

Entretien sur le métamorphisme n° VI

○○○○○

Anatexie et migmatites

SOMMAIRE

1. Introduction

- 1.1. Rappels des notions introduites
dans les Entretiens précédents page 3
- 1.2. Quand la température monte jusqu'à fondre
la roche ! L'anatexie page 3
- 1.3. Pour comprendre,
des expériences de laboratoire décisives page 4
- 1.4. Une singulière famille de roches :
les *migmatites* page 5

2. Migmatites du cœur de l'antiforme de Tulle, Bas Limousin

page 6

- 2.1. Les *migmatites* sur le terrain page 6
- 2.2. Examen des échantillons récoltés page 8
- 2.3. Examen des lames minces page 11
- 2.4. Synthèse... et une question ! page 13

3. Migmatites du dôme métamorphique de Gavarnie/Héas (Hautes-Pyrénées)

page 13

- 3.1. Les *migmatites* sur le terrain page 14
- 3.2. Atlas pétrographique des paragenèses
de *migmatites* de Gavarnie/Héas page 20
- 3.3. Interprétation page 26

4. Bibliographie

page 28

5. Lexique

page 29

*Textes, clichés et dessins de Dominique Rossier,
membre de la Commission de volcanisme de la SAGA.*

Entretien sur le métamorphisme n° VI

Résumé

Anatexie et migmatites

Après l'Entretien n° V, consacré aux hautes pressions, le présent Entretien n° VI s'intéresse à une nouvelle situation « limite », celle des hautes températures, auxquelles la roche subit un début de fusion : c'est l'**anatexie**.

Un premier chapitre donne les bases expérimentales qui permettent de comprendre ce qui se passe quand une *métapélite* est chauffée jusqu'à l'anatexie. Cette fusion partielle, dite incongruente, produit un liquide dont la composition est proche de celle du liquide résiduel des expériences historiques de Tuttle et Bowen, qui sont des expériences de cristallisation par refroidissement d'un magma ; on le sait, cette composition converge toujours vers celle d'un granite à feldspath alcalin.

Nous entraînons alors le lecteur sur le terrain, dans le Limousin et dans les Pyrénées, pour vérifier cette loi, et pour apprendre à reconnaître les structures et les textures des roches subissant l'anatexie : ce sont les *migmatites*, roches de « mélange » et hétérogènes. Les notions de base de *néosome* et de *paléosome*, ainsi que de *leucosome* et de *mélanosome*, sont illustrées à l'aide de coupes polies et de lames minces taillées dans des migmatites du Bas Limousin.

Le cas des migmatites de la zone axiale des Pyrénées est plus développé, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la région choisie, le dôme métamorphique dans lequel sont taillées les « fenêtres » de Gavarnie et de Héas, offre un cas bien intéressant d'imbrication entre dômes d'intrusion magmatique et région métamorphique.

Ensuite, la paragenèse de ces migmatites, bien qu'à rattacher au faciès à amphibolites, est bien différente de celle rencontrée dans le métamorphisme régional du Limousin et qui sera largement illustrée dans le « **Petit atlas pétrographique** » de l'Entretien n° VII. Dans les « fenêtres » de Gavarnie et de Héas, la composition hyperalumineuse et les pressions nettement plus faibles sont responsables de la présence massive d'un minéral caractéristique qui est la *cordiérite*. Ceci nous a conduits à développer un nouveau « **Petit atlas pétrographique** » montrant ce minéral dans ses formes plus ou moins altérées et sa cohabitation avec d'autres minéraux de haute température, comme la *sillimanite*.

Enfin, l'examen des lames minces permet de compléter ces aspects par l'observation de la structure et de la texture des migmatites en liaison avec l'anatexie subie et la tectonique.

L'Entretien n° VI s'achève par une bibliographie et un lexique des termes.

Dominique Rossier

1. Introduction

1.1. Rappel des notions introduites dans les Entretiens précédents

Dans l'Entretien n° III, nous avons décrit les minéraux, comme les *silicates d'alumine*, hydratés ou non, qui révèlent les transformations subies par les roches au cours de leur histoire métamorphique. Barrow les avait dénommés à juste titre « minéraux index ». Mais cette notion se révèle insuffisante pour comprendre l'histoire métamorphique d'une région. Ceci a conduit Eskola à introduire la notion de **faciès** qui lie les paragenèses observées aux conditions de température et de pression subies par la roche, indépendamment de la composition du protolithe.

Nous avons vu dans l'Entretien n° IV que ces conditions correspondent au moment où la mémoire de la roche métamorphique s'est figée ; elles s'inscrivent, pour une région métamorphique donnée, le long d'une courbe dans l'espace pression/température, courbe que l'on désigne par le terme de **gradient** du métamorphisme. Or, il est vite apparu qu'il y a une grande diversité de gradients. Miyashiro a montré qu'il était possible de les rassembler en trois classes principales en utilisant la pression comme critère principal :

- les gradients d'Abukuma des basses pressions ;
- les gradients dalradiens, ou barrowiens, des moyennes pressions, largement répandus sur la bordure occidentale de la chaîne hercynienne ;
- les gradients franciscains des hautes pressions.

L'Entretien n° V, qui traitait des roches métamorphiques de hautes pressions, a fait ressortir, sur l'exemple particulier du Bas Limousin, le paradoxe de leur présence en lentilles intercalées en chapelet dans de vastes régions soumises au gradient dalradien.

Pour l'expliquer, nous avons eu recours aux deux principaux modèles récents de géodynamique, qui décrivent respectivement la subduction d'une plaque océanique et les collisions continentales frontales. Ces modèles utilisent des notions et des mécanismes comme :

- les isothermes et leur déformation par les grands accidents ;
- les différentes cinétiques de réchauffement et de refroidissement ;
- le chevauchement et le sous-charriage d'écailles ;
- l'équilibrage isostatique.

1.2. Quand la température monte jusqu'à fondre la roche ! L'anatexie

Dans le présent Entretien n° VI, nous abordons une nouvelle situation limite¹, où cette fois c'est la température qui franchit un seuil significatif. Nous allons examiner le cas où une roche qui serait un *paragneiss* banal, *métapélite* ou *métagrauwacke* (voir les définitions dans l'Entretien n° IV), d'abord métamorphisée dans un contexte de gradient régional dalradien, est ensuite portée à des températures pour lesquelles va se produire un début de fusion. Pour désigner cette situation, les géologues utilisent le terme d'« **anatexie** », issu du grec. Qu'il s'agisse d'une roche métamorphique « para » ou « ortho », le phénomène s'analyse de la même façon.

¹ Dans l'Entretien n° V, nous avons déjà présenté une première situation limite, celle des très hautes pressions.

Cette transformation est un changement de phase, car il y a passage de la phase solide à la phase liquide, au moins pour une fraction de la roche. Cependant, une troisième phase est presque toujours présente : c'est la phase vapeur (ou gazeuse). La pression de vapeur qui existe à ces hautes températures résulte pour partie des réactions de déshydratation des minéraux auparavant hydroxylés, comme les *phyllites*, les *chlorites* ou la *staurolite*. Le principal constituant de cette phase est la vapeur d'eau. Son taux peut atteindre 100 % dans la composition de la phase fluide, le reste étant du CO₂. Malgré tout, il existe aussi des situations où les roches sont complètement anhydres. On verra que la pression, et particulièrement la pression partielle de vapeur d'eau, joue un rôle important dans l'anatexie, en abaissant substantiellement la température de fusion.

Or la première fusion va se produire pour des conditions thermodynamiques particulières, et qui sont voisines de celles d'un autre phénomène, en quelque sorte inverse. Il s'agit de la formation du liquide résiduel dans un magma en phase finale de refroidissement et de cristallisation. Précisons ce point important, à l'aide de deux expériences cruciales de laboratoire. Elles donneront la clé pour bien comprendre la dualité de ces phénomènes de fusion et de cristallisation.

1.3. Pour comprendre, deux expériences de laboratoire décisives

• *Première expérience, celle de Tuttle et Bowen (1958)*

Elle consiste à observer ce qui se passe lors du refroidissement d'un magma silicaté [1].

Ces auteurs ont analysé les conditions d'apparition des cristaux et la nature de ces cristaux, lors du refroidissement et de la cristallisation différenciée de magmas silicatés dans une large gamme de concentration. Simultanément, la composition du magma (phase liquide) évolue. Dans la phase ultime de refroidissement, les auteurs cités ont pu établir une loi remarquable qui se résume dans les trois points suivants.

I. Au terme de l'expérience de refroidissement et de cristallisation différenciée, tout magma silicaté expulse un liquide résiduel dont la composition converge toujours vers celle d'un *granite à feldspath alcalin*² standard. Ce dernier est constitué par l'assemblage en proportions voisines de *quartz*, d'*orthose*³ et d'*albite*⁴, comme on peut le voir sur la **figure 1**. La composition d'équilibre est donnée par le point **M** sur cette figure ;

II. Cette composition « standard » est obtenue pour le **minimum thermique**, noté **M**, c'est-à-dire pour les températures les plus basses compatibles avec l'existence d'un liquide silicaté, en l'occurrence, un liquide de même composition que le granite à *feldspath alcalin* (**figure 1**).

III. Toutefois, le minimum thermique n'a pas une valeur unique, mais dépend de la pression des fluides dans le magma, et en particulier de la pression partielle de la vapeur d'eau. Les molécules d'eau, à ces hautes températures, jouent un rôle essentiel, puisqu'elles sont capables de déconstruire les structures complexes des aluminosilicates. Ainsi, pour un taux de vapeur d'eau de 100 %, le minimum thermique est de 700 °C à une pression de 2 kbar.

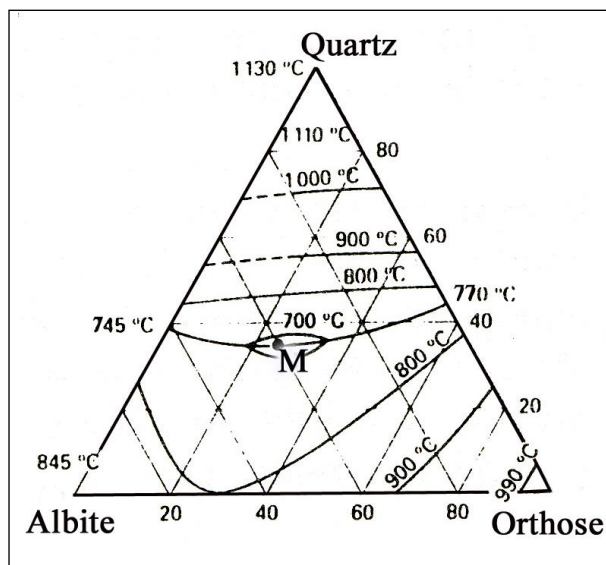
² *Alcalin* désigne la famille des éléments de la seconde colonne de la classification de Mendeleïeff, à savoir le lithium (Li), le sodium (Na) et le potassium (K).

³ Orthose : KAlSi₃O₈.

⁴ Albite : NaAlSi₃O₈.

Figure 1.

Évolution de la composition des liquides résiduels dans le système *Quartz - Orthose - Albite* (diagramme triangulaire), en présence de vapeur d'eau. Tuttle et Bowen, 1958.



Quelle que soit la composition initiale des roches anatexiées, les liquides résiduels convergent vers le « minimum thermique » **M**, au centre du diagramme triangulaire. **M** correspond à une composition de granite à feldspath alcalin. (Tiré de *Pétrologie endogène*, de B. Bonin, voir bibliographie).

• **Seconde expérience, celle de Winkler et Von Platen : anatexie d'un paragneiss porté à haute température.**

Plaçons-nous maintenant dans le cas inverse. Au lieu d'un magma refroidi sous une pression donnée, c'est une roche aluminosilicatée⁵ à l'état solide qui va être portée à des températures croissantes, sous cette même pression : des gouttes de liquide magmatique vont alors apparaître ([1], page 127). Ce qui est remarquable, c'est la nature de ce premier liquide :

la composition des premières gouttes de liquide est proche de celle, « standard », du granite alcalin, évoquée plus haut dans la loi de Tuttle et Bowen ! Et cela, même si la composition de la roche d'origine est éloignée de celle du granite.

Cette fusion est appelée « incongruente », car la roche d'origine et le liquide produit n'ont pas la même composition, non plus que le résidu solide.

Quantitativement parlant, les valeurs trouvées pour les températures d'anatexie sont voisines des valeurs de « minimum thermique » **M** de la loi de Tuttle et Bowen.

1.4. Une singulière famille de roches : les *migmatites*

Dès l'apparition de l'anatexie, qui est ce phénomène de fusion partielle et incongruente, la roche perd son homogénéité. Elle se sépare en plusieurs phases, se transforme profondément chimiquement et se déforme plastiquement sous l'influence de la moindre contrainte mécanique.

Si la roche de départ est métamorphique, par exemple un *paragneiss*, se crée alors un nouveau type de roche, caractérisée par son hétérogénéité : une **migmatite**. Son nom tient son origine étymologique du mot grec *migma*, signifiant mélange.

Si la température continue à augmenter, la phase liquide envahit la totalité du volume et sa composition s'homogénéise graduellement pour converger vers celle de la roche d'origine.

⁵ La plupart des *migmatites* proviennent de *paragneiss*, de *métapélites* ou de *métagrauwackes*.

On aboutit à un « granite d'anatexie », qui peut d'ailleurs se rapprocher d'une diorite, voire d'un gabbro, suivant sa composition d'origine.

