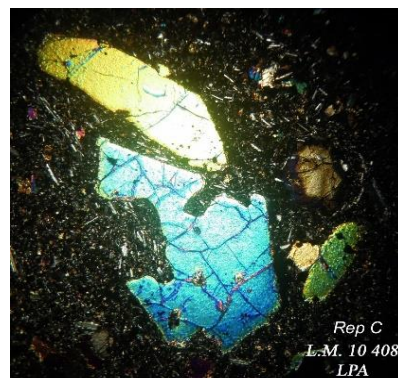




Atelier de pétrographie



ATLAS PÉTROGRAPHIQUE

Etude des roches magmatiques et métamorphiques par l'examen de lames minces au microscope polarisant

NOTICE DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

Dominique Rossier

Danielle Piaud

Hélène Quéré

Roland Maherault

Remerciements : les auteurs expriment leur reconnaissance à Annie Cornée, pour sa relecture de la présente notice des roches métamorphiques, permettant ainsi des améliorations.

Dernière mise à jour le 17 novembre 2021

Table des matières

	page
Préambule - présentation des entretiens du métamorphisme.....	4
Introduction – tableau des minéraux des roches métamorphiques.....	5
La série barrowienne dans le cas du Bas Limousin	8
Données géographiques et localisation des prélèvements :	
1 - Anticlinal de Tulle.....	10
1.1 – roches paradérivées.....	12
1.2 – roches orthodérivées.....	14
2 - Synclinal d’Uzerche.....	15
2.1 – gneiss du Bas Limousin, sous-faciès à cyanite et sillimanite, et amphibolites indifférenciées – Espartignac, carrière du Faucou.....	18
2.2- éclogites et amphibolites.....	18
 Guides méthodologiques	
Guide N° 1 M – Principaux minéraux des schistes et gneiss dans le métamorphisme régional – Le cas du Bas Limousin.....	
	19
Guide N° 2 M - Diagrammes ACF A’CK – principes et exemples dans le métamorphisme Régional prograde.....	
	24
Guide N° 3 M - Schistes et micaschistes paradérivés – métagrauwakes et métapélites	
	28
Guide N° 4 M - Les changements de phase à haute température dans les gneiss, par les "réactions ioniques".....	
	33
Guide N° 5 M - Les différentes séries d'amphiboles. Application dans les amphibolites du métamorphisme régional.....	
	36
Guide N° 6 M - Eclogites et méta-éclogites.....	
	41
 Lexique : pour mémoire. Toutes les définitions utiles sont regroupées dans la notice générale du site de pétrographie de la SAGA	
Bibliographie.....	48

Préambule

Les bases pour aborder l'examen de lames minces de roches métamorphiques sont développées dans les **Entretiens sur le métamorphisme**.

Associés à l'introduction générale de l'ATLAS, les Entretiens sont accessibles à la rubrique **pétrographie** du site de la SAGA

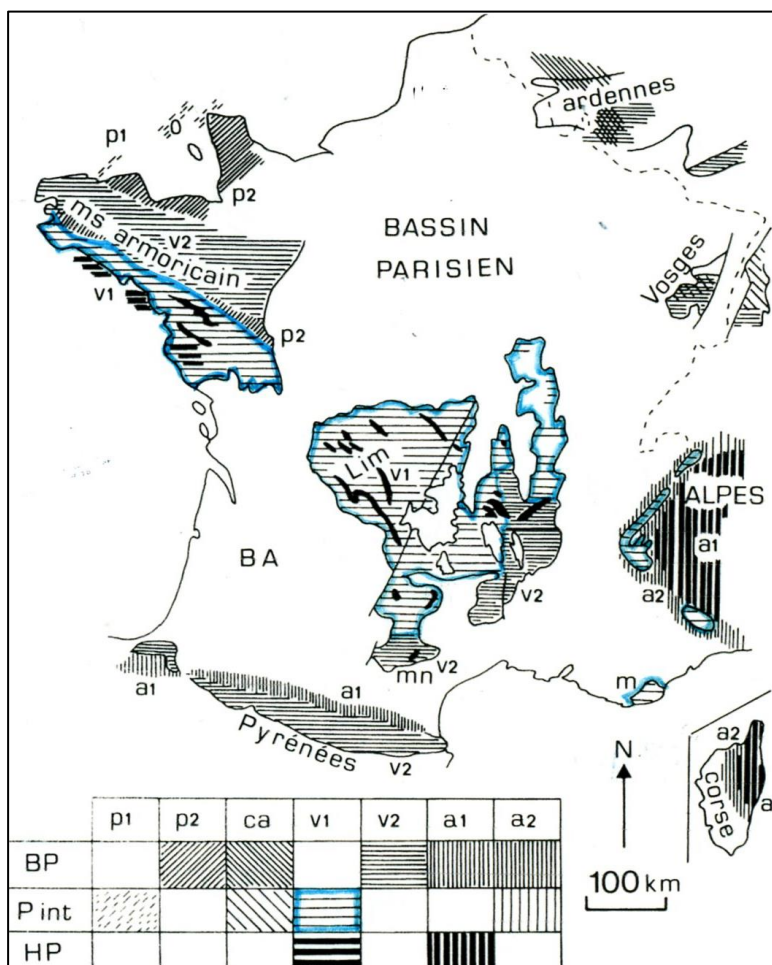
Historiquement, les **Entretiens**, au sens des exposés en commission de volcanisme de la SAGA, se sont déroulés de 2006 à 2007. Ils ont précédé le voyage d'étude organisé par la SAGA dans la région métamorphique du Bas Limousin du 28 septembre au 1^{er} octobre 2007. Ils ont été rédigés, puis édités en 2009 et introduits dans le site de la SAGA¹. Une douzaine d'années se sont écoulées. Abordant aujourd'hui la rédaction du nouveau domaine de l'ATLAS portant sur les roches métamorphiques, avec un premier chapitre sur la région du Bas Limousin, nous avons jugé que les **Entretiens** conservaient tout leur intérêt pour l'utilisateur de l'ATLAS. Le tableau ci-dessous donne la composition des chapitres des **Entretiens**, dans lesquels l'élève pétrographe peut puiser, et rechercher les éléments qui lui sont nécessaires : en termes de définitions, de vocabulaire, de principes de base et de méthodes d'approche. Ils sont complétés par des lexiques, des bibliographies et des galeries de clichés en couleur.

N° et titre	Contenu
Entretien n° I <i>Introduction au métamorphisme</i>	Observation en lumière naturelle polarisée, non analysée et analysée. Bases physiques et méthodes
Entretien n° II et petit atlas de textures et microstructures <i>Structures et texture des roches métamorphiques</i>	Mécanique des milieux continus, déformation des roches. Schistosité, foliation et crénulation. Structures, microstructures et textures des roches métamorphiques
Entretien n° III <i>Minéraux du métamorphisme régional de pression intermédiaire</i>	Données minéralogiques de base. Comment reconnaître et identifier les minéraux sur un affleurement, en particulier les silicates du métamorphisme, non-hydratés et hydratés.
Entretien n° IV <i>Comment classer les roches métamorphiques ?</i>	Nomenclatures descriptives. Notion de gradients, d'isogrades et de faciès : classification des faciès.
Entretien n°V <i>Géodynamique et métamorphisme de hautes pressions</i>	Modèles géodynamiques. Le faciès des éclogites. Rétromorphisme des éclogites

-
- ¹ Lors de la création du séminaire de pétrographie de la SAGA en 2011, celle-ci a imprimé et distribué les Entretiens à tous les participants, en appui scientifique et technique.

Entretien n°VI <i>Anatexie et migmatites</i>	Métamorphisme de hautes températures en lien avec des intrusions magmatiques et l'anatexie
Entretien n°VII <i>Le métamorphisme régional.</i> <i>Un cas d'école : le Bas Limousin</i>	Lecture de la carte géologique d'une région métamorphique. Le réseau des isogrades. Identification des protolithes sédimentaires et magmatiques : roches para-dérivées et ortho-dérivées. Datations et interprétation géodynamique.

Le domaine géographique occupé dans notre pays par les roches métamorphiques est vaste, car il coïncide en grande partie avec le domaine paléozoïque, comme l'illustre la carte des régions métamorphiques ci-après..



Noter la place importante occupée par le métamorphisme régional de gradient barrowien dans le Massif Central, en Bretagne et en Vendée, accompagné des reliques de roches du métamorphisme de haute pression (éclogites...).

Répartition des séries métamorphiques sur le territoire français, en fonction de leur âge et du type de gradient prograde (d'après Kornprobst et al, 1981, modifié)

BP : gradient abukuma ; P int : gradient dalradien (barrowien) ; HP : gradient franciscain. p1 : Archéen ; p2 : Protérozoïque supérieur (Cadomien) ; ca : Calédonien ; v1 : éohercynien ; v2 : hercynien ; a1 : éoalpin ; a2 : lépontin. M : massif des Maures ; mn : Montagne Noire ; Lim : Limousin. Le boudins noirs représentent les principaux essaims de roches de haute pression (éclogites et granulites) qui apparaissent en reliques dans les séries dalradiennes. BA : bassin Aquitain.

Introduction

Cette notice regroupe les éléments nécessaires à l'utilisateur pour la compréhension des observations des lames minces des roches métamorphiques :

- Des éléments communs à tous les sites visités ...
- Des éléments spécifiques à chacun des sites visités : Bas Limousin, Ile de Groix, Trégor.

Tableau récapitulatif des « minéraux des roches » métamorphiques :

Pour un site donné, ce tableau récapitule les lames minces étudiées : le N° de la lame, le lieu de prélèvement, la lignée métamorphique de la roche, la nature de la roche, son faciès, et les minéraux observés.. Il apporte la distinction entre roches « **para** », dérivées de roches sédimentaires et volcano-sédimentaires et roches « **ortho** », dérivées de roches magmatiques.

L'extrait ci-après du tableau établi pour le Bas Limousin illustre ce principe. Pour le présenter, un exemple est pris sur le site du Moulin du Nègre, au nord-est de Travassac, dans la vallée du Maumont noir.

N° lame	Lieu de prélèvement	Lignée	Roche	P/O	Faciès	Minéraux observés																
						Qz	F.A.	Pl	Bt	Mb	Prl	Chl	And	Cy	Sil	Crđ	Grt	St	Px	Amp	Ep	MA
<u>509a</u>	Moulin du Nègre	Bar Pr	Schtch	P	A	X	-	-	X	X	-	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	X

A noter les particularités suivantes :

Une notice peut regrouper la description de plusieurs lames tirées du même échantillon, disponibles pour un travail en atelier. Un exemple fréquent est celui-ci : une lame taillée parallèlement au plan de schistosité ou au plan axial de foliation, l'autre dans un plan perpendiculaire. Exemple: la notice de la lame 509a décrit les lames 509a et 509b.

Il peut arriver également qu'une lame soit mentionnée plusieurs fois dans le tableau, si des roches différentes y apparaissent, nécessitant des descriptions distinctes.

Le tableau est renseigné selon la légende suivante :

● Rubriques « minéraux observés »

Ces rubriques sont remplies par des **X** si les minéraux correspondants ont été observés au microscope. En l'absence de ces minéraux, on laisse un blanc.

Qz : quartz.

F.A. : feldspath alcalin (sodo potassique)

Pl : plagioclases. La composition des plagioclases observés, si elle est déterminée par une mesure de Michel-Lévy, n'apparaît que dans la **fiche descriptive**. Dans le tableau, on indique l'un des trois critères suivants : an+, an- ou an?, quand la présence de plagioclases est avérée, mais qu'on n'a pas pu les identifier.

Bt : biotite. La variété éventuellement observée n'apparaît que dans la **fiche descriptive**.

Mb : micas blancs. A savoir, séricite, muscovite, hydromuscovite. En effet dans le métamorphisme de degré moyen sur les métapélites, la transformation des feldspaths fait apparaître d'abord la séricite, puis la muscovite.

La variété éventuellement observée n'apparaît que dans la **fiche descriptive**.

Prl : pyrophyllite

Chl : chlorite

And : andalousite

Cy : cyanite

Sil : sillimanite

Crd : cordiérite

Grt : grenat

St : staurolite

Px : pyroxènes (ortho et clino)

Amp : amphibole (hornblende verte, actinote, trémolite...). La variété éventuellement observée n'apparaît que dans la **fiche descriptive**.

Ep : épidote

M.A : minéraux accessoires (zircon, hematite, apatite, sphène, ilmenite, rutile..). La nature des minéraux accessoires observés n'apparaît que dans la **fiche descriptive**.

Remarque : les **altérations** sont reportées uniquement dans la **fiche descriptive**.

● Rubriques série, origine, et nature des roches

On inscrit dans ces rubriques les codes de la lignée, de l'origine, et de la nature de la roche.

Lignée		Origine		Nature de la roche
Bar Pr	Barrowien prograde	P	Paradérivée	Sch : schiste, Qzit : quartzite, Msch : micaschiste, Schtch : schiste tacheté, Pgn : paragneiss, Migm : migmatite
		O	Orthodérivée	Qzitfels : quartzite feldspathique, Lept : Leptynite, Ogn : orthogneiss, Ognoeil : orthogneiss oeillé, Embr : embréchite, Migm : migmatite, Cat : cataclasite
Bar Ret	Barrowien retrograde	P	Paradérivée	Amp : amphibolite, Hornb : hornblendite,
		O	Orthodérivée	Amp-pyr : amphibolo-pyroxénite, Amp ind : amphibolite indifférenciée, Mtadol : métadolérite, Serp : serpentinite
Frcain	Franciscain	P	Paradérivée	Schbleu : schiste bleu, glauc : glaucophanite, eclog-fr : éclogite « fraîche », Mtaéclog : Méta éclogite, Eclog-amp : éclogite amphibolitisée
		O	Orthodérivée	Granul : granulite, eclog-fr : éclogite fraîche, Mtaéclog – métaéclogite, Eclog-amp : éclogite amphibolitisée
Abuk	Abukuma			

- **Rubrique faciès** : les faciès sont complètement normalisés sur le plan international, avec des abréviations reconnues.

Z : faciès des zéolites

PrA : faciès à prehnite et actinote

PPr : faciès à prehnite et pumpellyite

LC : faciès à lawsonite et chlorite

PA : faciès à pumpellyite et actinote

GL : faciès des schistes à glaucophane et lawsonite

GE : faciès des schistes à glaucophane et épidote

EC : faciès des éclogites

CornAE : faciès des cornéennes à albite et épidote

CH : faciès des cornéennes à hornblende

CP : faciès des cornéennes à pyroxène

S : faciès des sanidinites

SV : faciès des schistes verts

AE : faciès des amphibolites à épidote

A : faciès des amphibolites

GBP : faciès des granulites de basse pression

GPI : faciès des granulites de pression intermédiaire

GHP : faciès des granulites de haute pression

Dans le cas de la région du Bas Limousin seuls sont concernés les faciès des éclogites, des schistes verts, des amphibolites et des amphibolites à épidote.

La série barrowienne dans le cas du Bas Limousin

Données géographiques et localisation des prélèvements

Anticlinal de Tulle et synclinal d'Uzerche.

Pour découvrir les bases de la géologie de cette région métamorphique (**fig. 1**) le lecteur et utilisateur des lames minces de la collection SAGA, se reportera au chapitre **VII** des **Entretiens sur le métamorphisme**, qu'il trouvera sur le site, à la rubrique Pétrographie.

Outre un aperçu géologique de la région, centré sur le métamorphisme et le magmatisme, il prendra connaissance des particularités suivantes, qui font l'originalité de cette région à valeur scientifique patrimoniale :

- l'organisation du **gradient métamorphique** dans l'espace, suivant une intensité croissante du métamorphisme d'ouest-sud-ouest à est-nord-est.
- la notion d'**isograde**.
- la distinction entre roches « **para** », dérivées de roches sédimentaires et volcano-sédimentaires d'une part, et roches « **ortho** », dérivées de roches magmatiques d'autre part.
- les intrusions magmatiques qui jalonnent la région, la zone d'**anatexie** et la vaste région des **migmatites** associées.
- les **métabasites** et **amphibolites** (éclogites et métaéclogites) de la région.

Géographie de la région : l'anticlinal de Tulle

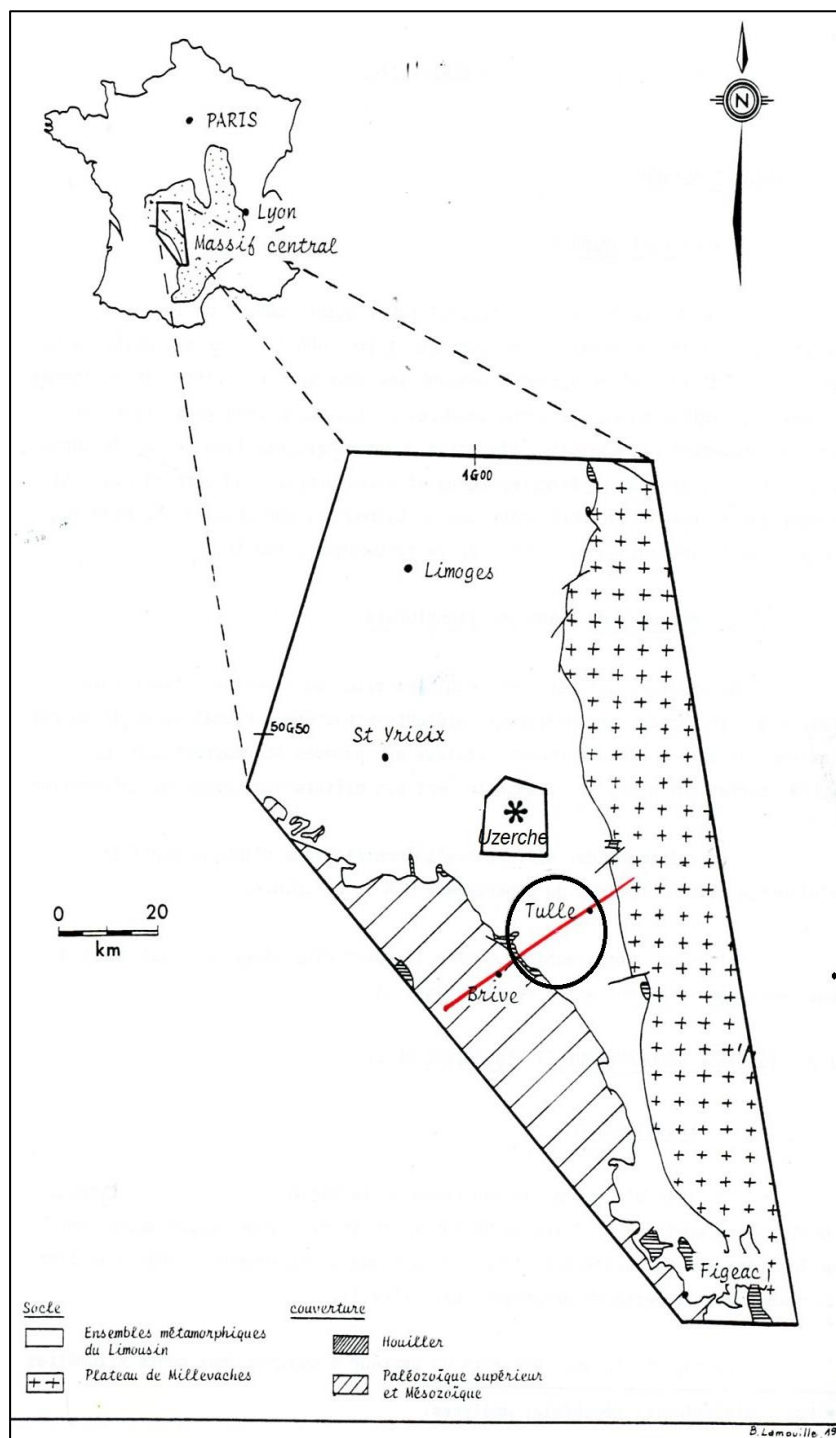
Figure 1 : carte de localisation de l'anticlinal de Tulle



Le rectangle rouge – anticlinal de Tulle - délimite la vallée de la Corrèze et ses environs immédiats, de Brive à Tulle, où ont été échantillonnées les roches métamorphiques sur un grand nombre de sites.

