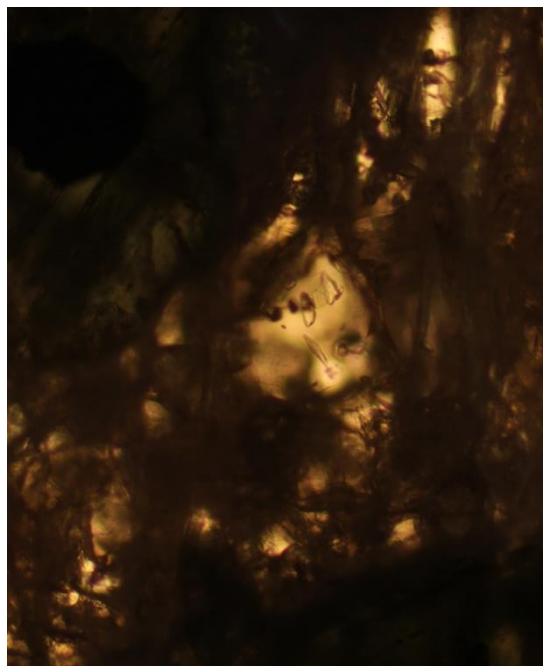
Spectre UV-Visible
LP04



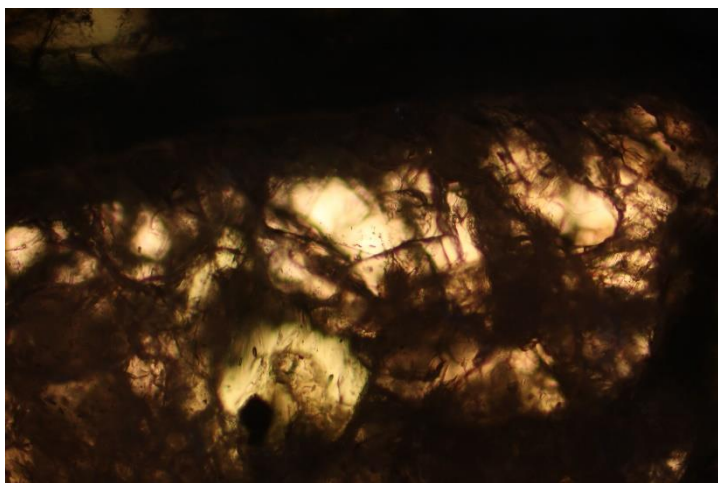
Observations microscopiques



Zonage de qualité, le grenat est moins fracturé en bordures où on observe alors mieux la couleur rose. Inclusions vertes (omphacite) et opaques. Photo x4



Inclusions dans le grenat. Photo x10



Zoom sur la bordure du grenat, en dehors des fractures la couleur est rose claire et la transparence est bonne. Photo x10

Conclusion sur le caractère non-gemme : Les grenats sont très nombreux dans cette roche. Mais leur qualité est très mauvaise. Ni la couleur, ni la transparence ne sont bonnes pour le marché. A cela s'ajoute la présence d'abondantes fractures, et la présence de minéraux d'oxydation dans ces défauts.

Annexe 5 : Echantillon LP05



Origine géographique : La baie des Trépassés, Finistère, France

Origine géologique : Métamorphisme de contact (Leucogranite).

Cause apparente de non-qualité gemme : Trop petit.

