
Les kersantites (fraidonites) des Cévennes : connaissances actuelles, mode de gisement, minéralogie, pétrographie et inventaire des inclusions fluides



Eglise de Valfrancesque, Sainte-Croix-Vallée-Française, construite entièrement en kersantite

Karim Samra

Licence Sciences de la Terre, 2016-17

Les kersantites (fraidonites) des Cévennes : connaissances actuelles, mode de gisement, minéralogie, pétrographie et inventaire des inclusions fluides

Résumé

Les kersantites des Cévennes sont des roches filoniennes et font partie des lamprophyres calco-alkalins. La grande abondance des paillettes de biotite responsable de la teinte très sombre de la roche, indique la bonne conservation du mica noir. Les minéraux les plus abondants sont le phlogopite, le feldspath potassique, et des carbonates.

Abstract

The kersantites of the Cévennes region are vein-like rocks, and belong to the the calco-alkaline lamprophyre group. The great abundance of biotite is responsible of the very dark colour of the rock, which indicates a good preservation of black mica. The major mineralogical composition is represented by phlogopite, potassic feldspar and carbonate.

Remerciements

Le présent travail n'aurait pas pu voir la lumière sans l'aimable collaboration d'un certain nombre de personnes, qui, avec leur soutien et leur patience, ont permis d'élaborer ce modeste travail dans les meilleures conditions possibles.

Mes remerciements les plus sincères sont destinés à Monsieur Michel Dubois, mon professeur encadrant à la Faculté des Sciences et Technologies Lille 1, pour sa disponibilité et pour son encadrement et sa patience le long du stage, pour ses discussions pertinentes, respectueuses et constructives qui ont fait enrichir mon sujet, ainsi que ses pertinentes corrections le long de la période de stage. Veuillez, Monsieur, trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier Florence Arnaud qui m'a fait bénéficier de ses idées sur les schistes des Cévennes et la géologie régionale. Elle m'a communiqué à plusieurs reprises des documents qui m'ont été utiles.

Mes remerciements sont destinés également à tout le corps professoral de la Faculté des Sciences et Technologies Lille 1, Merci de m'avoir fait profiter de vos connaissances, pour votre aide scientifique et morale le long de notre parcours universitaire.

Table des matières

Résumé / Abstract	i
Remerciements	i
Table des matières	iii
Liste des figures et tableaux	iv
Les kersantites (fraidonites) des Cévennes : connaissances actuelles, mode de gisement, minéralogie, pétrographie et inventaire des inclusions fluides	Erreur ! Signet non défini.
1 Introduction	1
2 Classification et nomenclature des lamprophyres	1
2.1 Principaux types de lamprophyres	2
2.1.1 Les kimberlites	2
2.1.2 Les lamproïtes	3
2.1.3 Lamprophyres ultramafiques « melnoïtes »	3
2.1.4 Les lamprophyres calco-alcalins	4
3 Les kersantites (fraidonites) des Cévennes	6
3.1 Situation géographique	6
3.2 Contexte géologique	6
3.2.1 L'encaissant	6
3.2.2 Le magmatisme acide	9
3.3 Les kersantites (fraidonites)	9
3.3.1 Sites visités	10
3.3.2 Pétrographie	10
4 Etude préliminaire des inclusions fluides	16
4.1 Nature de l'échantillon	16
4.2 Etude des inclusions fluides	17
4.2.1 Les inclusions fluides primaires	17
4.2.2 Les inclusions fluides secondaires	17
4.3 La spectroscopie Raman	18
4.4 Résultats	18
5 Interprétation	19
5.1 Données de terrain	19
5.2 Minéralogie et pétrographie	19
6 Conclusions	20
6.1 Apport personnel	20
6.2 Résultats	21
6.3 Perspectives	21
7 Bibliographie	22
ANNEXES	25

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : classification des roches lamprophyriques selon Rock (1990).....	2
Figure 2 : diagramme modal QAPF (Quartz, Feldspath alcalin + albite, Plagioclases (An>5%), feldspathoïdes) de classification des lamprophyres	5
Figure 3 : situation géographique des filons échantillonnés (Geoportail).....	6
Figure 4 : extrait de la carte géologique de la région d'étude (carte géologique au 1/80000 ^{ème} , feuille d'Alès ; Ministère de l'Industrie, 1967)	7
Figure 5 : aspects des schistes des Cévennes ; a : exsudats de quartz au sein de s1 ; b : microplissement de schistosité	8
Figure 6 : rosace des principaux plans de schistosité.....	8
Figure 7 : granite de Saint-Guiral.....	9
Figure 8 : quelques photographies présentant la disposition des filons de kersantite sur le terrain. a : carrière de Malaussette (point 1) ; b : filon de Vébron (point 4) ; c : filon de Saint-Martin-de-Lansuscle (point 3) ; d : faille du filon de Saint-Martin-de-Lansuscle (point 3)	11
Figure 9 : contact entre le filon de kersantite et l'encaissant schisteux (point 4). a : localisation (cadre rouge) du contact pris en détail sur la photo b.....	11
Figure 10 : deux aspects de la roche en cassure fraîche.....	12
Figure 11 : quelques détails des éléments particuliers des kersantites. a : structure vacuolaire (carrière de Malaussette, point 1) ; b : xénolite quartzeux (point 1).....	12
Figure 12 : un ensemble de biotite avec zonation. a : LPNA ; b : LPA.....	13
Figure 13 : assemblage à biotite+quartz+carbonate. a : LPNA ; b : LPA.....	13
Figure 14 : myrmékisation	14
Figure 15 : assemblage biotite+apatite. a : LPNA ; b : LPA.....	16
Figure 16 : xénolite quartzeux (carrière de Malaussette, point 1).....	16
Figure 17 : inclusions fluide primaire (a) biphasée.....	17
Figure 18 : plans d'inclusions fluides secondaire (b) et pseudosecondaire(c).....	18
Figure 19 : inclusion fluide affectée par un début de processus d'étranglement.	18
Figure 20 : schéma résumant l'intervention des fluides hydrothermaux, avant, pendant ou après la cristallisation de la kersantite.....	20
 Tableau 1 : récapitulatif de la localisation des différents points d'oservation et d'échantillonnage	 10

Les kersantites (fraidonites) des Cévennes : connaissances actuelles, mode de gisement, minéralogie, pétrographie et inventaire des inclusions fluides

1 Introduction

Les lamprophyres sont des roches filoniennes composées essentiellement de biotite, amphibole, clinopyroxène et olivine, et occasionnellement présence de mélilite $(Ca,Na)_2(Mg,Fe,Al)[(Al,Si)SiO_7]$, avec une mésostase composée essentiellement des feldspaths et/ou feldspathoïdes. Les minéraux accessoires sont l'apatite, des carbonates et du quartz en cristaux isolés, les teneurs en H_2O , CO_2 , S, P_2O_5 , aussi bien que Ba (Velde, 1968) sont élevées.

Leur origine mantellique est actuellement admise. Néanmoins, le magma dérivé peut avoir différents types d'évolution et de changement au cours de sa mise en place : immiscibilité précoce du liquide (Clarke *et al.*, 1983 ; Esperanca et Holloway, 1987 ; Turpin *et al.*, 1988), contamination par érosion thermique (Hupperts et Sparks, 1985 ; Galan *et al.*, 1997), contamination crustale (Ayrton, 1991).

La présence de filons ou enclaves de lamprophyres est notable dans le sud-est du Massif Central français. Dans la partie méridionale du Dôme du Velay, ces lamprophyres sont cartographiés sous le terme de vagnérites (Dubois, 1992). Au sud de cette région, dans les Cévennes schisteuses, un ensemble de filons de lamprophyres, connus sous le nom de fraidonites, est reconnu (Arnaud, 1997).

L'objectif du travail qui m'a été confié a été de rechercher dans la littérature les éléments de classification des lamprophyres, puis de recenser les affleurements de kersantite mentionnés dans la bibliographie. Une mission de terrain a été organisée entre le 15 et le 19 mai afin de visiter les principaux affleurements. Enfin, l'étude d'un échantillon a été réalisée afin de faire la pétrographie de ce type de roches, complétée par une analyse géochimique ponctuelle des minéraux au Raman et au MEB. D'autres analyses ont été initiées et font l'objet de perspectives.

2 Classification et nomenclature des lamprophyres

La nomenclature et la définition propres de ces roches atypiques reste quand même compliquée, à cause d'une nomenclature ancienne qui est basée sur l'origine locale de ces roches.

Les lamprophyres ont été divisés en cinq groupes (Rock, 1990) (Figure 1) :

- lamprophyres calco-alcalins
- lamprophyres alcalins
- lamprophyres ultramafiques
- kimberlites (I et II)
- lamproïtes

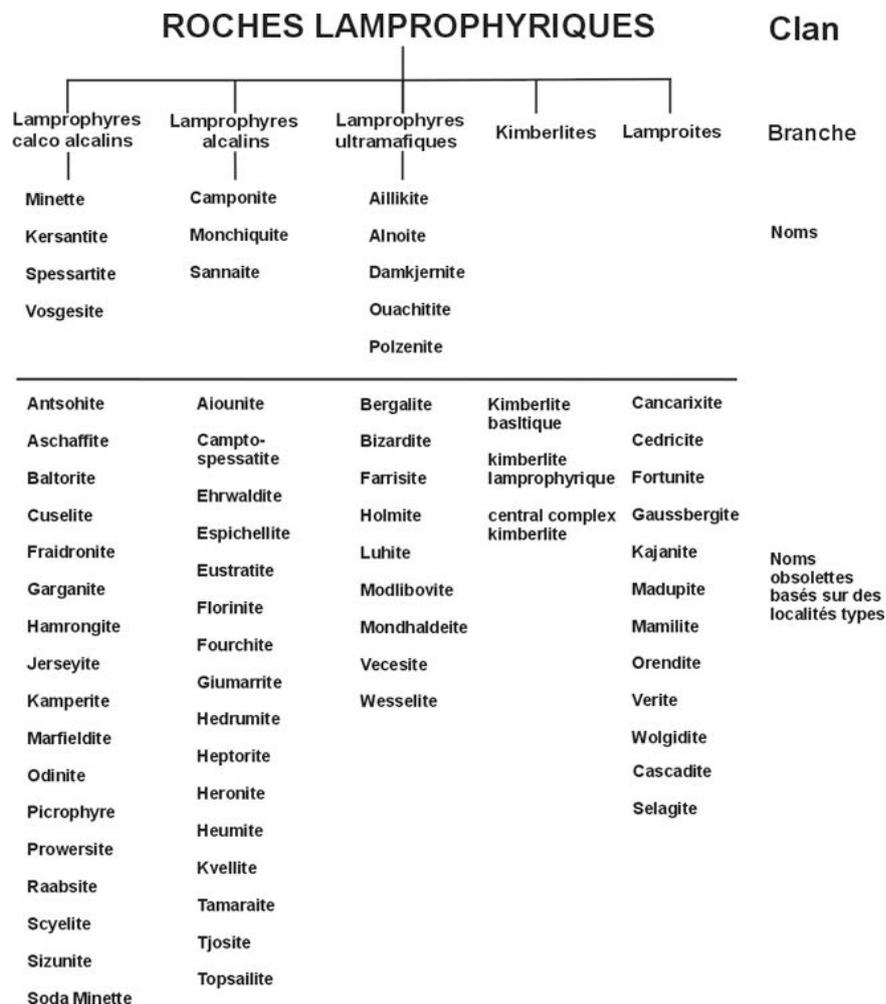


Figure 1 : classification des roches lamprophyriques selon Rock (1990)

2.1 Principaux types de lamprophyres

2.1.1 Les kimberlites

Les kimberlites sont divisées en deux groupes (Smith *et al.*, 1985). Les kimberlites du groupe I correspondent aux roches archétypes de la région de Kimberley, en Afrique du Sud, renommées kimberlites basaltiques par Dawson (1992). Le groupe II (ou orangéites) est celui des kimberlites lamprophyriques ou micacées.