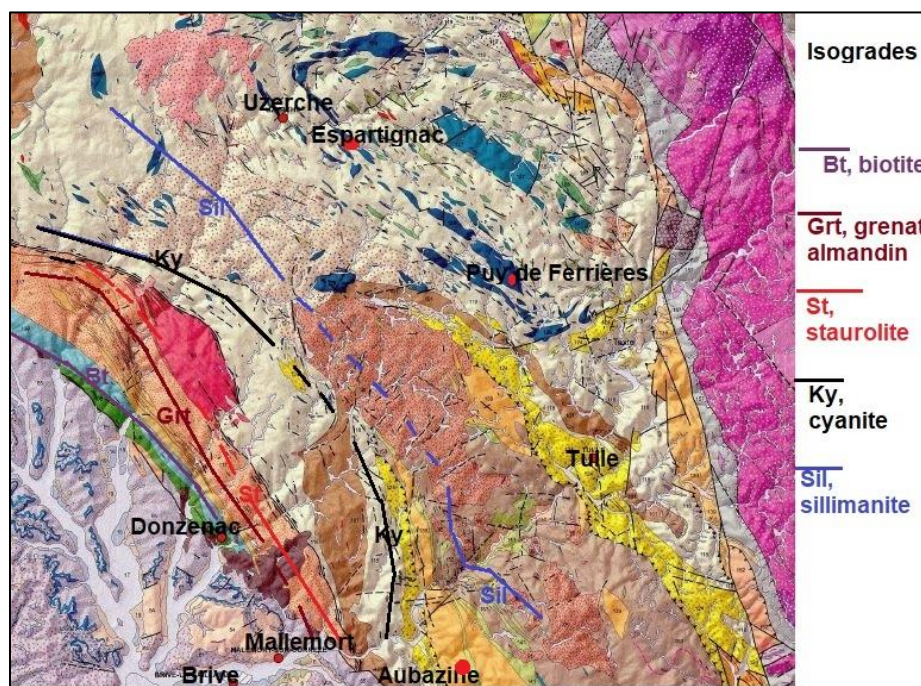
Ces sites ont été choisis parce qu'ils sont représentatifs du gradient barrowien, jusqu'au sous faciès des amphibolites à sillimanite, avec la succession des isogrades depuis celui de la biotite, tracés et légendés sur la **figure 3**. Sur la région d'Uzerche – synclinal d'Uzerche - seuls deux sites marqués par une étoile rouge sur la **figure 1**, ont été visités et étudiés, pour les raisons exposées dans le paragraphe de l'histoire géologique.

Figure 2 : zones étudiées (B. Lamouille – Géologie structurale et pétrologie de la région d'Uzerche. 1979. Ed. BRGM)



Les zones étudiées sont d'une part le polygone autour d'Uzerche, d'autre part la région entourée d'un cercle, sur l'axe de Brive à Tulle (en rouge sur le schéma).

Figure 3 :

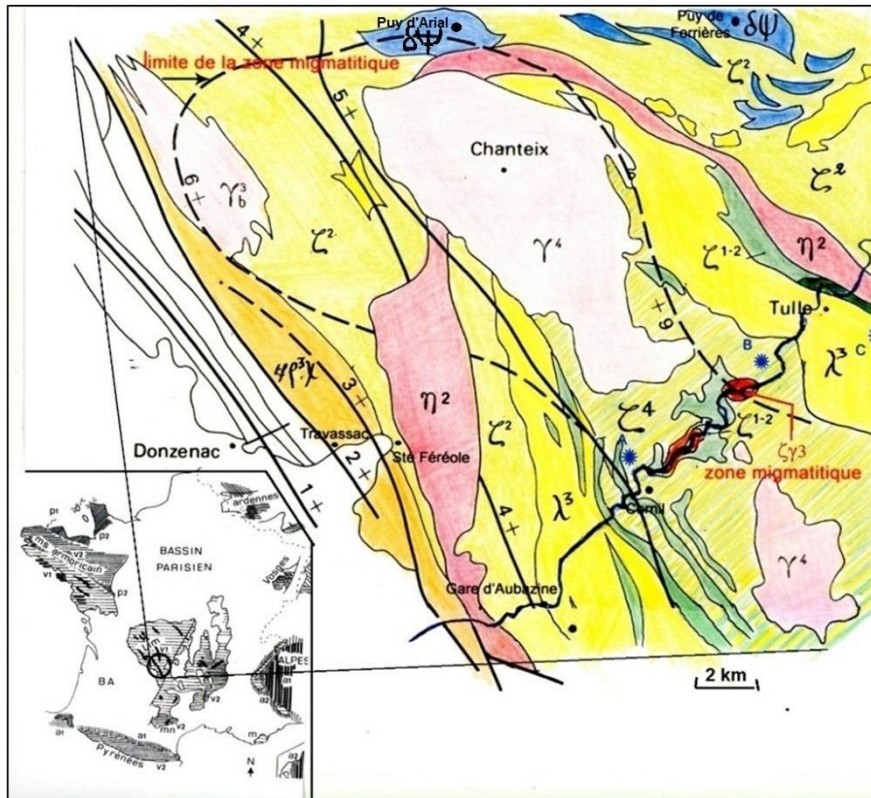


Alors que la diagonale Brive-Tulle traverse des terrains très variés ainsi que les cinq isogrades successifs, la zone d'Uzerche est uniformément représentée par des gneiss, de la famille des « gneiss gris du Bas Limousin ». C'est ce qui explique que seuls deux sites ont été retenus dans la région d'Uzerche. Les 2 sites de métaéclogites, le Puy d'Ariel (forêt de Blanchefort) et le Puy de Ferrières, sont à la limite entre les deux zones. (D'après Chèvremont et Donsimoni, 2009, pl. 2, modifiée).

1 - Données géographiques des prélèvements dans l'anticlinal de Tulle

La localisation géographique des roches prélevées, relatives aux lames minces illustrées et commentées dans l'ATLAS, est présentée ci-dessous dans un ordre de métamorphisme croissant de l'Ouest - Sud - Ouest à l'Est - Nord - Est : c'est la direction du **gradient**. La **Figure 4** donne la carte géologique simplifiée en couleur du Sud Limousin, sa position par rapport à la bordure occidentale du Massif central. Elle a été établie d'après la notice de la carte BRGM à 1/50 000, feuille de Tulle. L'utilisation de la couleur permet de mieux visualiser la succession d'ouest en est des terrains métamorphiques et des intrusions. Les symboles en lettres grecques sont détaillés dans la légende de la **figure 4** ci-après.

Figure 4 : région métamorphique du Limousin



Isogrades :

- 2+ = isograde de la biotite
- 3+ = Isograde de la staurolite
- 4+ = Isograde de la cyanite
- 5+ = Isograde de la sillimanite
- 6+ = Anatexie tardive

Légende, d'après la notice de la carte BRGM au 1/50000, feuille de Tulle (Grollier *et al*, 1979) :

De gauche à droite :

- **Roches métamorphiques paradérivées :**

$\text{tf}\rho^3\chi$: quartzites feldspathiques et micaschistes à biotite et grenats

ζ^2, ζ^{1-2} : gneiss gris du Bas Limousin.

Dans le quart supérieur droit, $\delta\Psi$: éclogites, métaéclogites et amphibolites dérivées

- **Roches métamorphiques orthodérivées**

λ^3 : leptynites d'Aubazine, leptynites de Tulle.

ζ^4 : gneiss mésocrates à biotite, à faciès leptyniques.

En rouge sur la carte, au coeur de la zone d'anatexie, $\zeta\gamma^3$: ortho gneiss, embréchites

- **Roches magmatiques intrusives**

η^2 : tonalite à gros grains. γ^4 : granite type Cornil de la zone d'anatexie de l'anticlinal de Tulle

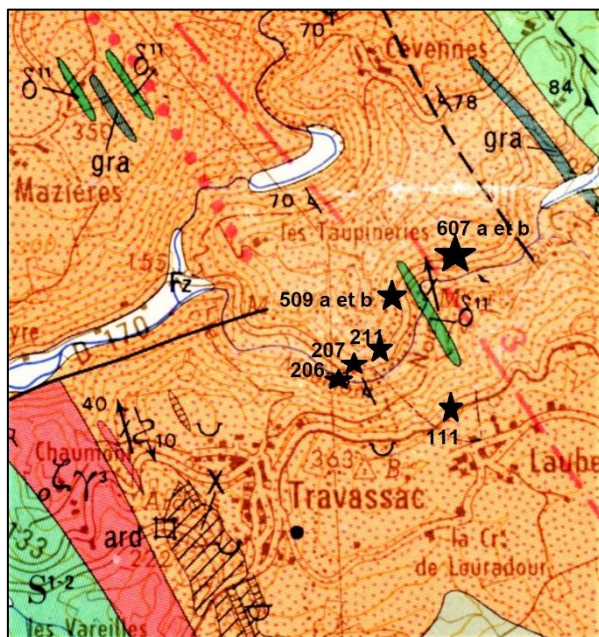
1.1. Roches paradérivées

1.1.1 - Localisation des lames minces tfp³_χ : quartzites feldspathiques et micaschistes à biotite et grenats

C'est la mésozone des méta-grauwackes et métapélites.

Les affleurements au nord de Travassac, sur la route de Ste Féréole et dans le bas de la vallée du Maumont noir, **figure 5**, permettent de bien illustrer la progression des paragenèses au voisinage et en approchant d'un **isograde**, celui de la **staurolite**, noté **3+** sur la **figure 4**. Il est indiqué en traits discontinus en rouge, sur la **figure 5** ci-dessous.

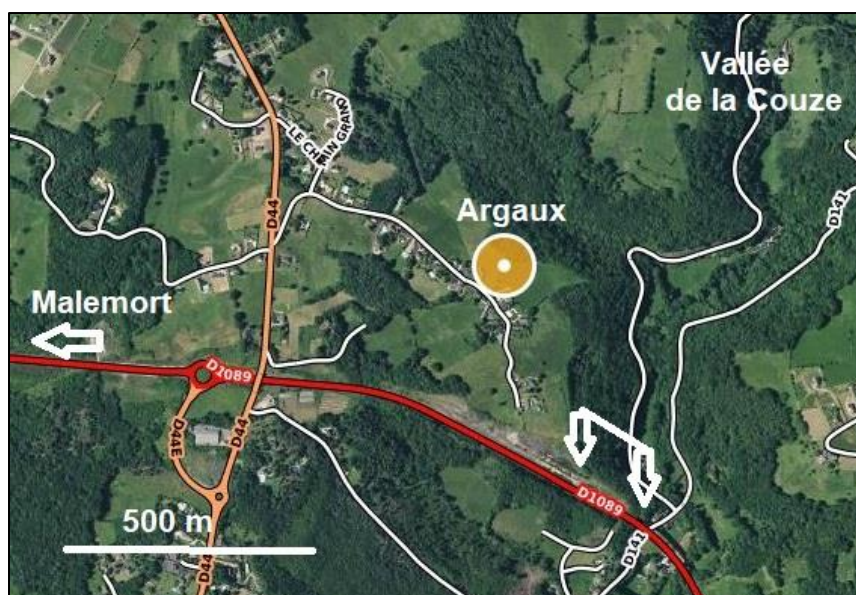
Figure 5 -



Positions et numéros des 8 lames, reportés sur un détail de la carte BRGM à 1/50 000, feuille de Tulle (Grollier *et al*, 1979, BRGM).

n°111, 206, 207, 211, 509 a et b, 607 a et b

Figure 6a : zone d'échantillonnage : les flèches à droite de la vue indiquent le parcours de 100 m sur lequel nous avons échantillonné, jusqu'au début du viaduc, rive gauche de la Couze. Vue satellite d'après Google Earth.



L'étude de la zone à staurolite et de l'approche de son isograde peut être complétée par la série de lames taillées sur des prélèvements faits en septembre 2008 sur le talus des travaux d'aménagement de la déviation de Malemort D 1089. **Figures 6a et 6b.**

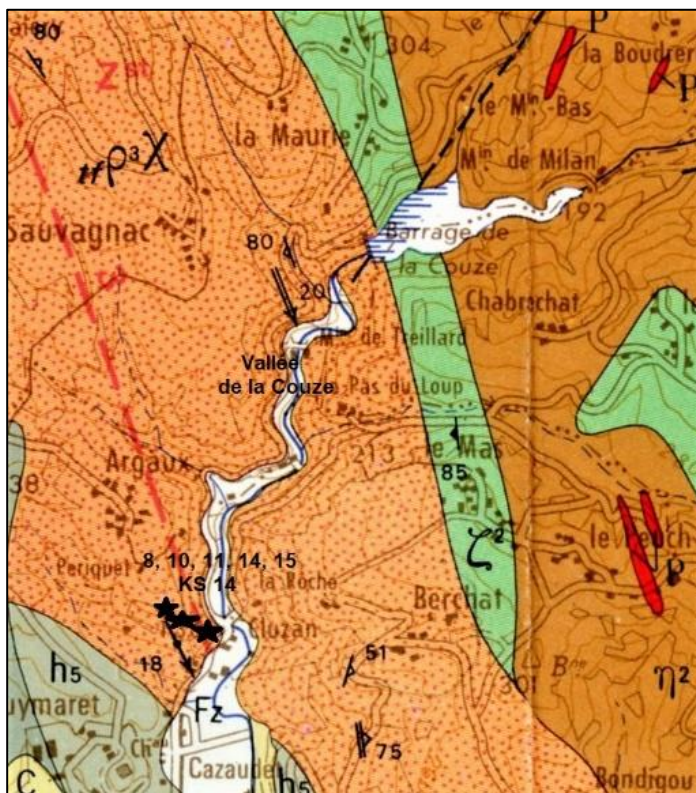


Figure 6b.

Positions et numéros des 5 lames, reportés sur un détail de la carte BRGM à 1/50 000, feuille de Tulle. (Grollier *et al*, 1979, BRGM). Lames **KS14**, n° **8, 10, 11, 14 et 15**

Noter que la série est disposée juste avant et à proximité de l'isograde **3+** de la **staurolite**. (tiretés en rouge).

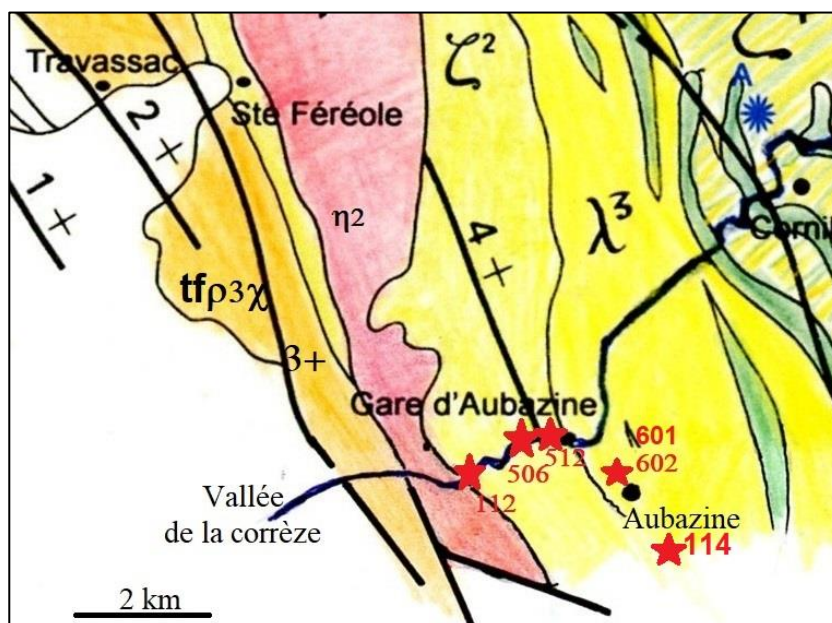
Les lames de la **figure 6b** n'ont pas fait l'objet de fiches complètes dans l'Atlas. L'intérêt des deux séries de lames (**figures 5 et 6b**) est de montrer comment un isograde apparaît sur le terrain, avec croissance rapide de l'abondance et de la taille du silicate d'alumine indicateur. On constate que le positionnement de la carte BRGM est relativement précis. La série de la **figure 6b** est utilisée pour illustrer le paragraphe « l'isograde dans un gradient métamorphique : concept abstrait ou réalité de terrain ? », dans le Guide N°3M.

1.1.2 – Localisation des lames minces ζ^2 , ζ^{1-2} : gneiss gris du Bas Limousin

À la suite des quartzites et micaschistes codés **tf p3x** on entre dans le domaine des « gneiss gris du Bas Limousin » (**figure 7**) qui constituent une bonne partie de la mésozone et de la catazone ; ils sont codés ζ^{1-2} , ζ^2 . Ces affleurements sont dans la zone de la cyanite.

Figure 7 – position des prélèvements dans le secteur des gneiss gris

Lames n° 112, 506, 512b et c



1.1.3 – Localisation des amphibolites banales – formations particulières, en filons ou en petits corps

Les amphibolites banales, cotées δ^{11} , sont répandues sous la forme de minces intercalations sur toute la région des gneiss et leptynites. Nous les avons représentées par le dossier conjoint des lames 609 a et b, taillées dans un prélèvement effectué sur l'intercalation de Chassoncet (Près Beynat sur la rive gauche de la Corrèze, à 4 km au sud-est d'Aubazine).