Préparation : lame épaisse de 0,6 mm

Densité : Non-analysée

Couleur : Rose

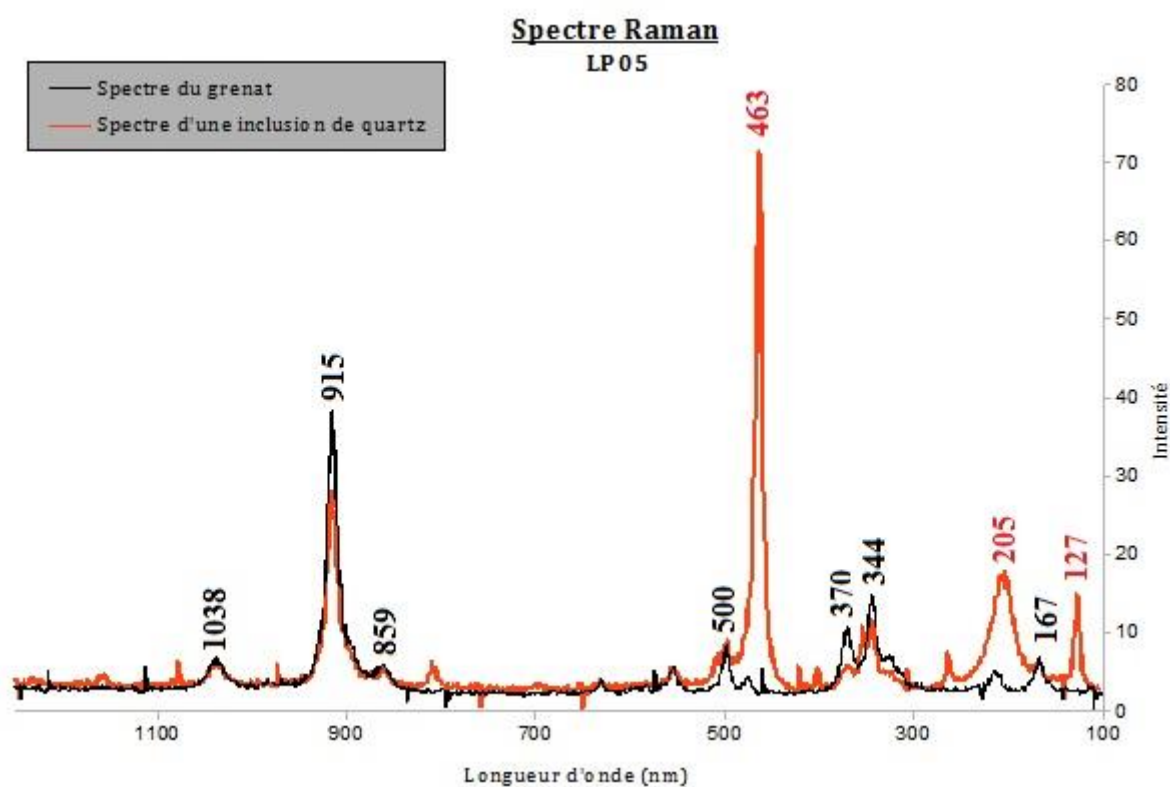
Variété de grenat : Almandin –Pyrope (présumé)