Les kimberlites de premier groupe sont des roches ignées ultrabasiques, potassiques, riches en espèces volatiles (essentiellement CO₂), présentant une texture inéqui-granulaire caractéristique par la présence de macrocristaux d'olivine et pyroxène (cristaux de 0,5 mm à 1 cm) et dans certains cas de mégacristaux (grands cristaux de 1-20 cm). Les roches sont composées des minéraux xenomorphes, tels que : olivine, ilménite magnésienne, grenat pyrope, diopside, phlogopite, orthopyroxène et la chromite pauvre en titane.

La mésostase contient une seconde génération d'olivine automorphe à sub-automorphe associée à une phase ou plusieurs phases minérales primaires telles que la serpentine, la phlogopite, l'apatite, les carbonates, la monticellite (Ca(Mg,Fe)SiO₄), la pérovskite (CaTiO₃), et du spinelle.

Les kimberlites du groupe II (orangéites) sont des roches ultra-potassiques hyperalcalines riches en espèces volatiles essentiellement H₂O, caractérisées par l'existence de phlogopite en macrocristaux, liés à des micas matriciels, au sein desquels varient en composition de la phlogopite ($\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F},\text{Cl})_2$) à la tétraferriphlogopite ($\text{KMg}_3\text{Fe}^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). La mésostase comprend le diopside communément zoné, l'aegyrine titanifère, le spinelle dont la composition oscille entre la chromite magnésienne et la titano-magnétite, la pérovskite riche en terres rares et Sr, l'apatite riche en Sr, les phosphates riches en terres rares, les titanates de baryum appartenant au groupe des hollandites, le rutile à Nb et l'ilménite magnésienne. Dans la phase secondaire de la mésostase, on trouve la calcite, la dolomite, l'ancylite ($\text{Sr}(\text{Ce},\text{La})(\text{CO}_3)_2(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O}$) et d'autres carbonates de terres rares, la withérite (BaCO_3), la norsethite ($\text{BaMg}(\text{CO}_3)_2$), et la serpentine, ainsi que parfois le quartz, mais rarement.

Généralement, les orangéites se distinguent des kimberlites par l'absence de monticellite, d'ulvöspinelle (Fe_2TiO_4) magnésien et de micas riches en baryum. Les kimberlites de même que les orangéites sont dépourvues de feldspath alcalin, de plagioclase, de kalsilite (KAlSiO_4) ou de néphéline.

2.1.2 Les lamproïtes

Selon la forme, les lamproïtes se présentent sous la forme de dykes ou des minuscules extrusions. Minéralogiquement, ils sont constitués en proportions entre 5 et 90 % des phases primaires suivantes (Marchand, 2005) :

- phénocristaux de phlogopite titanifère pauvre en alumine
- tétraferriphlogopite titanifère matricielle pœcilitique
- richtérite potassique titanifère
- olivine, variété forstérite
- diopside pauvre en aluminium et en sodium
- leucite non stœchiométrique riche en fer déficitaire en sodium et aluminium
- sanidine riche en fer

Dans la paragénèse secondaire, on observe :

- pridérite: $(\text{K},\text{Ba}),(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+}) \text{O}_{16}$
- wadéite : $\text{K}_4\text{Zr}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$
- apatite : $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$.
- pérovskite : CaTiO_3
- magnésio-chromite
- magnésio-chromite titanifère
- titano-magnétite magnésienne

2.1.3 Lamprophyres ultramafiques « melnoïtes »

Il s'agit de roches composées de macrocristaux d'olivine fortement serpentinisée, des diopsides zonés et altérés, de phlogopites et de chromites rouges xénomorphes, bordées de spinelle. Les micas constituent la phase minérale prépondérante, parfois altérée en chlorite sur leur bordure, dont ils intègrent des inclusions de minéraux opaques. Des baguettes d'apatite

automorphes pouvant atteindre une grande dimension incluent des spinelles, des pérovskites et des phlogopites.

Une deuxième génération occupe la matrice composée de phlogopite, par des spinelles abondants, liés à des pérovskites communes et de l'apatite. Tous ces minéraux reposent dans une mésostase à carbonate et serpentine (Marchand, 2005).

2.1.4 *Les lamprophyres calco-alcalins*

2.1.4.1 Les vaugnérites

Elles désignent des roches grenues micacées (biotites) des terrains granitiques et cristallophylliens. Cette définition a été précisée par Sabatier (1984) qui définit les vaugnérites comme des roches d'aspect dioritique riches en micas noirs. Elles se présentent comme des petits corps plutoniques enclavés dans les granites et les terrains métamorphiques.

Minéralogiquement ces roches sont à biotite et hornblende-actinote magnésienne auxquelles s'ajoutent souvent le quartz, le feldspath alcalin et parfois du clinopyroxène.

Du point de vue chimique, les vaugnérites montrent beaucoup d'affinités avec les laves basiques potassiques (shoshonites, certains lamprophyres, lamproïtes). Ce sont des monzodiorites magnésiennes, riches en potassium et caractérisées par la relation $MgO > CaO$.

2.1.4.2 Les spessartites

Ce sont des roches ignées calco-alcalines porphyriques issues d'un magma dioritique (Arnaud, 1997). Minéralogiquement, elles sont dominées par la hornblende (30%), le diopside (10%) et le plagioclase (50%) avec du feldspath alcalin mineur, du quartz, de l'apatite, du chlorite et de la titanite.

2.1.4.3 Les vogésites (ou vogsésites)

Il s'agit d'une roche monzonitique à hornblende (Sørensen, 1974). Avec des phénocristaux d'hornblende brune, augite, olivine serpentinisé, apatite. La mésostase est composée d'hornblende brune, orthose, labrador, apatite, hématite, magnétite, quartz (Jung et Brousse, 1959). On y rencontre parfois la chlorite et la calcite. Les vogésites sont des roches rares, faites d'olivine altérée (chlorite) et de hornblende légèrement brunâtre, pauvre en titane, dans une pâte constituée de feldspath potassique et de hornblende brun verdâtre. L'assemblage feldspath potassique-hornblende a vraisemblablement un domaine de stabilité extrêmement restreint, qui fait qu'on ne le trouve que rarement réalisé dans la nature.

2.1.4.4 Les minettes

Elles se rattachent aux trachytes, pouvant soit être alcalines, soit calco-alcalines (Lacroix, 1933), constituées de phénocristaux de biotite dans un fond de feldspath alcalin et de biotite. En comparaison avec les lamprophyres du même groupe, notons que la vogésite renferme les mêmes minéraux, mais l'amphibole y remplace la biotite.

2.1.4.5 Les kersantites

Il s'agit de roches microlitiques, à biotite, de la famille des syénites (Streckeisen, 1979) (Figure 2), calco-alcalines (Lacroix, 1933), mésocrates, contenant peu de quartz, holoplagioclasiq, à biotite. Les phénocristaux sont la biotite, l'augite, la calcite et l'apatite. Pour la mésostase, on trouve l'oligoclase, quartz, biotite, et les minéraux opaques (Jung et

Brousse, 1959). La kersantite et la spessartite sont des roches proches de la minette et de la vogésite, mais c'est un plagioclase qui y remplace le feldspath potassique.

Selon Arnaud (1997), les kersantites dans les Cévennes méridionales ont une forme des filons larges, mais parfois réduits avec une structure grenue au centre et microlitique, le mica noir y prédomine de beaucoup et est accompagné par un plagioclase qui serait l'oligoclase dans la plupart des cas. En outre, il arrive qu'il y ait un petit peu d'amphibole et bien plus exceptionnellement du pyroxène, l'apatite est en petite quantité, et le quartz est très fréquent, mais pas toujours (Figure 2).

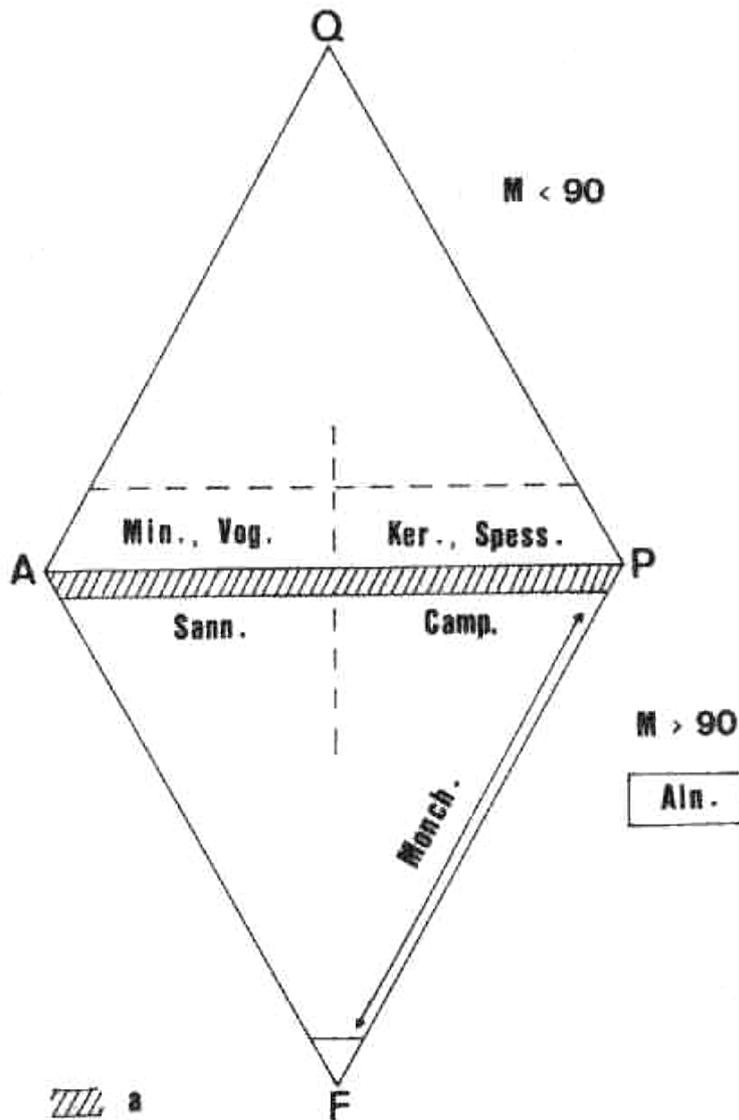


Figure 2 : diagramme modal QAPF (Quartz, Feldspath alcalin + albite, Plagioclases (An>5%), feldspathoïdes) de classification des lamprophyres

a (domaine hachuré) : domaine de superposition minette/vogésite avec la sannaites, et kersantite/spessartite avec la camptonite (Streckeisen, 1979)