1.2. Roches orthodérivées

Les prélèvements ont été faits au voisinage et au cœur de la vaste zone d'anatexie et de migmatites de l'anticlinal de Tulle.

Ces roches affleurent sur les falaises parfois impressionnantes au bord de la N 89, au fond de la vallée de la Corrèze². La terminologie pour désigner les orthogneiss est empruntée à la notice de la carte géologique BRGM de Tulle (déjà référencée).

1.2.1 – Localisation des leptynites

Il y a d'abord les leptynites à albite dites de Vergonzac λ^3 alb échantillonnées sur la route qui mène de la gare au village d'Aubazine, n° 601 et 602 au bas de la **figure 7** ci-avant.

Dans l'ancienne carrière de l'abbaye aux Dames du monastère d'Aubazine, on a prélevé la superbe leptynite rose à microcline λ^3 mi, dont on a taillé la lame n° 114 : **figure 7** ci-avant. Le protolithe est un granite.

² Le géologue de terrain est de plus en plus confronté à des difficultés d'accès aux affleurements intéressants. En Bas Limousin, région d'excellence pour l'étude du métamorphisme régional, la situation s'est dégradée, comme nous avons pu le constater en comparant les conditions d'accès vécues dans les années 70 à celles d'aujourd'hui. Par exemple, sur la N89 entre Brive et Tulle qui est le parcours de référence, tous les affleurements ne sont plus accessibles, à cause des grillages, ou certains difficilement à cause de l'envahissement par la végétation.

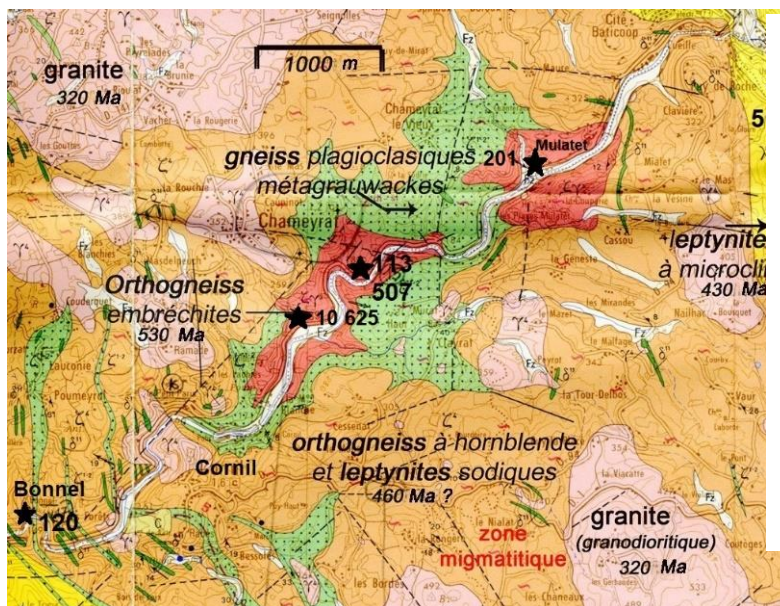


Figure 8 – Les gorges profondément creusées par la rivière Corrèze dans le socle métamorphique donnent accès aux formations orthodérivées du cœur de l'antiforme de Tulle. Carte BRGM au 1/50000 feuille de Tulle (Grollier et al, 1979)

lames n° 120, 10106, 511, 113 et 201

Les autres prélèvements s'échelonnent le long de la D 1089, anciennement N89, comme le montre la **figure 8**. La lame n° 120 de la carrière de Bonnel, est représentative des **leptynites d'Albussac, dans son faciès des leptynites grises à biotite seule** ζ^4 . Cette formation est aussi représentée par un faciès de gneiss mésocrate à biotite et grosses ponctuations d'amphibole: ce faciès est représenté par la lame 10106 : prélèvement à 600 m à l'Ouest de la D 167, dans la zone ζ^4 sur la carte géologique au bord de la route, près de Chaunac, au nord-ouest de Tulle.

A l'extrémité Est de la carte de la **figure 4**, le prélèvement sur l'affleurement du lieudit du « Château fort », sur la route de Tulle à Argentat, lame n° 511, est représentatif de la **leptynite de Tulle, leptynite à albite** λ^3 alb,

1.2.2 – Localisation des gneiss mésocrates – orthogneiss oeilés : les lames 507 et 113 (**figure 8**) ont été prélevées dans l'étroite boutonnière d'**embréchites** (orthogneiss oeilés) γ^3 entre pont de Cornil et Mulatet, au lieudit Chameyrat. Le protolithe est un granite.

2- Données géographiques des prélèvements du synclinal d'Uzerche

Introduction à sa géologie et sa pétrologie : nous reproduisons ci-après le paragraphe introductif de la notice de la feuille d'Uzerche de la carte BRGM au 1/5000, (Floc'h et al., 1982) (Page 6) :

«Pour l'essentiel, les gneiss représentés sur la feuille sont de type plagioclasiqes (ζ^{1-2}). Ce sont d'anciens sédiments immatures, plus ou moins mêlés d'apports volcaniques et dont la composition moyenne est celle de grauwackes. Au Nord, ils reposent sur des gneiss micaschisteux (λ^1) et des micaschistes dont les compositions varient entre celles de grauwackes et de shales.....L'âge de dépôt des matériaux précédents n'est pas connu avec certitude à l'heure actuelle, mais on peut raisonnablement le rapporter au Paléozoïque inférieur ou au Précambrien terminal. C'est probablement à l'Ordovicien que s'établit un régime de distension, que s'ouvre un rift dans la croûte continentale et que se manifeste un important magmatisme basique (gabbros, dolérites, laves et tufs basaltiques) et ultrabasique (péridotites). Ces roches sont à l'origine des nombreux **corps amphiboliques et serpentineux** intercalés dans les gneiss....

....Le métamorphisme polyphasé débute dès le Silurien. Il se développe pendant le Dévonien et s'achève vers la limite dévono-carbonifère. Les **paragenèses éclogitiques reliques** que l'on retrouve au sein de certaines amphibolites témoignent d'une phase de haute pression (au Silurien), à laquelle succède un épisode barrovien généralisé (au Dévonien), à l'origine des paragenèses mésozonales que l'on rencontre sur l'ensemble de la feuille. Le métamorphisme se termine, en régime de pression

décroissante, par le développement d'une anatexie particulièrement importante dans la partie nord de la feuille.

Parallèlement se succèdent deux phases de déformation synmétamorphes accompagnées par le développement de la foliation et de la schistosité régionales. Puis vient une troisième phase, plus superficielle, responsable de la structure en synforme d'Uzerche. »

Localisation des prélèvements :

Les deux sites choisis sont complémentaires et leur localisation est reportée sur la carte géologique de la **figure 9**.

- Le premier, la carrière du Faucou près d'Espartignac, est un site considéré comme patrimonial du point de vue géologique et pétrologique. Il est sur un corps amphibolique, et sur sa bordure gneissique plagioclasiq. Il permet d'étudier deux faciès. Tout d'abord, celui du gneiss gris dans son stade de **métatexite**, juste avant le passage à l'anatexie, et dans un sous-faciès d'amphibolite à cyanite et sillimanite. Ensuite celui du corps d'amphibolite, lui-même.
- Le second, la ferme Lavergne près de Benayes, est aussi sur un corps intercalaire, mais cette fois de nature ultrabasique. Il recèle une forme rare de paragenèse éclogitique relique , dit « éclogitite non rétrotransformée ».

figure 9 :

Carte géologique publiée dans la thèse de B.Lamouille. 1979

B désigne le corps ultrabasique d'éclogite fraîche, ferme Lavergne, près Benayes.

E désigne la carrière du Faucou, par Espartignac, tout proche d'Uzerche.

La teinte uniforme verte montre la monotonie du caractère gneiss plagioclasiq de la région.

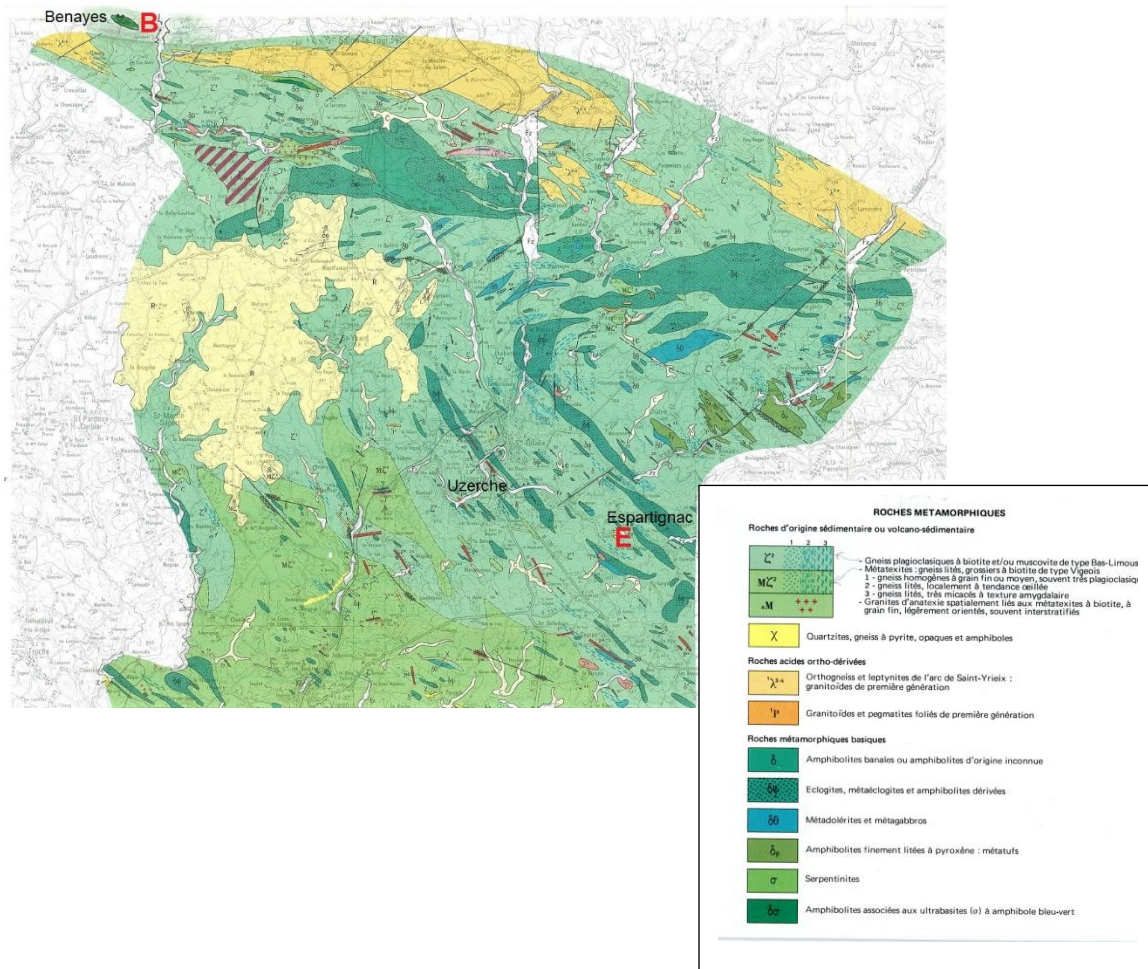


Figure 10 : repérages prélèvements

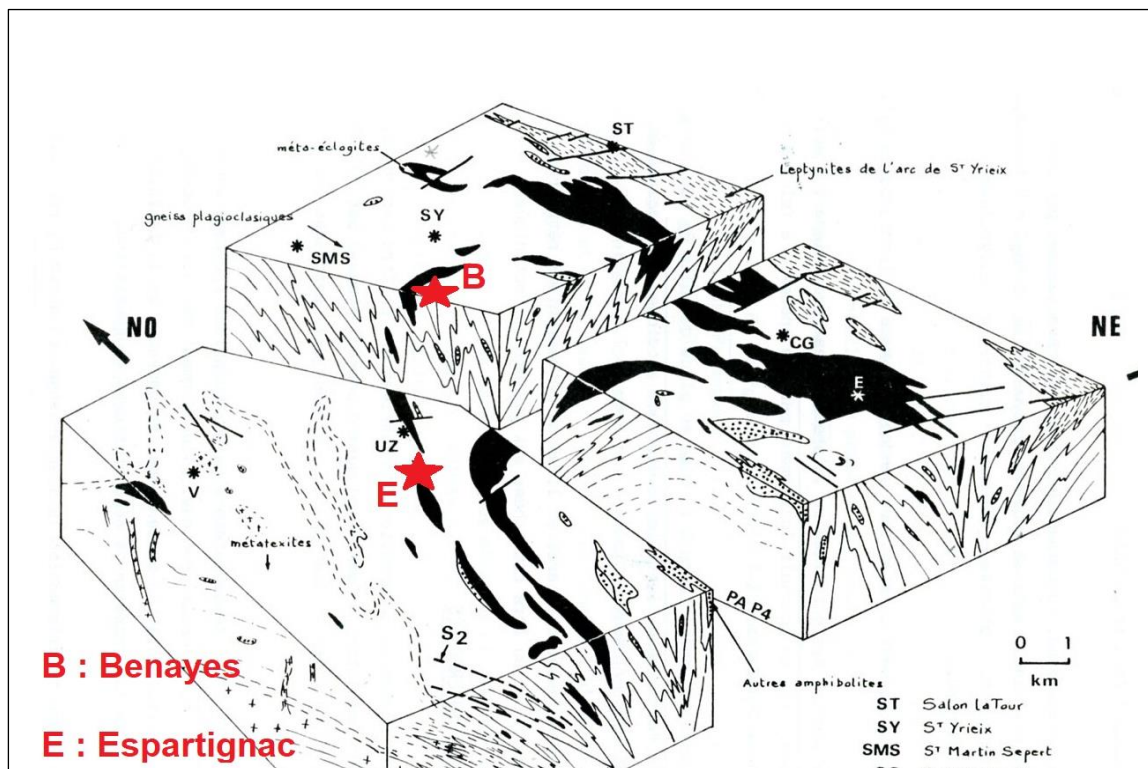
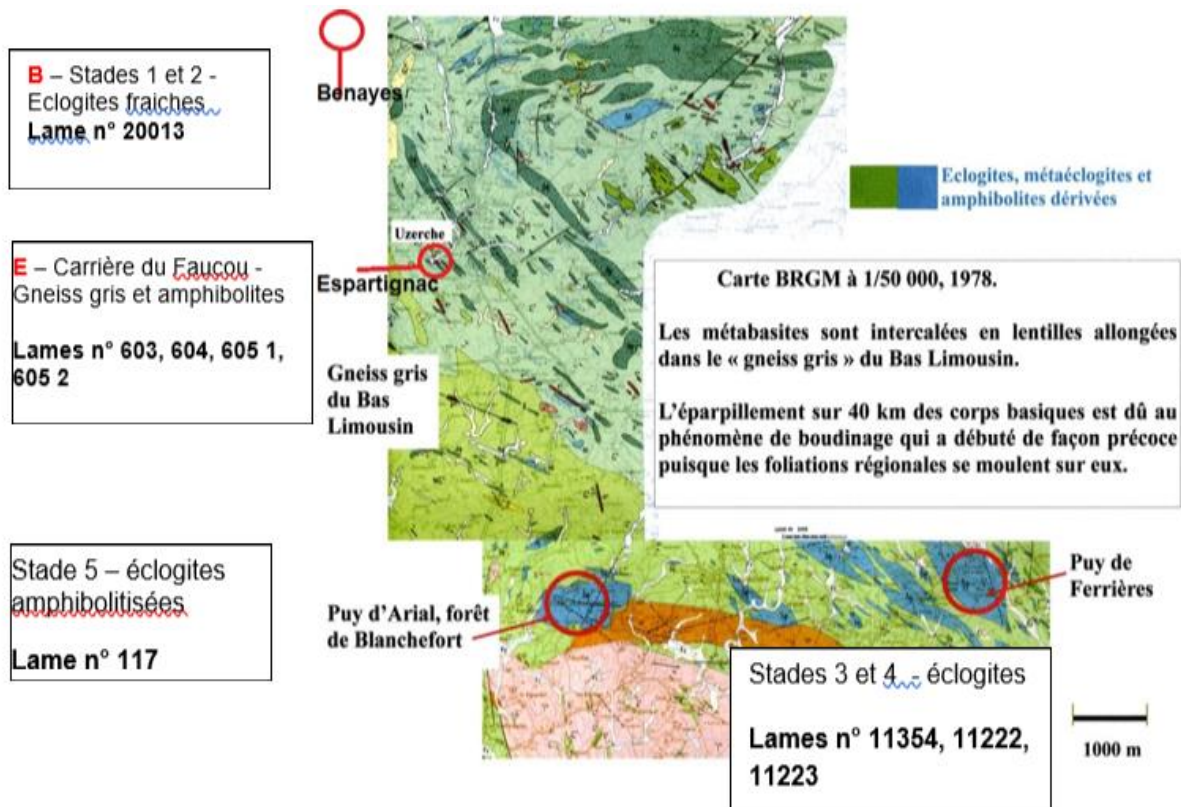


Figure 11 - Bloc diagramme centré sur le synclinal d'Uzerche, montrant le positionnement de l'essaim en arc des amphibolites et métaéclogites. D'après Lamouille, 1979

2.1 . Gneiss du Bas Limousin sous-faciès à cyanite et sillimanite, et amphibolites indifférenciées – Espartignac, carrière du Faucou

figure 12 – carte de localisation : voir aussi figure 10



La carrière est sur la limite entre une lentille d'amphibolite et la vaste zone des gneiss plagioclasiques, rattachés au « **groupe Bas-Limousin** » ζ^2 , ζ^{1-2} . Espartignac est en bordure du synclinal d'Uzerche et de la région de la grande masse de lentilles d'origine éclogitique interstratifiées dans les gneiss lités. Voir le bloc diagramme de la **figure 11**, tiré de la thèse de B.Lamouille.

L'intérêt exceptionnel de la carrière vient de sa position à cheval sur la limite entre un corps de roche métamorphique basique, une lentille d'amphibolite, d'une part, et la vaste zone des gneiss migmatitiques de type Uzerche, à disthène et sillimanite, d'autre part. La lentille fait partie des très nombreux corps amphibolitiques en essaim autour du synclinal d'Uzerche, et enclavés dans la vaste zone du *gneiss gris* du Bas Limousin.