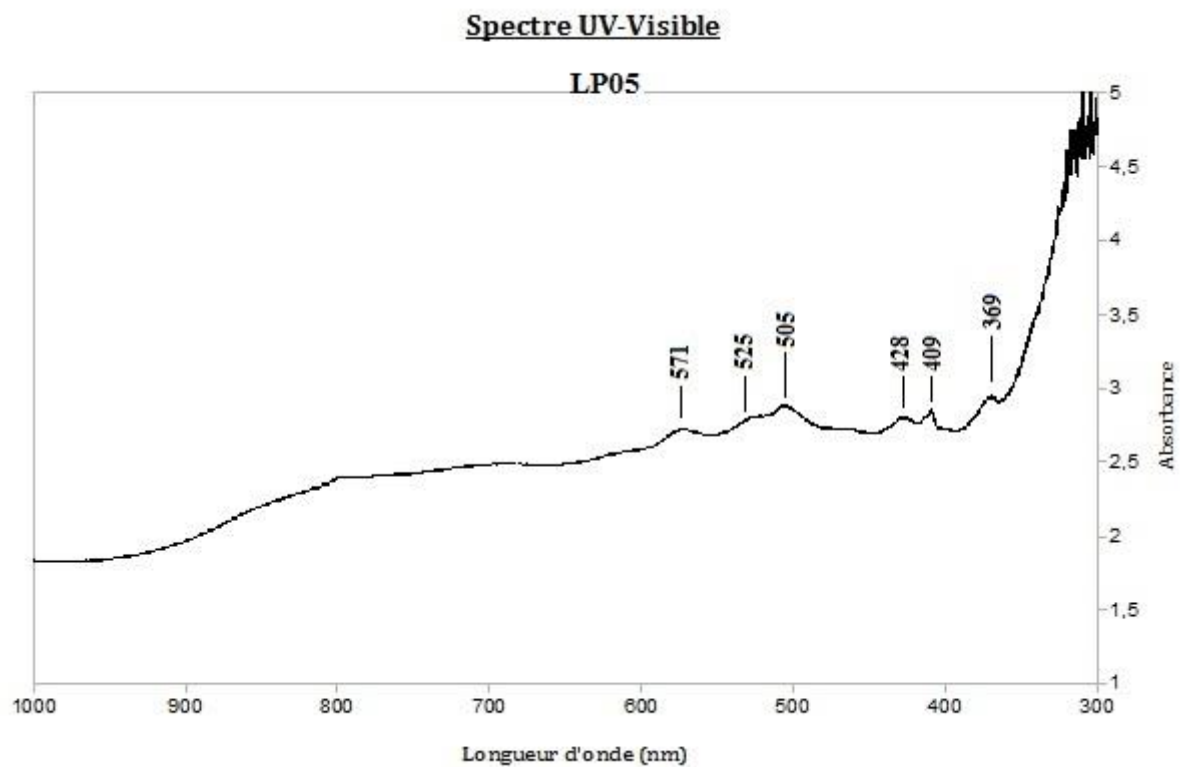
Composition exacte : Non-analysée

Inclusions : Quartz

Résultats

Raman





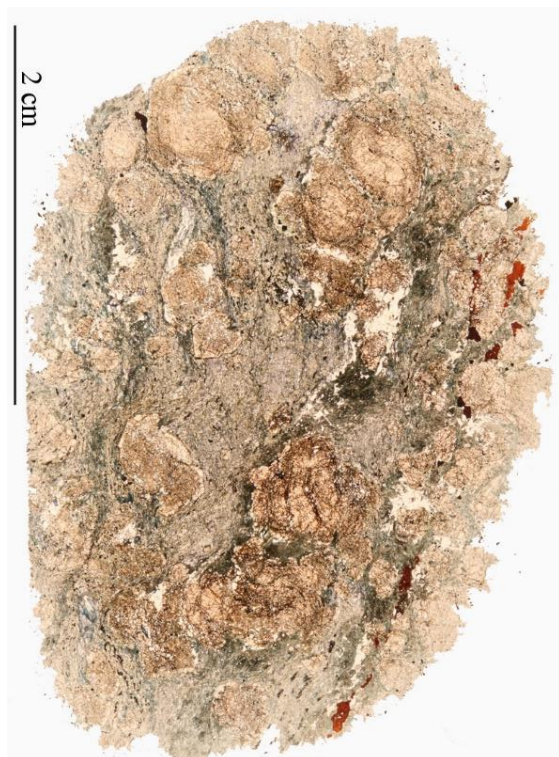
Observations microscopiques



Les inclusions sont bien visibles, et nombreuses pour un grenat si petit. Mais elles sont transparentes et incolores.

Conclusion sur le caractère non-gemme : Ces grenats présentent une qualité uniquement affectée par la présence d'inclusions. Malgré ces inclusions, leur couleur rose et leur bonne transparence leur donnent une qualité presque gemme. Le facteur limitant pour l'utilisation de ces grenats en joaillerie est leur dimension, des pierres de moins de 1mm ne sont pas exploitables.

Annexe 6 : Echantillon LP06



Origine géographique : Ile de Groix, Morbihan, France

Origine géologique : Métamorphisme régional (Schiste Bleu/Glaucophanite).