Nous allons nous transporter maintenant sur le terrain, pour observer ces *migmatites* dans leur environnement, puis les examiner en lame mince. Comme leur formation requiert les plus hautes températures dans l'échelle du métamorphisme, ces roches bien particulières sont à rechercher au cœur des régions métamorphiques, mais aussi au voisinage de dômes associés à des intrusions magmatiques. Deux sites ont été choisis pour illustrer ces phénomènes :

- le cœur de l'anticlinal de Tulle, en Bas Limousin, d'une part ;
- le dôme métamorphique de Gavarnie/Héas, dans les Pyrénées, d'autre part.

2. Migmatites du cœur de l'antiforme de Tulle

2.1. Les *migmatites* sur le terrain

Tout d'abord, nous retournons dans notre « laboratoire » du métamorphisme régional du Bas Limousin, où nous avons appris à détecter les isogrades du métamorphisme dalradien classique (Entretiens n° IV et n° VII).

Par l'observation de l'apparition, séquencée d'ouest en est, de l'*almandin* ainsi que des minéraux index, comme la *staurolite*, la *cyanite* et la *sillimanite*, nous avons identifié l'axe principal d'apparition et de développement en intensité du métamorphisme, depuis les schistes ardoisiers de la carrière de Travassac, jusqu'aux gneiss omniprésents au cœur de l'antiforme de Tulle (**figure 2**).

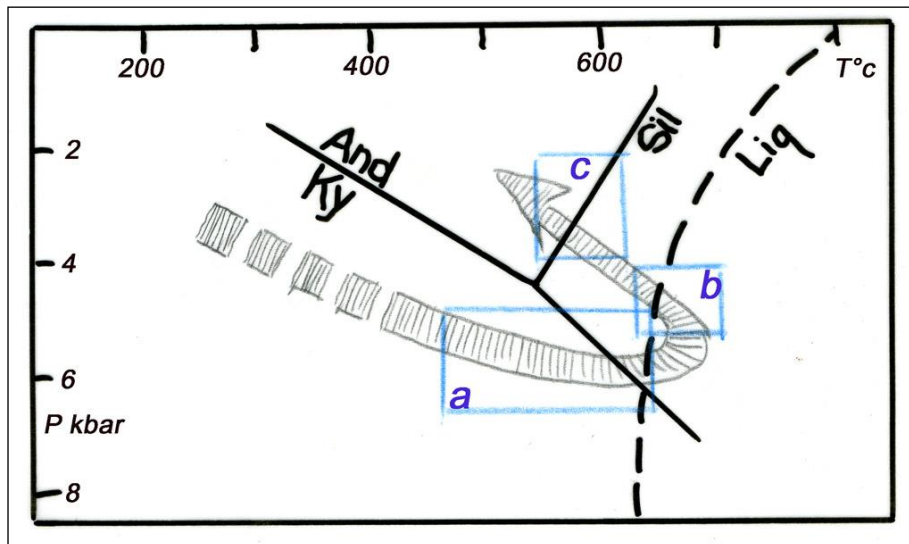


Figure 2. Évolution prograde et rétrograde des unités dalradiennes du Bas Limousin, d'après l'ouvrage de J. Kornprobst [2] (*Métamorphisme et roches métamorphiques*. Dunod). La trajectoire décrite dans le

temps, à travers l'espace des pressions et températures, est schématisée par le trait épais hachuré, se terminant par la flèche. Trois domaines de pression/température sont traversés successivement :

a : lors de la phase prograde, l'unité connaît les conditions de transition de la *cyanite* vers la *sillimanite* ;

b : fusion partielle des *métapélites*, tardive par rapport au métamorphisme prograde, mais également début de la décompression et passage au maximum de température, favorable à la mise en mémoire de minéraux bien formés de la *restite* (voir lexique) ;

c : remontée à la surface et refroidissement.

Jetons un coup d'œil sur la notice de la carte géologique du BRGM, à 1/50 000, feuille de Tulle (XXI-34), à la page 26 [3]. La carte est schématiquement représentée sur la **figure 3**. Un élément nouveau apparaît qui est l'existence d'une région étendue où les gneiss ont subi une fusion partielle plus ou moins marquée : c'est la « boucle » des *migmatites* de l'anticlinal de Tulle, auxquelles nous allons nous intéresser, en échantillonnant les plus typiques, les *migmatites* de Vigéois et celles de Cornil (**figures 4 à 8**).

Figure 4.

Les *migmatites* sont abondantes dans la région, et de beaux affleurements apparaissent à proximité de la « boucle d'anatexie », comme le montre la photo prise au lieu dit du Gour Noir, à l'endroit où le viaduc de chemin de fer franchit la Vézère, entre Uzerche et Vigéois.

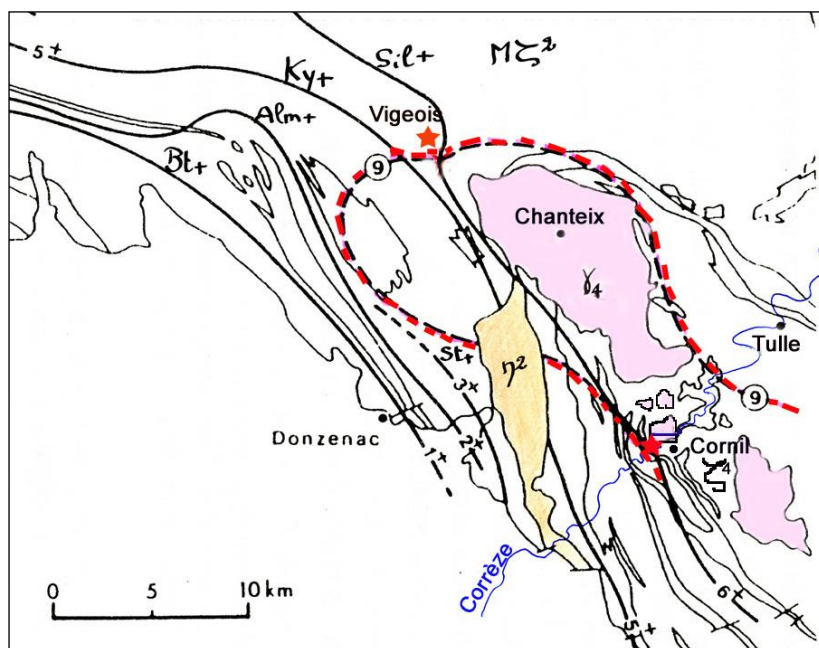


Figure 3. Schéma simplifié de la région entre Tulle et Uzerche, montrant :

- la disposition parallèle des isogrades d'apparition, d'ouest en est, de la biotite (Bt+), de l'almandin (Alm+), de la staurolite (St+), de la cyanite (Ky+) et enfin de la sillimanite (Sil+), traversant la vaste région de gneiss gris du Bas Limousin, $M\zeta_2$.
- l'isograde⁶ de fusion partielle en forme de « boucle » (traits interrompus soulignés de rouge - - -), recoupant orthogonalement les isogrades de la cyanite et de la sillimanite.

Les étoiles rouges ★ indiquent les lieux de prélèvement des *migmatites*, respectivement de Vigéois et de Cornil, étudiées dans le § 2.1. Au cœur de la « boucle d'anatexie », la zone rose notée γ_4 désigne les granites de Chanteix et de Cornil, centrés sur l'anticlinal de Tulle. (D'après un schéma de la notice de la carte géologique BRGM [3]).

Si nous nous reportons à la notice de la carte BRGM mentionnée plus haut [3], nous apprenons que l'anatexie n'a pas pu se produire dans la continuité du processus prograde du métamorphisme, c'est-à-dire dans la seconde moitié du Dévonien (voir Entretien n° VII). La disposition de l'isograde d'anatexie, en boucle sécante sur les isogrades de plus basse

⁶ Dans le cas présent, parler d'isograde d'anatexie est un peu excessif, car le contour des granites avec leur environnement gneissique est diffus.

température (**figure 3**), montre qu'il s'agit d'une anatexie « transzonale ». Elle est liée à la mise en place tardive d'un magma intrusif qui a d'abord produit un essaim de *migmatites* au cœur de l'antiforme de Tulle. Puis l'anatexie s'est généralisée et a abouti au développement de la *granodiorite* de Chanteix et Cornil. Elle s'est produite plus tardivement, à la fin du Dévonien, et fait ainsi la transition avec le magmatisme du Carbonifère.

2.2. Examen des échantillons récoltés

La **figure 5** montre un bloc détaché de l'affleurement de *migmatite* de Vigéois, dont on a scié et poli une face dans la direction perpendiculaire au plan axial des plis. Le détachement est rendu possible par le litage de la roche suivant des surfaces gauches particulières, comme on va voir plus loin. Les termes nouvellement introduits sont récapitulés dans le lexique de cet Entretien n° VI.

La roche apparaît rubanée et plissée, avec alternance nette de lits très clairs et de lits foncés. Cette disposition en couches parallèles (indépendamment des plis) résulte d'une véritable séparation de phase dans la roche initiale et dans la formation du **néosome**⁷. La roche d'origine peut subsister par endroit, constituant alors des îlots dénommés **paléosome**⁸.

Le néosome présente l'alternance entre deux constituants :

- une phase quartzo-plagioclasique, en lits très clairs, épais jusqu'à 1 cm, à grains plurimillimétriques, alternant avec de minces liserés noirs, de ferromagnésiens. C'est le **leucosome**, phase fondue, mobilisée et recristallisée, dont la composition évoque celle d'un granite ;
- d'une roche gneissique à grain plus fin, également disposée en lits épais variant entre quelques millimètres et le centimètre. Les limites entre les deux fractions sont soulignées par des filets de *biotite* continus déjà mentionnés : ces filets constituent le résidu solide (on parle de restite) après extraction du liquide anatectique. C'est le **mélanosome** et il est constitué de ferromagnésiens réfractaires.

Figure 5. *Migmatite* prélevée sur l'affleurement du pont de Vigéois, échantillon scié et poli sur une surface orthogonale au plan axial des plis.

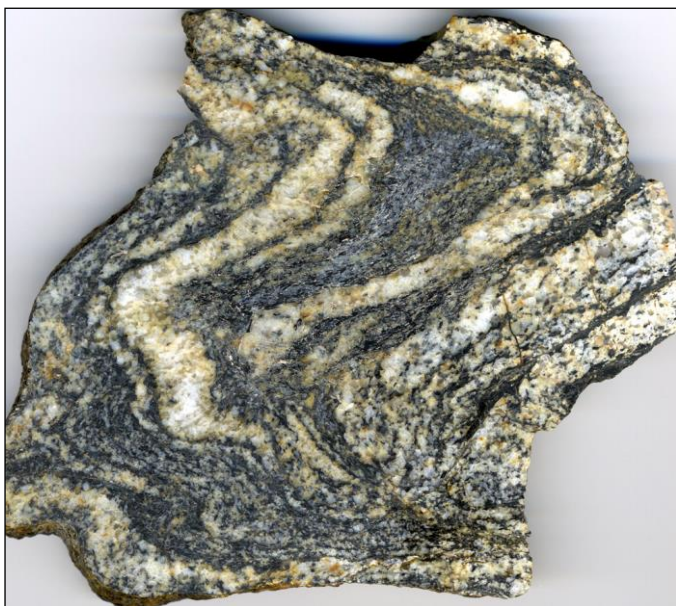


La surface extérieure, brillante, est celle résultant d'un « litage » de la roche, suivant les surfaces séparant les lits. Ces surfaces sont gauchies par le plissement et elles sont chemisées par des feuillets de *muscovite*, disposés dans les plans de litage.

Examinons maintenant de plus près la surface polie de la tranche : **figure 6** et dessin interprétatif **figure 6 bis**.

⁷ Du grec *neo*, nouveau et *soma*, corps.

⁸ Du grec *paleo*, ancien.

Figure 6. Coupe polie de l'échantillon de la **figure 5**.

L'ensemble des caractères est démonstratif de la forte mobilisation de matériau leucocrate qui vient épaissir les charnières des plis, alors que les flancs de ces derniers sont étirés par les forces de cisaillement à l'œuvre.

Mais ces plis ont un aspect bien différent des plis qui accompagnent la foliation S1 et les déformations d'un gneiss : les charnières sont larges, épaisses et arrondies.

À l'intérieur de ces charnières, il peut y avoir absence complète de minéraux transposés, c'est-à-dire orientés suivant le plan axial du pli P2 contemporain de l'anatexie.

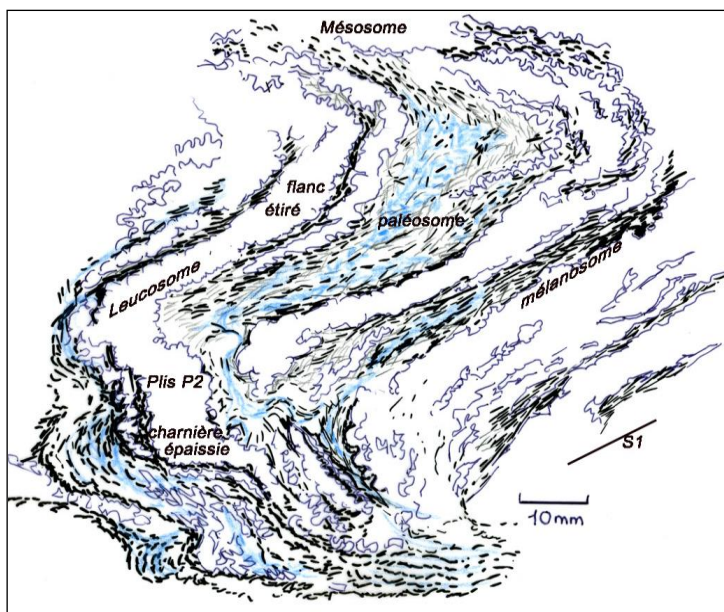
Cet échantillon montre l'évolution déjà bien engagée de l'anatexie, c'est-à-dire de la fusion qui commence à opérer sur les gneiss à grande échelle dans la région.