2.1.4.6 Les fraidonites (appelées aussi fraidronites)

Il s'agit d'un nom local donné en Normandie des variétés de lamprophyres à orthose-biotite (Centre de Géologie *Terrae Genesis*, 2017). C'est une variété de kersantite, elle est constituée de biotite, chlorite, plagioclase, un peu de quartz, magnétite, pyrite, et la calcite (Lapadu-Hargues, 1945).

3 Les kersantites (fraidonites) des Cévennes

3.1 Situation géographique

Ces roches appelées localement fraidronites¹ ou porphyrites andésitiques micacées, se localisent au Nord-Ouest et à l'Ouest de Saint-Germain-de-Calberte. Cette commune est située dans le département de la Lozère, en région Occitanie (Figure 3).



Figure 3 : situation géographique des filons échantillonnés (Geoportail)

3.2 Contexte géologique

La région d'étude se situe dans la région des Cévennes, au sud-est du Massif Central français, dans la branche sud de la chaîne varisque. La région des Cévennes constitue un segment de la chaîne varisque d'Europe occidentale, elle est formée de séries schisteuses d'âge paléozoïque et située en position autochtone relatif par rapport aux chevauchements de la chaîne varisque (Figure 4) (Arnaud, 1997).

Par rapport aux déformations associées à l'extension post-orogénique, cette région se localise entre deux dômes migmatitiques : le Velay et la Montagne Noire.

3.2.1 L'encaissant

Les kersantites sont encaissées dans des schistes dits des Cévennes, dont le degré de schistosité varie d'un secteur à l'autre. Cette variation est en fonction de plusieurs facteurs tels que l'intensité de la contrainte, la composition minéralogique, la granulométrie de la roche, le niveau structural et la présence ou non de fluides.

¹ décrites initialement sous le nom de « fraidronites » (Dumas, 1845) (mot masculin)



- La Garrigue
- Causses
- Cévennes calcaires
- Filon de Kersantite

- sous les morts -terrain
- Schistes
 - Gneiss
 - Granite

Extrait de la carte géologique
d'Alès au 1/80000^{ème}

Figure 4 : extrait de la carte géologique de la région d'étude (carte géologique au 1/80000^{ème}, feuille d'Alès ; Ministère de l'Industrie, 1967)

Cette série schisteuse est affectée par une schistosité S1 dont les plans sont continus, serrés et pénétratifs (exsudats de quartz) (Figure 5a), ainsi que les microlithons de petite taille, et la schistogénèse est accompagnée de phénomène de recristallisation.

On a remarqué aussi la schistosité de crénulation indiquée par des microplissements de la schistosité (Figure 5b).

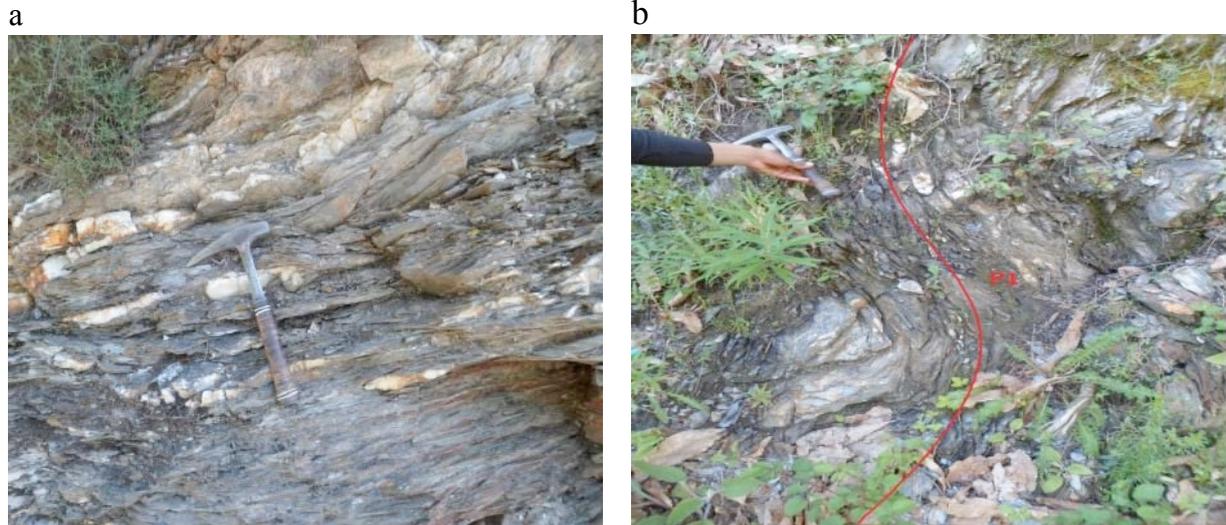


Figure 5 : aspects des schistes des Cévennes ; a : exsudats de quartz au sein de s1 ; b : microplissement de schistosité

La représentation de rosaces directionnelles des différentes mesures de schistosité réalisées près différents filons observés permet de distinguer deux directions principales de schistosité (Figure 6).

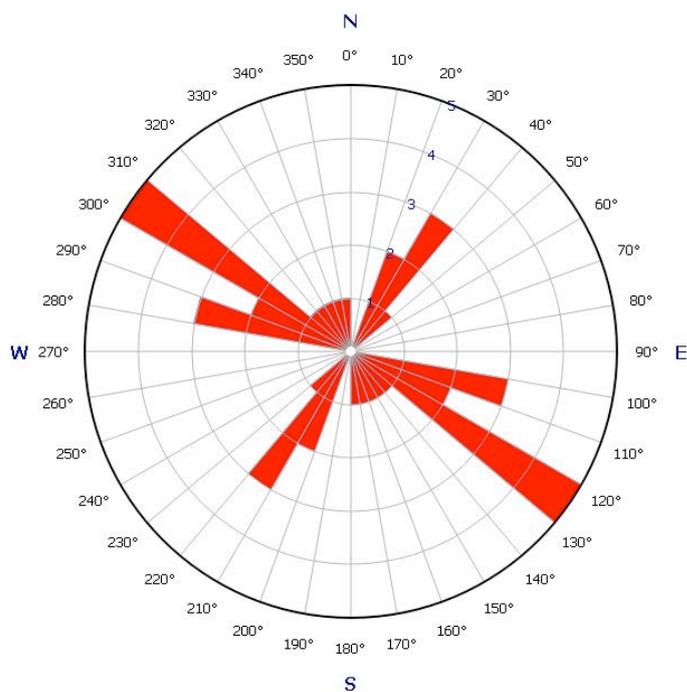


Figure 6 : rosace des principaux plans de schistosité

Une schistosité S1 dont la direction varie de N20 à N40 avec un pendage de 18° le NW, et une schistosité S2 de direction qui varie entre N100 à N 175 avec un pendage de 20° NE, dont la direction des contraintes sont respectivement N-S ET NNE-SSW.

Selon une discussion avec Florence Arnaud à propos du gradient de déformation, les conditions paléo-température et paléo-pression sont les mêmes partout dans le secteur ; donc en allant du haut vers le bas, on aura un passage d'une schistosité de fracturation vers la schistosité de foliation en passant par la schistosité de flux.

3.2.2 *Le magmatisme acide*

Les granites du Mont-Lozère, de l'Aigoual et du Saint-Guiral-Liron proviennent d'un magma acide qui est remonté à travers les schistes

Le granite, dans les trois massifs, présente partout une composition identique : il est à gros grains, composé d'un mélange intime de feldspath orthose blanc jaunâtre lamellaire et grenu, de quartz gris amorphe et de mica brun. Il contient de gros cristaux de feldspath orthose, disséminés dans la masse, qui lui donnent un aspect porphyroïde (Figure 7).



Figure 7 : granite de Saint-Guiral

3.3 Les kersantites (fraidonites)

Selon la carte géologique au 1/80000^{ème} (feuille d'Alès) (Figure 4), les kersantites forment des filons présentant une direction Nord-Sud, et se relaient en formant des alignements importants. Une attention a été portée sur l'alignement de la carrière du lieu-dit Malaussette (à l'ouest de Saint-Germain-de-Calberte) vers le col de Jalcreste, puis sur Genolhac et vers le Bougès. L'affleurement du Col des Laupies, visité lors de notre exploration de terrain mais non répertorié sur la carte géologique, se situe selon cet alignement.

3.3.1 Sites visités

Les affleurements pour une visite et un échantillonnage ont été choisis en fonction des connaissances de Michel Dubois acquises lors de précédentes missions de terrain (2011 et 2015). La liste a été complétée par des échanges avec Florence Arnaud, qui a réalisé sa thèse sur le terrain (Arnaud, 1997). Florence Arnaud nous a accompagnés une demi-journée sur le terrain et a recensé pour nous quelques sites intéressants.

Le premier point d'observation (point 1) durant la mission de terrain est un filon situé au bord de la route D13. Il s'agit d'une ancienne carrière de kersantite qui s'appelle la carrière de Malaussette. C'est de cet affleurement que proviennent les échantillons étudiés en laboratoire lors de cette étude ; ils avaient été prélevés par Michel Dubois en août 2015. L'étude pétrographique et géochimique réalisée est basée sur cet affleurement. Les points 3 et 4 sont situés aussi au bord de la route (Figure 3) ; par contre l'accès au filon 2 se fait par une piste non carrossable d'environ 1 km.

La localisation précise des sites visités est donnée dans le Tableau 1.