Cause apparente de non-qualité gemme : Mauvaise transparence et couleur

Préparation : lame mince de 40 μm

Densité : Non-analysée

Couleur : Brun

Variété de grenat : Pyrope-Almandin (grenat de schiste bleu)

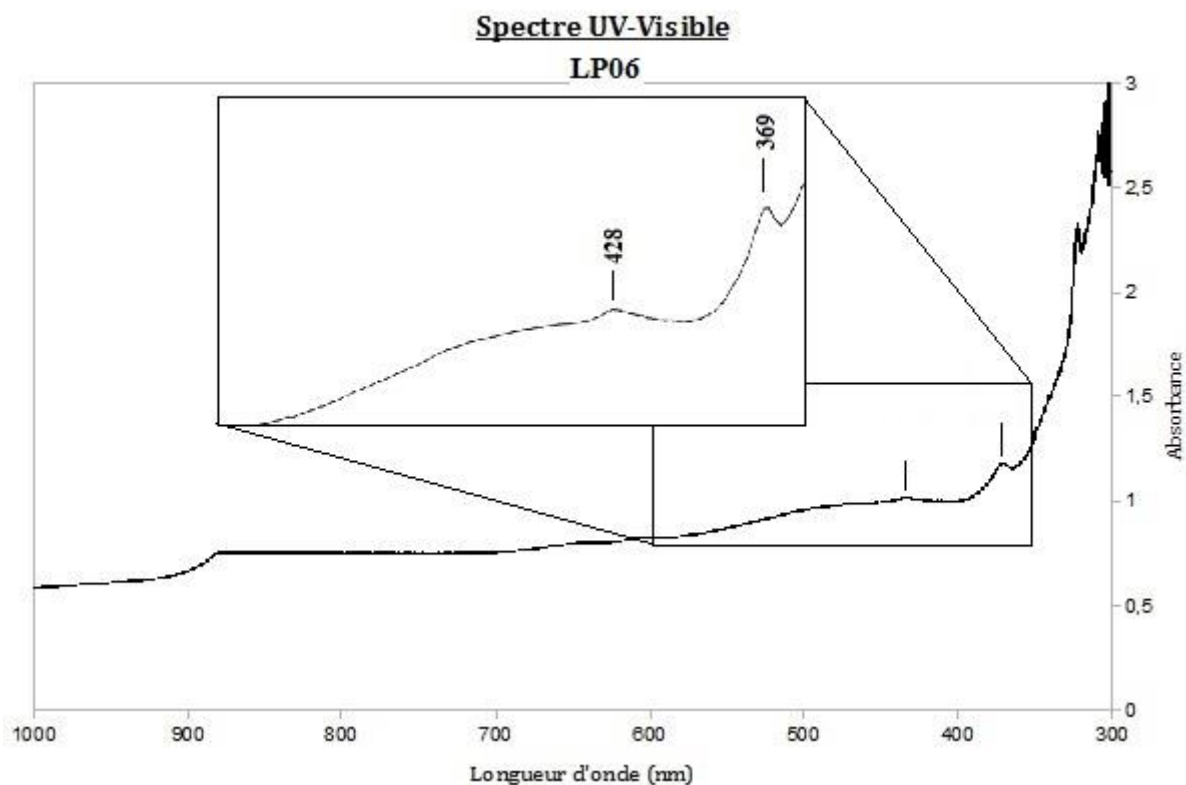
Composition exacte : non-analysé

Inclusions : Quartz, glaucophane, titanite, chlorite, oxydes, épidote

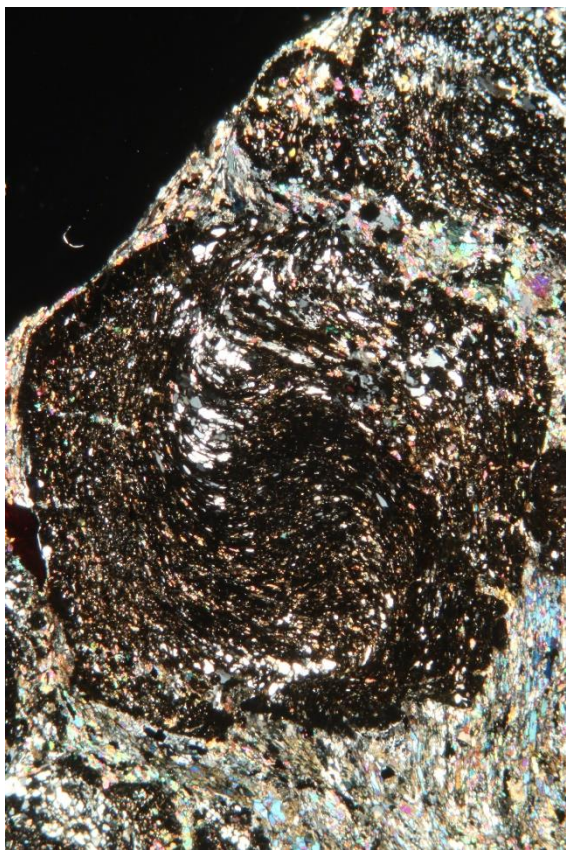
Résultats

Raman : Impossible sur une lame mince (Colle époxy)

UV-Visible :



Observations microscopiques



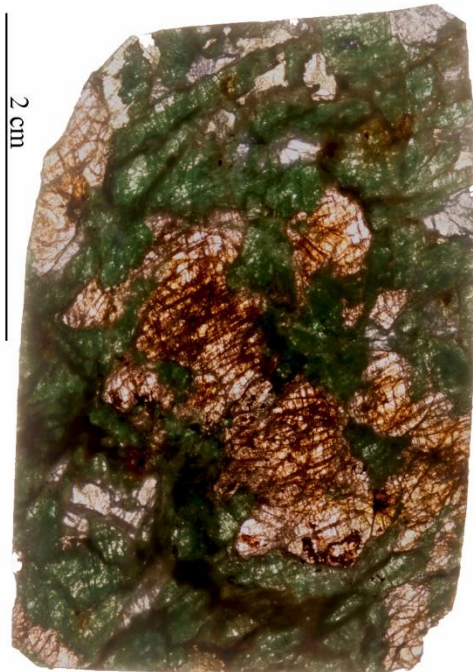
*Hélicitisme dans un grenat de Groix qui atteste du caractère syncinématique de la formation de ces grenats.
Photo en lumière polarisée et analysée, x 7*



Au centre : Importante densité d'inclusions. A droite : Zonation de qualité d'un grenat de Groix. En haut: déstabilisation du grenat en chlorite. Photo x20

Conclusion sur le caractère non-gemme : Les grenats de l'île de Groix sont extrêmement nombreux et de tailles variables. Mais l'énorme densité d'inclusions fait qu'ils n'ont ni une couleur attractive, ni une transparence suffisante pour avoir une qualité gemme.

Annexe 7 : Echantillon LP07



Origine géographique : île de Groix, Morbihan, France

Origine géologique : Métamorphisme régional (Schiste Bleu).