Figure 6 bis. Dessin interprétatif de la coupe polie, donnant la désignation des constituants de cette migmatite.

La roche gneissique à grain fin représente la roche mère : c'est le paléosome, ou encore mésosome. Elle est de couleur bleutée et est cernée par les lits de restite : on identifiera en lame mince la présence de *cyanite*.

Elle alterne avec les lits clairs à grain grossier et structure équante, d'apparence granitique, qui constituent la phase leucocrate du néosome (leucosome). Le matériau du néosome a été extrait goutte à goutte du gneiss et les gouttes se sont mobilisées et agglomérées par capillarité jusqu'à constituer une phase homogène, dont la composition est celle d'un mélange magmatique de point de fusion correspondant au « minimum thermique » vu plus haut (§ 1.3), donc à une composition de granite.

La roche est devenue plastique à la température où elle a été portée. Elle s'est déformée et plissée quasi librement sous l'influence des contraintes de pression et de cisaillement. Les migmatites de l'antiforme de Tulle sont généralement moins évoluées que celle du pont de Vigéois, présentées ci-dessus. Les leucosomes et les mélanosomes qui leur sont associés sont plutôt minoritaires par rapport au paléosome. Ceci est illustré par la photo de la **figure 7**,



prise *in situ* sur le bel affleurement du Gour Noir (**figure 4**), voisin de Vigeois. Dans ce cas, on parle de *métatexites*, pour bien marquer que l'anatexie n'a pas complètement abouti [4].

Figure 7. Lieu dit le « Gour Noir », près de Vigeois (voir **figure 4**).

Migmatite du type *métatexite*, car le paléosome est largement majoritaire. La foliation d'origine est bien visible, et est soulignée par les leucosomes en rubans. Ces derniers ont vu leur formation facilitée par l'hétérogénéité initiale du paragneiss. La trace du plan axial du pli contemporain du début d'anatexie est facilement identifiable sur cet affleurement.



Plaçons-nous maintenant au contact du petit massif intrusif de Cornil, signalé par une étoile rouge sur la carte de la **figure 3**. Le plus bel affleurement se trouve à l'entrée du tunnel de Cornil, sur la N89, en rive gauche de la Corrèze. Le terrain est recoupé par plusieurs corps intrusifs de *granodiorite*, dit « de Cornil ». C'est cette intrusion qui est cause de l'anatexie intense post-métamorphique qui a fait évoluer la zone voisine d'*orthogneiss* ζ_4 (voir Entretien n° VII) vers des *migmatites*.

Le site de l'entrée du tunnel du Cornil, avec ses affleurements de grande ampleur, est particulièrement utile pour comprendre les phénomènes qui se sont produits au contact avec le granite. Celui-ci était exploité dans une grande carrière qui domine l'entrée du tunnel. Des blocs d'*orthogneiss* ont partiellement fondu à son contact, et ils ont été « emballés » par l'intrusion. Les couches quartzo-feldspathiques, en fondant, ont donné des mobilisats bien visibles sur la photo de la **figure 8**. Sous l'intensité de la contrainte tectonique, les panneaux de *migmatites* ont été pliés et étirés ; certaines roches fondues ont subi le boudinage, et toutes ces déformations se sont produites avant la mise en place finale et le refroidissement.



Figure 8.

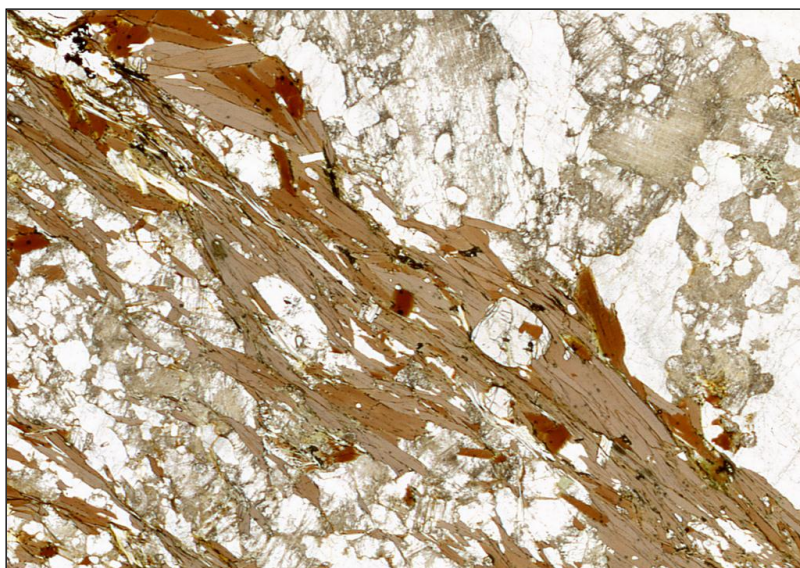
Affleurement de *migmatites* au bord de la N 89, près de l'entrée du tunnel de Cornil, Corrèze. Panneau d'*orthogneiss* partiellement fondu, et déformé au contact de l'intrusion de *granodiorite*. La limite entre l'intrusion et le panneau est parfaitement nette.

2.3. Examen des lames minces

Pour avoir une idée plus précise des transformations à l'œuvre, en terme de séparation des phases et destruction de la texture initiale, il faut aborder l'aspect microscopique par l'examen de lames minces du néosome. La **figure 9**, et son dessin interprétatif (**figure 9 bis**), montrent le caractère très hétérogène d'une *migmatite* du pont de Vigois : la texture est granoblastique dans le leucosome et lépidoblastique dans le mélanosome. Le leucosome est de composition principalement biminérale, *quartz* et *oligoclase*, en mosaïque engrenée. Il est bordé par des baguettes de *biotite*. La trace de la foliation initiale subsiste et est marquée par les phyllites.

C'est également en bordure du leucosome qu'apparaît la *muscovite* en longues lanières flexueuses limpides, ou jaunies par des impuretés de fer. Elles sont regroupées en faisceaux étroits épousant toujours étroitement la ligne de foliation, et accompagnées de fins liserés noirs de minéraux opaques.

Figure 9. *Migmatite* du pont de Vigois. Lame mince en lumière naturelle. La photo montre la limite franche entre le leucosome (en haut à droite), avec ses grands *plagioclases* engrenés avec les *quartz* limpides, et le mélanosome.



Les mélanosomes sont fortement encadrés d'épais cordons de cristaux de *biotite*, disposés en fagots de un à deux millimètres d'épaisseur, accompagnés de minces prismes incolores et limpides, à fort relief, de *sillimanite/cyanite*. À l'intérieur, quelques *grenats* almandins aux formes arrondies sont reconnaissables à leur relief (un grenat est localisé par l'abréviation **alm** sur le dessin d'interprétation).

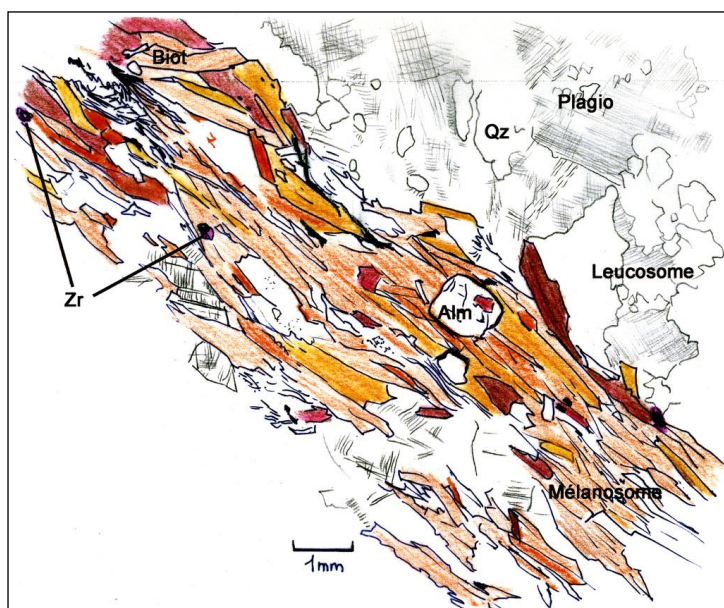


Figure 9 bis (dessin d'interprétation de la **figure 9**). Bordure franche entre leucosome et mélanosome.

La paragenèse du mélanosome comprend ici :

- les grandes lattes de *biotite* imbriquées en marquetterie, avec nombreuses inclusions de *zircon* ;
- l'*almandin* et la *cyanite*, et enfin la *muscovite*.

Les lattes colorées de *biotite* et les prismes incolores et limpides de *sillimanite/cyanite*, d'une fraction de millimètre de large, peuvent atteindre 2 à 3 mm de long et présentent des formes géométriques nettes, imbriquées les unes dans les autres comme pour une marqueterie. Les fagots s'enroulent autour des charnières de plis en formant, pour les *biotites*, des arcs polygonaux⁹ (**figures 10** et **figure 10 bis**). Les *biotites* ont été majoritairement recristallisées après la phase de mobilisation plicative, puisqu'elles ne sont pas déformées.

À l'opposé, les lamelles de *muscovite*, qui se sont formées avant la fin de la déformation, présentent toutes des courbures.

Figure 10.
Pli dans une migmatite
du pont de Vigois.
Lame mince en lumière naturelle.
On observera le grand *plagioclase*
moulé en amande
dans la charnière du pli.

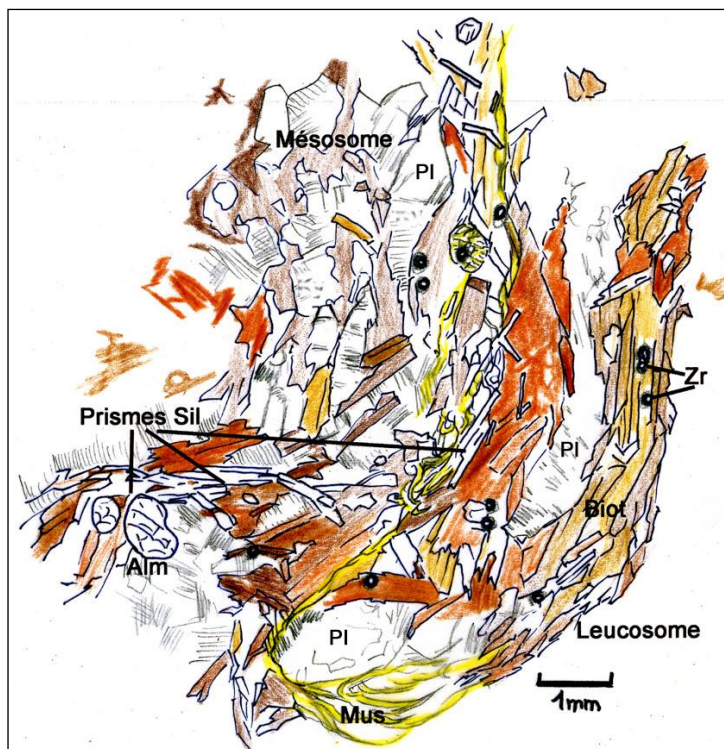
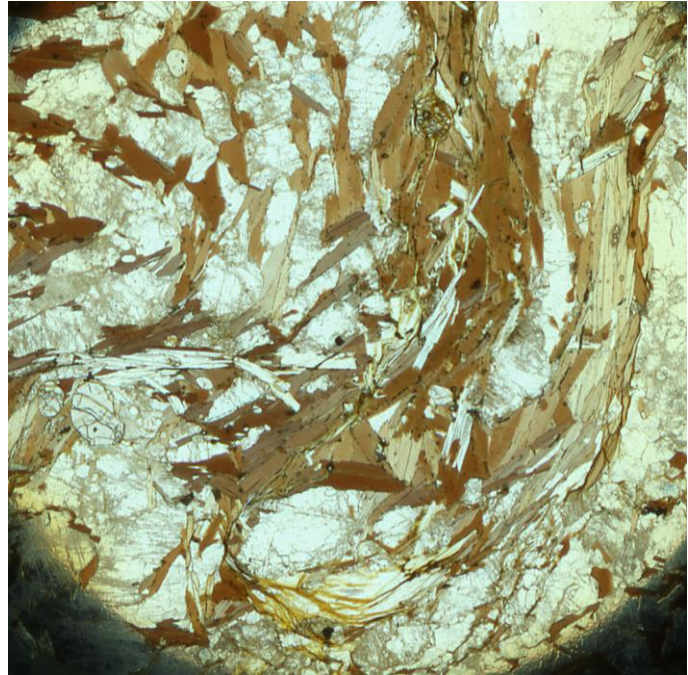


Figure 10 bis (dessin interprétatif
de la **figure 10**).

Ky : cyanite. Sil : sillimanite.

Alm : grenat almandin.

Biot : biotite. Zr : zircon.