Le site est réputé pour les faciès variés de ces gneiss plagioclasiques qu'il livre à l'observation, dont celui à faciès oeilé de métatexites³ de type Vigeois et Uzerche, à cyanite et sillimanite, exclusivement sous sa forme de fibrolite. Le gneiss a fait l'objet des prélèvements dont sont issues les lames **605 n°1** et **2**, ainsi que, partiellement, **603**.

Les lames **604** et partiellement **603** sont représentatives du faciès amphibolite indifférenciée (on ne peut pas démontrer que ce sont des métaéclogites).

2.2. Eclogites et amphibolites

Les éclogites dites « fraîches », ou à peine rétro-morphosées de stade 1 à 2, ont été échantillonnées sur le site de Lavergne sur la commune de Benayes, voir **figure 10** ci-dessus, objet de la **lame n° 20013**.

Les éclogites rétro-morphosées de stade 3, 4 ont été recueillies sur le site patrimonial du Puy de Ferrières, représenté tout à fait en haut de la carte de la **figure 4**, et sur la **figure 10**. Ce sont les lames **11 354**, **11 220** à **11 223**.

Les éclogites amphibolitisées dans le stade 5 ultime ont été prélevées sur le site du Puy d'Arial, en forêt de Blanchefort, voir **figure 10**, objet de la **lame 117**.

³ **Métatexite** : dont la structure est déterminée par un début très partiel de fusion, ou anatexie.

Guide 1 M – Principaux minéraux des schistes et gneiss dans le métamorphisme régional : le cas du Bas Limousin

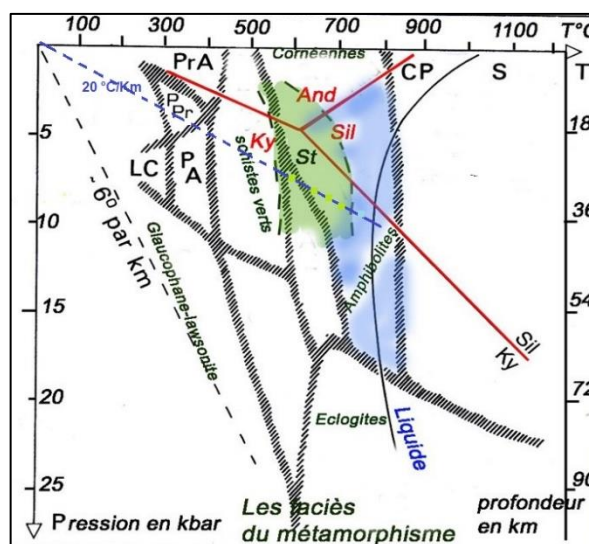
Les réactions qui se produisent sur une roche, par exemple une roche sédimentaire, quand la pression et la température augmentent par suite d'un enfouissement ou d'une subduction, sont très variées. Le métamorphisme observable dans le Bas-Limousin, est dit **régional**. Il s'est produit depuis la fin de l'Ordovicien jusqu'à la limite Dévonien/ Carbonifère, sur des roches du Paléozoïque inférieur jusqu'au tard-Précambrien. « Régional » implique qu'il s'est produit sur de grandes étendues et à des profondeurs telles que la pression a atteint des valeurs de plusieurs kilo bars. Il s'est produit aussi pendant un temps très long, suffisant pour enregistrer des événements tectoniques. Ceux-ci ont déformé les roches, et la structure de la roche métamorphique constitue une archive de ces déformations et de leur histoire. Ces déformations peuvent se produire avant le maximum d'intensité du métamorphisme, ou pendant ce maximum (déformation syn-métamorphique) ou elles peuvent être postérieures.

La fonction qui relie l'augmentation simultanée de la pression et de la température quand la profondeur augmente, porte le nom de géotherme. Après exhumation, il se traduit sur le terrain par la variation de l'intensité du métamorphisme, en fonction de la distance au cœur de la région métamorphique : c'est le « gradient métamorphique ».

Dans le cas de la région Bas Limousin, ce gradient est dit **Barrowien** : il est d'intensité intermédiaire dans l'échelle des gradients : **figure 1**.

figure 1

Diagramme d'Eskola. Diagramme pression température et disposition des faciès définis par Eskola dans ce diagramme. Le géotherme à 20°C/Km, typique du Barrowien, est en tirets bleus. La trajectoire du métamorphisme prograde du Bas Limousin suit de près le géotherme indiqué, et traverse successivement le faciès des schistes verts, puis brièvement celui des amphiboles et épidote et enfin le faciès des amphibolites (zone en bleu sur la figure), traversé par la ligne du solidus (anatexie). La zone d'apparition de la staurolite est indiquée en vert.



Dans le graphique pression/température des faciès, établi par Eskola, quand la température augmente, on traverse d'abord entre 400 et 550°C le faciès des schistes verts (SV) pour entrer dans le faciès des amphibolites, subdivisé en faciès des amphibolites s.s. (A) et celui des amphiboles et épidotes (AE). La frontière entre les deux faciès est très bien établie sur le plan expérimental, et varie peu avec la pression, de 550°C à 560°C pour une pression passant de 4 à 8 kbar !

La progression se traduit par le franchissement de seuils détectables dans la composition minéralogique de la roche métamorphisée, bien que la composition chimique reste invariable (au taux de H₂O près). En effet, au-delà de 400°C, cette composition minéralogique est bouleversée, et fait apparaître, et aussi disparaître, successivement de nouveaux minéraux bien distincts de ceux caractérisant au départ les sédiments. Compte tenu du gradient, ces seuils sont représentés sur la carte géologique par des lignes virtuelles qu'on nomme **isogrades** : exemple, dans notre cas, l'isograde de la staurolite.

Les nouveaux minéraux qui apparaissent près du seuil de 550°C, sont les trois silicates d'alumine isomorphes, de formule Al₂SiO₅. Mais seuls entrent en ligne de compte la **kyanite (Ky)** et la **sillimanite (Sil)** dans le cas Barrowien du Bas Limousin, caractérisé par des pressions supérieures à 5 kbar (voir

figure 1). Ils sont accompagnés par la **staurolite**, dans un domaine de température restreint entre 550°C et 700°C. Ces minéraux indicateurs sont - ou ne sont pas - associés aux minéraux standards que sont les **grenats**, le quartz, les feldspaths, les micas, les amphiboles, les épidotes et les micas : voir en annexe, le **tableau des minéraux principaux** du métamorphisme pour les schistes et gneiss du Bas Limousin.

Les assemblages (paragenèses), très variés, dépendent de la composition initiale c'est-à-dire de la nature du protolithe. Qu'en est-il du Bas-Limousin ?

La discussion qui suit est limitée aux gneiss **paradérivés**, majoritaires dans le Bas Limousin, dans lesquels de nombreux corps amphiboliques sont intercalés⁴

1. Gneiss paradérivés :

Ces gneiss plagioclasiques sont massivement répandus sur toute l'étendue des feuilles de Tulle et d'Uzerche. Autrefois dénommés gneiss gris du Bas Limousin, et désignés sur les feuilles sus-nommées par les symboles ζ_{1-2} et ζ_2 . Leurs protolithes à prendre en compte, sont majoritairement des grauweekes, c'est-à-dire des roches sédimentaire ou volcano-sédimentaires lithiques banales, avec parfois des termes plus riches en argile (« shales »). Les protolithes sont d'âge paléozoïque inférieur ou précambrien terminal.

Dans ces conditions, la silice étant toujours en excès, les paragenèses sont riches en **quartz**, et font apparaître dans l'ordre de croissance de la température maximale atteinte :

- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - chlorite primaire et apparition de la biotite - feldspaths, biotite, chlorite, et apparition de la muscovite et de la pyrophyllite, + feldspaths | } | Faciès des schistes
verts |
| <ul style="list-style-type: none"> - biotite, muscovite et pyrophyllite et disparition du chlorite primaire, + feldspaths - biotite, muscovite et apparition du grenat almandin et de la staurolite. Disparition de la pyrophyllite remplacée éventuellement par la cyanite. | } | Du faciès des
schistes verts à
celui des
amphibolites |
| <ul style="list-style-type: none"> - biotite, muscovite, grenat almandin, staurolite, cyanite + plagioclase. Début de la déshydratation - muscovite, grenat, cyanite, disparition de la staurolite, apparition de la sillimanite et du feldspath potassique : orthose. + plagioclase. Déshydratation complète | } | Faciès des
amphibolites |

2. La « règle des phases » :

Pour une composition chimique donnée, il existe un nombre limité de minéraux en équilibre pour un couple donné des paramètres pression et température. Ce nombre est régi par une loi universelle et très générale, la « **règle des phases** », phase désignant dans le cas présent les minéraux. La loi relie le nombre **n** de constituants indépendants, c'est-à-dire des oxydes participant à la composition chimique d'une part, au nombre des phases **Φ** d'autre part. Les oxydes courants à prendre en compte ne sont guère plus de sept et sont les suivants :

SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, CaO, MgO, FeO,

⁴ L'autre type de gneiss est celui des orthogneiss, comme les leptynites d'Albussac, de Vergonzac et Tulle, celles d'Aubazine, ainsi que les embréchites de Cornil et Chameyrat.

La règle des phases s'énonce ainsi :

$$\Phi = n + 2 - \omega$$

Où ω est la variance du système, c'est-à-dire la dimension dans le diagramme P/T du domaine d'existence de la paragenèse considérée. En général ce domaine occupe une certaine surface et la variance $\omega = 2$, si bien que le nombre de minéraux de l'assemblage est exactement égal à celui des constituants.

3. Quelques Exemples simples :

A. Cas où la variance est de 2, ou système **divariant** :

Le protolithe est une pélite saturée en silice, avec Al_2O_3 , K_2O , MgO et FeO . Il y aura

- dans le faciès des schistes verts, possibilité d'assemblages à 5 minéraux, par exemple :

Quartz, biotite, muscovite et pyrophyllite, ainsi que chlorite

Ou,

- dans le faciès des amphibolites, pour une température plus élevée, l'autre assemblage à 5 minéraux suivant :

Quartz, biotite, muscovite, grenat et staurolite

B. Cas où la variance est de 1, ou système **monovariant** :

Pour l'illustrer prenons d'abord le cas d'un corps dont la composition serait exclusivement le silicate d'alumine Al_2SiO_5 , indicateur essentiel du métamorphisme. Il lui correspond trois minéraux possibles, isomorphes, c'est à dire ne différant les uns des autres que par la structure cristallographique : l'andalousite (**And**), qui n'existe à l'état stable qu'aux pressions inférieures, et aux plus hautes pressions la cyanite (**Ky**) et la sillimanite (**Sil**), cette dernière pour les plus hautes températures. Leurs domaines de stabilité sont définis par trois droites sur la **figure 2**, qui convergent en un point dit point triple (P.T.).

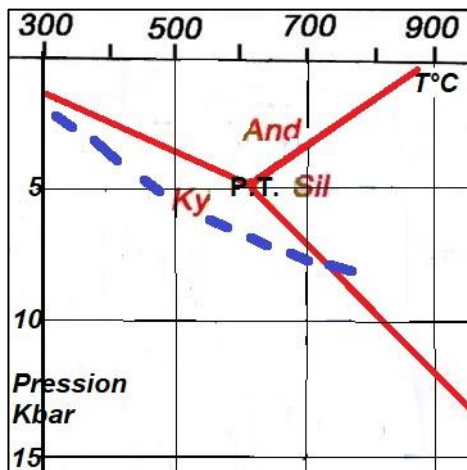


figure 2 : diagramme dans l'espace pression/température, montrant les domaines de stabilité des trois isomorphes des silicates d'alumine. Ces domaines sont délimités par des droites convergeant vers le point triple. Le long de chaque droite frontière, deux minéraux peuvent coexister, par exemple cyanite et sillimanite. Les trois droites convergent vers le point triple **P.T.**, à 5 kbar et 550°C. La courbe en tirets bleus est un exemple de trajectoire métamorphique dans l'espace pression/température, qui sort du domaine de stabilité de la cyanite en venant recouper la frontière avec la sillimanite.

Les trois isomorphes mettent en œuvre dans leurs chaînes la même molécule Al_2SiO_5 . Il n'y a donc qu'un seul constituant, au sens des molécules chimiques. La règle des phases pour $n=1$, a plusieurs solutions :

- La solution la plus générale est celle d'un domaine à une phase. Alors la règle donne $\omega = 2$, c'est-à-dire que dans le domaine de la phase considérée (par exemple la cyanite), pression et température peuvent prendre indépendamment une large gamme de valeurs. Le système est **divariant**.
- Considérons maintenant un domaine à deux phases, comme la frontière cyanite/sillimanite. La règle donne $\omega = 1$ et si l'on se donne la pression, la température est contrainte à prendre la valeur particulière donnée par la droite. Le système est **monovariant**.
- Au point triple, la variance est nulle, mais c'est un cas qu'on rencontrera difficilement sur le terrain !

Pour rendre cet exemple plus réaliste, prenons un mélange où la silice est en excès et l'alumine abondante, comme dans un grauwaacke banal. Avec un peu de potassium K_2O . Les quatre constituants sont :

La molécule Al_2SiO_5 , SiO_2 , Al_2O_3 et K_2O

A haute température et moyenne pression, le système à l'équilibre est dans le champ divariant de la cyanite, et on s'attend à observer $\Phi = 4+2-2 = 4$ phases (minéraux). Il y aura par exemple :

- aux côtés de la cyanite et du quartz, de la muscovite et du grenat almandin, s'il y a un peu de fer.
- Sinon, aux côtés de la cyanite et du quartz, muscovite et plagioclase, s'il y a un peu de sodium et de calcium.

Mais si la température atteint la limite entre les domaines de la cyanite et celui de la sillimanite (**figure 2**), alors le système à l'équilibre est monovariant et on pourra observer $\Phi = 4+2-1 = 5$ phases (minéraux), par exemple :

- aux côtés de la cyanite et de la sillimanite, du quartz, de nouveau de la muscovite, et un plagioclase. La biotite a disparu (réaction de déshydratation)
- Ou, aux côtés de la cyanite et de la sillimanite, du quartz, de nouveau de la muscovite, et le feldspath potassique, en équilibre avec la muscovite (réaction de déshydratation).

En réalité, il y a de nombreux assemblages possibles, en fonction de la composition du protolithe. D'autre part, au voisinage de l'anatexie, la roche commence à se migmatiser et les conditions d'équilibre parfait ne sont pas toujours remplies.

Ces derniers cas sont à prendre en compte pour interpréter la situation que nous avons rencontrée dans la carrière du Faucou, en plein cœur des gneiss à plagioclase du synclinal d'Uzerche, au nord de notre région métamorphique du Bas Limousin : lames 605 n°1 et 2.

Voir page suivante le **tableau des minéraux principaux du métamorphisme, pour les schistes et gneiss du Bas Limousin**.

Tableau des minéraux principaux du métamorphisme pour les gneiss du Bas Limousin

minéral	Formule chimique	Al	Al/Si	Ca	K	Na	Mg	Fe	(OH)2
Anorthite An	[Si ₂ Al ₂ O ₈]Ca	++	1	X					
Albite Alb	[Si ₃ Al O ₈]Na	+	1/3			X			
Orthose Kfs	[Si ₃ Al O ₈]K	+	1/3		X				
Muscovite Mus	[Si ₃ Al O ₁₀](OH) ₂ K Al	++	2/3		X		prehnite		X
Biotite Bt	[Si ₃ Al O ₁₀](OH) ₂ K (Mg, Fe) ₃	+	1/3		X		X phlogopite	X	X
Chlorite Chl	[Si ₃ Al O ₁₀](OH) ₂ (Mg, Fe, Al) ₃ - Mg ₃ (OH) ₆	+	1/3				X	lepidomélane ±	XX
Pyrrophyllite Prl	[Si ₃ O ₁₀](OH) ₂ Al ₂	+	1/2						X
Silicates d'alumine Andalousite And Cyanite Ky Sillimanite Sil	} Al ₂ SiO ₅	++	2						
Cordierite Crld		+	4/5				X	X	
Staurolite St		++	2					X	X
Grenats Grt		+	2/3				X pyrope	X almandin	
	[SiO ₄] Al ₂ - M ₃ [SiO ₄] Ca ₃ - M ₂	0	0	X grossulaire					
Epidote Ep	[Si ₃ O ₁₂] (OH) Ca ₂ Al ₂ Fe	+	2/3	X				X(pistachite)	
Actinote, Act Tremolite Tre	[Si ₃ O ₁₂] (OH) ₂ Ca ₂ (Mg, Fe) ₅	0	0	X			X trémolite	X	
Hornblende Hbl	[Al ₂ Si ₆ O ₂₂](OH) ₂ Na Ca ₂ (Mg, Fe) ₄	+	1/3	X		X	X	X	X

Commentaires au tableau. **Colonne 3** : degré d'importance du cation Al. **Colonne 4** : rapport Aluminium /silicium dans le minéral. **Colonne 5 à 9**: présence ou absence du cation de la colonne dans le minéral. **Colonne 10** : présence ou absence d'eau dans le minéral.

Guide N° 2 M : diagrammes ACF-A'KF

Principes et exemple d'application dans le métamorphisme régional prograde

Ce guide est à utiliser après avoir complètement assimilé les chapitres III et IV des Entretiens du métamorphisme.

1. Principes.

Les diagrammes **ACF-A'KF**, éventuellement complétés par le diagramme **AFM**, jouent pour les roches métamorphiques un rôle similaire à celui des diagrammes de Streckeisen pour les roches magmatiques, mais ils sont sensiblement plus complexes à maîtriser et à interpréter. Ils s'appliquent aussi bien aux roches para-dérivées qu'aux ortho-dérivées. Leur utilisation stricte nécessite la mesure des compositions chimiques en termes des « **constituants** », qui sont les oxydes des minéraux significativement présents dans la roche :

Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, CaO, FeO, et MgO, ...

...à l'exclusion de **SiO₂** qui est toujours implicite.

Ces valeurs des « **constituants** » sont ensuite associées par des calculs assez complexes, et transformées en coordonnées dans le système triangulaire des diagrammes : voir plus loin, au paragraphe 2 de ce guide, la signification qu'il faut attacher aux sommets des triangles. L'utilisation qui peut en être faite est également assez différente de celle des diagrammes de Streckeisen, puisqu'il s'agit alors d'une part d'identifier le **protolithe** de la roche métamorphique, d'autre part de contribuer à placer la roche dans le diagramme P-T des **faciès** et sous-faciès, au sens d'Eskola, en faisant apparaître les « **phases** » de la paragenèse, c'est-à-dire les espèces minérales en équilibre dans la roche métamorphique, lors de sa formation.