Cause apparente de non-qualité gemme : Mauvaise transparence

Préparation : lame mince de 40 μm

Densité : Non-analysée

Couleur : Brun

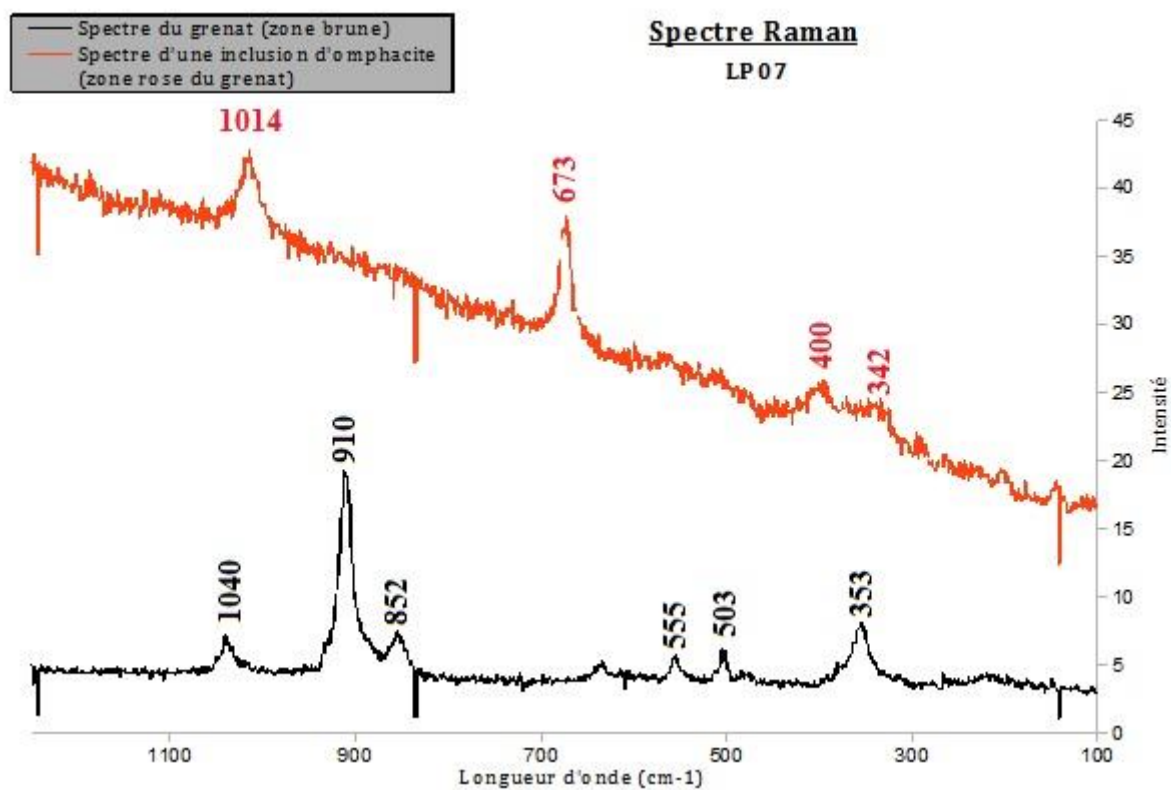
