Entretien sur le métamorphisme n° III

○○○○○

Minéraux du métamorphisme régional de pression intermédiaire

SOMMAIRE

1. Introduction
Cadre de l'Entretien n° III page 3

2. Première partie
Données minéralogiques de base page 5

2.1. Rôle physico-chimique des éléments page 5
2.2. Les deux familles de silicates d'alumine du métamorphisme régional page 9
2.2.1. Les silicates d'alumine purs et anhydres page 9
2.2.2. Les silicates d'alumine, hydroxylés ou non, contenant Fe et Mg page 13

3. Seconde partie
Comment reconnaître et identifier les minéraux d'un affleurement, en particulier les silicates du métamorphisme page 17

3.1. Cas le plus simple : monominéral visible à l'œil nu.
Quelques exemples de pétrographie de terrain page 17
3.2. Guide d'identification sur lames minces des minéraux de roches métamorphiques page 24
3.2.1. Méthodologie page 25
3.2.2. Les minéraux usuels, présents dans toutes les roches cristallophylliennes page 26
3.2.3. Les deux familles de silicates du métamorphisme page 31
3.2.4. Conclusion et conseils pratiques page 34

4. Lexique page 37

5. Bibliographie page 37

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

Entretien sur le métamorphisme n° III

Résumé

Les minéraux du métamorphisme régional de pression intermédiaire

Cet Entretien n° III est destiné à permettre une initiation à la pétrographie du métamorphisme. Il décrit quelques espèces minérales originales qui jouent un rôle particulier dans les roches du métamorphisme régional, telles que celles qui peuvent être observées dans plusieurs de nos régions. Il fallait donc faire un choix, celui de mettre l'accent sur les minéraux qui apparaissent dans le contexte des gradients usuels de faibles et moyennes pressions, dans le métamorphisme hercynien. Ce choix est bien sûr en relation avec le contenu des autres Entretiens.

Dans la première partie, nous rappelons les données minéralogiques de base. Non seulement elles sont indispensables pour comprendre la signification des termes et des formules chimiques, mais aussi elles aident à structurer les principales familles de minéraux du métamorphisme, les silicates d'alumine*, et à comprendre les relations entre eux. Chacun des principaux minéraux fait l'objet d'une fiche standard.

La seconde partie est méthodologique, et pratique. Elle fournit les outils de base pour l'identification des minéraux décrits dans la première partie. Pour l'essentiel, elle est consacrée à l'identification élémentaire, à partir de l'observation des lames minces au microscope polarisant. L'amateur géologue est supposé avoir accès au type de microscope le plus simple, celui de l'étudiant de licence en pétrographie. Là encore, chaque minéral fait l'objet d'une fiche standard.

Concernant les illustrations, qui sont indispensables pour entrer dans l'apprentissage de l'examen des lames minces, la plupart d'entre elles sont reportées dans le :

*« **Petit atlas photographique de paragenèses rencontrées dans le métamorphisme régional du Bas Limousin** ».*

Cet atlas est associé à l'Entretien n° VII, consacré au métamorphisme régional du Bas Limousin.

Dominique Rossier

* Au sens large, c'est-à-dire les silicates d'alumine purs et anhydres d'une part, et les silicates d'alumine, hydroxylés ou non, contenant du fer et du magnésium, d'autre part.

1. Introduction.
Cadre de l'Entretien n° III

Métamorphisme régional, *gradient métamorphique* de basse et moyenne pressions

Cet Entretien est consacré aux minéraux du métamorphisme régional.

Associé à l'Entretien n° II sur les structures et les textures, et à l'Entretien n° VII sur le métamorphisme régional du Bas Limousin, il est destiné à permettre une initiation à la pétrographie du métamorphisme. Il n'a pas vocation à être un exposé exhaustif et systématique de minéralogie, comme on peut en trouver d'excellents dans la bibliographie donnée en fin d'Entretien. Simplement, il décrit quelques espèces minérales originales qui jouent un rôle particulier dans les roches du *métamorphisme régional de basse et moyenne pressions*, dont nous présentons l'observation sur le terrain, dans notre pays.

Ces minéraux décrits ont été choisis parce qu'ils sont vraiment caractéristiques de roches métamorphiques communes sur la marge occidentale de l'ancienne chaîne hercynienne, issue de roches du Paléozoïque, ainsi que sur la zone axiale des Pyrénées. Certains de ces minéraux sont peu fréquents dans les roches magmatiques *stricto sensu*.

Cependant, il n'y a pas un type unique de métamorphisme régional, mais une diversité qui, heureusement, a pu être organisée en trois grands types, comme on le verra dans le prochain Entretien n° IV. Ces types se distinguent par le « gradient métamorphique », c'est-à-dire la pente de la montée de la pression en fonction de la température (**figure 1**). Dans cet Entretien, nous avons choisi de mettre l'accent sur les gradients relativement usuels de faibles et moyennes pressions dans le métamorphisme hercynien.