Notre utilisation de ces diagrammes, au séminaire de pétrographie de la SAGA reste modeste et ne s'applique qu'à des cas simples où la composition minéralogique de la paragenèse ayant été établie, il devient possible de placer la roche à l'intérieur d'un des cinq principaux domaines de protolithes couverts par les diagrammes : voir les figures ci-jointes.

Nous illustrerons ce cas simple par un exemple dans le second paragraphe, tiré d'un cas de roche ortho-dérivée.

De plus, ce cas nous permettra de signaler un piège à éviter dans l'interprétation : les phases (espèces minérales de la paragenèse) apparaissant lors du métamorphisme régional prograde résultent de profondes transformations topo-chimiques des minéraux initiaux du protolithe, et sont le plus souvent très différentes de ceux-ci. L'assemblage qui en résulte (le sous-faciès) obéit à des lois d'équilibre chimique et thermodynamiques strictes, dépendant des conditions de pression et de température. Mais dans le cas des ortho-dérivées, ces *phases* peuvent aussi sembler plus ou moins proches des minéraux initiaux. En réalité les minéraux initiaux ont toujours été substitués en totalité, même s'ils semblent de même nature. En général, la structure et la texture des nouvelles *phases* font bien apparaître la différence : c'est pourquoi on les désigne structurellement par le terme de phénoblastes.

2. Construction des diagrammes ACF - A'KF.

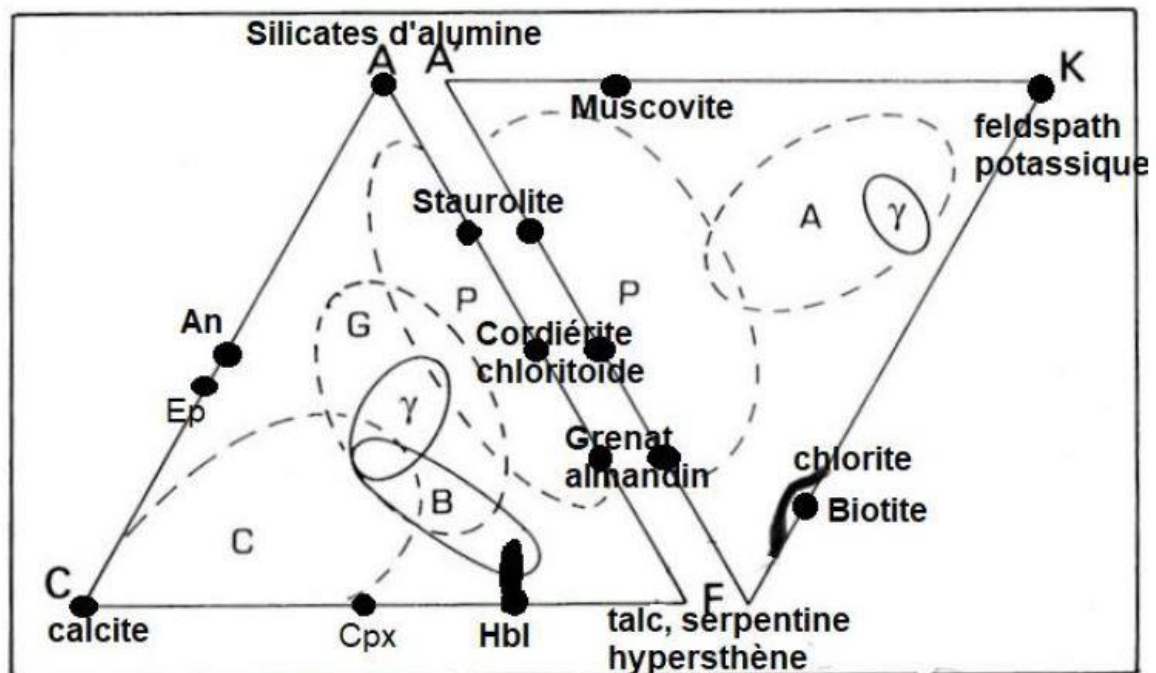
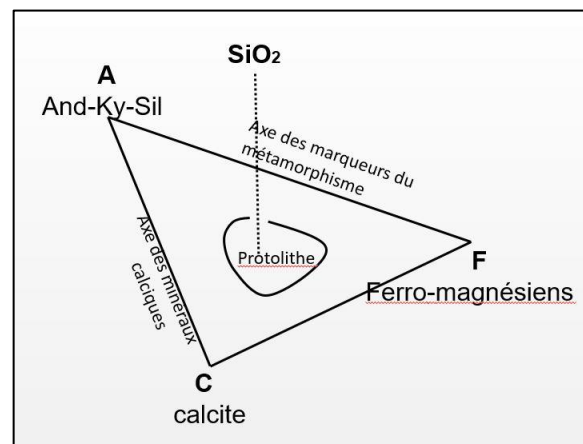
Les deux diagrammes **ACF** et **A'KF** se complètent mutuellement. Les *phases* des différentes paragenèses possibles apparaissent sur les sommets et les côtés.

Le premier diagramme est **ACF**, dans lequel les alcalins, Na et K, ne sont pas pris en compte.

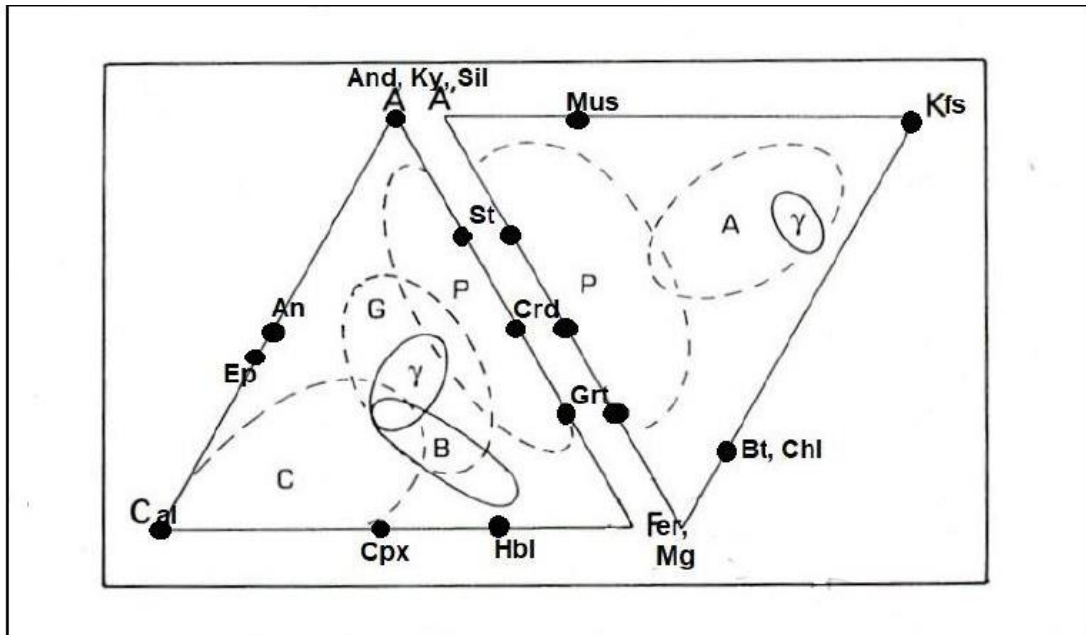
➔ Les concentrations prises en compte dans **ACF** sont donc corrigées des quantités d'albite et de feldspath potassique présentes dans la roche, de façon à bien faire apparaître, en les isolant, les **silicates d'alumine**, précieux indicateurs du métamorphisme.

- Le sommet **A** (A comme alumine) est celui des « **silicates d'alumine** » du métamorphisme, et donc regroupe **Andalousite**, **Cyanite** et **Sillimanite**.
- Le sommet **C** (C comme calcium) pour la **calcite**
- Le sommet **F** (F comme fer) pour les **ferro-magnésiens**

Dans les cas très fréquents de saturation en silice, où le **quartz** est exprimé dans la roche métamorphique, ce dernier est implicite et peut être considéré comme le quatrième sommet d'un quadrilatère, le point représentatif de la roche étant représenté par sa projection sur le triangle **ACF** ou **A'KF**.



Diagrammes ACF-A'KF avec mention explicite et abrégée des minéraux :



La définition de son extrémité, l'axe **AC** porte les minéraux à fort caractère calcique : **An**, l'**anorthite** et **Ep**, l'**épidote**.

De même, l'axe **CF** porte **Cpx**, le **clinopyroxène** et **Hbl**, la hornblende qui est l'une des branches de la vaste famille d'amphibole.

Enfin l'axe **FA** porte successivement **Grt**, le **grenat** almandin, **Crd**, la **cordiérite** avec **Cld** le **chloritoïde**, et enfin **St** la **staurolite**. On trouve donc sur cet axe des indicateurs ou marqueurs bien connus du métamorphisme.

Concernant maintenant les domaines des différents protolithes :

B = basaltes et andésites, γ = granitoïdes, A = arkoses, P = pélites, G = grauwackes, C = roches carbonatées

Le second diagramme, **A'KF**, complète l'information donnée par **ACF** en introduisant cette fois les alcalins, par le **potassium** qui est le plus important quantitativement.

→ Cette fois, les concentrations prises en compte dans **A'KF** sont corrigées de la présence des minéraux **An**, **Cpx** et **Amp** déjà pris en compte par **ACF**, mais en introduisant tous les minéraux à base de potassium, comme les micas, **biotite** et **muscovite**, et **Kfs** le feldspath potassique.

- Le sommet **A'** (A comme alumine) est comme pour **ACF**, celui des « **silicates d'alumine** » du métamorphisme, et donc regroupe **Andalousite**, **Cyanite** et **Sillimanite**.
- Le sommet **K** (pour potassium) pour **Kfs** le feldspath potassique
- Le sommet **F** (F comme fer) pour les **ferro-magnésiens**

3. Exemple d'utilisation des diagrammes ACF-A'KF.

Nous prenons comme exemple la leptynite à albite, $\lambda^3\text{alb}$, dite d'Albussac (Bas Limousin), dont deux lames **601** et **602** sont décrites dans l'Atlas.

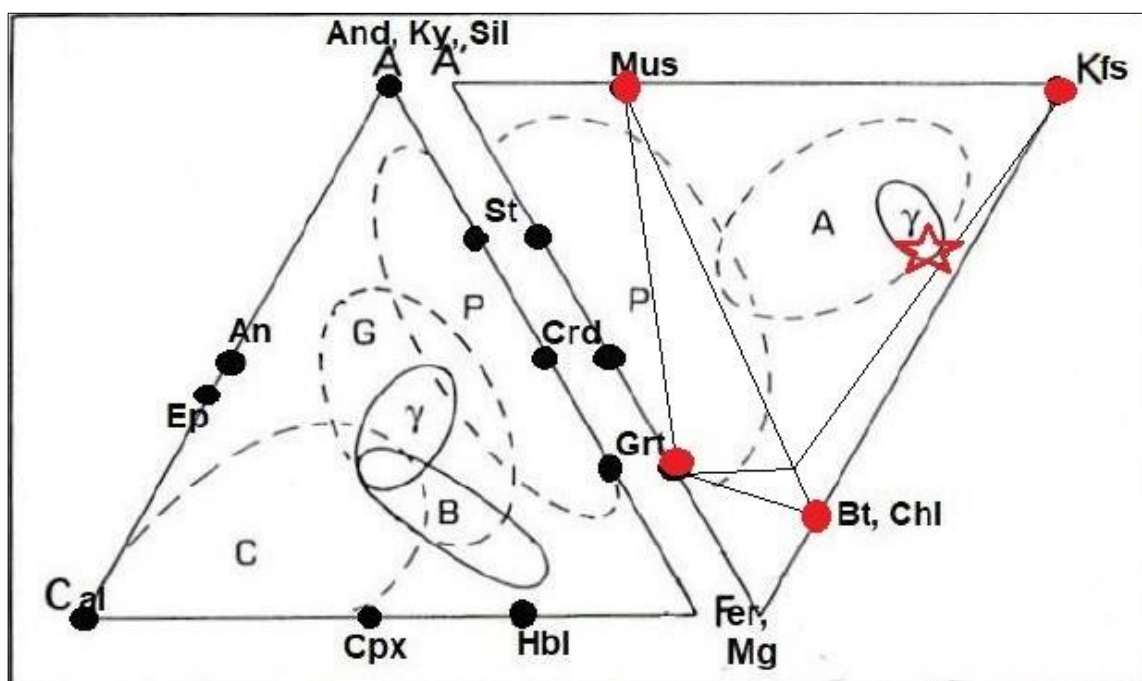
Cette leptynite est bien décrite par quatre **phases**, en plus du quartz qui est en excès : **Kfs** (feldspaths alcalins, en fait principalement sodique), **Bt** et **Mus**, **Grt**.

A mettre en relation avec les **constituants**, qui sont au nombre de quatre: SiO_2 , Al_2O_3 , FeO et K_2O (on ne représente pas le sodium dans ces diagrammes).

La simplification vient de ce qu'en première approximation, il n'y a ni minéral calcique, ni silicate d'alumine (au sens strict) apparaissant dans la paragenèse : dans le triangle ACF, la roche n'est représentée que par un point sur l'axe FA, celui du grenat. Dans le diagramme A'KF, à cause du poids du **constituant** potassique, apporté par les deux micas et le feldspath potassique minoritaire, le protolithe s'inscrit naturellement dans le domaine étroit noté γ , des granitoïdes ou de leurs équivalents volcaniques (rhyolite/dacite).

En revanche, on perçoit la limite de la méthode, puisque dans le cas de cette leptynite, le feldspath majoritaire est l'**albite**, le plagioclase sodique, qui n'est pas pris en compte dans ces diagrammes.

Bien entendu, les **phases** apparaissent avec une structure (ou texture) de phénoblastes : voir l'encadré dans le premier paragraphe



D'autres exemples sont décrits dans l'ATLAS, pour l'orthogneiss **10106**, les leptynites **114**, **120**, **601**, **602**, et pour le micaschiste **111**.

Guide n°3 M pour l'étude des schistes et micaschistes de la série des métaGrauwackes et métapélites.

Guide méthodologique pour l'étude des roches métamorphiques de type schistes en complément de l'entretien n° II et de son petit ATLAS des textures et microstructures

Pour aborder une roche métamorphique du type schistes, micaschistes et schistes à nodules ou à taches, dans les séries classiques métaGrauwackes/métapélites, on peut dérouler la séquence ci-dessous. Elle était déjà abordée et illustrée dans les **Entretiens n°II et n°VII**, suivis en annexe de galeries de clichés, sur plusieurs cas empruntés au Bas Limousin.

La méthodologie a été appliquée et approfondie pour le présent ATLAS, par l'étude des schistes et micaschistes dans la mésozone du Bas Limousin, et elle est illustrée par les lames 111, 211, 509, 607.

L'observation de ce type de roches métamorphiques se prête bien à la restitution par le **dessin**, comme aide à la mise en évidence des types de structure et de texture énumérés dans la méthodologie : quatre exemples sont donnés après le tableau ci-dessous :

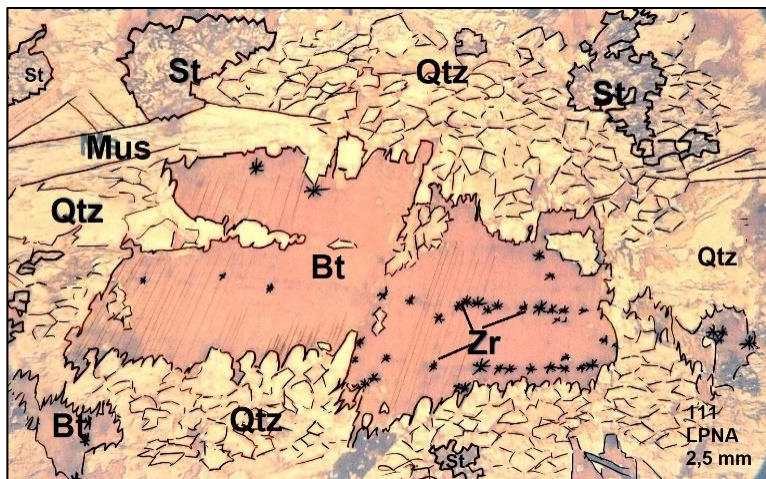
Séquence méthodologique

Observation d'un type de structure ou de texture		Entretien n°II, pages	Petit atlas de l'Entretien n°II, pages
observer les témoins (les reliques) (S0) de la structure sédimentaire du protolithe ?		10 et 11	6
distinguer les linéations S0 , des linéations dues aux déformations S1 , S2 , ...		10 et 11	
La roche est-elle plissée ? Caractériser : direction du plan axial... Foliation ?		11 13 et 14	
Y a-t-il eu dissolution et recristallisation du quartz ? Zones « abri de pression » ou « d'ombre ». Disposition en pavage polyédrique .		11 à 14 17	
Modulation spatiale de la déformation, apparition de la crénulation ? Formation de filets de quartz recristallisé ?	14	15 16 à 16	17
Nature, dimensions et morphologie des différents blastes ⁵ : porphyro---, grano---, lépido---, némato---blastiques. Poeciloblastes		23 et 24	
Pour chaque type de blastes, décrire la schistosité interne Si ; est-elle rectiligne ou courbe ? orientation par rapport à la direction de la schistosité externe Se , direction générale de la déformation.		17 à 20 21 et 22	6

⁵ Blaste : βλαστος = bourgeon en grec. Un phénoblaste est un minéral dont la taille dépasse de beaucoup celle de la majorité des minéraux constitutifs de la roche.

Les blastes sont-ils moulés ? Anastomose : comment les lignes de flux moulent-elles les blastes ? Sens de rotation induite par la contrainte de cisaillement. Les blastes sont-ils déformés ? Texture « fish-eye »		20 à 22 20	7 et 8 9 8
La matrice et ses lignes de flux, dessinant la Se = schistosité externe. Le problème du raccordement : comment les lignes de flux se raccordent-elles à la Si d'un blaste ?		19 à 21	6, 7 et 9
A partir de ces données réunies, établir la nature du protolithe, l'intensité du métamorphisme et l'ordre d'apparition des principaux constituants de la nouvelle pargenèse, en lien avec la cinématique de déformation. <i>Ante-cinématique ? Syn-cinématique ? Post-cinématique ?</i>		Pages 19 à 23	Pages 7, 9

Quatre exemples d'utilisation du dessin : les contours des blastes sont surlignés sur un calque superposé au cliché couleur LPNA.



- **Premier exemple.**

Micaschiste à biotite et grenats tf p3x, échantillonné dans la zone d'apparition de la **staurolite**. lame 111. Echelle : 2,2 mm à la base.