	Localisation	Route	Coordonnées		altitude	Distance à Saint-Germain-de-Calberte (km)
			x	y		
Point 1	Malaussette	D13	44,220683	3,767526	594,88	7,91
Point 2	Col des Laupies	piste	44,257701	3,778684	854,16	12,26
Point 3	Saint-Martin de Lansuscle	D28	44,2071	3,761388	645,08	15,00
Point 4	Vébron	D907	44,275648	3,588484	612,47	32,90

Tableau 1 : récapitulatif de la localisation des différents points d'observation et d'échantillonnage

3.3.2 Pétrographie

Notre travail a consisté en une étude de terrain des différents filons de kersantite dans la région des Cévennes, et une description macroscopique et microscopique des roches.

3.3.2.1 Caractères macroscopiques

Les 4 affleurements de kersantite observés au cours de mon stage forment des filons sombres. Ils sont facilement reconnaissables sur le terrain par la forme en boule de l'altération ; l'abondance de la biotite est un élément marquant. Ils présentent parfois une forme en biseau (point 4)

Selon la carte géologique, ces filons sont verticaux à sub-verticaux de direction N-S à N20. Lors de nos observations, dans le cas des points 1, 2, 4, la kersantite semble se présenter plutôt sous forme de sill sécant avec une faible angle sur la schistosité sub-horizontale (pendage d'environ 10-15°) (Figure 8a et b). Mais le filon peut être parfois complètement sécant sur la schistosité (Figure 8c). On observe parfois des failles affectant le filon (Figure 8d).

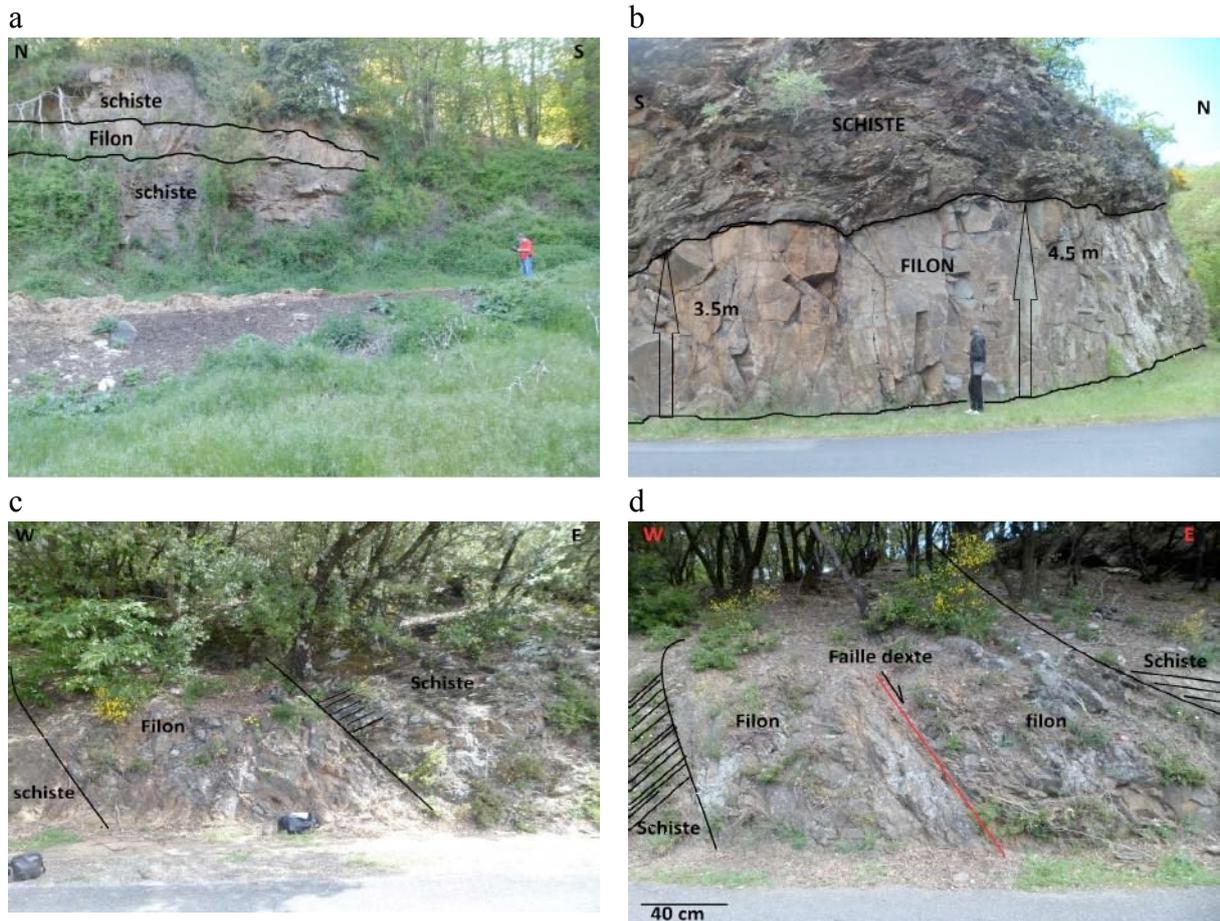


Figure 8 : quelques photographies présentant la disposition des filons de kersantite sur le terrain. a : carrière de Malaussette (point 1) ; b : filon de Vébron (point 4) ; c : filon de Saint-Martin-de-Lansuscle (point 3) ; d : faïlle du filon de Saint-Martin-de-Lansuscle (point 3)

Dans le cas du point 4, le contact est soit tranché, soit se manifeste par un faciès à gros cristaux de quartz et de feldpsth potassique, en association avec un minéral noir (tourmaline ?), ce faciès évoque une pegmatite au niveau du contact (Figure 9).

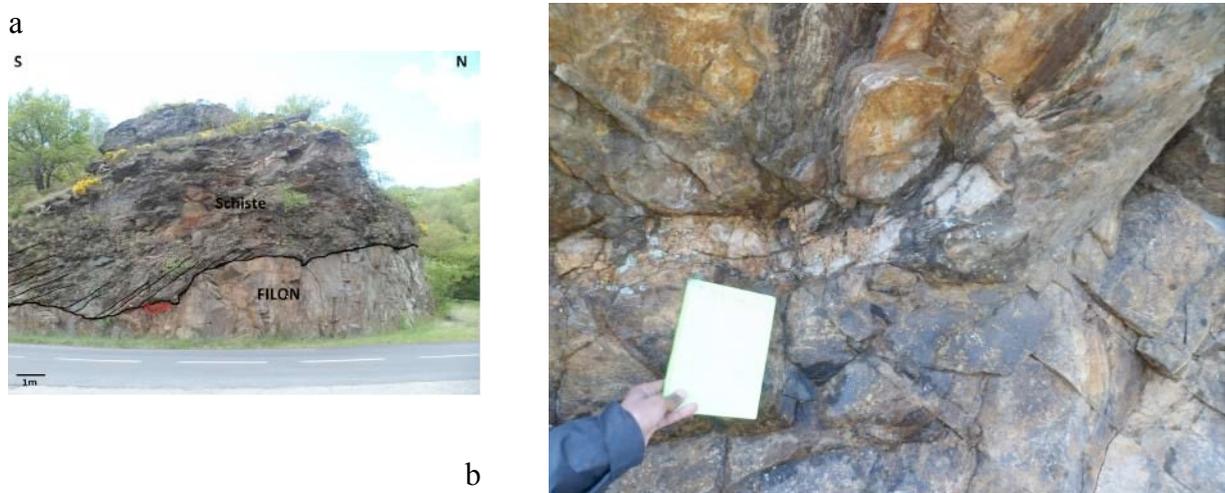


Figure 9 : contact entre le filon de kersantite et l'enceissant schisteux (point 4). a : localisation (cadre rouge) du contact pris en détail sur la photo b

La grande abondance des paillettes de biotite est responsable de la teinte très sombre de la roche, la bonne conservation du mica noir lui fait garder son aspect habituel (Figure 10). Les feldspaths sont présents sous forme de prismes blancs très fins. Le quartz est globuleux, forme les seules taches claires visibles sur la roche.

Une cassure fraîche de notre roche montre qu'il s'agit d'une texture microgrenue. Des taches verdâtres sont parfois visibles (point 2).

La roche est généralement massive et sans structure visible. Toutefois, il a parfois été observé des structures particulières. Ainsi, dans la carrière de Malaussette (point 1), une texture vacuolaire semble visible, les vacuoles formant des alignements (Figure 11a) qui évoquent certains niveaux riches en gaz dans les basaltes.

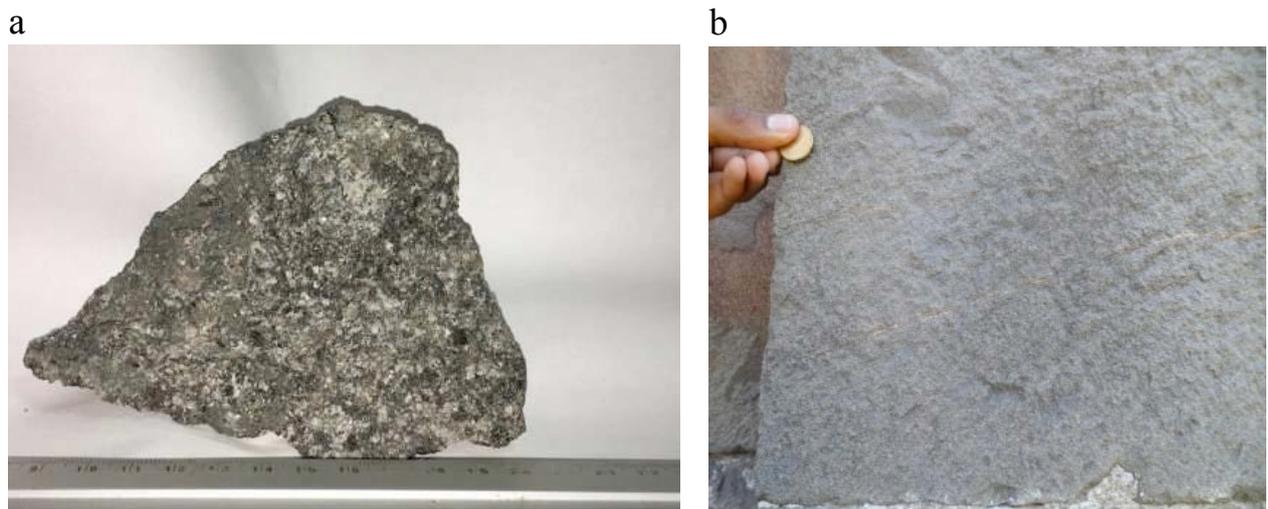


Figure 10 : deux aspects de la roche en cassure fraîche

On note parfois la présence d'amandes de quartz, noyées dans la masse de la roche (Figure 11b). Il devrait s'agir de xénolites emballées dans le magma. On note également des fractures larges d'un à deux millimètres, remplies de calcite (bien visibles sur les blocs du mur de l'église de Valfrancesque à Sainte-Croix-Vallée-Française).