Mus : muscovite.

On peut observer sur les migmatites du pont de Vigois comment le liquide magmatique se développe au sein du paléosome, en le faisant « éclater ».

Le néosome s'étend progressivement à partir de fins rubans en forme d'ombilics sinueux qui regroupent le mobilisat par capillarité et dispersent progressivement la *biotite*. Seuls subsistent, de chaque côté, les fagots de *biotite/sillimanite/muscovite*, qui bordent ces zones d'anatexie.

⁹ Voir lexique en fin d'Entretien.

2.4. Synthèse et... une question !

Les *migmatites* de Vigéois, issues de la série lithologique des gneiss gris du Bas Limousin, nous ont servi d'illustration des phénomènes d'*anatexie*. Elles offrent un bon exemple de *migmatite* à séparation nette des phases :

- une phase « *mobilisée* » par la fusion partielle du gneiss, de composition apparente proche de celle d'un granite. Avec cependant une question restant en suspens: comment expliquer l'absence de feldspath potassique¹⁰ ? Autrement dit, où passe le potassium ? Dans l'état actuel des recherches, il n'y a pas encore de réponse...

- une phase réfractaire, la « *restite* », dont l'intérêt est de présenter une recristallisation plus complète que celles observées dans les stades moins avancés du *gradient de métamorphisme*. La *staurolite* a complètement disparu, et l'*almandin* réapparaît avec une nouvelle génération de grands cristaux de *biotite* et de *sillimanite*. Cette paragenèse de minéraux bien formés s'explique par les conditions qui ont prévalu au moment de sa formation, comme le schématise la **figure 2** : elle se situe bien après la phase de contrainte et de déformation la plus intense, mais au paroxysme de température du gradient.

3. Migmatites du dôme métamorphique de Gavarnie/Héas (Hautes-Pyrénées)

Les Pyrénées donnent l'exemple d'une chaîne intracontinentale entre plaque ibérique et plaque européenne, formée en deux épisodes orogéniques [5]. Le premier est contemporain du cycle hercynien, le second l'est du cycle alpin. Bien que ce soit l'orogénèse alpine qui ait imprimé la marque structurale majeure à la chaîne, les terrains paléozoïques, bouleversés à l'Hercynien, sont partout présents dans le cœur de la chaîne, et constituent ce qu'il est convenu d'appeler sa « zone axiale ». Cette zone permet d'observer les vestiges souvent remarquablement conservés de l'action de l'orogénèse hercynienne sur les vieux terrains sédimentaires de l'Ordovicien, du Silurien et du Dévonien, marquée par des plissements, des écaillages des séries stratigraphiques, enfin par un métamorphisme de haute température¹¹. Ce dernier s'accompagne d'*anatexie*, et c'est ce dernier point qui nous intéresse.

Dans les Pyrénées centrales, le métamorphisme hercynien se manifeste par la formation et le développement de grands dômes structuraux métamorphiques, associés à la mise en place de roches plutoniques [9]. Ces dômes forment un socle qui a été recouvert par les énormes nappes de charriage déplacées par l'orogénèse alpine. Nous pourrions tout simplement ignorer l'existence de ces structures métamorphiques, si par bonheur l'édifice n'avait pas été profondément disséqué par l'érosion glaciaire puis fluviale du Quaternaire.

C'est le cas du dôme dit de Gavarnie/Héas, qui ne se révèle que grâce aux fenêtres sculptées par un glacier géant¹² dans les nappes qui recouvraient le dôme.

Pourquoi s'intéresser à cette formation dans le cadre de cet entretien ?

Pour trois raisons. Tout d'abord, le complexe de Gavarnie/Héas offre une très belle diversité de types pétrographiques [6]. Ensuite, les textures et les paragenèses de ses *migmatites* sont différentes de celles décrites plus haut pour le Bas Limousin. Enfin, les conditions de

¹⁰ Le point 1 de la loi énoncée par Tuttle et Bowen (§ 3.1) n'est pas complètement respecté !

¹¹ À ne pas confondre avec le « métamorphisme pyrénéen », beaucoup plus tardif.

¹² Au Quaternaire, c'était le plus grand glacier des Pyrénées, qui prenait sa source au voisinage du mont Perdu actuel et s'étendait sur 70 km, jusqu'à Adé, au-delà de Lourdes.

gradient métamorphique régional ne sont pas les mêmes, les pressions restant plus faibles que dans le cas précédent.

Le cadre grandiose des cirques de Gavarnie et de Troumouse confère aux caractères tectoniques du paysage une netteté et une dimension incomparables. Le prélèvement d'échantillons n'a guère de limite que celle fixée par le règlement dans la zone de coeur du Parc National.

3.1. Les *migmatites* sur le terrain

La carte schématique de la **figure 11** fait apparaître les deux fenêtres ouvertes dans la nappe de Gavarnie, qui offrent l'occasion d'observer les gneiss migmatitiques ainsi que les formations plutoniques associées.

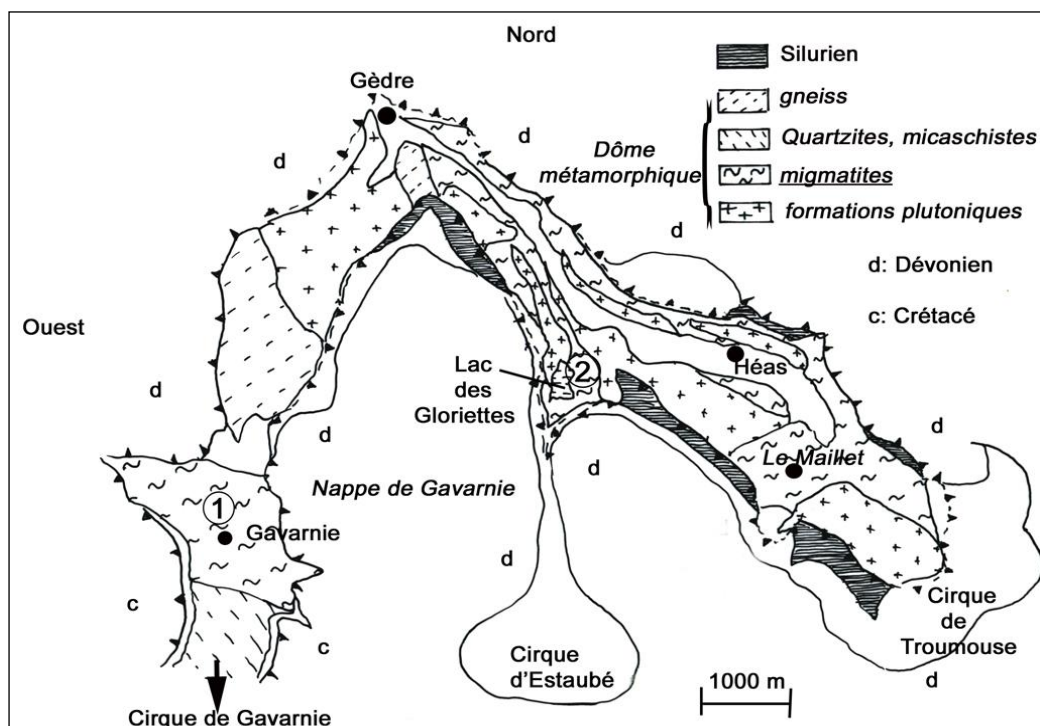


Figure 11. Sur cette carte géologique schématique, les terrains du dôme métamorphique apparaissent grâce aux deux fenêtres ouvertes par le glacier dans les terrains dévoniens de la nappe de Gavarnie, charriés par l'orogénèse pyrénéenne. Ces terrains omniprésents autour de Gavarnie, Héas et Gèdre, sont indiqués par la lettre **d**, pour Dévonien. Le Carbonifère est signalé par la lettre **c**.

La première fenêtre à l'ouest est celle creusée par le gave¹³ de Gavarnie, qui naît dans le cirque du même nom (flèche sur la figure). La seconde fenêtre, à l'est, est celle creusée par le gave de Héas, prenant sa source dans le cirque de Troumouse.

Les emplacements des prélèvements sont indiqués par les chiffres **1** (juste au nord du village de Gavarnie) et **2** (au pied du barrage de retenue du lac des Gloriettes), entourés d'un cercle.

Dessin d'après les cartes géologique du BRGM à 1/50 000, feuilles de Vielle-Aure et de Gavarnie [6].

Les formations plutoniques, dans la fenêtre d'Héas, sont étroitement imbriquées au sein des gneiss migmatitiques. La **figure 12**, avec son dessin d'interprétation **12 bis**, illustre cette imbrication dans le socle métamorphique.

¹³ Gave est le terme bigourdan pour désigner un torrent.



Figure 12. Photo du chaînon sud séparant le cirque de Troumouse de celui d'Estaubé, prise depuis le versant nord (voir dessin interprétatif sur la **figure 12 bis**).

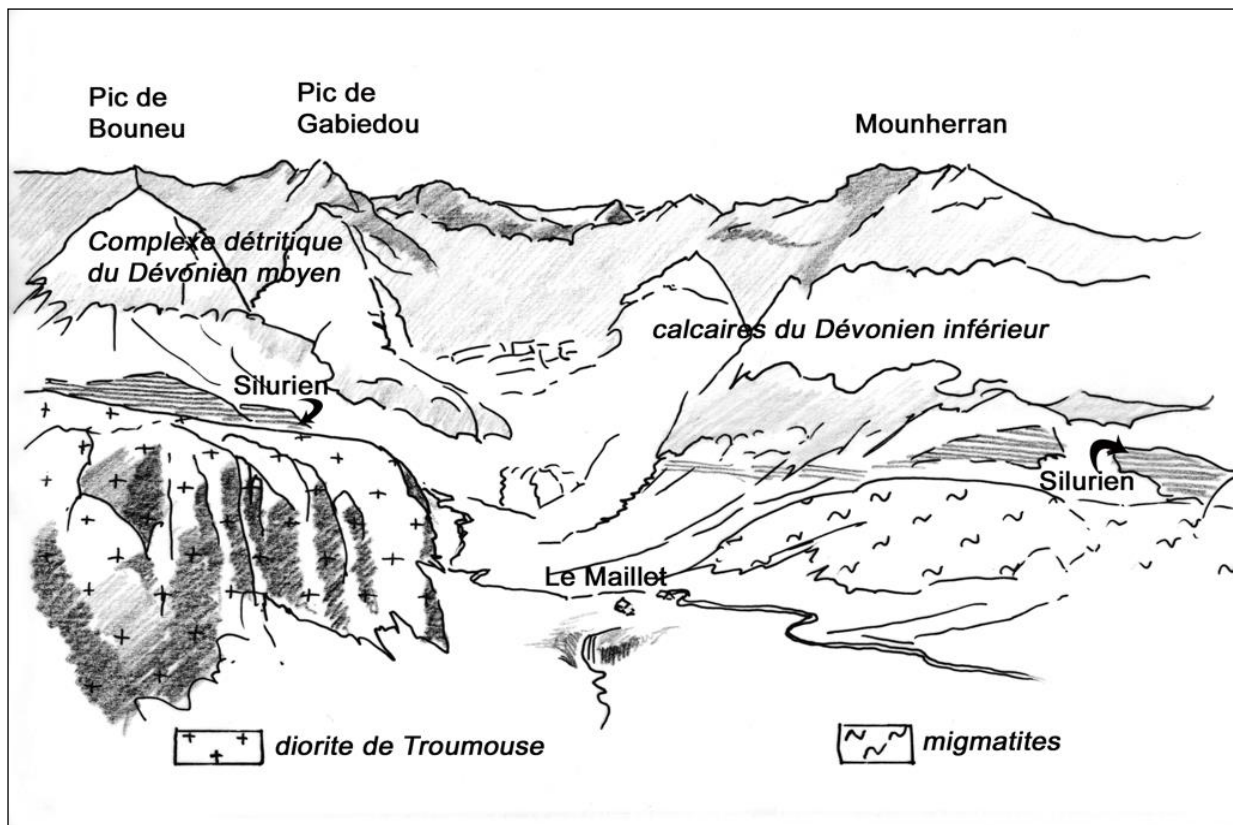


Figure 12 bis (dessin interprétatif de la **figure 12**).

Au centre, le lieu dit « Le Maillet », d'où il est possible de s'élever vers l'ouest (droite du cliché) pour observer le contact chevauchant entre le socle de *migmatites* et les terrains du Silurien, base de la nappe de Gavarnie. À gauche, le massif de *diorites* de Troumouse constitue le point le plus haut du socle.

Les *migmatites* sont facilement accessibles au lieu dit « Le Maillet », et jusqu'au contact anormal de la surface de chevauchement de la nappe, marqué par l'apparition des *ampélites*¹⁴ graphiteuses du Silurien. La couche formée par ces *ampélites* a joué le rôle de couche « savon » entre la nappe et le socle métamorphique.

Les plus belles *migmatites* peuvent être visitées facilement en montant par la route jusqu'au barrage des Gloriettes, au-dessus de la rive gauche du gave d'Héas : c'est l'emplacement noté 2 sur la carte schématique de la **figure 11**.

Les derniers deux cent mètres sur la route en lacets, avant d'arriver au barrage, permettent d'échantillonner granite d'anatexie et migmatites à *cordiérite* et *sillimanite*. À l'œil nu, la *cordiérite* est bien visible dans le leucosome, en cristaux millimétriques de couleur jaune à bleu verdâtre, regroupés en essaims, comme le montre la **figure 13**.