Les grandes biotites sont post-cinématiques et se sont développées sur le pavage de grains quartzo-feldspathiques. Ils sont ponctués de nombreux zircons, (Zr sur la biotite) bien alignés dans le plan **S0**, dont la trace est horizontale sur le dessin.

Ces zircons préexistent à ces biotites de seconde génération et sont solidaires des lits quartzo-feldspathiques. Sur le dessin, les Zr avec leur auréole de pléochroïsme, sont symbolisés par un astérisque. Les **staurolites (St)** sont syn-cinématiques.

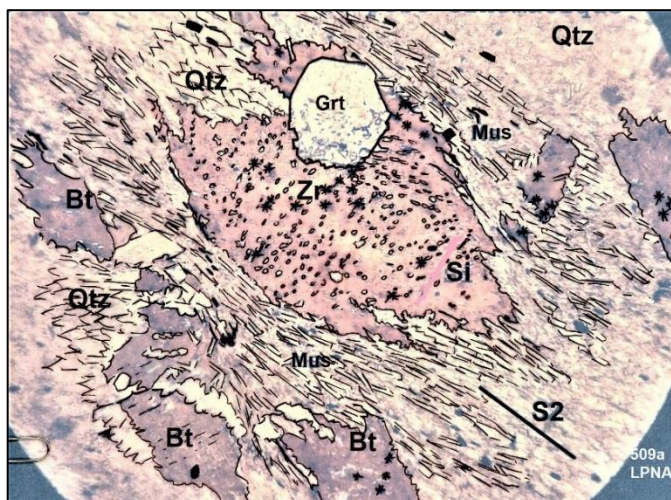
- Second exemple.

Schiste tacheté, sur l'isograde de la **staurolite**. **Lame 509a**.

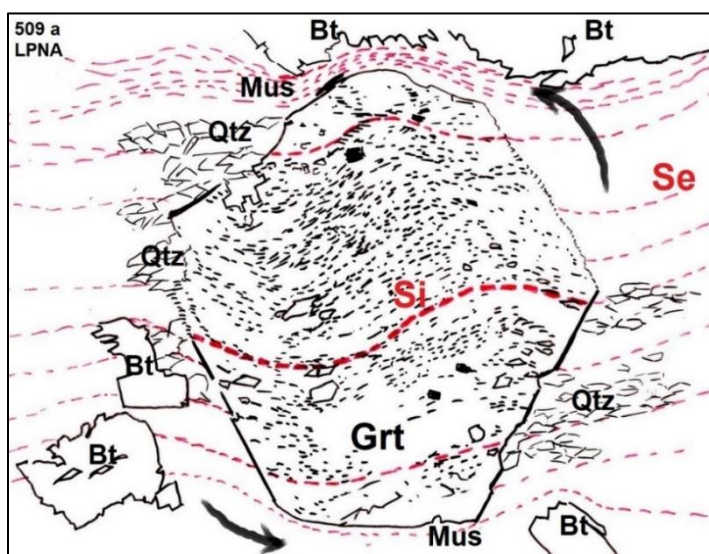
Echelle : 2,8 mm à la base.

La schistosité interne **Si** de la grande **Bt** est oblique par rapport à la direction générale **S2** de la schistosité, indiquée par la direction des faisceaux de microlattes de muscovite ou hydromuscovite (**Mus**). Une **zone abri** s'est formée à l'une de ses extrémités (en haut du cliché), où le quartz dissout a recristallisé en pavage polyédrique. Latéralement, dans les zones de hautes pressions, les lignes de flux à microlattes de **Mus** sont comprimées.

Les biotites, dont la croissance en début de phase prograde est rapide, enregistrent et figent en interne un premier état de la schistosité. Dans les phases ultérieures, elles sont mises en rotation par la contrainte cisailante, déformées en « **fish-eye** » et substantiellement érodées. Le **grenat** est syn-cinématique.



- Troisième exemple.



Dessin sur calque :

Schiste tacheté, sur l'isograde de la **staurolite**. **Lame 509a**. **Echelle 2 mm à la base**.

Les nombreux microlites de quartz inclus au cours de la croissance dans ce **grenat** almandin reproduisent fidèlement la déformation géométrique de la schistosité interne (**Si**) pendant l'épisode le plus intense du métamorphisme prograde. Le raccordement des lignes de flux internes et externes à la périphérie du grenat est parfait : le grenat est syn-cinématique. L'épisode est marqué par l'action d'une contrainte cisailante qui

façonne les lignes de flux et les moule autour des phénoblastes en formation, comme le **grenat**. Dans la partie supérieure, pris en tenaille entre le grenat et une **biotite**, le faisceau est fortement resserré. C'est une zone de haute pression. En LPA elle est vivement colorée par les teintes de Newton des micropaillettes de **muscovite** (ou d'hydromuscovite). Le **quartz** est expulsé de ces zones et s'abrite par recristallisation sur les bords moins contraints du grenat, en pavage polyédrique. Le tracé permet de reconstituer le sens de la rotation du grenat sous l'action du couple de cisaillement : flèches arrondies. Voir l'explication ci-dessous.

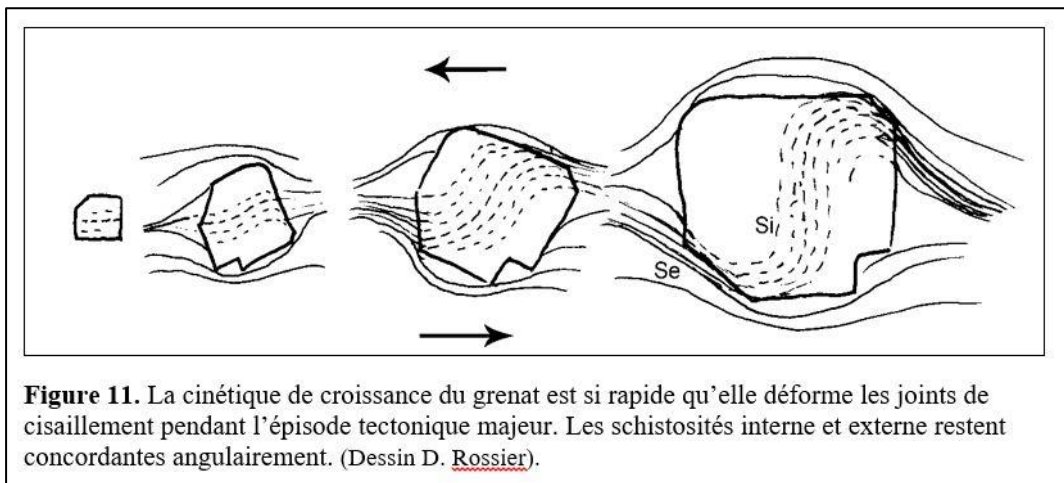
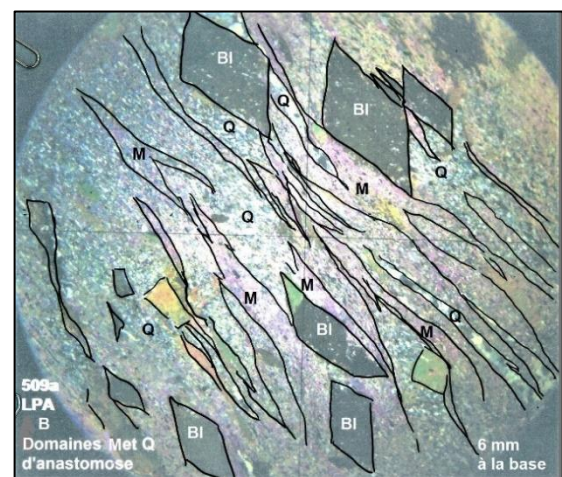
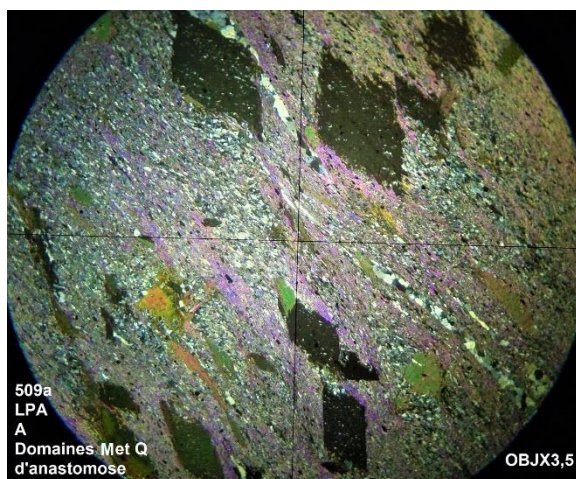


Figure tirée de : Entretien sur le métamorphisme n° II. *Structures et textures des roches métamorphiques*. Le grenat en début de croissance, à gauche, présente une schistosité linéaire, parallèle à la schistosité externe.

- Quatrième exemple.

Schiste tacheté, sur l'isograde de la **staurolite**. Lamé **509a**. Echelle **6 mm** à la base.



En LPA, la modulation de la déformation se traduit par

- les domaines « **M** » de forte contrainte de cisaillement aux teintes de Newton vives (phyllites). Lettre **M** pour micas.
- les domaines « **Q** » de plus faible contrainte, refuges du **quartz**.

Les contours des blastes de **Bt** et des domaines « **M** » et « **Q** » de déformation sont surlignés sur un calque superposé au cliché couleur LPA.

Tous les domaines sont étirés. Structure **lépidoblastique**.

Vocabulaire du guide méthodologique N°3 M

- **Paragenèse**
- **Anastomose.**
- **Modulation spatiale de la déformation**
- **MOULAGE**

Nota : les termes utilisés dans les articles en langue anglaise sont en italique.

Les minéraux à grains fins et ceux à gros grains peuvent appartenir au même assemblage de minéraux compatibles, c.à.d. s'étant formés dans les mêmes conditions de température et de pression : c'est la définition d'une **paragenèse**

Les feuillets de minéraux à grains fins (surtout phyllites) se forment simultanément avec les porphyroblastes. La roche étant soumise à une forte contrainte (compression et cisaillement) lors de l'épisode métamorphique, les feuillets viennent envelopper les porphyroblastes : c'est l'**anastomose**. Les minéraux à grains fins ont la capacité de nucléer promptement et de survivre dans des conditions de forte déformation. Leurs feuillets se concentrent dans les zones de forte contrainte : Il y a alors une **modulation spatiale de la déformation** (*deformation partitioning*). La préservation de sillages (*trails*) dans les porphyroblastes esquissant des microstructures préexistantes, comme des microplis et des litages, indiquent que le porphyroblaste remplace un égal volume des minéraux de l'ancienne matrice. En général les inclusions ont accompagné le minéral principal dans sa transformation.

Le moulage (*wrapping*) d'un porphyroblaste et l'anastomose par des minéraux en feuillets ne doivent pas être interprétés en termes de plus grande jeunesse des minéraux foliés. La relation résulte d'une croissance simultanée des minéraux, joint à la modulation spatiale de la déformation. Par exemple, la biotite et la sillimanite peuvent survivre dans des zones de fortes déformations, formant des feuillets qui sont écrasée sur/contre - et par conséquent anastomosés autour - des « gousses » (*pods*) de minéraux beaucoup plus solides comme le grenat ou la cordiérite, en croissance simultanée. Si la biotite ou la sillimanite existent également en inclusion dans les gousses/porphyroblastes, cela confirmera que tous ces minéraux participent à la même paragenèse (assemblage de minéraux compatibles). De plus aucune réaction n'apparaît entre l'inclusion et le porphyroblaste.

Par contre si le minéral en inclusion dans la « gousse » résistante, est fortement déformé ou partiellement remplacé par un minéral compatible avec des assemblages de plus basse température, l'hypothèse d'une réaction mutuelle peut être envisagée.

Guide N° 4 M – Les changements de phase à haute température dans les gneiss, par les "réactions ioniques"

Les réactions ioniques et le cas d'école des polymorphes des silicates d'alumine

Ce guide est largement inspiré par l'ouvrage « An introduction to metamorphic petrology. Bruce W.D. Yardley. 1990. Longman earth science series ».

Les guides n° 3M, 5M et 6M, offrent de nombreux exemples qui montrent comment les textures métamorphiques (morphologie intime des blastes et assemblage des blastes entre eux), sont en relation étroite avec les réactions métamorphiques. Par réactions métamorphiques, on entend les réactions qui font apparaître puis disparaître les minéraux du métamorphisme, minéraux marqueurs (ou index »), lors des séquences progrades ou rétrogrades.

Cela amène à poser la question suivante :

Les réactions métamorphiques sont-elles réellement progressives ?

En d'autres termes, peut-on observer des textures intermédiaires mettant en évidence que tel ou tel minéral marqueur a fait sa croissance à partir d'un groupe de réactants dont on sait a priori qu'ils réagissent ? Par textures intermédiaires, on désigne des textures de transformation partielle, inachevée, témoin d'une étape dans l'évolution prograde - ou rétrograde.

Une réponse peut être donnée pour les gneiss dits « *gneiss gris du Bas Limousin* », avec le cas d'école de la transformation de la **cyanite** en **muscovite** puis en **sillimanite**. Exemple remarquable, mais qui peut se généraliser à d'autres réactions.

On prévoit et on observe, en effet, que la **cyanite** en contact avec le **quartz** et en présence d'une phase fluide (H₂O), se transforme en **muscovite**.

Voir la **figure 1** tirée de nos observations sur le *gneiss gris du Bas Limousin*, dans le sous-faciès amphibolite à cyanite et sillimanite. Echantillon prélevé dans la carrière du Faucou (Espartignac, région d'Uzerche), lame 605, échelle 2mm à la base.

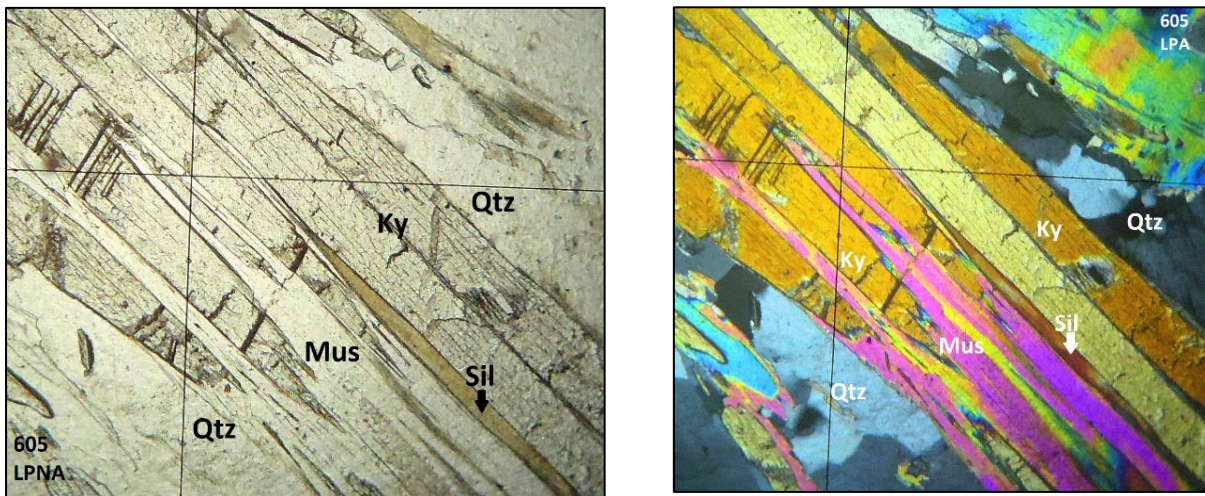


Figure 1. Les clichés LPNA et LPA montrent un faisceau de lattes pluri millimétriques de cyanite dont la transformation en muscovite en présence de quartz, n'a pas été achevée. De plus, l'un des néocristaux de muscovite a commencé sa transformation en sillimanite.

Or ces transformations ne peuvent pas s'expliquer classiquement, par un échange équilibré entre composants solides, puisqu'il n'y a pas localement (en contact) de réactant minéral susceptible d'apporter le potassium nécessaire à la muscovite ! Ce paradoxe a été résolu (Carmichael D.M. 1969⁶) par le concept de *réaction ionique*. Celle-ci est illustrée par la réaction ci-dessous :



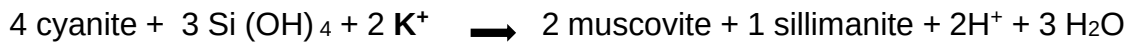
Réaction qui est rendue possible par l'apport d'ions K^+ grâce à la phase fluide de transport, Si(OH)_4 , qui circule dans les pores ultrafins entre cristaux. Dans la formulation quantitative de la réaction ci-dessus, la muscovite produite occupe à peu près le même volume que celui laissé par la cyanite et le quartz remplacés. D'autre part, l'élément **Al** n'a pas besoin d'être ajouté ou retiré, ce qui d'ailleurs ne serait pas possible à cause de sa très faible solubilité.

En fait, et dans le cas présent, il y a un grand nombre de *réactions ioniques* possibles de ce type. C'est surprenant et cela montre la puissance du concept de *réaction ionique*. A tel point que le quartz n'a même pas besoin d'être en contact direct avec la cyanite pour que la transformation se fasse, comme illustré par la **figure 1**. La raison tient dans une des réactions possibles, qui s'écrit :

⁶ Carmichael D.M., 1969. *On the mechanism of prograde metamorphic reactions in quartz-bearing pelitic rocks*. Contribution to mineralogy and petrology, 20.



Cette fois la silice est apportée dissoute dans le fluide de transport, sous la forme de Si (OH)_4 . Mais il y a plus ! Car la même réaction permet la transformation de la cyanite en sillimanite et la croissance de celle-ci, comme observé également sur la **figure 1**, par le mince filet de sillimanite qui s'est inséré entre muscovite et cyanite. La réaction est alors :



A ce stade on peut conclure que les réactions observées entre minéraux proches sont couplées aux échanges d'ions par diffusion par la phase fluide qui circule dans les pores entre cristaux et au mécanisme de dissolution/recristallisation du quartz. Elles expliquent in fine la transformation cyanite $\longrightarrow$ sillimanite : celle-ci n'est généralement pas directe mais passe par la muscovite.

Mais d'où viennent les ions ? En particulier les ions K^+ ?

En effet, le métamorphisme dont il s'agit est topochimique⁷, c'est-à-dire qu'il assure les transformations à toutes les échelles de la roche, tout en conservant la composition du protolithe. Dans le cas de la **figure 1** qui nous occupe, le seul minéral voisin qui peut apporter K^+ , est la muscovite elle même, par la réaction :



On voit qu'il s'agit d'un processus cyclique, en boucle, **figure 2**, dont les étapes sont :

- A. Une réaction s'effectue à la surface d'un minéral, avec modification locale de la composition
- B. Elle est équilibrée simultanément par une autre modification locale, mais à un emplacement voisin dans la roche.