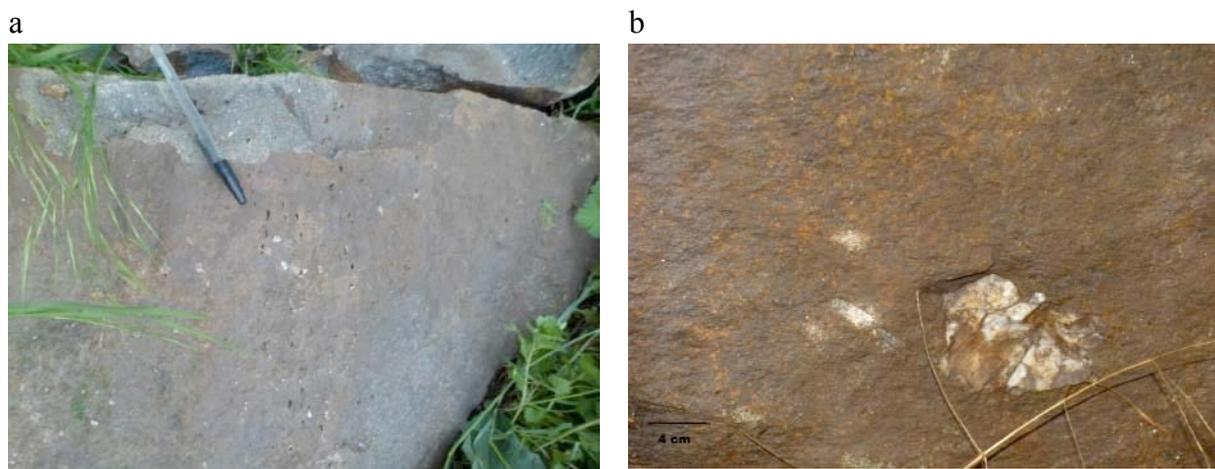


Figure 11 : quelques détails des éléments particuliers des kersantites. a : structure vacuolaire (carrière de Malaussette, point 1) ; b : xénolite quartzeux (point 1)

3.3.2.2 Caractères microscopiques

Les biotites:

Microscopiquement, les biotites sont présentes selon différentes formes, monoclinique à pseudo-hexagonale, avec un relief moyen, et une coloration intense du brun jaunâtre à brun rougeâtre (Figure 12). Elles représentent 35% du volume de notre lame.

On constate aussi la présence de l'ex-solution d'ilménite (FeTiO_3) le long des clivages avec des inclusions d'apatite, ainsi que de la chlorite.

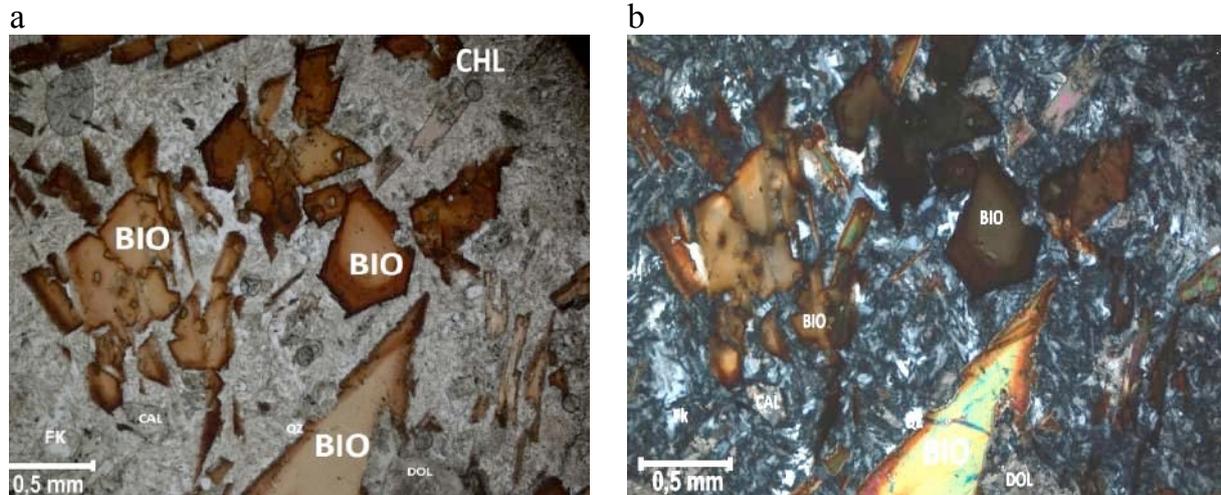


Figure 12 : un ensemble de biotite avec zonation. a : LPNA ; b : LPA

Ces biotites ne sont pas monogénétiques, une deuxième génération se développe au contact d'un carbonate (dolomite). L'ensemble biotite-dolomite forme des globules arrondis. Ceci suggère que l'assemblage résulte de l'altération totale d'une phase minérale antérieure, et notamment la déstabilisation des olivines, qui entraînent une grande libération de MgO et par conséquent provoque une recristallisation de phlogopite (Figure 13)

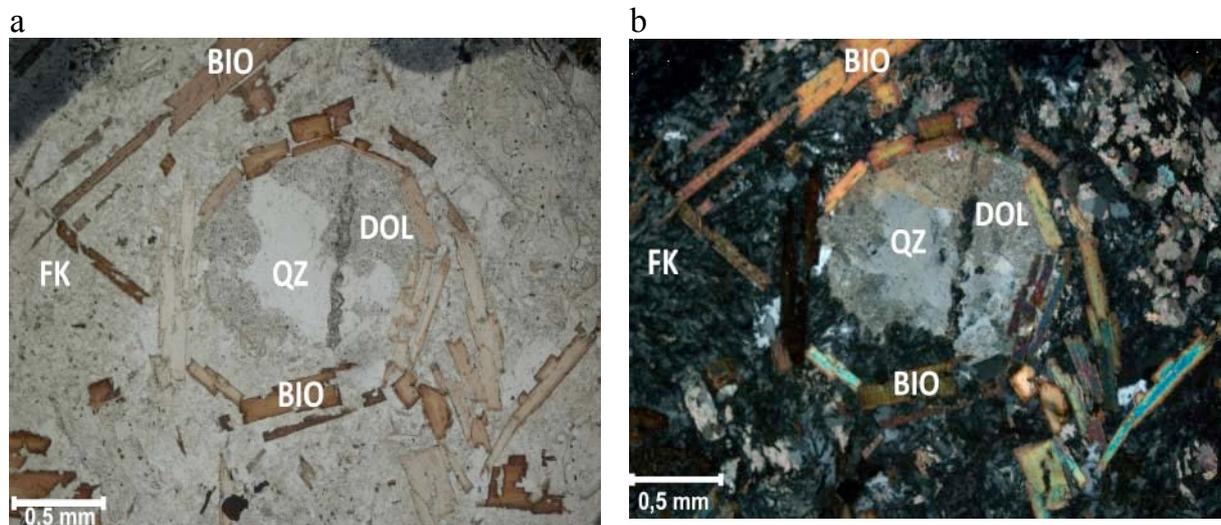


Figure 13 : assemblage à biotite+quartz+carbonate. a : LPNA ; b : LPA

Les olivines :

L'olivine dans notre roche n'est pas conservée, l'étude microscopique montre qu'il s'agit des fantômes qui sont xénomorphes à sub-automorphes, et qui ont la particularité d'avoir gardé les marques des craquelures au cours de son altération en chlorite. Selon Velde (1968), cette forme est toujours conservée dans la mica noir, autrement dit ils sont transformés en pilite, constituée par du talc, des chlorite et du carbonate.

Les feldspaths potassiques :

Omniprésents dans notre lame, on les retrouve surtout dans la mésostase. Microscopiquement, on trouve de la sanidine, incolore avec une forme aplatie, des cassures transverses, et des macles de Carlsbad. Sa présence indique une formation à haute température. On trouve aussi l'orthose qui présente une texture graphique, cette texture résulte d'une syncristallisation de quartz et d'orthose.

Les myrmékites (Figure 14) sont des bourgeons de plagioclase acides contenant des vermicules de quartz, elles se développent sur le plagioclase au contact des feldspaths potassiques, elles résultent du remplacement du potassium dans le feldspath potassique par un plagioclase calco-sodique avec libération de la silice.

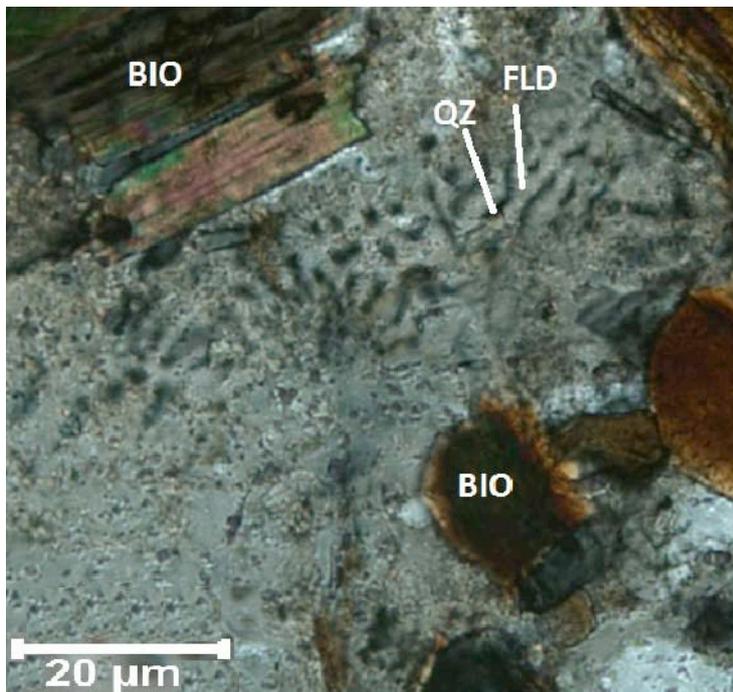


Figure 14 : myrmékisation

Les feldspaths plagioclases :

Il s'agit d'une phase tardive, interstitielle, sub-automorphe, dont elle représente environ 4 % du volume. Microscopiquement, ils sont incolores, le relief est faible, la biréfringence est faible avec des teintes grises à blanches, et des macles polysynthétiques. La composition chimique varie du labrador à l'andésine.