Variété de grenat : Pyrope-Almandin

Composition exacte : Pyrope 42%, Almandin 34%, grossulaire 24%

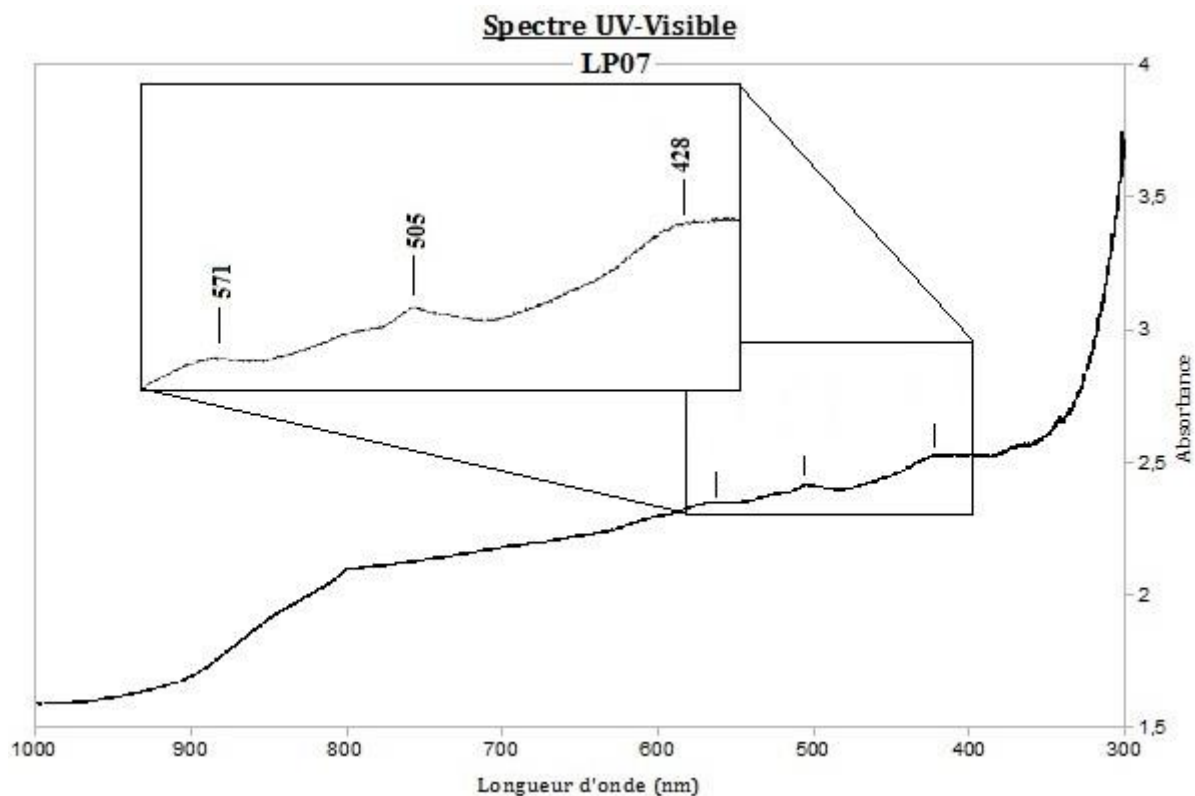
Inclusions : Quartz, glaucophane, sphène, chlorite, oxydes, épidote