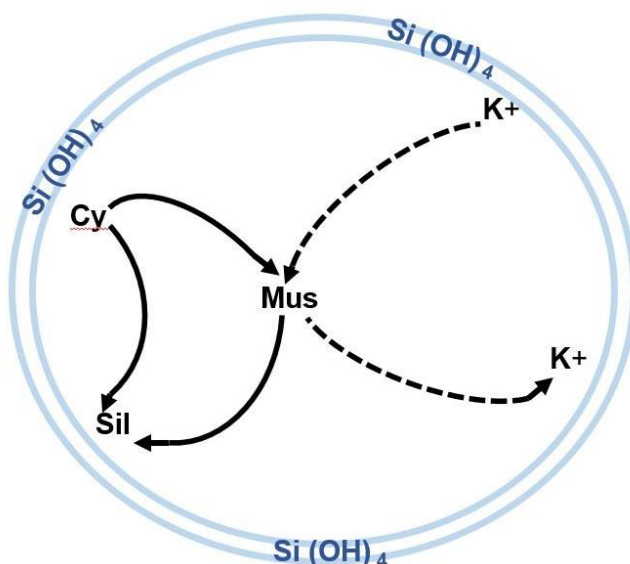


Figure 2 :

Cycle de transformation de la **cyanite** en **muscovite** puis en **sillimanite**, via des ions K^+ et grâce au transport à distance par une phase fluide silicatée Si (OH)_4

Dessin Dominique ROSSIER

⁷ Ou isochimique

Guide N° 5 M – Les différentes séries d'amphiboles. Application dans les amphibolites du métamorphisme régional

La localisation géographique et l'histoire géologique du vaste essaim d'amphibolites des deux feuilles Tulle et Uzerche sont exposées dans le chapitre localisations de l'introduction sur la série barrowienne du Bas Limousin.

Ce guide a pour but de donner des éléments de description sur la vaste et complexe famille des amphiboles (*amphibolos* = *ambigu*). Le simple examen au microscope polarisant autorise, en général facilement, à reconnaître une amphibole, au sens de la famille, dans une lame mince : voir à ce sujet l'entretien sur le métamorphisme N°III.

Mais, en général, il ne permet pas d'aller très loin dans son identification stricte. Le tableau ci-dessous donne les principaux caractères des sous-familles, que l'on nomme **séries**. Les séries sont décrites selon l'ouvrage : *détermination des minéraux des roches au microscope polarisant*, Marcel Roubault. Ed. Lamarre-Pointat, 1982.

Les séries qu'il faut bien connaître dans le cas du métamorphisme régional du Bas Limousin sont toutes **monocliniques**, et on retiendra principalement les suivantes, page 2 :

- Série de la cummingtonite (sans Al)
- Série de l'actinote (alumino-calcique)
- Série de la hornblende verte (alumino-calcique)
- Séries du glaucophane, de l'arfvedsonite et de la barroisite (toutes sodiques).
La dernière est à prendre en considération pour les métaéclogites : voir le **guide n°6M**.

Les amphiboles sont des inosilicates, silicates constitués de rubans d'alumino-silicates soudés par les cations habituels, notés **R** ci-dessous. Elles sont souvent décrites comme résultant de l'hydroxylation d'un pyroxène. Mais dans les roches métamorphiques la réalité est beaucoup plus variée et complexe. Elles sont témoin de la basicité ou même de l'ultra basicité du protolithe. Elles jouent un rôle essentiel dans le **facies A**, dit des amphibolites.

Caractères principaux des amphiboles⁸

$[\text{Si}_{4-x} \text{Al}_x \text{O}_{11} (\text{OH})] 2 \text{R} 14+2x$, Où **R** est un cation :

Na, (K), Ca, Fe⁺⁺, Mg, (Ti), Al, Fe⁺⁺⁺

⁸ D'après Roubault

Désignation Symétrie	Composition chimique	Morphologie	LPNA	LPA Ng-Np
orthorhombique	orthorhombique	orthorhombique	orthorhombique	orthorhombique
Anthophyllite	Ferromagnésien Pas d'Al Schistes, serpentines, péridotites	Baguettes et fibres aciculaires Altération en talc	N=1,6 à 1,7 incolore	Fin du 1 ^{er} ordre Extinction droite
Gédrite	Idem avec Al Amphibolites, éclogites, gneiss à cordiérite et grenats	idem	N=1,6 à 1,7 Faiblement pléo. Brun jaunâtre	Idem $\Delta < 0,022$
Monoclinique	Monoclinique	Monoclinique	Monoclinique	Monoclinique
Sans Al	Amphiboles ferromagnésiennes	(Fe ⁺⁺ , Mg) ₇ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂		
Cumingtonite (série de la...)	Cornéennes, schistes peu métamorphiques, micaschistes	Agrégats parallèles ou radiants de fibres	N= 1,63 à 1,73 Avec fer, très légèrement pléo verdâtre à incolore-jaunâtre	0,028 à 0,043 Milieu du 2 ^{ème} ordre et début du 3 ^{ème} ordre Allongement + 11 à 17°
Sans Al	Amphiboles calciques	Ca₂ (Mg, Fe)₅ Si₈ O₂₂ (OH)₂		
Actinote Trémolite (Magnésienne)	schistes et cornéennes calciques, cipolins, produit d'ouraltisation*	Aciculaire, fibreuse	N=1,6 à 1,7 Pléo. Net bleu à vert clair, vert jaunâtre Tr incolore	0,016 à 0,023 Fin du 1 ^{er} ordre et début du second $\Delta < 0,024$

				Allongement + 11 à 17°
	Amphiboles calciques et alumineuses			
Hornblende verte	Présence de Na Granites ou laves calco-alcalins, produit d'ouralitisation*. Altération en chlorite, épidote, calcite	Prismes allongés sur c	N=1,6 à 1,7 Sections normales à deux clivages losangiques m (110), 56° Pléo. Net vert + ou-intense	Jaune du 1 ^{er} ordre à bleu-vert du 2 ^{ème} ordre 0,014 à 0,026 Allongement+ 15 à 27°
Pargasite Na Ca2 Mg4 Al Al2Si6O22(OH)2	Paragneiss, calcaires métamorphiques	idem	Peu Pléo. Faiblement bleu-vert	0,019 à 0,025 25 à 28°
	Amphiboles sodiques			
Glaucophane	Sodium métamorphisme hautes pressions avec épidote et muscovite	Prismes fins et allongés	1,6 à 1, 7 Pléo. Coloré en bleu-violet (Ng) à lavande et jaune pâle	1^{er} ordre , assez faible, masqué par couleur propre Allongement+ 5 à 7°
Arfverdsonite	Sodium métamorphisme hautes pressions	Prismes ou agrégats fibreux	1,7 Fort Pléo. Bleu-vert foncé (Np) à gris verdâtre	1^{er} ordre , faible, 6 à 40° !

*L'ouralite est un mélange de hornblende verte et d'actinote, provenant de l'altération des pyroxènes.

La méthode à mettre en œuvre, quand on a identifié un cristal de la famille des amphiboles, si on souhaite aller plus loin, consiste à :

- Observer la texture (prismatique, aciculaire, fibreuse de type « amiante »...)
- Décrire les teintes naturelles et le pléochroïsme
- Si la teinte naturelle ne la masque pas, donner la teinte de Newton extrême en observant plusieurs cristaux, et en déduire la biréfringence

- Mesurer l'angle d'extinction et comparer au diagramme ci-dessous

Tous les intermédiaires existent entre la hornblende verte et les actinotes.

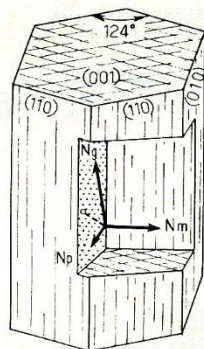


Fig. 117. — Amphiboles monocliniques, cas général (type hornblendes)

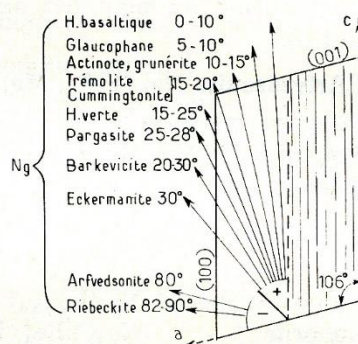


Fig. 118. — Amphiboles monocliniques ; position de Ng dans le plan g^1 (010)

Liste des **amphiboles** trouvées et identifiées dans les lames d'**amphibolites indifférenciées** décrites dans l'ATLAS de la SAGA

N° de lame et localisation	Désignation de l'amphibolite	Nature des amphiboles	Commentaire
609 Chassoncet, près Beynat	Lentille δ^{11}	Amphibole magnésienne de type pargasite	
609 Carrière du Faucou	Lentille $\delta\psi$	Hornblende verte	
609 Carrière du Faucou	Lentille $\delta\psi$	Amphibole magnésienne de type pargasite	

Autres amphiboles trouvées dans les gneiss, en dehors des lentilles d'amphibolites indifférenciées, et des corps de métaéclogites décrites dans le guide n°6M :

N° de lame et localisation	Désignation de l'amphibolite	Nature des amphiboles	Commentaire
106 entre Tulle et Naves	ortho-gneiss mésocrate à biotite et hornblende ζ^4	Hornblende verte calcique	tendance hastingsite(1) magnésienne
112 N89 avant gare d'Aubazine	Cataclasite, issue d'une tonalite	hornblende verte	du type hastingsite ou barkévicite
511 Château Fort	Leptynite à albite λ^3 alb	hastingsite sodo-calcique	riche en fer

(1) Hastingsite : $\text{Na Ca}_2 \text{Fe}_4^{2+} \text{Fe}^{3+} [\text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{22} (\text{OH})_2]$

3. Les éclogites et métaéclogites dans le contexte du métamorphisme régional du Bas Limousin

Les métaéclogites occupent une place à part dans le métamorphisme du Bas Limousin. D'abord à cause de leur fort caractère basique, à leurs paragenèses issues d'éclogites formées à très hautes pressions, et à leurs textures très particulières. Ensuite par leur dispersion géographique en un vaste essaim en fer à cheval, qui est l'image de marque visuelle de la feuille d'Uzerche : **figure 1**.



Figure 1

L'essaim en fer à cheval des corps d'amphibolites notées $\delta\Psi$ sur la feuille d'Uzerche. Elles ne sont pas toutes des métaéclogites. En bleu sur la carte.

En jaune, les gneiss plagioclasiques ζ^{1-2}

Extrait de Chèvremont Ph. Et Donsimoni M., 2009. Carte géologique harmonisée du département de la Corrèze. Rapport final BRGM / 56816-FR, 238 pages

Le métamorphisme du Bas Limousin est décrit pour l'essentiel comme le métamorphisme régional barrowien type : voir à ce sujet **EntretienVII** des Entretiens sur le métamorphisme, et l'introduction de l'atlas des roches métamorphiques. Les traits principaux de ce métamorphisme de hautes pressions et de hautes températures sont :

- Le caractère essentiellement prograde de la série barrowienne
- Le passage par les faciès de schistes verts puis d'amphibolite, faciès que l'on peut suivre en suivant la direction générale du gradient de l'ouest sud-ouest à l'est nord-est le long de la vallée de la Corrèze, de Brive à Tulle.
- Une vaste zone d'anatexie médiane.

L'ensemble a un caractère très cohérent, il se développe continument sur une aire importante de la feuille de Tulle, et se prolonge sur une grande partie de la feuille d'Uzerche.

Les **métaéclogites** au contraire apparaissent comme un essaim de petits corps dispersés, d'abord sur la bordure nord de la feuille de Tulle, puis sur le territoire de la feuille d'Uzerche où elles sont très fréquentes. L'essaim prend la forme d'un faisceau enroulé autour du grand synclinal d'Uzerche. Les métaéclogites se présentent en lentilles décimétriques à plurikilométriques intercalées dans les gneiss plagioclasiques, de type « gneiss gris du Bas Limousin ». Ces lentilles, aux extrémités souvent effilochées, se relaient et dessinent des alignements comme celui du Puy de Ferrières (feuille Tulle) qui se prolonge sur la feuille Uzerche. Par amphibolitisation progressive, les éclogites passent en toute continuité aux amphibolites banales. Les étapes-repères de ce processus continu ont été décrites par

Santallier (1975) et sont exposées de façon synthétique dans la notice de la feuille d'Uzerche. Nous en donnons une synthèse au paragraphe 3.

L'assemblage primaire d'une éclogite, typique des conditions P/T paroxysmales, n'est pas stable dans les conditions normales de température et de pression. Il y a toutefois quelques rares exceptions permises par des conditions très particulières d'exhumation qui ont permis la conservation du faciès de haute pression. Ce sont les éclogites dites « fraîches », dont quelques sites sont mentionnés dans la notice de la feuille d'Uzerche. Pour notre part, nous avons pu en récolter sur le site de La Vergne (commune de Benayes), voir le chapitre localisation géographique de cette notice. C'est un site en position très excentrée par rapport aux gneiss plagioclasiqes du Bas Limousin.

Les éclogites de la région ont donc suivi une évolution *polyphasée* rétrograde : elles sont remplacées par des *paragenèses réactionnelles*, les réactions fonctionnant très lentement en climat statique et en contraintes modérées. Les réactions sont accélérées en présence d'une contrainte tectonique et qui s'accompagne en général d'une circulation de fluides (H₂O et CO₂). Il en résulte des *recristallisations* incomplètes, les zones non déformées étant alors quasi indemnes de recristallisation. Néanmoins l'amphibolitisation complète peut aboutir dans le stade ultime de foliation. La conservation de cette variété de paragenèses apporte la preuve que les éclogites du Bas Limousin ont été exhumées dans des conditions d'exhumation tectonique : **figure 2**.

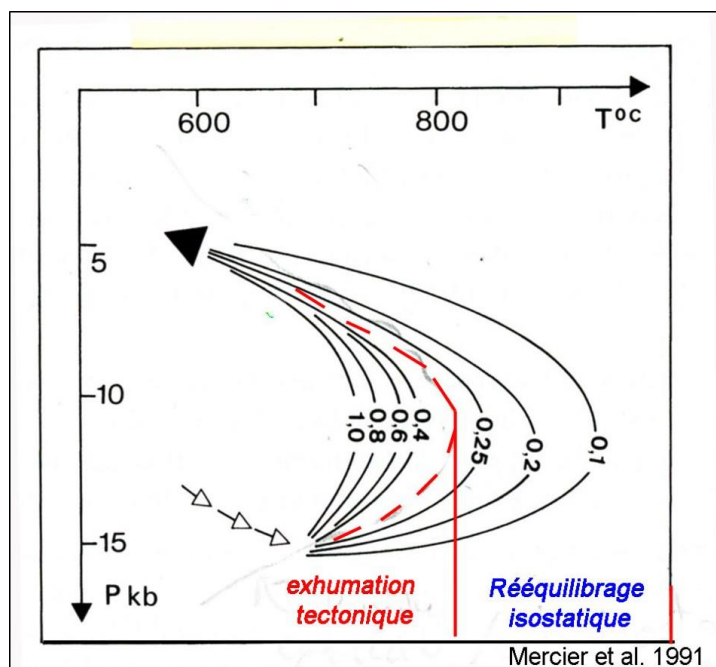


Figure 2

Exhumation tectonique : c'est une exhumation très rapide, qui ne permet pas d'atteindre le rééquilibrage isostatique.

Pour chaque courbe, la vitesse d'exhumation est indiquée en mm par an. Pour $v < 0,25$ mm, l'exhumation est entièrement contrôlée par le seul rééquilibrage isostatique.

Pour augmenter la vitesse au-delà de 0,4 mm/an il est nécessaire que la tectonique intervienne. Les flèches blanches schématisent le fonctionnement prograde. (tiré de *Métamorphisme et roches Métamorphiques*, 1994, J.Kornprobst. Dunod).

3 - Nomenclature des métaéclogites, suivant le degré de rétromorphose, $\delta\Psi^*$ = amphibolites dérivées d'éclogites.

« Très fréquentes sur le territoire de la feuille, elles se présentent en lentilles décimétriques à pluri-kilométriques intercalées dans les gneiss plagioclasiqes. Ces lentilles, aux extrémités souvent effilochées, se relaient et dessinent des alignements comme celui du Puy de Ferrières (feuille Tulle) qui se prolonge sur la feuille Uzerche..... Par amphibolitisation progressive, les éclogites passent en toute continuité aux amphibolites banales. Quelques étapes-repères dans ce qui est un processus continu peuvent être mises en évidence sur le terrain (D. Santallier, 1981). » D'après D.Santallier (références) et notice de la carte Uzerche.