Le quartz :

Il représente une partie automorphe au sein des carbonates, et même au niveau de la chlorite, mais on le trouve généralement dans la mésostase avec les feldspaths potassiques.

Il représente 3% du volume de la roche, microscopiquement incolore, pas de clivage, relief faible et une biréfringence faible, avec une teinte de polarisation dans le gris de premier ordre. Leur disposition sur la lame (au sein des carbonates, et dans la mésostase) indique qu'il a été cristallisé en plusieurs étapes.

La chlorite :

Elle correspond à l'une des altérations des olivines, elle se trouve dans toute la roche et représente presque 20%, du volume de la roche. C'est une phase post-magmatique ou sub-terminale, qui moule presque tous les minéraux sauf les carbonates.

Microscopiquement, elle a une couleur verdâtre, et une biréfringence très faible, le plus souvent avec des teintes basses avec un léger pléochroïsme normal, plus marqué quand la chlorite est riche en fer (Figure 12)

Les carbonates :

- La calcite : microscopiquement, elle est incolore, avec un clivage parfois formant un quadrillage losangique, ainsi qu'une biréfringence très forte, dont la teinte de polarisation se situe dans les ordres supérieurs. La calcite est le produit de la dernière phase de cristallisation, elle occupe environ 6 % du volume de notre roche, on la trouve le plus souvent dans la mésostase, ainsi qu'elle est hors de tout minéral magmatique.
- La dolomite : il s'agit d'une phase précoce par rapport à la calcite, on ne la trouve pas dans la mésostase ; par contre, on la retrouve dans les trois phases magmatiques qui sont l'olivine, les amphiboles et les phlogopites

L'amphibole :

L'amphibole est le seul minéral (autre que l'olivine) que l'on trouve déstabilisé et totalement remplacé par la dolomite.

Les apatites :

Elles représentent 2% dans notre lame, et microscopiquement, elles apparaissent parfois allongées, prismatiques à base hexagonale, mais le plus souvent en grains. Incolores avec un fort relief, elles polarisent dans des gris plus au moins sombres, avec une extinction droite pour la section prismatique (Figure 15).

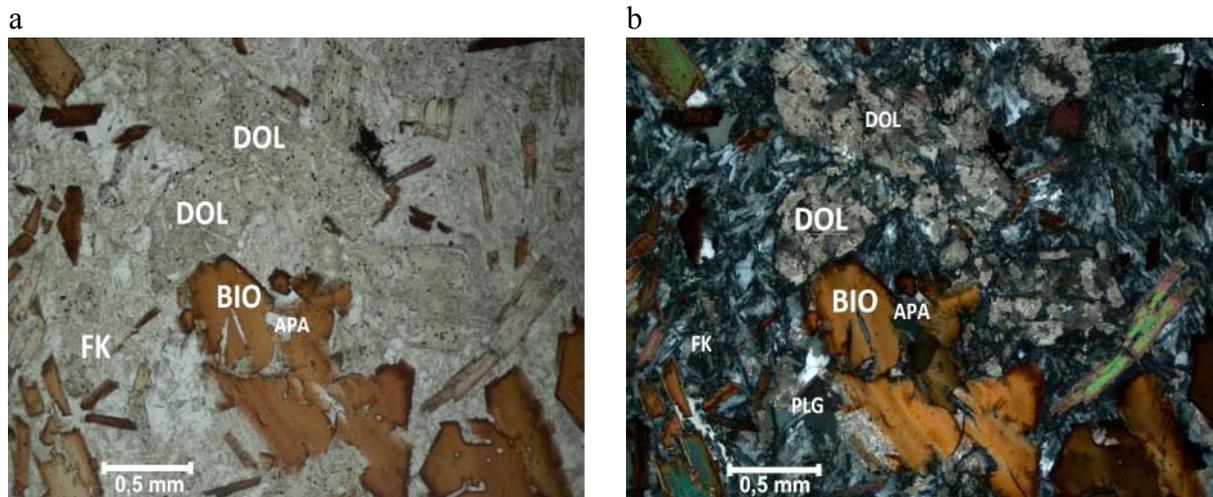


Figure 15 : assemblage biotite+apatite. a : LPNA ; b : LPA

Les phases accidentelles :

Les sulfures représentent presque 0,3% de la roche, ils sont assez précoces dans la mesostase. Selon l'analyse au MEB, on trouve :

- la chalcopyrite CuFeS_2
- la pyrite FeS_2
- la sphalérite $(\text{Zn,Fe})\text{S}$
- la galène PbS

4 Etude préliminaire des inclusions fluides

4.1 Nature de l'échantillon

Un xénolite est un fragment de matériaux étrangers englobés dans une roche magmatique et qui en diffère par quelques caractères minéralogiques, pétrographiques ou chimique. Une étude pétrographique des inclusions fluides a été effectuée sur la lame de l'enclave (amande de quartz) prélevée au sein du filon de kersantite de Malaussette (filon 1).



Figure 16 : xénolite quartzeux (carrière de Malaussette, point 1)

4.2 Etude des inclusions fluides

Les inclusions fluides (IF) sont des microcavités dans les minéraux qui contiennent le ou les fluides ayant existé au cours de l'histoire de la roche. Leur étude fournira des indications sur la composition des paléofluides, les conditions pression-température auxquelles ils sont soumis au moment de leur piégeage ainsi que les renseignements sur l'état de perméabilité du milieu.

L'analyse typologique consiste à décrire les IF à température ambiante. Les IF sont constituées de différentes phases (liquide, vapeur, solide). Différentes familles sont observées en fonction de leur chronologie (primaire, secondaire, et pseudo-secondaire), bien que des morphologies différentes et particulières.

4.2.1 Les inclusions fluides primaires

Selon la Figure 17, ces inclusions sont primaires et leur formation est contemporaine de la cristallisation du quartz, sont de grandes tailles (30 à 15 μ m), isolées et biphasées (liquide + bulle gazeuse)

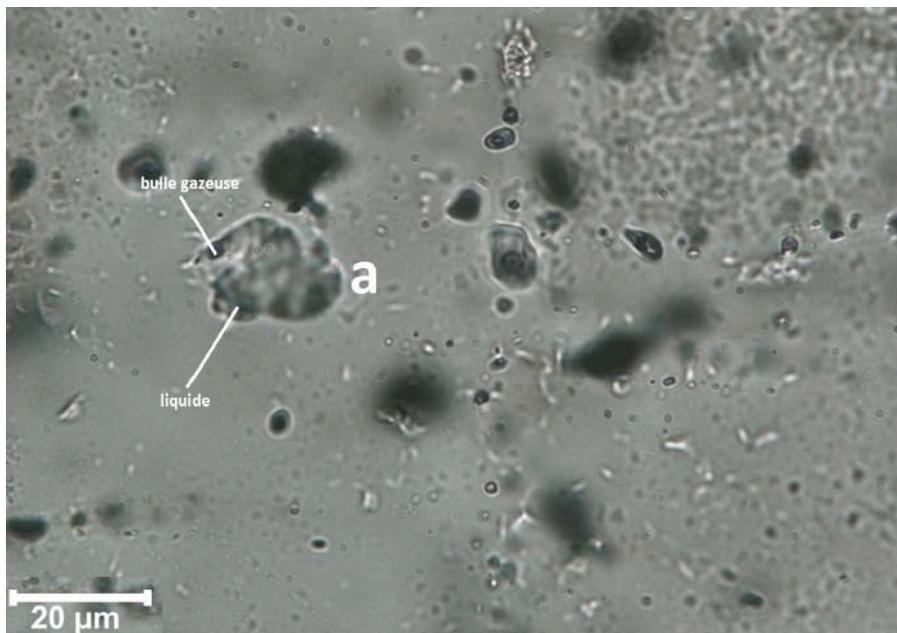


Figure 17 :
inclusions fluide
primaire (a) biphasée

4.2.2 Les inclusions fluides secondaires

La Figure 18 montre que ses inclusions ont une localisation sous forme de plans de microfracturation, ce qui leur confère une origine secondaire, donc postérieurement à la recristallisation du quartz (Roedder, 1984).

On observe aussi une autre famille d'IF secondaires dite pseudo-secondaires, sous forme de plans (microfracturation). Les mécanismes de leur formation sont identiques aux inclusions secondaires, mais elles donnent des renseignements sur les conditions lors de la cristallisation du quartz.

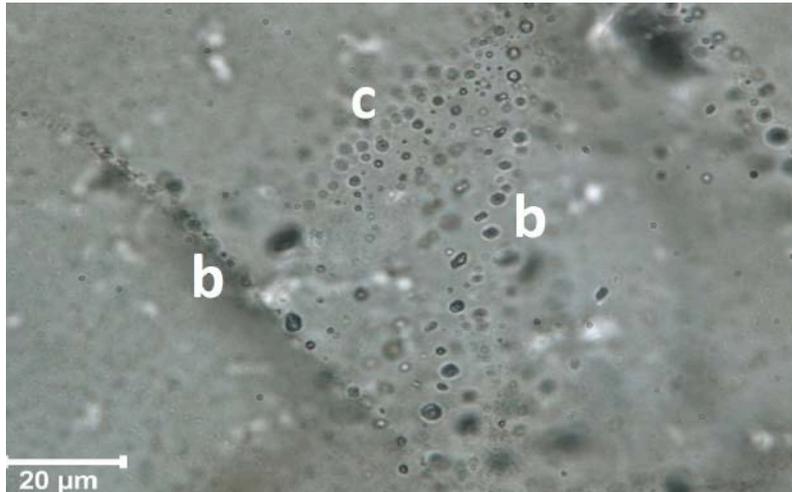


Figure 18 : plans d'inclusions fluides secondaire (b) et pseudosecondaire(c)

Des morphologies particulières ont été observées et indiquent des transformations post-piégeage, tel que le processus de l'étranglement (Figure 19), ce processus modifie les propriétés physico-chimique originales de l'IF.



Figure 19 : inclusion fluide affectée par un début de processus d'étranglement.

4.3 La spectroscopie Raman

La microspectrométrie à effet Raman permet de déterminer la composition et la concentration de certains constituants en utilisant le phénomène de changement de longueur d'onde caractéristique d'un milieu matériel qui accompagne la diffusion de la lumière. C'est une méthode qui m'a permis de connaître la composition de la phase volatile (CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2S), et de nombreuses phases solides.

4.4 Résultats

Selon les analyses d'une dizaine d'IF sous le Raman j'ai constaté que la phase gazeuse est constituée de $\text{CO}_2 + \text{N}_2$, et la phase liquide de H_2O .

5 Interprétation

5.1 Données de terrain

La mission de terrain de 3 jours (auxquels s'ajoutent 2 jours de trajet) a permis de visiter quelques sites et d'observer les filons de kersantite en place, leur structure et les relations avec l'encaissant.