• Le gradient de basse pression porte le nom de « gradient Abukuma » car il a été défini pour la première fois dans la chaîne de montagnes d'Abukuma, au Japon. Les exemples que nous donnerons sont issus des Pyrénées, où des cas de gradients similaires existent tout le long de la chaîne.

• Le gradient de moyenne pression est dénommé « gradient dalradien », du nom de la région de l'Écosse où il a été décrit en premier. C'est un gradient important à cause de la place qu'il tient dans plusieurs régions en bordure ouest de la chaîne hercynienne ; ce sera le cas de la région métamorphique du Bas Limousin, d'où seront issus de nombreux exemples utiles dans la seconde partie.

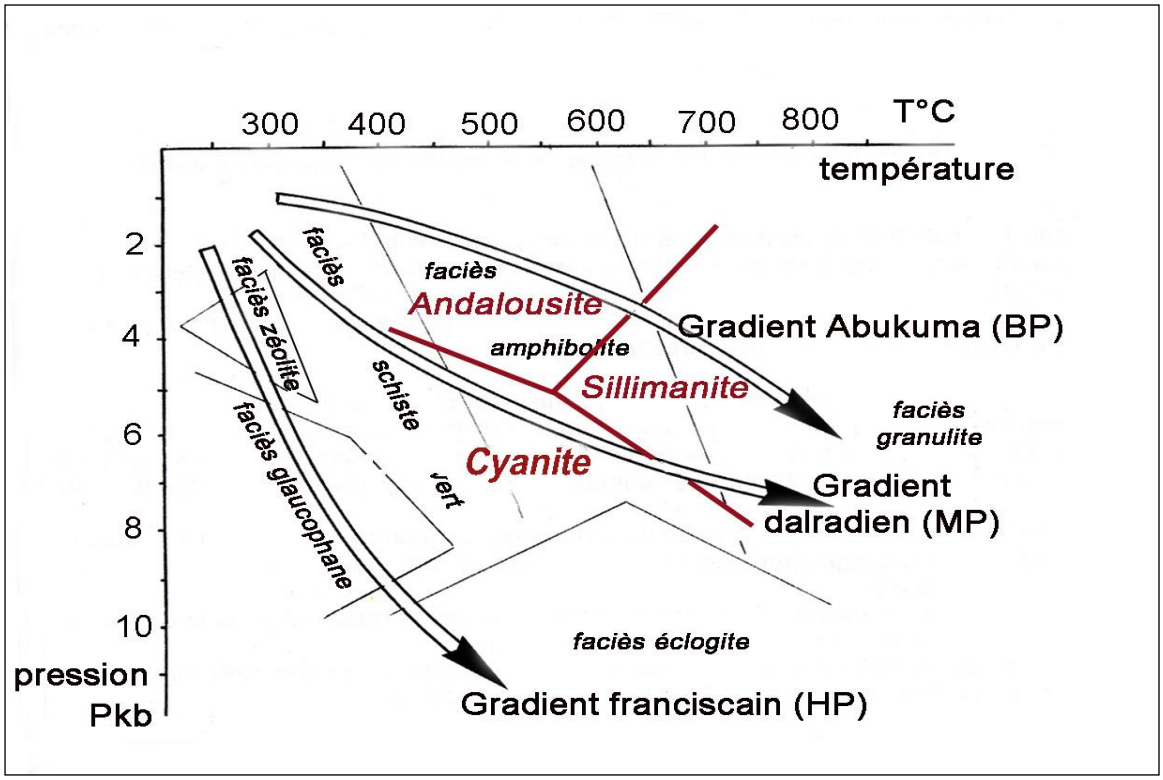


Figure 1. Les trois types de gradients du métamorphisme, distingués par la présence de couples distincts de silicates d'alumine polymorphes : le gradient de basses pressions, dit « Abukuma », à *andalousite* et *sillimanite* ; le gradient de moyennes pressions, dit « dalradien », à *cyanite* (= *disthène*) et *sillimanite* ; le gradient de hautes pressions, dit « franciscain », à *glaucophane* et *jadéite*. (Schéma d'après Miyashiro, tiré et adapté de l'ouvrage de J.-Cl. Pons, cité en référence dans la bibliographie en fin d'Entretien).

Des minéraux originaux, qu'il faut apprendre à reconnaître sur le terrain

Cet Entretien n° III précède les Entretiens IV, V, VI et VII qui traitent des phénomènes et des mécanismes du métamorphisme régional[1]. En effet, il est apparu que, pour bien aborder ces aspects du métamorphisme, il était nécessaire de disposer au préalable des notions et du vocabulaire de base qui s'appliquent à ces minéraux originaux, dont certains ne se retrouvent pas ou peu dans les roches magmatiques.