- **Stade 1 : élogites fraîches.**

« Ce sont des roches massives, apparemment exemptes de déformations. La matrice est de teinte gris clair. Sur ce fond se détachent des grenats roses ou rouges et des omphacites vert vif. Les élogites fraîches sont rares. ...En lame mince, la structure apparaît granuloblastique. Les principaux constituants minéralogiques sont l'omphacite, un grenat riche en magnésium, une amphibole brune (*barroisite*), un peu de quartz, ...du rutile, parfois de l'ilménite.... ». **Figure 3.**

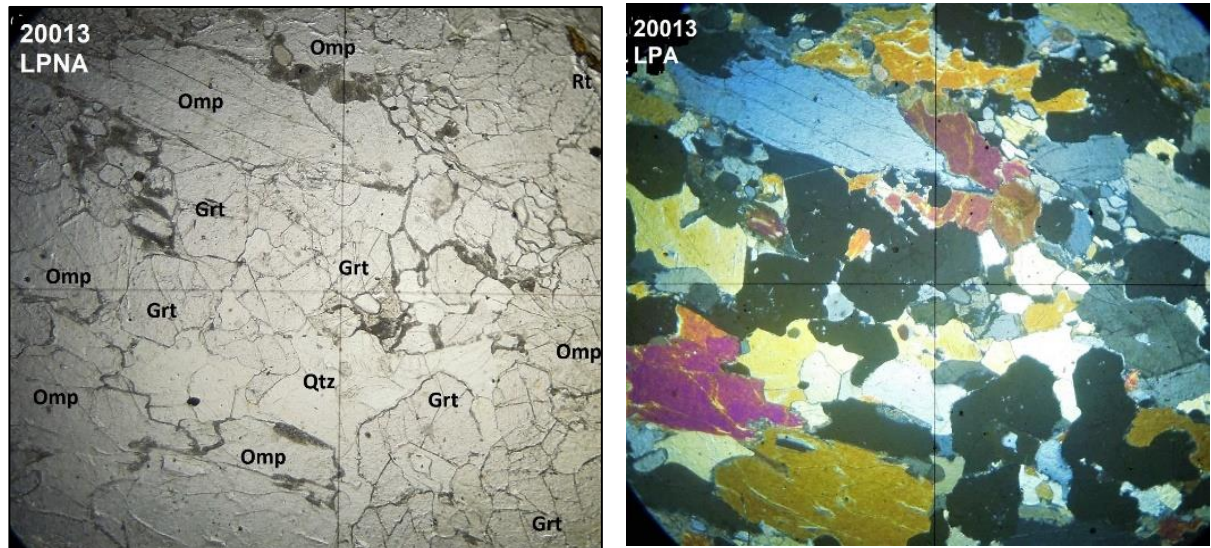


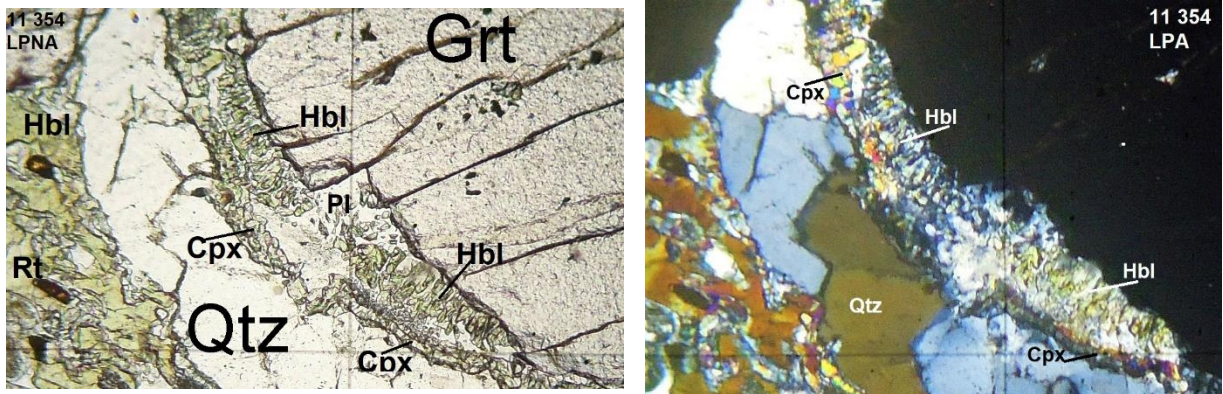
Figure 3. Lame 20013, élogite « fraîche » de La Vergne, commune de Benayes (Corrèze).

- **Stade 2 : élogites rétro-morphosées dans le stade anhydre.**

C'est la première étape de la déstabilisation des élogites ; elle se caractérise par une paragenèse tout d'abord principalement anhydre : les fluides interviennent peu dans la déstabilisation.

Les roches sont massives, claires, avec une matrice gris-vert sur laquelle se détachent les grenats rouges millimétriques, et parfois centimétriques. Au cours de cette première étape, le grenat et le quartz restent stables sauf lorsqu'ils sont en contact direct l'un avec l'autre. Le premier minéral à se déstabiliser est l'omphacite qui est peu à peu remplacée par une trame constituée de symplectites très fines de diopside et de plagioclase acide. Lorsque quartz et grenat sont directement en contact, on observe l'apparition d'une double auréole réactionnelle de plagioclase et hornblende (vers le grenat), et de clinopyroxène (vers le quartz), comme illustré sur la **figure 4.**

Figure 4. Double auréole réactive au contact entre grenat et quartz, dans l'éclogite 11354 du Puy de Ferrières.



Le **rutile**, souvent associé à la **titanite** (figure 5, LPNA) se transforme partiellement en **ilménite** à la périphérie des cristaux.



Figure 5. Concentration de **rutile** avec bordure d'**ilménite** dans le symplectique de déstabilisation de l'omphacite. 11354, Puy de Ferrières. Echelle 1,1 mm à la base.

• **Stade 3 : début de l'amphibolitisation.**

Ce stade correspond à l'apparition des premières amphiboles colorées et donc au début de l'amphibolitisation. La matrice reste de teinte claire tandis que les amphiboles à fort pléochroïsme se localisent en priorité autour des grenats en formant une couronne sombre visible à l'œil nu à la surface de la roche. Les roches demeurent souvent massives et non déformées, ou faiblement déformées.

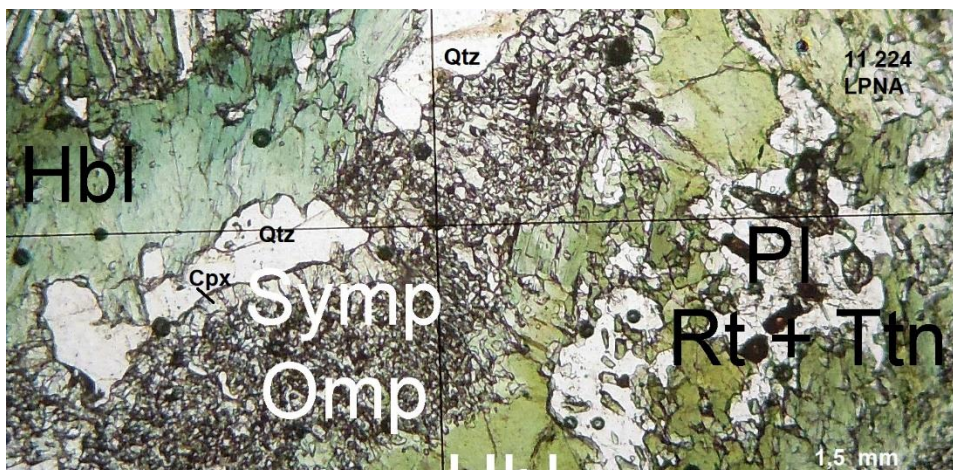
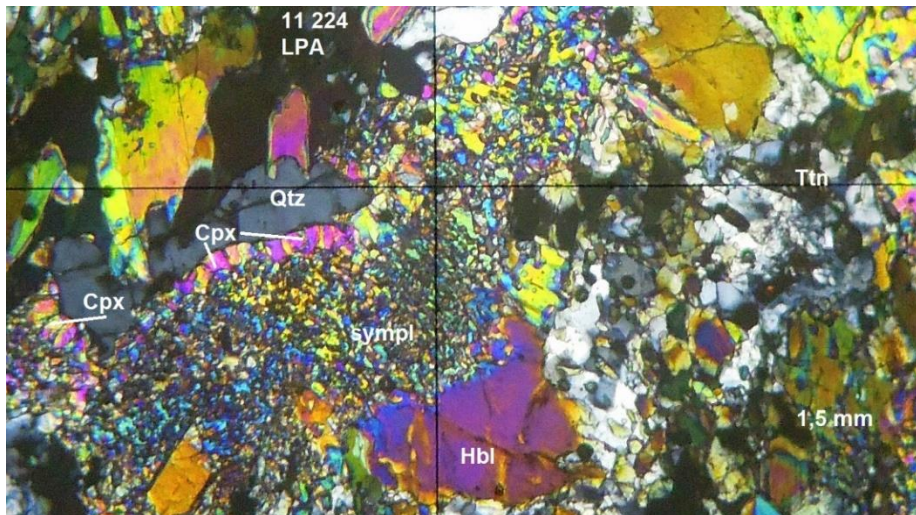


Figure 5a 11224, LPNA, Puy de Ferrières.

Couches successives entre la kélyphite d'un grenat, dans l'angle supérieur gauche, et la hornblende massive du quart inférieur droit, avec un premier blindage d'amphibole sodique de pléochroïsme bleu verdâtre, des plages quartz, allongées et discontinues, et le restant du symplectique de l'omphacite déstabilisée. Noter la trame très fine du symplectique de déstabilisation de l'omphacite.

Au contact entre quartz et trame de symplectique, un joint réactionnel de **diopside** se forme sur une épaisseur de moins de 0,1 mm. Voir **figure 5a et b**.



Figures 5a et b. Eclogite 11224 du Puy de Ferrières. Auréole réactive de diopside au contact entre les quartz et le symplectique (noté symp) de l'omphacite. Echelle 1,5 mm à la base. Noter sur le cliché LPNA, le teinte bleu/vert du pléochroïsme de l'amphibole (notée Hbl), dont la composition comprend du sodium.

• Stade 4 : progression de l'amphibolitisation

La hornblende envahit progressivement la roche, les deux constituants des couronnes de symplectites (ou kélyphite) autour des grenats se séparent : le plagioclase reste au contact du grenat tandis que l'amphibole migre vers la périphérie et se perd progressivement dans le fond granoblastique de ce qui est maintenant une amphibolite. **Figures 6a et b.**

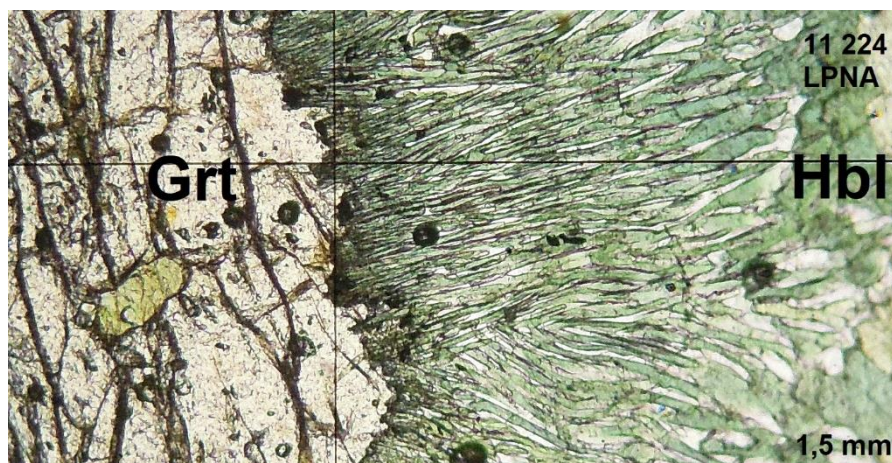
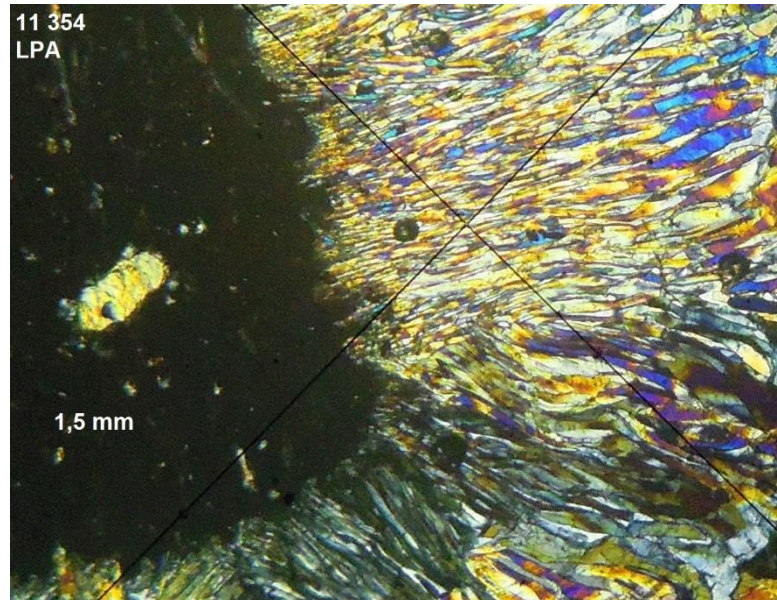


Figure 6a
Eclogite 11224 dans le stade 4, Puy de Ferrières. LPNA

Faisceau dense de la kélyphite d'un grenat, perpendiculaire à une face d'un cristal de grenat. Le volume du grenat résiduel est bien inférieur à celui de sa kélyphite. La kélyphite résulte de l'intercroissance périodique et vermiculaire de l'amphibole et du plagioclase. Les vermicules d'amphibole ont une largeur de 0,01 mm au voisinage du grenat, et s'élargissent jusqu'à 0,06 mm à la périphérie, en se perdant dans les grandes hornblendes à l'extrémité du cliché. Le pléochroïsme de l'amphibole est de vert pâle à bleu vert vif.

Figure 6b

Eclogite 11224 dans le stade 4, Puy de Ferrières. LPA.
Les vermicules d'amphibole, élargis en spatule à l'extrémité de la kélyphite, présentent une teinte de Newton qui va jusqu'au jaune du second ordre.



Ce type d'anciennes éclogites amphibolitisées est celui que l'on rencontre le plus fréquemment.

- **Stade 5 : amphibolitisation complète**

Il représente l'aboutissement du processus précédent. La foliation devient de plus en plus intense. Les grenats sont totalement résorbés et remplacés par des amas (ou « nids » : D. Santallier, 1981) de plagioclase en lentilles plus ou moins aplaties. Le sphène a maintenant presque totalement remplacé l'ilménite et le rutile.

Dans le terme ultime de leur évolution, les anciennes éclogites sont remplacées par des amphibolites apparemment banales car les nids de plagioclase s'étirent jusqu'à donner de véritables lits.

Les compositions chimiques des éclogites sont assez variables. Celles des environs de Benayes (analyse n° 56 de la notice de la feuille Uzerche) ont une composition de gabbros cumulatifs à olivine. Les éclogites formées essentiellement de grenat et d'omphacite, comme au Puy de Ferrières, (analyse n° 52 de la notice de la feuille Uzerche) correspondent à des basaltes tholéitiques indifférenciés. L'étude des éléments traces (B. Cabanis et al.) révèle des tendances alcalines caractéristiques d'un ancien magmatisme de rift.

- **Stade 6 : remplacement des anciennes éclogites par des amphibolites**

C'est le terme ultime de l'évolution des anciennes éclogites qui sont alors remplacées par des amphibolites apparemment banales car les nids de plagioclase s'étirent jusqu'à donner de véritables lits.

Les deux derniers stades s'observent autour de Genestre (Ouest de Seilhac), de Condat-sur-Ganaveix, à l'Ouest de Saint-Pardoux-Corbier et entre Beausoleil et le Breuil au Sud de Salon-la-Tour.

Bibliographie :

Santallier D. (1975) – Les intercalations basiques dans les gneiss de la partie nord de la feuille Tulle à 1/50 000. Bull. B.R.G.M., sect.1, n°4.

Santallier D. (1976) – Quelques minéraux dans les éclogites et amphibolites dérivées. Etude géochimique préliminaire. Bull. B.R.G.M., sect.1, n°3.

Pour la localisation des échantillons dans lesquels les lames d'éclogites et de métaéclogites ont été taillées, voir :

Notice des roches métamorphiques, chapitre 2- Données géographiques des prélèvements du synclinal d'Uzerche.

Annexe au guide 6M

Données disponibles sur les amphiboles comportant du sodium dans leur composition

Comparaison entre **hornblendes vertes**, avec la série de l'actinote/**trémolite** et avec les amphiboles dites sodiques comme le **glaucophane** : dans tous les cas, le taux de fer est faible.

appellation	formule	Propriétés Optiques, pléo.	Propriétés optiques
(Hbl verte) édénite	$\text{Na Ca}_2 (\text{Mg, Al})_5 [\text{Al Si}_7 \text{O}_{22}(\text{OH})_2]$	Pléo. Vert	Début du second ordre
(Hbl verte) pargasite	$\text{Na Ca}_2 \text{Mg}_4 \text{Al} [\text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{22}(\text{OH})_2]$	Incolore à faible pléo. (Vert-bleuté)	Début du second ordre
(Hbl verte) barroisite	$\text{Na Ca Mg}_3 \text{Al}_2 [\text{Al Si}_7 \text{O}_{22}(\text{OH})_2]$	Incolore à faible pléo. (vert-bleuté)	Début du second ordre
Série de l'actinote	$\text{Ca}_2 (\text{Mg, Fe})_5 [\text{Si}_8 \text{O}_{22}(\text{OH})_2]$	Assez fort relief Incolore	Début du second ordre
(Amp sodique) glaucophane	$\text{Na}_2 \text{Mg}_3 \text{Al}_2 [\text{Si}_8 \text{O}_{22}(\text{OH})_2]$	Pléo. bleue à jaune	Premier ordre

Lexique : pour mémoire. Les définitions des termes utiles sont regroupées dans la notice générale du site.

Bibliographie /

Relation of nucleation and crystal-growth to the development of granitic structures, Samuel E. Swanson, American mineralogist, 62, 966-78, 1977

An introduction to metamorphic petrology », Bruce.W.D. Yardley. 1989. Longman Earth Science Series.

On the mechanism of prograde metamorphic reactions in quartz-bearing pelitic rocks. Carmichael D.M., 1969. Contribution to mineralogy and petrology, 20.

Géologie structurale et pétrologie de la région d'Uzerche (Corrèze). Thèse de B. Lamouille. Edition BRGM, 1979.

Kornprobst et al, 1981

Métamorphisme et roches métamorphiques. J. Kornprobst 1994, Dunod

Métamorphisme et roches métamorphiques. Signification géodynamique. J. Kornprobst 2001. 3^{ème} édition Dunod

Santallier D. (1975) – Les intercalations basiques dans les gneiss de la partie nord de la feuille Tulle à 1/50 000. Bull. BRGM., sect.1, n°4.

Santallier D. (1976) – Quelques minéraux dans les éclogites et amphibolites dérivées. Etude géochimique préliminaire. Bull. BRGM., sect.1, n°3.

La genèse des roches métamorphiques. H.G.F. Winkler. Traduction de « Die Genese der metamorphen Gesteine », par édition Ophrys

Les roches basiques dans la série métamorphique du Bas Limousin, Massif central. Danielle Santallier. 1981. Thèse Université D'Orléans

Minéraux et roches métamorphiques. J.Cl.Pons.2001. CRDF de l'académie de Grenoble.

Chèvremont Ph. Et Donsimoni M., 2009. Carte géologique harmonisée du département de la Corrèze. Rapport final BRGM / 56816-FR, 238 pages.

Grollier *et al* 1979 - Carte géologique de la France au 1/50000, N°761, Tulle. Ed. BRGM, Orléans, 1 carte + 1 notice (42p).

Floc'h *et al*, 1982. Carte géologique de la France au 1/50000, N° 737, Uzerche. Ed. BRGM. Orléans, 1 carte + 1 notice (42p).

Lamouille B. (1979). Géologie structurale et pétrologie de la région d'Uzerche (Corrèze). Thèse de 3^e cycle, Univ. d'Orléans, 230 pages.