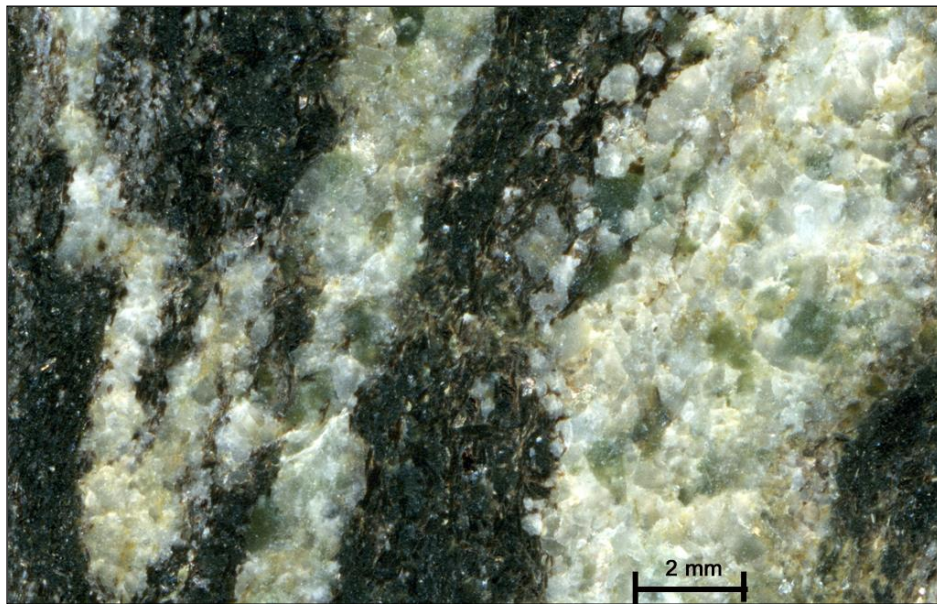


Figure 13. Coupe polie dans une *migmatite* rubanée, à proximité du barrage des Gloriettes. Les leucosomes forment des lits larges de quelques millimètres à plusieurs centimètres, nettement séparés des lits de mélanosome. Ils représentent une fraction plutôt majoritaire du volume des migmatites. Les cristaux de *cordiérite* apparaissent en essaims dans les lits de leucosome au milieu des grains de quartz et de feldspaths de structure équante¹⁵. Les lits de mélanosome, à foliation marquée, présentent une très forte concentration en *biotite*. On verra que la *sillimanite* est localement présente et parfois abondante.

L'anatexie est bien avancée dans ces *migmatites*, le mésosome (paléosome) étant bien moins abondant que le néosome. On note, sur la **figure 13**, que les lits de mélanosome sont « vidés » de la composante quartzo-feldspathique. Leur épaisseur peut dépasser le centimètre. Dans ce dernier cas, on observe au cœur de ces lits des amas enchevêtrés de grosses *biotites*, recristallisées dans la phase de décompression, au cours de laquelle la température a atteint sa valeur maximale (**figure 14**).

¹⁴ *Ampélites* : du terme grec *ampelos*, qui signifie vigne ! En effet, il s'agit d'une roche schisteuse, noire, dérivée d'argiles riches en matières organiques et en pyrite, anciennement utilisée pour traiter la vigne. Les *ampélites* au-dessus du Maillet, en montant vers le fond du cirque de Troumouse, sont métamorphisées et constellées de cristaux d'andalousite, faciès *chiastolite*.

¹⁵ Les cristaux ne présentent pas d'orientation préférentielle.



Figure 14. Coupe polie dans une *migmatite* rubanée, à proximité du barrage des Gloriettes. Au cœur de ce lit épais de mélanosome, les *biotites* ont recristallisé dans la phase finale de montée en température, en grosses lattes polygonales enchevêtrées.

Un sentier qui fait le tour du lac, par les rives nord puis ouest (**figure 15**), permet d'observer une formation plutonique originale, un petit massif de roches magmatiques ultrabasiques [8]. En effet, l'assise à gauche du barrage est faite de *gabbro* à *hornblende*, tandis que celle de droite est partie intégrante du socle des *gneiss migmatitiques*. Ce massif de *gabbro*, allongé vers le nord sur environ 2 000 mètres, offre une grande variété de types lithologiques, allant de *péridotites* à des *pyroxénites* à *hornblende*, et à des *hornblendites* massives.



Figure 15. Retenue du barrage des Gloriettes, « suspendue » à 250 mètres au-dessus du gave d'Héas. L'assise à gauche du barrage est faite de *hornblendite* noire massive ; c'est la bordure du petit massif de *gabbro*. Les *migmatites* sont présentes partout ailleurs sur les berges du lac. Au fond, c'est-à-dire en rive droite du gave de Héas, les flancs abrupts de la vallée ont été taillés par le glacier dans le socle de gneiss, et on discerne bien la limite supérieure de ce dernier, correspondant à l'accident majeur de chevauchement par les terrains paléozoïques de la nappe de Gavarnie.

Le lac des Gloriettes est entièrement contenu par la formation anatectique du socle métamorphique, à l'exception de sa rive nord, dont on a vu qu'elle bordait le petit massif ultrabasique de *gabbro*. La photo de la **figure 16** donne une idée des textures magnifiques et

variées de cette formation anatectique, offertes à la vue tout au long de la promenade autour du lac, et aussi au pied du barrage.



Figure 16. Affleurement de *migmatite* à structure hétérogène au bord du lac des Gloriettes (emplacement **2** sur la carte schématique de la **figure 11**).
Le cliché couvre une surface de 130 x 85 cm.

Au centre du cliché de la **figure 16**, un panneau de *migmatite* rubané ressort avec un fort contraste. Les lits du leucosome peuvent atteindre jusqu'à 10 cm¹⁶, et représentent en importance à peu près le même volume que les lits du mélanosome. Le mésosome est minoritaire. Le rubanement est ondulé par les plis et localement boudiné à cause des différences de compétence entre les matériaux des différents lits. Le panneau est emballé dans une *migmatite* où le rubanement est moins régulier, ou tend à disparaître par homogénéisation, pour tendre vers un granite d'anatexie.

Enfin, la roche est recoupée assez nettement, en haut à gauche, par une grande enclave gris sombre, dont la texture est encore complètement différente. Cette fois, le rubanement est très fin et régulier, et s'apparente plutôt à une foliation dans laquelle l'anatexie n'a pas produit d'effets massifs de collecte du liquide.

L'hétérogénéité de ces migmatites sera interprétée au § 3.3, et la question de la composition sera abordée par l'examen des paragenèses au microscope, dans le § 3.2 consacré à l'observation des lames minces taillées sur les échantillons prélevés.

Transportons-nous maintenant dans la « fenêtre » ouest, celle du gave de Gavarnie, juste avant l'entrée du village de Gavarnie, lieu historique et emblématique du pyrénéisme ! L'intérêt de ce petit massif de *migmatites* est de montrer des structures d'anatexie encore différentes de celles observées au barrage des Gloriettes. La *cordiérite* est toujours abondante, mais la *sillimanite* est plus rare. Le cliché sur coupe polie de la **figure 17** fait apparaître une structure nettement bréchique.

¹⁶ Ce qui donne l'échelle du cliché.

Des fragments centimétriques à pluricentimétriques de paléosome **a** et de néosome **b** sont disposés en désordre et imprégnés par un leucosome **d** largement prédominant. Les fragments n'ont pas de contours nets (zones **c**) et ne sont pas cernés de restite.

Le caractère le plus original est dans le leucosome, qui a une structure pegmatitique, avec des cristaux de *feldspaths* centimétriques et des amas denses de *cordiérites* de taille millimétrique à centimétrique. Les *cordiérites* sont noyées dans des cristaux de quartz et toutes altérées en *pinite*¹⁷.

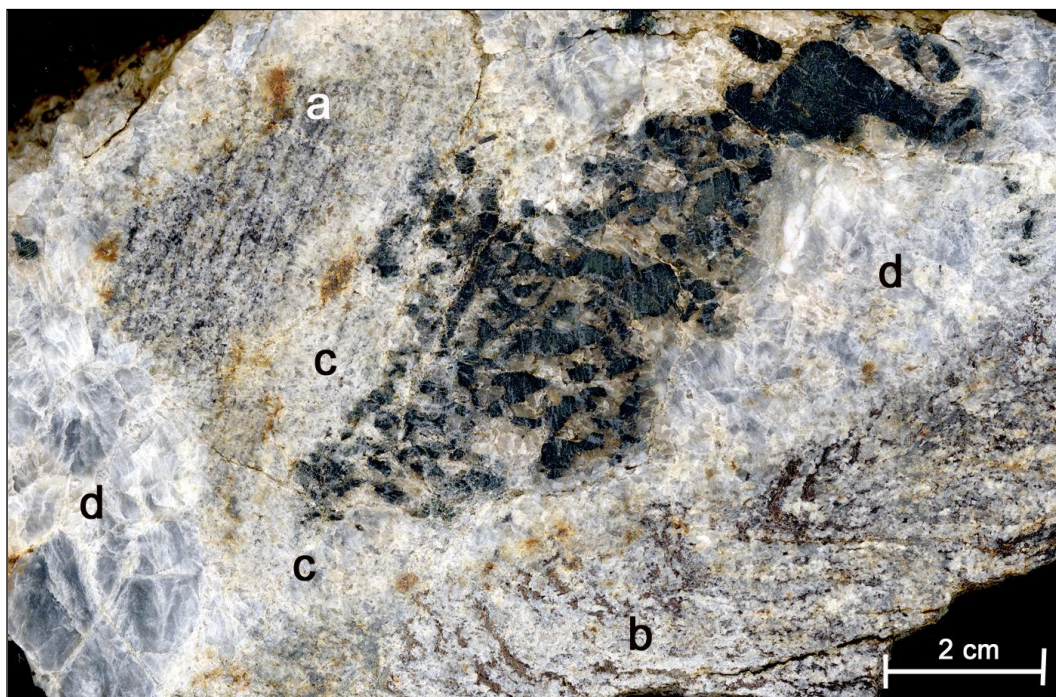


Figure 17. Migmatite à structure bréchique, récoltée avant l'entrée du village de Gavarnie, au lieu dit le Turon de l'église (emplacement **1** sur la carte schématique de la **figure 11**).

- a** : fragment de paléosome, à texture de *gneiss* ;
- b** : néosome, avec charnières de pli ;
- c** : zone de transition floue entre paléosome ou néosome d'une part, et leucosome d'autre part ;
- d** : leucosome à gros cristaux quartzo-feldspathiques, et *cordiérite* en amas entourés de *quartz*.

Sur le même échantillon prélevé, on observe un prisme monocristallin centimétrique de *cordiérite*, pseudomorphosé en *pinite*.

Le caractère bréchique est habituellement interprété comme résultant d'une fracturation hydraulique au toit du socle de *migmatite*. La masse de leucosome serait alors suffisante pour développer une poussée d'Archimède responsable de la fracturation.

Dans le cas présent, la poussée a pu être amplifiée par la pression des fluides libérés en phase de décompression au cœur du dôme. Cette interprétation est cohérente avec le caractère pegmatitique du leucosome.

¹⁷ *Pinite* : mica blanc, encore désigné par le terme de *hydromuscovite*, résultant de l'altération par hydratation de la *cordiérite*.

3.2. Atlas pétrographique des paragenèses de *migmatites* de Gavarnie/Héas

Dans ce paragraphe, nous décrivons, sous la forme d'un petit atlas pétrographique de clichés pris au microscope polarisant, les paragenèses observées sur des *migmatites* récoltées sous le barrage des Gloriettes.

Jointe aux observations des sites de récolte, cette analyse nous permettra d'étayer l'interprétation au § 3.3, tirée des publications [7] et de la synthèse présentée dans les notices des cartes géologiques à 1/50 000 des feuilles de Vielle-Aure et de Gavarnie [6].

Notre objectif est donc essentiellement didactique : montrer comment utiliser la technique des lames minces et quelles méthodes d'interprétation mettre en œuvre.

Les questions classiques auxquelles on cherche à donner une réponse sont les suivantes :

- quel est le faciès et quel est le type de gradient métamorphique rencontré ?
- quel est le degré d'anatexie ?
- quelle est la nature des roches d'origine ?
- quelle relation y a-t-il avec les roches plutoniques intimement associées à ces gneiss migmatitiques ?

Quatre lames minces ont été taillées sur deux prélèvements :

- les **lames 110a et 110b**, sur un affleurement au pied du barrage, dans une zone intégralement migmatitique. Ces lames sont présentées en premier : **clichés n° 1 à 8**.

Elles montrent :

- d'une part, la structure imposée à la migmatite par le champ de contraintes tectoniques, en présence du phénomène d'anatexie ;
- d'autre part, l'importance prise par la *sillimanite* et la place que prend cette dernière dans la texture de la *migmatite*.

- les **lames 2003-3, 2003-8 et 2003-11**, taillées dans une *migmatite* récoltée à une centaine de mètres en dessous du barrage, à proximité d'un massif de granite à *cordiérite*.

Leur intérêt est de montrer comment identifier et décrire la *cordiérite*, avec ses modes d'altération et d'inclusions : **clichés n° 9 à 13**.