Cet ordre d'exposition peut paraître artificiel, et on peut préférer faire précéder la description des constituants de base par l'exposé des lois physiques régissant le métamorphisme. Cependant, rappelons que l'esprit de ces Entretiens est de guider le géologue amateur dans ses observations de terrain et de le conduire progressivement à une connaissance des roches métamorphiques et à une compréhension des phénomènes qui leur donnent naissance.

Beaucoup d'amateurs commencent leur parcours par un intérêt intense pour la minéralogie, dans ce qu'elle peut offrir de curieux, ou simplement d'esthétique. Ils recherchent éventuellement des échantillons dignes d'entrer dans leur collection, par la taille ou l'état remarquable des cristaux. Or, dans l'immense majorité des cas, le pétrographe de terrain ne dispose que de roches où les différents constituants sont imbriqués dans une trame dense et compacte, souvent très structurée par des déformations intenses, et où tous les minéraux significatifs ne

[1] Le métamorphisme de contact est à lui seul l'objet de l'Entretien n° VIII.

sont pas identifiables à l'œil nu. De quels moyens l'amateur peut-il disposer pour ne pas rester démuni et frustré devant un affleurement ou un échantillon récolté ?

Dans la seconde partie de l'Entretien, nous donnerons quelques exemples d'observation, en choisissant des cas assez courants, et en montrant quelles méthodes, des plus simples à celle relativement plus élaborée, au microscope polarisant, l'amateur peut mettre en œuvre.

Auparavant, nous décrivons quelques minéraux vraiment typiques des deux cas de métamorphisme régional de *faible pression* et de *moyenne pression*, qu'il est indispensable de connaître, en particulier quand on s'intéresse à la bordure occidentale de l'ancienne chaîne hercynienne. Le cas du métamorphisme de haute pression, dit *franciscain*[2], fait l'objet de l'Entretien n° V. Le cas du *métamorphisme de contact* est traité dans l'Entretien n° VIII.

*Les photos illustrant les minéraux du métamorphisme se trouvent réparties entre la seconde partie de cet Entretien et les autres Entretiens, en particulier le n° VII, consacré au métamorphisme régional du Bas Limousin, ainsi que dans le « **Petit atlas photographique de parageneses rencontrées dans le métamorphisme régional du Bas Limousin** » qui lui est associé.*

2. Première partie. *Données minéralogiques de base*

2.1. Rôle physico-chimique des éléments

De quelles roches s'agit-il à l'origine ?

Le métamorphisme transforme aussi bien des roches sédimentaires que des roches ignées… et que des roches déjà métamorphisées : la roche d'origine se nomme le *protolithe*.

Le chimisme du protolithe va évidemment jouer un rôle déterminant dans le résultat final. Or nous avons insisté, dans l'introduction, sur l'origine paléozoïque des terrains « recyclés » par le métamorphisme régional lié à la création de la chaîne hercynienne, comme c'est souvent le cas en France.

À l'origine, ces terrains sont des sédiments détritiques, d'origine majoritairement continentale, mélangés et remaniés avec des matériaux volcaniques de l'Ordovicien. Il en résulte que les roches métamorphiques issues de ces protolithes sont principalement constituées d'*alumino-silicates*. Les protolithes d'origine sédimentaire détritique du Paléozoïque peuvent être très variés ; en voici quelques exemples : *argiles*, *calcaires argileux* et *marnes*, *pélites* et *silts*, *grès*, *grès calcareux*, *cendres volcaniques*, *grauwackes* et *tufs volcaniques*, etc.

Les *pélites*, les cendres et *tufs volcaniques*, et les *grauwackes* sont largement majoritaires dans les séries paléozoïques qui nous intéressent.

Dans la grande majorité des *métasédiments* issus de ces roches sédimentaires, SiO_2 est d'abord présent à l'état de silice libre, c'est-à-dire de quartz, bien souvent issu directement du protolithe. L'examen des cristaux de quartz, de leur déformation et de leur disposition dans la « *fabrique* » (voir note 8) est une étape indispensable de la pétrographie.

Bien entendu, un calcaire pur peut subir le métamorphisme. Dans le cas du métamorphisme régional qui nous occupe, un banc de calcaire pur se transforme en *marbre* : quelles que soient la température et la pression, la calcite ne peut pas se transformer en autre chose que de la calcite ! Suivant la composition et la teneur des impuretés incluses dans le calcaire, on peut obtenir un marbre à minéraux, où l'on retrouve certains minéraux décrits dans cet Entretien.

[2] Il a été décrit pour la première fois dans la région de San Francisco.