Résultats

Raman



UV-Visible

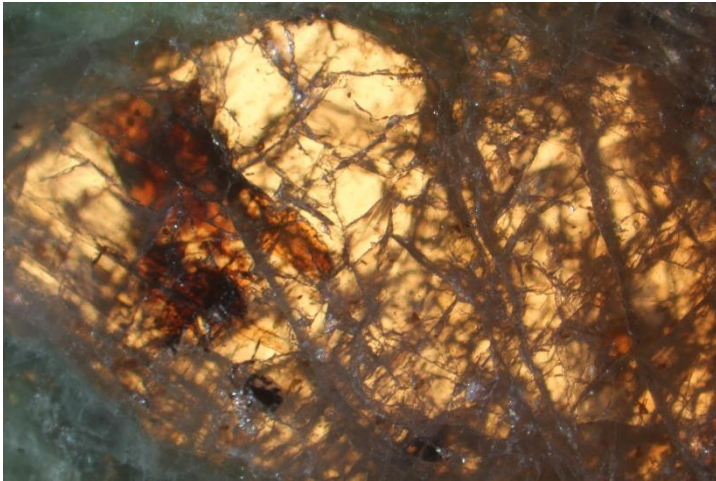


MEB

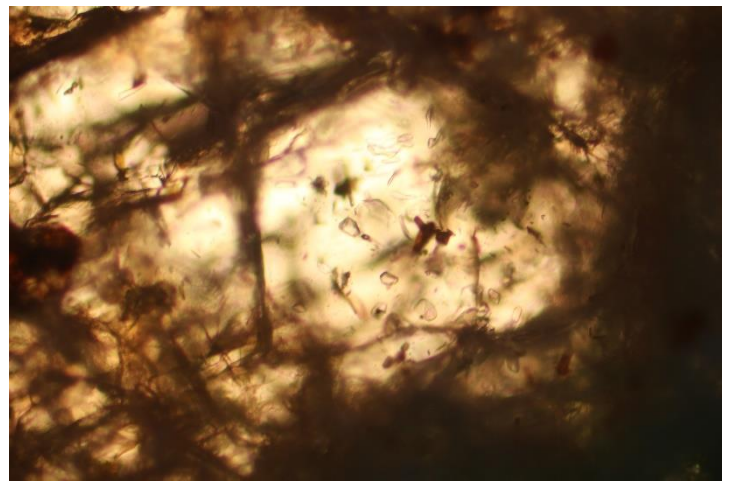
	% Atomique	% Poids	Formule structurale		% Poids Oxydes	
O	55,14	36,14	Total Fe + Mg + Mn + Ca	16,9	SiO ₂	42,38
Mg	7,13	7,1	% Almandin: Fe ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	33,8	Al ₂ O ₃	22,30
Al	10,68	11,8	% Pyrope: Mg ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	42,1	FeO	16,84
Fe	5,72	13,09	% Spessartite: Mn ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	0,0	MgO	11,77
Si	17,22	19,81	% Grossulaire: Ca ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	24,1	MnO	0,00
Ca	4,08	4,08			CaO	5,71
Mn	0	0			Cr ₂ O ₃	0,07
Cr	0,03	0,05			Total Oxydes	99,07

	LP07_ZoneBrune	LP07_ZoneRose
Total Fe + Mg + Mn + Ca	16,9	21,8
% Almandin: Fe ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	33,8	39,8
% Pyrope: Mg ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	42,1	46,1
% Spessartite: Mn ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	0,0	0,0
% Grossulaire: Ca ₃ Al ₂ [SiO ₄] ₃	24,1	14,1

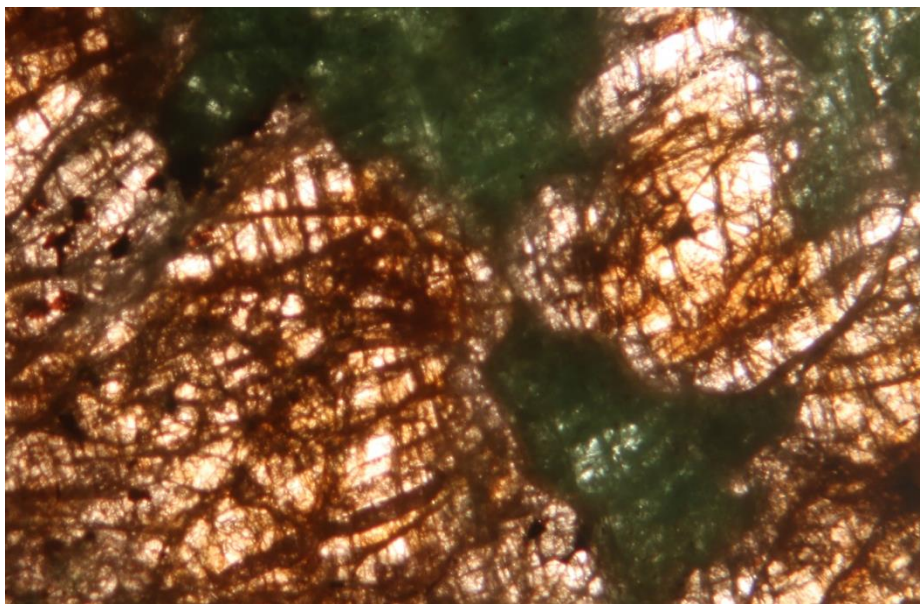
Observations microscopiques



Hormis les fractures et les plages d'oxydation, la transparence du grenat est bonne. Sa couleur est rose-brun. Photo x4



Les rares inclusions sont petites, transparentes et incolores. Photo x10



Zonage dans les grenats : une fine bordure rose peu oxydé est visible tout autour de cœur brun très altérés.

Conclusion sur le caractère non -gemme : Ces grenats sont très fracturés et les minéraux d'oxydation dans ces défauts ternissent leurs couleurs rose-rouge. Cependant leur transparence n'est pas mauvaise. Il est également à noter qu'ils ne sont pas du tout automorphes.