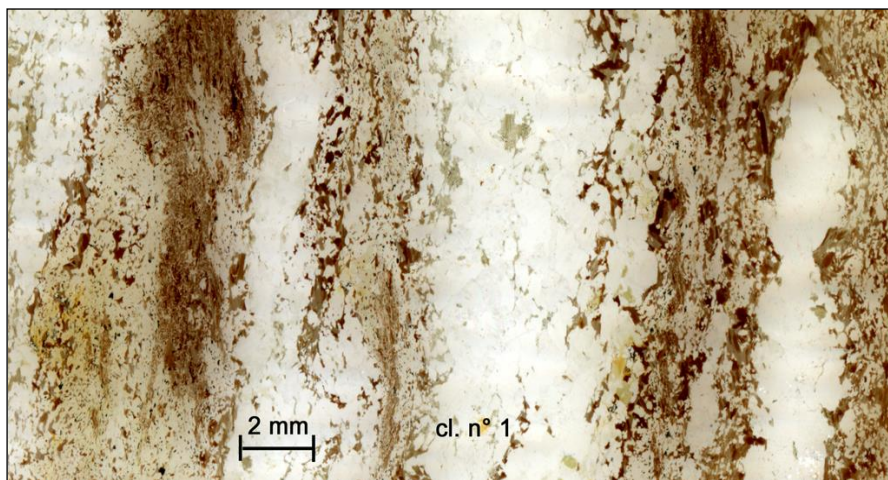
La légende de chaque cliché donne l'indication des conditions d'observation :

- ***LPNA, signifiant lumière polarisée non analysée ;***
- ***LPA, signifiant lumière polarisée analysée ;***
- ***X 7, objectif de grossissement sept fois ;***
- ***X 60, objectif de grossissement soixante fois.***

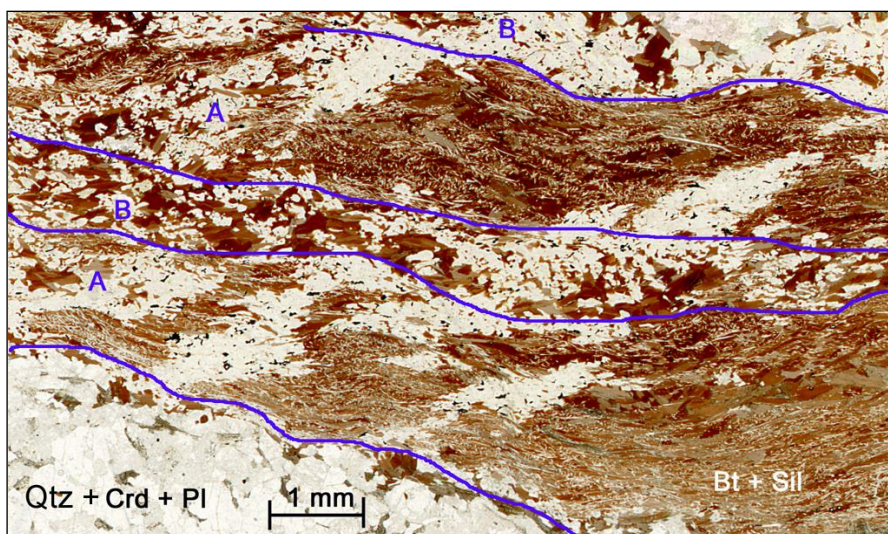
L'échelle est en général portée directement sur le cliché.

- Lames 110a et 110b. Examen au scanner

Nous commençons par effectuer des scans en lumière naturelle sur les lames minces, pour identifier la structure de la *migmatite* et dégrossir la paragenèse.



Cliché n° 1. Scan en lumière naturelle sur la lame mince 110a. *Migmatite* rubanée, ayant subi l'anatexie en présence d'une contrainte d'extension. Le rubanement est parallèle à la direction de l'extension, avec alternance de leucosomes, de 2 à 10 mm de large, et de mélanosomes. Le leucosome à l'extrémité droite du cliché a été boudiné par la contrainte.



Cliché n° 2. Scan en lumière naturelle sur la lame mince 110b. *Migmatite* rubanée, semblable à 110a. Le cliché montre la structure en sandwich d'un mélanosome. La roche a subi deux phases de déformation. La première phase par raccourcissement et création de plis très serrés sur le *gneiss* avant anatexie. La seconde par extension (étirement) perpendiculairement à la première, avec une contrainte de cisaillement. Il en résulte que le ruban du mélanosome est déchiré en fragments. Ces fragments ont une forme en amande effilée et ondulée qui est la marque du type de contraintes décrites. Entre les fragments, le leucosome est venu s'infiltrer et recristalliser, témoignant de la forte mobilité de la phase liquide.

Sur le **cliché n° 2**, le mélanosome est finement divisé en lits alternés, **A** et **B**.

- Lits **A** : ces lits, riches en *biotite* et en *cordiérite*, sont ponctués d'une multitude de cristaux de *sillimanite*. La *biotite* de ces lits se transforme massivement en *sillimanite* par réaction

avec le *quartz* à haute température. La réaction libère l'eau des *biotites*, laquelle vient accélérer l'anatexie. Les fragments de ces lits ont été déformés en amandes effilées et ondulées par la contrainte de cisaillement : voir le détail d'un gros fragment sur le **cliché n° 2 bis**.

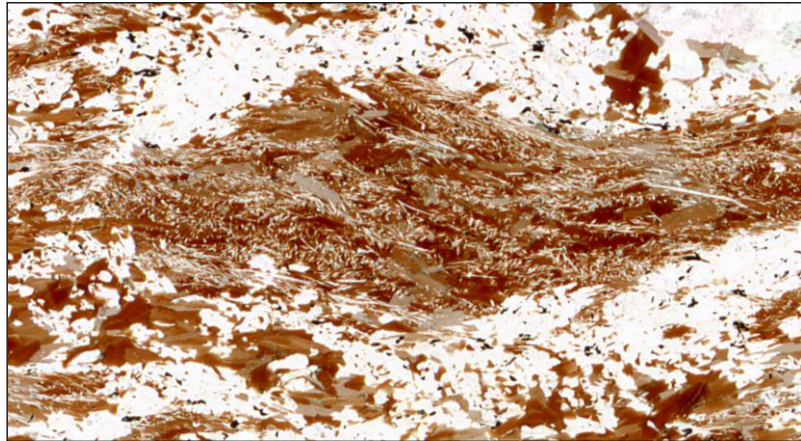
• Lits **B** : la composition est telle que la *sillimanite* ne se développe pas, et les *biotites* ont recristallisé en grandes lattes isolées ou en paquets, sur fond de *cordiérite*.

La raison de ces différences de réactions à haute température est à rechercher dans les différences de composition des sédiments pélitiques d'origine, plus ou moins argileux, ou plus ou moins riches en fer. La concentration d'origine en alumine joue le rôle essentiel.

Cliché n° 2 bis.

Scan en lumière naturelle :
détail du **cliché n° 2**.

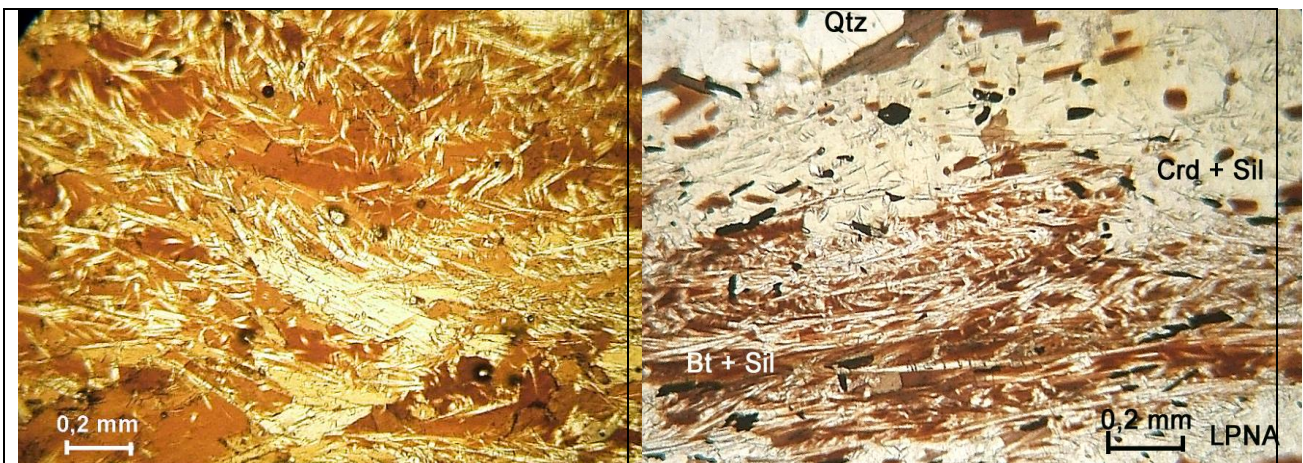
Fragment de lit de mélanosome
de type A, de forme en amande
effilée et ondulée. Les lattes de
biotite sont constellées de
prismes de *sillimanite* limpides
dont certains atteignent le
millimètre.



- Lames 110a et 110b. Examen au microscope polarisant

La paragenèse est la suivante : *quartz*, *cordiérite*, *plagioclase* et *sillimanite*. Zircons et nombreux oxydes opaques. *Grenats* peu fréquents.

Nous présentons d'abord les textures en relation avec la *sillimanite*.



Cliché n° 3. LPNA X 7. Lame mince 110b.

La *sillimanite* envahit en masse les *biotites*. Il s'agit de la forme de haute température du silicate d'alumine, en prismes automorphes allongés, très bien formés, en forme de baguettes. Les cristaux peuvent s'accumuler jusqu'à faire disparaître la *biotite*.

La *sillimanite* est syntectonique, la plupart des grands prismes sont orientés dans le sens de la déformation.

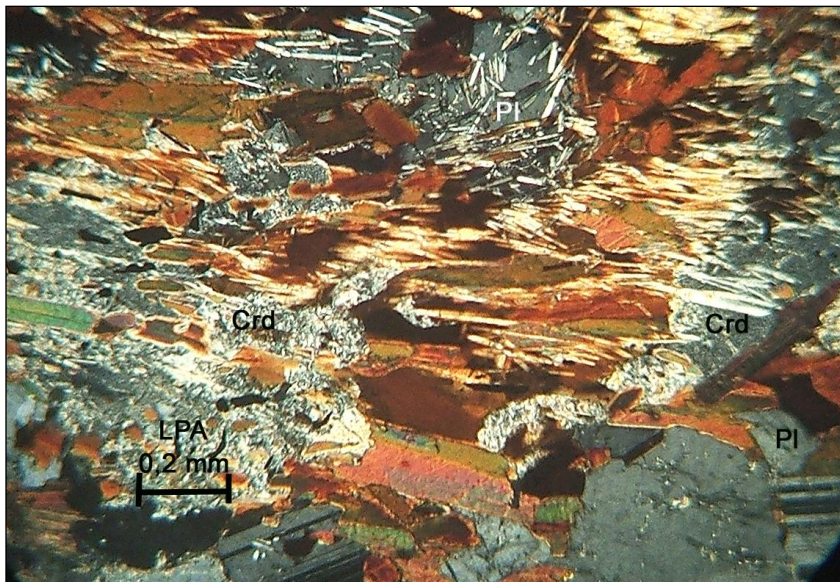
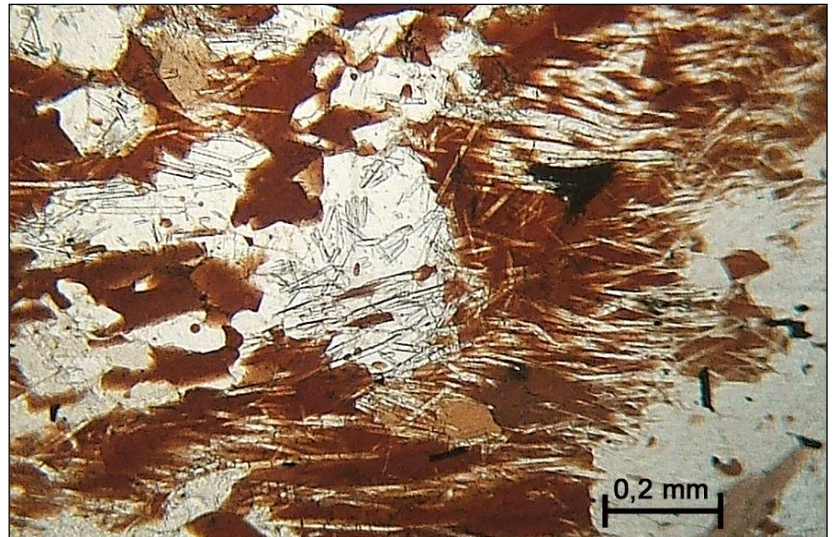
Cliché n° 4. LPNA X 7. Lame mince 110b.

Les *cordiérites* et les *plagioclases* sont aussi envahis par la *sillimanite*, mais moins massivement que les *biotites*. La première phase de compression se traduit dans le mélanosome par des plis très serrés, révélés par les petits prismes courts de *sillimanite*, enroulés en recristallisation polygonale autour des charnières des plis.