Le grand filon, dit de la carrière de Malaussette (point 1), a fait l'objet d'une visite, d'un ré-échantillonnage et d'observations détaillées. La visite montre qu'il s'agit d'un corps magmatique formant un sill presque concordant sur la schistosité régionale. L'interprétation proposée est que l'extension responsable de la fracturation de l'encaissant aurait ouvert la schistosité permettant la remontée d'un liquide de composition lamprophyrique.

Ce grand filon a été ré-échantillonné au point dit Saint-Martin-de-Lansuscle (point 3) qui montre que le filon est franchement sécant sur la schistosité. On observe également une fracturation N160 du filon.

Un autre point d'échantillonnage a été visité au Col des Laupies (point 2). Ce point, non mentionné sur la carte géologique d'Alès, est nouveau. Il se situe dans la continuité parfaite des deux premiers affleurements et en est probablement l'extension Nord. Ainsi ce filon formait un corps Nord-Sud de plus de 20 kilomètres d'extension. L'épaisseur va d'environ 2 mètres (Col des Laupies) à 12 à 13 mètres à Saint-Martin de Lansuscle.

Les affleurements montrent que le contact avec l'encaissant schisteux est soit tranché, soit au travers de la présence d'une pegmatite à quartz, feldspath potassique et peut-être tourmaline. Ce type de contact indique que l'encaissant schisteux était probablement froid au moment de la mise en place. La présence de failles, le plissement de la schistosité de l'encaissant, indique que la mise en place serait contemporaine d'une phase de déformation extensive Est-Ouest.

La roche est massive, en général microgrenue, mais des variations de taille de grain sont parfois visibles, millimétrique à infra-millimétrique (Col des Laupies). La roche ne montre que peu de structures internes à l'exception de vacuoles évoquant une mise en place en contexte sub-volcanique. La minéralogie est dominée par la biotite, certains faciès montrent des tâches vertes qu'il conviendra d'analyser ; il pourrait s'agir d'un assemblage à talc et chlorite (Velde, 1971).

La collection d'échantillons récoltés permettra des études plus approfondies à l'échelle de plusieurs filons.

5.2 Minéralogie et pétrographie

La plupart des micas observés possède une coloration intense brun jaunâtre à brun rougeâtre en fonction de la composition chimique, plus précisément selon le rapport de Mg/Fe. Les zonations observées au niveau des biotites analysées au MEB montrent deux générations de biotite, la première génération consiste en biotite automorphe non associée aux carbonates ; la deuxième génération se développe au contact avec les carbonates.

Les points analysés varient du centre vers le périphérique (voir annexe). Selon le rapport $Mg/(Mg+Fe)$, on constate que le centre de la première génération est un phlogopite 83% , et au bord ce même rapport est de 58 % , donc on passe du centre vers la bordure d'un phlogopite à une biotite magnésienne.

Dans la deuxième génération, on passe du phlogopite au centre 83% à une biotite ferrugineuse 0,47%.

Petrographiquement, cette étude a révélé que les kersantites sont affectées par une altération hydrothermale (Figure 20) qui se manifeste par :

- La chloritisation : ce type d'altération est matérialisé par l'abondance de chlorite. Cette dernière a été observée au niveau du mica, mais elle caractérise particulièrement l'olivine. A ce niveau la chloritisation est maximale. Les olivines sont complètement transformées, la chlorite représente le minéral dominant.

- La silicification : c'est l'altération qui caractérise toutes les phases. Elle se traduit par l'abondance des grains de quartz à taille différentes, ainsi que le remplissage des veines au niveau de notre roche

- La séricitisation : c'est l'altération la plus fréquente au niveau des feldspaths, traduite par la néoformation de la séricite le plus souvent dispersée, orientée dans les feldspaths hôte.

- La carbonatation

Cette altération est présente dans presque tous les espaces laissés par la chlorite et le quartz, l'espace est rempli par la calcite, ainsi que le remplacement de l'olivine et les amphiboles par les dolomies. Le flux hydrothermal était donc riche en CO₂.

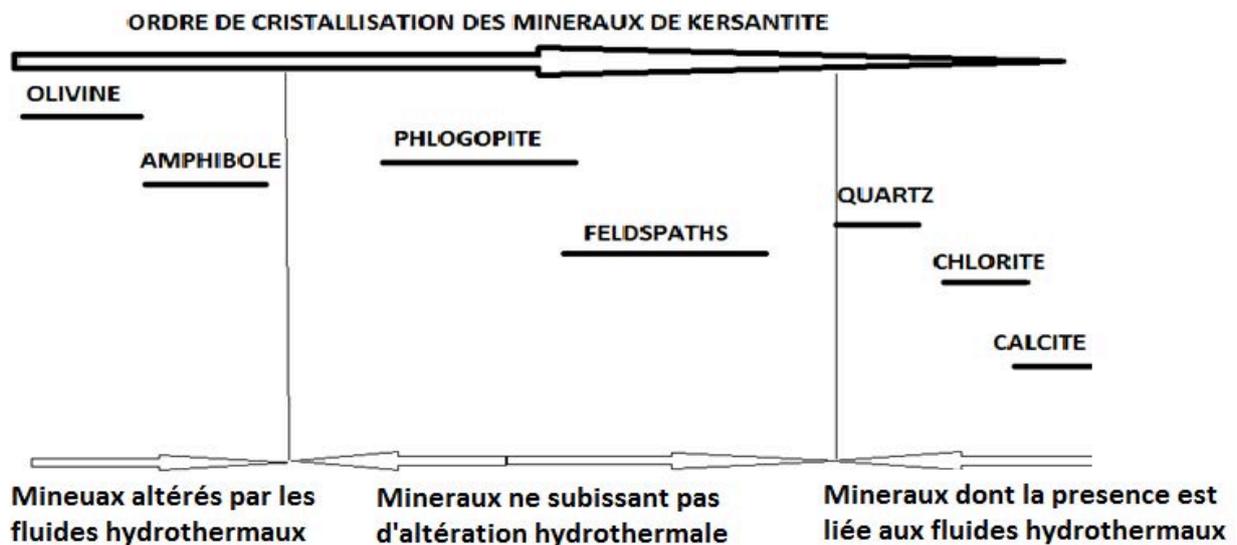


Figure 20 : schéma résumant l'intervention des fluides hydrothermaux, avant, pendant ou après la cristallisation de la kersantite

6 Conclusions

6.1 Apport personnel

La préparation de la mission m'a permis d'acquérir des nouvelles compétences d'organisation : estimation du coût de la mission (trajet et hébergement) dans une enveloppe budgétaire proposée, recherche de logement à proximité des points d'affleurement, préparation du matériel, gestion du planning (moins de 24 h entre le stage de terrain du Jura et le départ dans les Cévennes) et coordination. Cela m'a également amené à découvrir des

terrains différents et dans des conditions différentes (végétation) de celles dans lesquelles j'avais pu travailler auparavant (Maroc).

6.2 Résultats

Selon la classification des lamprophyres, les kersantites de Cévennes appelées localement fraidonites, appartiennent au groupe des lamprophyres calco-alcalins de la famille des syénites.

Les kersantites sont encaissées dans des schistes dits des Cévennes, leur schistosité est pénétrative et le mécanisme de déformation est la dissolution-re cristallisation.

Ces roches filoniennes présentent une direction générale N-S, et se relaient en formant des alignements importants que nous avons confirmés avec l'affleurement du Col des Laupies. Les affleurements visités montrent une disposition sous forme de sills avec un faible angle sur la schistosité régionale de l'encaissant, mais peuvent être sécants avec un fort angle. Leur épaisseur varie de 2 à 12-13 m, selon nos observations de terrain.

Ces filons sont massifs, parfois fracturés, faillés et possèdent une teinte sombre, avec une texture parfois vacuolaire, suggérant une mise en place en contexte sub-volcanique. On observe parfois des amandes de quartz interprétées comme des xénolites quartzeux.

Microscopiquement, les kersantites des Cévennes sont des roches à texture microgrenue, dont la composition minéralogique majeure est composée de biotite (variété phlogopite), feldspath potassique et carbonates, dont les altérations les plus marquantes sont la silicification, la chloritisation et la séricitisation. L'olivine et l'amphibole ne sont pas directement observées, mais certains « fantômes » suggèrent leur présence initiale.

L'analyse chimique MEB-EDX indique la présence de deux générations de biotites zonées. Une première génération, biotite en phénocristaux, correspond au phlogopite ; elle montre une évolution de la composition chimique selon le rapport Mg/Fe, avec un cœur magnésien évoluant vers une bordure plus ferrifère. Une seconde génération est représentée par une biotite ferrugineuse ; cette deuxième génération est plus différenciée que la première génération.

La présence de pyrite, chalcopyrite et galène indique peut-être un potentiel métallogénique.

6.3 Perspectives

Durant le déroulement de ce stage, diverses analyses ont été initiées, dont les résultats n'ont pas été obtenus dans le temps imparti. L'étude minéralogique sera complétée par une analyse par la Diffraction des Rayons X (DRX), afin d'identifier les minéraux mineurs non reconnus en pétrographie. La préparation de certains échantillons a également été réalisée afin de solliciter des analyses chimiques, éléments majeurs et traces, ce qui permettra de faire des comparaisons avec d'autres lamprophyres du Sud-Est du Massif Central français, notamment les vauugnérites d'Ardèche, et de faire des hypothèses sur l'origine de ces roches particulières.

L'inventaire des différentes IF indique qu'une étude complète est possible. Les premiers résultats montrent que le fluide piégé est de composition H₂O-CO₂-N₂, déjà mis en évidence dans certaines études antérieures dans des vauugnérites (Dubois, 1992).