Les grands prismes (jusqu'à 1 mm) sont tous alignés horizontalement. **Crd** : *cordiérite*. **Sil** : *sillimanite*

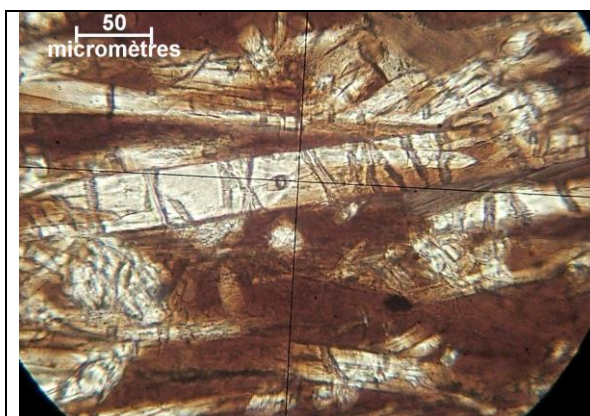
Cliché n° 5.

LPNA X 7. lame mince 110b. Les cristaux de *sillimanite* apparaissent en inclusion dans les *quartz* et les *plagioclases* (au milieu du cliché), sous la forme de prismes limpides à fort relief, pas nécessairement orientés comme dans les *biotites*. Ils ont pu se développer en phase post-tectonique, simultanément avec la recristallisation des *feldspaths* et des *quartz*. Les grands prismes de *sillimanite* sont courbés par les contraintes d'étirement et de cisaillement.

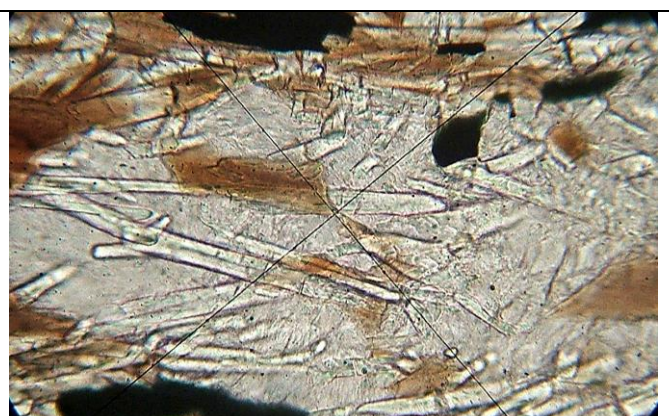
**Cliché n° 6.**

LPA X 7. lame mince 110b et même emplacement que celui du cliché n° 5. La LPA permet de distinguer entre *quartz*, *plagioclase* et *cordiérite*, cette dernière fortement altérée. Noter la disposition de la *sillimanite* en fagots de prismes parallèles, courbés et serrés dans les *biotites*. La *sillimanite* polarise dans la seconde moitié du 1^{er} ordre.

Crd : cordiérite.

**Cliché n° 7.**

LPNA X 60. lame mince 110b. Macles mécaniques sur les prismes de *sillimanite* sous contrainte dans les *biotites*.

**Cliché n° 8.**

LPNA X 60. lame mince 110b. Dans les *quartzs* et les *feldspaths*, les prismes de *sillimanite* sont indemnes de macles mécaniques.

- Lames 2003-3, 2003-8 et 2003-11. Examen au microscope polarisant

Nous présentons maintenant les paragenèses observées sur une *migmatite* prélevée au voisinage d'une intrusion. Ces intrusions, on l'a vu au § 3.1, sont nombreuses dans tout le secteur de la « fenêtre » de Héas. Examinées au scanner, les lames minces font apparaître un leucosome homogène, très majoritaire, fait d'une mosaïque de gros cristaux de *quartz* et de *cordiérite* de texture équiaxe. Les restites de *biotite* et de *sillimanite* sont déchiquetées et dispersées dans le leucosome.

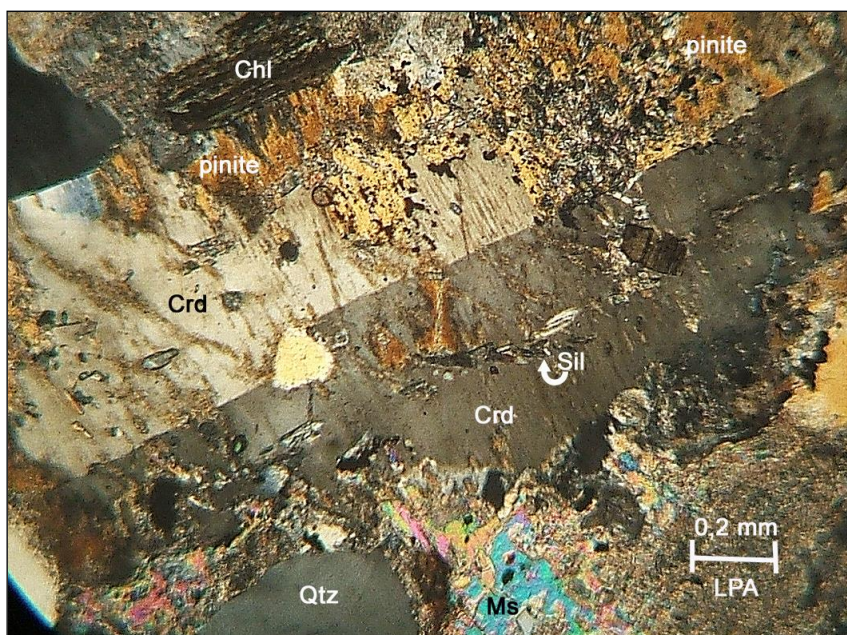
Grâce à la taille des cristaux de *cordiérite*, de leur abondance et malgré leur très relative fraîcheur, cette *migmatite* va nous servir pour décrire ce minéral du métamorphisme et ses critères d'identification. Rappelons que la *cordiérite* est un des minéraux « index » du métamorphisme de pressions faibles à moyennes (voir les Entretiens n° III et IV).

Cliché 9. LPA X 7.

Lame mince 2003-8.

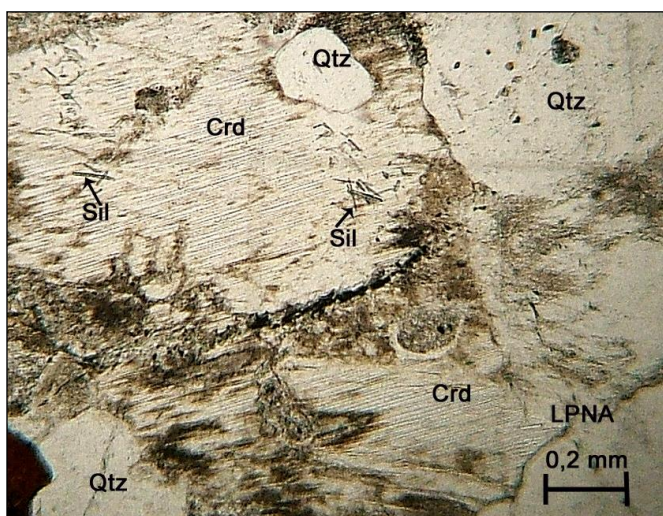
Grand cristal de *cordiérite* avec macle simple. La moitié supérieure est en partie altérée en *pinite*, tandis que le bas de la moitié inférieure du cristal s'est transformé en *muscovite* (voir aussi cliché 13).

Inclusions orientées de *sillimanite*, pointées par la flèche incurvée et montrées sur l'agrandissement du cliché 11. Autre inclusion : un petit *plagioclase* de 0,15 mm. **Chl** : *chlorite*.



Les teintes de polarisation, visibles sur le cliché 9, sont semblables à celles du quartz. Cependant, la *cordiérite* est reconnaissable à ses altérations en *muscovite* et *pinite*, altérations souvent bien envahissantes ! La trace du plan de macle simple est interrompue, puis décalée

de 0,1 mm par un défaut sur lequel un cristal triangulaire de *pinite* s'est développé. Un autre critère de reconnaissance est dans le clivage suivant le plan (001)¹⁸. Sur le cliché, les fines traces de clivage apparaissent quasi perpendiculaires à la trace du plan de macle. Le clivage apparaît mieux, en LPNA, sur le cliché 10.



Cliché 10. LPNA X 7. Lame mince 2003-8.

Deux cristaux de *cordiérite* présentent de fines traces de clivage (001), régulièrement espacées. Les cristaux sont séparés par des produits d'altération, dont la ligne sombre de *chlorite*. Inclusions de *sillimanite*.

¹⁸ Dans son ouvrage de détermination des minéraux des roches, M. Roubault parle de « clivage imparfait, indistinct en lame mince ». Le cliché 10 montre qu'il est bien imparfait, mais parfaitement distinct !

Le **cliché 11** montre les inclusions de petits prismes de *sillimanite* dans la *cordiérite*. Ils sont répartis le long d'un axe parallèle à la trace du plan de macle.

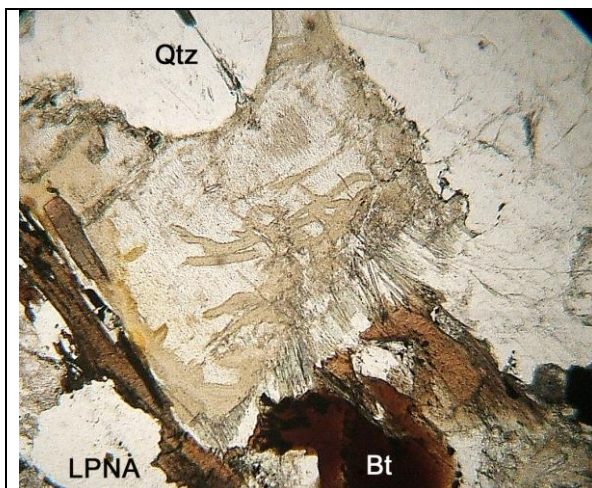
Cliché 11.
LPA, détail grossi du **cliché 9**
(flèche incurvée),
après rotation de 90°,
pour faire ressortir la *sillimanite*
avec le maximum de relief.
La teinte de polarisation de la
sillimanite est bleutée, proche
de la teinte dite « sensible » du
premier ordre, correspondant à la
biréfringence de 0,002 à 0,0023,
citée dans la littérature.



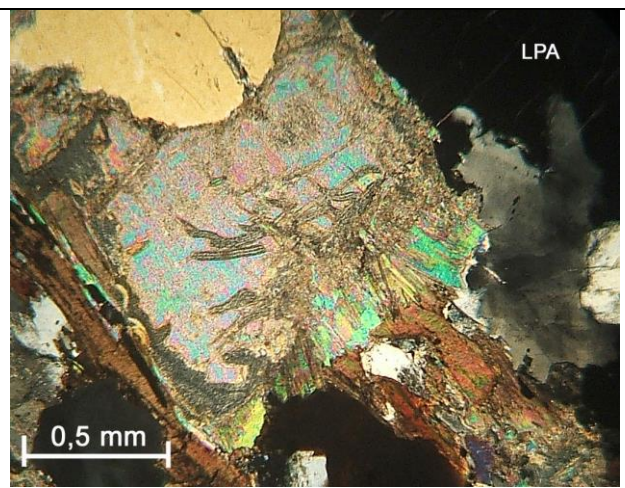
Les clichés suivants, **12 à 14**, montrent les étapes de l'altération qui envahit les cristaux de *cordiérite*. La biréfringence de la *cordiérite* est de 0,009 à 0,016 (voir Entretien n° III). Elle est proche de celle des plagioclases (de 0,009 à 0,011). Le mode d'altération peut donc se révéler utile pour distinguer ce minéral des feldspaths.

Sur les **clichés 12 et 13**, un cristal de *cordiérite* entièrement altéré est entouré de quartz.

L'altération se fait en plusieurs étapes, marquées par une hydratation croissante.



Cliché 12. LPNA X 7. lame mince 2003-3.
Au centre, le grand cristal de *cordiérite* est entouré de quartz et de biotite. Les fines traces de clivage (001) sont peu distinctes, mais suffisamment visibles pour les observer comme amorces de la pseudomorphose par la *pinite*. Le cristal a été entièrement altéré, en deux étapes distinctes, commentées ci-contre, à partir du **cliché 13** en LPA.

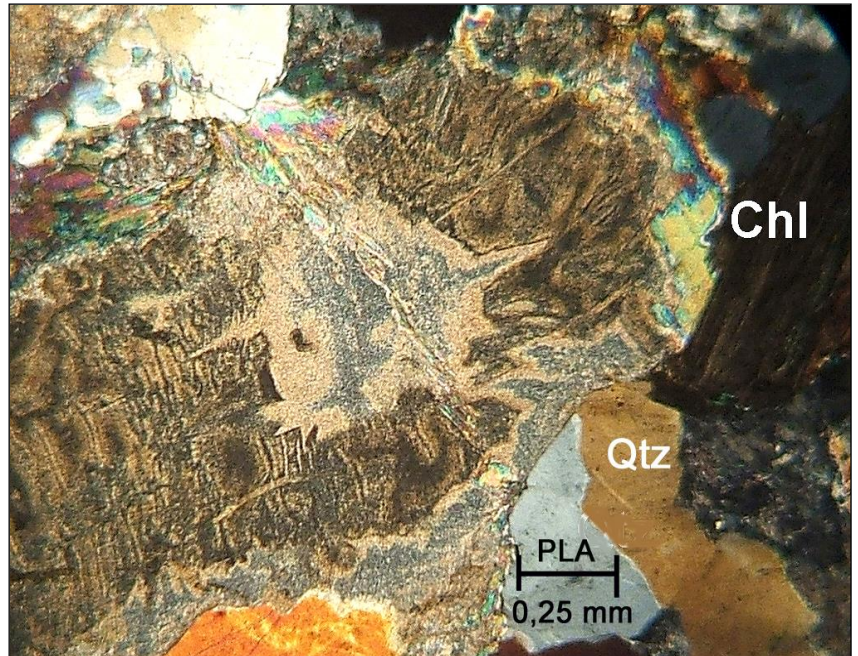


Cliché 13. LPA X 7. lame mince 2003-3.
Lors de la première étape d'altération, le cristal se transforme uniformément en *muscovite* (couleurs fraîches du second ordre caractéristiques). Puis l'hydratation se poursuit à partir des discontinuités, comme les bords du cristal, les défauts et les clivages, et aboutit à la pseudomorphose par la *pinite* (teinte de polarisation gris sombre).

Dans une première étape, la *cordiérite* se transforme en paillettes de *muscovite*, reconnaissable aux teintes moirées et fraîches du second ordre. Puis l'altération se poursuit avec l'apparition de textures typiques : les « trabécules* », illustrées sur le **cliché 14**. Ce sont elles qui permettent d'identifier à coup sûr le minéral d'origine, la *cordiérite*. Enfin l'altération aboutit en une pseudomorphose complète par la *pinite*.

Cliché 14.

LPA X 7. Lampe mince 2003-11.
Grand cristal de *cordiérite* entièrement altéré, et en phase de pseudomorphose par la *pinite*.
La texture d'altération est particulière à la *cordiérite* et est décrite dans l'ouvrage de M. Roubault, cité en référence, dans les termes suivants :
« Cette pseudomorphose s'effectue de façon très caractéristique à partir de la périphérie, des cassures et du clivage g_1 (001), sous forme de trabécules* constituées de petites et fines aiguilles disposées normalement aux épontes. Puis les trabécules s'anastomosent et envahissent progressivement tout le minéral... ».
Les « trabécules » sont en effet très visibles sur le cliché !



* Nous n'avons pas trouvé l'origine de ce terme qui ne figure que dans l'ouvrage cité ; il est vrai qu'il est la bible de la pétrographie !

3.3. Interprétation

Résumons nos observations :

- la fenêtre de Héas laisse apparaître un socle métamorphique, où les gneiss font place en plusieurs endroits à des *migmatites* évoluées, intimement imbriquées à ce qui semble être des intrusions de granite ;
- les paragenèses dominantes sont remarquables par l'importance de la *cordiérite* ;
- la structure des *migmatites* est en général rubanée, avec des lits de leucosome pluricentimétriques, majoritaires. Le leucosome est homogène, fait d'une mosaïque de gros cristaux de *quartz* et de *feldspath* de texture équante, ponctuée de *cordiérite* en essaims ;
- les lits de mélanosome, à *biotite* et *cordiérite*, sont « vidés » de la composante quartzofeldspathique, au profit des leucosomes. La *sillimanite* y est fréquente, dans sa forme de haute température. Elle peut même être envahissante, comme résultant de la réaction de la *biotite* avec le quartz ;
- les *migmatites* sont hétérogènes. Dans certaines d'entre elles, le rubanement est moins régulier, ou tend à disparaître par homogénéisation, pour tendre vers un granite d'anatexie. Les frontières sont floues.

Cette grande hétérogénéité des *migmatites* a été reconnue et décrite par les auteurs cités en [7]. Voici leur interprétation, telle quelle est rapportée en synthèse dans la notice de la carte géologique du BRGM, feuille de Vielle-Aure [6] :

« Les auteurs voient en cela la conséquence d'une fusion partielle qui se serait produite dans des roches préalablement litées, litage probablement d'origine sédimentaire. Selon la composition des lits, la fusion partielle est intervenue à des taux différents. »

À la question posée au début du § 3.2. :

« **Quelle est la nature des roches d'origine ?** »,

on peut répondre globalement qu'il s'agit de sédiments pélitiques, plus ou moins argileux, ou plus ou moins riches en silice, en fer... Les différences de réactions à haute température sont à rechercher dans les écarts entre les compositions. La forte concentration d'origine en alumine joue un rôle essentiel, l'abondance de la *cordiérite* dans les *migmatites* aussi bien que dans le granite d'anatexie en étant la preuve.

À la question :

« **Quelle relation y a-t-il avec les roches plutoniques¹⁹ intimement associées à ces gneiss migmatitiques ?** »,

la notice de la carte de Vielle-Aure conclut en faveur d'un **processus anatectique unique** pour expliquer l'imbrication et le voisinage simultané de *migmatites* et de granite d'anatexie, tous deux à *cordiérite* : « *L'étude pétrologique fait ainsi apparaître que ces granites d'anatexie correspondraient, par rapport aux migmatites environnantes, à une formation plus alumineuse, plus homogène, plus appropriée à la fusion.* » [6].

Enfin, à la question :

« **Quel est le faciès et quel est le type de gradient métamorphique rencontré ?** »,

la réponse est donnée par la détermination des conditions de température et de pression compatibles avec l'apparition des *migmatites* et le développement ultime de l'anatexie (granite) : elles sont de l'ordre de 700 °C et 4 kbar [7].

Le faciès est le même que celui des *migmatites* du Bas Limousin, décrit au chapitre 2 : c'est le faciès à *amphibolite* (voir l'Entretien n° IV), à sa limite anatexique. Toutefois, le gradient est caractérisé par des valeurs de la pression significativement plus faible : 4 kbar, au lieu de 6 kbar. Cette différence, jointe à la composition hyperalumineuse du protolithe, donne tout leur intérêt aux paragenèses observées, où la *cordiérite* domine au lieu de la *cyanite*. Enfin, la *sillimanite* est beaucoup mieux exprimée, probablement parce que la température maximum atteinte a été plus élevée. Ce qui se traduit aussi par une anatexie nettement plus avancée.

En conclusion du paragraphe sur les granites à *cordiérite*, dans la notice de la carte géologique de Héas, les auteurs écrivent : « *Par ailleurs, les granites d'anatexie, sécants sur la foliation, et parfois délimités par des roches non anatectisées, ont probablement subi une légère ascension relative au sein des migmatites, du fait de leur densité et de leur viscosité relativement faibles, lors d'une montée diapirique de l'ensemble.* » [6].

Nous avons vu la démonstration de cette montée diapirique, responsable de la fracturation hydraulique et de la bréchification dans la fenêtre de Gavarnie (**figure 17**). Reste à trouver des preuves aussi convaincantes dans la fenêtre de Héas !

¹⁹ Il s'agit ici uniquement des granites à *cordiérite*. Les intrusions de roches basiques, comme les gabbros du barrage des Gloriettes, seraient antérieures à leur formation et à l'anatexie.

4. Bibliographie

- [1] Le lecteur trouvera tous les développements utiles sur l'origine et la formation du granite, à partir d'un magma différencié, dans l'ouvrage de BONIN B. (1998) – *Pétrologie endogène*. Dunod éd., pages 167 à 169. L'anatexie expérimentale est décrite dans les pages 125 à 129.
- [2] KORNPORST J. (2001) – *Métamorphisme et roches métamorphiques, signification géodynamique*. 3^e édition. Dunod éd.
- [3] Notice de la carte géologique à 1/50 000 de Tulle, n° XXI-34. BRGM.
- [4] On trouvera une étude détaillée des types de migmatites du Bas Limousin dans la thèse de LAMOUILLE B. (1979) – *Géologie structurale et pétrologie de la région d'Uzerche*. Éditions du BRGM.
- [5] On trouvera une excellente synthèse sur la géologie et la formation des Pyrénées dans le *Guide géologique régional des Pyrénées centrales franco-espagnoles* (1992), Masson éd.
De même, dans le fascicule intitulé : *Pyrénées : 500 millions d'années*, coédité par le Parc national des Pyrénées et le BRGM. Les deux ouvrages donnent des descriptions d'itinéraires géologiques dans le secteur de Gavarnie.
- [6] Notices des cartes géologiques à 1/50 000 de Gavarnie, n° 1082, et de Vielle-Aure, n° 1083. BRGM.
- [7] DEBAT P., DAHMANI A., DRIOUCH Y. (1996) – *Le complexe métamorphique et anatectique de Gavarnie*. In Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées : BARNOLAS A., CHIRON J.-C., GUERANGE B. (Coords), BRGM, ITGE. Vol 1, p. 565-568.
- [8] DRIOUCH Y., ROUX L., DAHMANI A., DEBAT P. (1996) – *Formations ultrabasiqes et basiques associées aux formations métamorphiques et anatectiques des Pyrénées hercyniennes*. In Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées : BARNOLAS A., CHIRON J.-C., GUERANGE B. (Coords), BRGM, ITGE. Vol 1, p. 463-464.
- [9] Collectif (1995) – *Magmatisme hercynien*. Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées. Tome I, « Cycle hercynien ». Éditions du BRGM.

5. Lexique²⁰

Anastomose (du grec *anastomosis*, embouchure).

En chirurgie, communication établie entre deux conduits, ou nervures. En pétrographie, communication établie, à haute température et haute pression, entre deux clastes - ou deux blastes - par migration de silice et recristallisation.

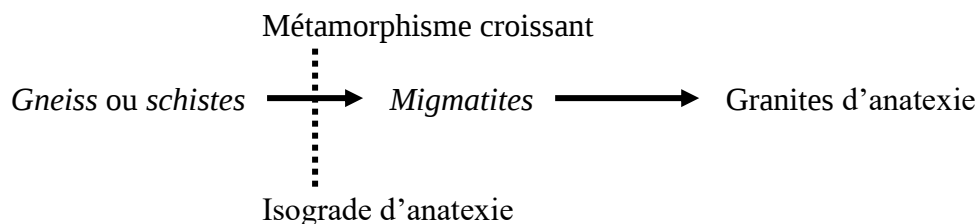
Anatexie. (Sederholm, 1907, du grec *anateksis* = fusion).

Processus par lequel des roches du métamorphisme général, soumises à des températures de plus en plus fortes, subissent une fusion partielle (ou différentielle) donnant des *migmatites*, puis une fusion totale ou presque, donnant un magma. Si celui-ci est de nature granitique, sa cristallisation conduira à un granite d'anatexie.

Le début de la fusion se produit à des températures dépendant du chimisme des roches et de la présence ou non de vapeur d'eau.

L'ordre de fusion des minéraux est inverse de l'ordre de la cristallisation fractionnée et des suites réactionnelles : une roche riche en *albite* et *quartz* commence à fondre à une température plus basse qu'une roche à *plagioclases* basiques.

Pour marquer le début d'apparition de l'anatexie dans une région métamorphique, on parle d'isograde d'anatexie.



Arcs polygonaux. Assemblages de petits cristaux à contours polygonaux dans les charnières des plis, ces cristaux résultant de la fragmentation de cristaux antetectoniques de plus grande dimension. C'est la recristallisation finale qui leur donne une forme géométrique régulière.

Fusion incongruente. Fusion qui ne conserve pas la composition moyenne de la roche et qui s'accompagne de séparation de phases.

Leucosome. Partie la plus claire du néosome.

Leucocrate. S'applique aux roches magmatiques riches en minéraux dits « blancs », comme le *quartz* et les *feldspaths*.

Mélanocrate. S'applique aux roches magmatiques riches en minéraux ferromagnésiens, en général sombres.

Mélanosome. Partie la plus sombre du néosome.

Métatexite. Roche métamorphique ayant subi un début d'anatexie.

²⁰ Définitions tirées pour la plupart du *Dictionnaire de géologie* d'A. Foucault et J.-F. Raoult. Masson éd. (2003) 5^e édition.

Migmatites (du grec *migma* = mélange).

Ensemble qui, à l'échelle de l'affleurement, non du petit échantillon isolé, est un mélange de roches de type *granite* et *gneiss*, celui-ci en général à grain grossier et à foliation souvent peu marquée ou confuse, avec *quartz*, *microcline* et *oligoclase*, myrmékites fréquentes, et, selon le cas, *biotite*, *muscovite*, *andalousite*, *sillimanite*, *cordiérite* et *grenat*.

Ces roches sont à la limite des roches métamorphiques catazonales et des roches magmatiques, et leur genèse est liée à une anatexie (voir ce terme, ci-dessus) partielle. Certaines parties de la roche fondent et constituent le *mobilisat*, qui est un magma de composition granitique. D'autres restent solides : c'est le *restat*, ou *restites*. Le *mobilisat* peut migrer et former des filonnets, souvent plissés suivant une forme caractéristique à charnières bien arrondies : les plis *ptygmaticques*.

Mobilisat. Parties de la roche ayant fondu en magma à composition granitique.

Néosome. Région ou lit en cours de migmatisation.

Paléosome. Région de la migmatite encore indemne de tout début de fusion.

Pléochroïsme. Variations de couleur de certains minéraux, dits pléochroïques, qui apparaissent au microscope, en lumière polarisée non analysée (lumière « naturelle »).

Restat, restite. Partie de la roche restant non mobilisée, après extraction du jus quartzofeldspathique, et composée de minéraux réfractaires.

Zircon. Le nésosilicate ZrSiO_4 est un minéral accessoire, commun en inclusion dans les *gneiss* et les *granites*. Comme il est radioactif, il désordonne localement le réseau cristallin de l'hôte, ce qui crée un fort relief. Dans les *anatexites*, les cristaux ont des formes variées liées aux conditions de genèse, si bien que leur étude permet de préciser la température, la pression et le chimisme du milieu de cristallisation.