7 Bibliographie

- ARNAUD, F. (1997) Analyse structurale et thermo-barométrique d'un système de chevauchements varisque : les Cévennes centrales (Massif Central Français), Thèse I.N.P.L., 248 p. + annexes.
- AYRTON, S.N. (1991) Appinites, lamprophyres and mafic microgranular enclaves: three related products of interaction between acid and basic magmas. In: DIDIER, J. & BARBARIN, B. (éds.): Enclaves and granite petrology. Developments in petrology, 13, pp. 465-476
- BEAUMONT, E. de (1822) Notice sur les mines de fer et les forges de Framont et de Rothau. Ann. Mines, VII, 521-554
- CLARKE, D.B., MUECKE, G.K. & PE-PIPER, G. (1983) The lamprophyres of Ubekendt Ejland, West Greenland : products of renewed partial melting or extreme differentiation ? Contrib. Mineral. Petrol, 83, pp. 117-127
- Centre de géologie Terrae Genesis (2017) Les pétrotypes français.
http://www.terraegenesis.org/doc/CGTG-petrotypes_97.pdf (consulté le 10/06/2017)
- DAWSON, J. B. (1962) Basutoland kimberlites. Geological Society of America Bulletin, 73(5), 545-560.
- DUBOIS, M., (1992) Fluides crustaux : approche expérimentale et analytique. Détermination du solvus des systèmes H₂O-MCl (M=Li, K, Rb, Cs). Caractérisation et dynamique des fluides des dômes thermiques, sur l'exemple du diapir vellave (S-E Massif Central Français), Thèse I.N.P.L., Nancy (France), 228 p.
- DUMAS, E. (1845) Notes sur le fraidronite, nouvelle roche plutonique. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XII^{ème} session, Nîmes, 333-340
- ESPERANCA, S. & HOLLOWAY, J.R. (1987). On the origin of some mica-lamprophyres: experimental evidence from a mafic minette. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95, 207-217
- GALAN, G, CORRETGE, L.G. & LAURENT, O. (1997) Low-potassium vaugnerites from Guéret (Massif central, France), mafic magma evolution influenced by contemporaneous granitoids. *Mineral. Petr.*, 59, 165-187
- HUPPERT, H.E. & SPARKS, R.S. (1985) Cooling and contamination of mafic and ultramafic magmas during ascent through continental crust. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 74, 371-386
- JUNG, J., & BROUSSE, R. (1959) Classification modale des roches éruptives: utilisant les données fournies par le compteur de points. Masson, Paris, 122 p.
- LACROIX, A. (1933) Les roches éruptives potassiques leucitiques ou non, du Tonkin occidental. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 197, 625-627
- LAPADU-HARGUES, P. (1945). Sur l'existence et la nature de l'apport chimique dans certaines séries cristallophyliennes. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, vol. S5-XV no. 4-6, 255-310
- MARCHAND, P. (2005) Caractérisation de deux intrusions kimberlitiques au Témiscamingue, Notre-Dame-du-Nord 1 et Belleterre (BT 44) et de deux dykes ultramafiques des monts Torngat. Études pétrographique, minéralogique, géochimique et potentiel diamantifère, Mémoire MSc., Faculté des Sciences et Génie, Université Laval, Québec, 305 p.
- Ministère de l'industrie (1967) Carte géologique de la France au 1:80000, Feuille Alès, n°209, Service de la carte géologique, Paris, 1967. 1 carte en couleur + 1 notice, 22 p.
- ROCK, N.M.S. (1984) The nature and origin of calc alkaline lamprophyres: minettes, vogesites, kersantites and spessartites. *Trans. R. Soc. Edinb*, 74, 193-227
- ROCK, N.M.S. (1990) Lamprophyres. Blackie & Son, Edinburgh, 285 p.
- ROEDDER, E. (1984) Fluid inclusions. In: P.H. RIBBES (Ed.) "Reviews in mineralogy", Mineralogical Society of America, Washington D.C., 644 p.

- SABATIER, H. (1991) Vaugnerites: Special lamprophyre-derived mafic enclaves in some Hercynian granites from Western and Central Europe, in Didier, J., Barbarin, B. (eds) Enclaves and granite petrology, *Developments in Petrology* 13, Elsevier, 63-82
- SMITH, C.B., GURNEY, J.J., SKINNER, E., M., W., CLEMENT, C.R. & EBRAHIM, N., (1985) Geochemical character of southern Africa kimberlite: a new approach based upon isotopic constraints. *Trans. geol. Soc. South Afr.*, 88, 267-280
- SØRENSEN, H. (Ed) (1974) *The Alkaline rocks*. John Wiley & Sons Ltd, 634 p.
- STRECKEISEN, A. (1979) Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites, and Melilitic Rocks: Recommendation and Suggestion of the IUGS, Subcommittee on the Systematic of Igneous Rock. *Geology*, 4, 331-335
- TURPIN, L., VELDE, D. & PINTE, G. (1988) Geochemical comparison between minettes and kersantites from the western European Hercynian Orogen: trace element and Pd-Sr-Nd isotope constraints on their origin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 87, 73-86
- VELDE, D. (1968) Les transformations de l'olivine dans les lamprophyres et lamproïtes: une étude de la pélite. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (7), X, 601-612
- VELDE, D. (1971) Les kersantites: étude des lamprophyres à plagioclase et biotite. *Bull. Soc. fr. Min. Cristal.*, 94, 411-426

ANNEXES

Composition chimique des biotites de la kersantite de la carrières de Malaussette

LA PREMIERE GENERATION

Spectr	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
55C	57,394984	0,4942459	12,036593	7,0177978	13,219649	0,0518739	0,0584039	0,0641224	4,732506	0,1396732	1,8537262	0,0985292	0,081257	0,0644832	2,692155
56C	56,900322	0,7364962	13,845951	6,0093743	12,612096	0,0259702	0,0450848	0,048165	5,2655712	0,1296342	1,2978995	0,0876157	0,439045	0,0471811	2,5095941
57C	56,76251	0,5607362	12,710868	6,8059914	13,594759	0,0326009	0,0569996	0,1124326	5,1965108	0,1107621	1,1475479	0,1001586	0,5191411	0,0499878	2,2389938
46C	57,546543	0,5489866	12,412975	6,2645783	12,459087	0,0408547	0,0411764	0,0386028	4,8862294	0,115899	1,9047077	0,0797998	0,0418195	0,054991	3,56375
29C	59,202713	0,3646382	11,683478	6,4958903	12,749922	0,0459709	0,0364218	0,0454238	4,8653644	0,1112569	1,8894427		0,1765111	0,0560874	2,2768796
38C	57,941454	0,3862458	12,992581	6,6585987	13,293668	0,0297928	0,0619548	0,0849258	5,0519325	0,1292574	1,2525146		0,1692948	0,0702855	1,8774942
39C	57,156631	0,3592435	12,899295	6,7179657	13,131321	0,0206338	0,0191495	0,0304775	5,9258205	0,1881284	1,1249724	0,0390478	0,6217373	0,0251439	1,7404331
42C	57,343552	0,3193243	13,183253	6,9929413	13,420655	0,0610145	0,0619398	0,0650204	5,2380195	0,1546886	0,939269	0,0453198	0,5961368	0,031421	1,5474446
20C	59,276571	0,2984091	11,306295	6,3328737	12,104592	0,0319052	0,0166379	0,0167396	5,7029651	0,1447719	1,8369072		0,0749461	0,0663861	2,7899997
45C	57,289934	0,5815852	13,466219	6,0424329	12,639384	0,0588229	0,0387136	0,0491192	5,3027414	0,1157925	1,2445332	0,0676443	0,5072473	0,0243052	2,5715245
19C	58,647405	0,4317624	11,020681	6,8375015	12,730877	0,0483156	0,0417174	0,0735736	5,1558694	0,1644413	1,6780535		0,0371877	0,0421223	3,0904925
40B	57,440656	0,6232625	12,808566	6,2127908	12,299596	0,021849	0,0288959	0,0520825	5,0369149	0,1394856	2,1027767	0,1357166	0,1551689	0,0747085	2,8675307
41B	56,668879	0,0210347	5,4000912	7,9761542	12,793579	0,0629095	0,0538642	0,4391947	4,5616537	0,1459773	2,2918037	0,0809272	0,0472977	0,1143739	9,3422601
43B	56,828544	0,6236265	12,824015	6,2705526	12,307825	0,0269211	0,0332348	0,0531556	5,4971323	0,1070312	2,0721156	0,1350742	0,114243	0,0601437	3,0463855
44B	57,756749	0,4375899	6,5840984	7,4166389	12,573378	0,0481952	0,0554446	0,0597424	4,654444	0,1222189	2,1766649	0,1261455	0,0550223	0,1011339	7,8325347
21B	62,467999	0,226768	5,7720234	7,324931	10,332402	0,0460513	0,056223	0,1632923	2,7545345	0,1308856	1,7980772		0,0297447	0,0927532	8,8043145

rapport Mg/Mg+Fe **0,8364** **0,5764**

LA DEUXIEME GENERATION

Spectr	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
1C	57,934713	0,3652184	12,856652	6,6643352	13,104842	0,0553573	0,0455133	0,0758696	4,6515759	0,0892925	1,6542496		0,5402761	0,0675922	1,8945125
4C	57,637807	0,7427993	12,84518	6,2409515	12,705299	0,0093056	0,0209385	0,2881444	6,3555305	0,2470627	0,9186258		0,2827008	0,0751803	1,6304748
7C	58,013084	0,2748496	13,432202	6,4874081	13,263793	0,0483671	0,071397	0,0384536	4,940689	0,1204393	1,198606		0,5150378	0,0450942	1,550579
12C	58,841567	0,359632	11,670894	6,4437873	12,601032	0,0218093	0,0246725	0,0214644	5,3402857	0,1267934	1,519165		0,3147918	0,0766545	2,6374511
13C	58,101056	0,4734925	11,688507	6,9491218	13,113172	0,0762565	0,0872153	0,0885574	4,6465696	0,1407103	1,8196318		0,0503567	0,0290755	2,7362771
3C	57,177407	0,2684564	11,888617	6,9772319	13,842223	0,0684333	0,0566162	0,074374	4,885255	0,086844	1,6606272		0,0687042	0,0448945	2,9003165
8C	58,747174	0,3980625	11,139336	6,616759	12,421203	0,0337883	0,0544664	0,0252625	5,1068845	0,1373657	1,9617239		0,0988297	0,073952	3,1851933
10B	60,680279	0,4341004	7,6945074	6,386642	11,46454	0,0301416	0,0256792	0,0391405	4,3810831	0,1448277	2,2240483		0,0741519	0,0843642	6,3364949
14B	59,912313	0,5005959	6,232037	7,2056448	12,624356	0,0666147	0,0417656	0,0758739	4,0682523	0,1705311	1,7897717		0,0327402	0,0834073	7,1960965
18B	59,794175	0,4449025	5,0170393	7,1825806	12,483845	0,096383	0,0752972	0,0770081	4,4615888	0,1257739	1,9379439		0,0879433	0,1090269	8,1064924
2B	60,417634	0,1668315	6,0262732	6,6418932	11,429536	0,0274712	0,015706	0,0527304	4,7907456	0,1118553	2,2828533		0,0474842	0,1077411	7,8812456

rapport Mg/Mg+Fe **0,838** **0,4582**

Moyenne Fe Mg en % atomique des 2 générations de biotite

centre		bordure	
Fe	Mg	Fe	Mg
2,44	12,5	6,38	8,67
2,36	12,21	7,38	6,24

la 1ère génération

la 2ème génération