Le cas des échanges par circulation des fluides au contact entre un magma et un sédiment marin sera évoqué dans l'Entretien n° VIII (voir note 1).

Le *faciès*, notion utile pour se retrouver dans la complexité

Par augmentation progressive de la température et de la pression, le métamorphisme prograde se traduit par des modifications physiques et chimiques des minéraux du protolithe, modifications qui s'enchaînent en séquences complexes :

- les modifications physiques se traduisent par des modifications d'arrangement et de position des atomes au sein d'un même minéral, ce qui conduit à des changements de structure cristalline, dans le cas du *polymorphisme* ;
- les modifications chimiques se traduisent par des réactions d'échange d'ions ou d'atomes entre minéraux voisins, produisant des assemblages nouveaux. Ces réactions peuvent se produire soit en phase solide sec, soit, le plus souvent, en présence de fluides libérés par l'augmentation de chaleur, comme l'eau et le gaz carbonique.

C'est la *phase prograde* d'un cycle métamorphique. Malgré la complexité des réactions, il a été possible de distinguer quelques domaines pression/température à l'intérieur desquels apparaissent toujours les mêmes minéraux : ce sont les *faciès*, qui font l'objet d'une présentation dans l'Entretien n° IV.

Nous verrons dans les Entretiens ultérieurs à quelles conditions ces nouveaux assemblages peuvent être formés, quelles sont les cinétiques de réaction, et aussi comment ils peuvent subsister après le retour aux conditions de température et de pression normales où nous les recueillons, c'est-à-dire au terme de la *phase rétrograde*[3] ; un assemblage qui conserve ainsi en partie la mémoire de l'histoire métamorphique de la roche est une *paragenèse*.

Dans le cadre de cet Entretien n° III, nous ne donnons que quelques exemples simples, mais qui sont suffisants pour les cas souvent rencontrés sur le terrain.

Quels sont les éléments de la classification de Mendeleïev associés à la silice pour former les silicates du métamorphisme ?

Les minéraux dont il s'agit maintenant sont ceux qui sont créés par le métamorphisme régional à partir des matériaux d'origine. Dans le cas d'une roche métamorphique « orthodérivée[4] », ces minéraux peuvent cohabiter, et réagir, avec les minéraux d'origine, ou ce qui en subsiste.

• *Aluminium*

L'élément le plus important est l'*aluminium*, sous sa forme de l'oxyde Al_2O_3, l'*alumine*, constituant une « brique » toujours intimement liée à la brique de base qu'est la silice SiO_2.

Dans toutes les séquences dont le protolithe est argileux, comme la *séquence des métapélites*[5], ou celle des *métagrauwackes*[6], silice et alumine se combinent dans une très large gamme de composition, de température et de pression pour former les *silicates d'alumine*, purs et anhydres, dont la formule est particulièrement simple : Al_2SiO_5.

Pourquoi parle-t-on des *silicates d'alumine*, au pluriel ? Parce qu'ils se présentent sous trois formes bien distinctes, plus précisément sous trois états cristallographiques de la même espèce

---

[3] La phase rétrograde d'un cycle peut être accompagnée d'une nouvelle séquence d'apparition et de destruction d'espèces minérales.

[4] Une roche métamorphique *orthodérivée* résulte de la transformation d'un protolithe d'origine magmatique, comme un granite, une diorite ou un gabbro, ou encore comme une dacite ou un basalte…

[5] La notion de séquence sera développée dans l'Entretien n° IV. Une séquence métamorphique est l'ensemble des roches métamorphiques, de degré variable, issu d'un même type de protolithe. Dans l'exemple ci-dessus, les *métapélites* désignent la séquence métamorphique issue des *pélites*.

[6] *Grauwackes* : sédiments détritiques contenant des débris de roches à grain fin, magmatiques ou métamorphiques, enrobés dans un ciment argileux.

chimique. Ils sont remarquables dans ce sens qu'ils forment trois composés *polymorphes*[7], ne différant que par la disposition cristallographique des atomes :

l'***andalousite***, la ***cyanite*** *(*ou *disthène)* et la ***sillimanite.***

Dans le contexte des gradients *Abukuma* et *dalradien* choisis pour cet Entretien, nous verrons dans quelles conditions de pression et de température ils peuvent se transformer les uns dans les autres. Ces conditions sont suffisamment reproductibles pour permettre de tracer des domaines d'existence de chacun des trois polymorphes, comme on peut le voir sur les figures 1 et 2. Il en résulte que ces trois *silicates d'alumine* se révèlent être des indicateurs utiles des conditions de pression et de température, pour reconstituer l'histoire d'un métamorphisme régional. Pour cette raison, ils ont été appelés « minéraux index ».

• *Fer et magnésium*

Toujours dans ces séquences communes des *métapélites* et *métagrauwackes*, le fer, et le magnésium presque toujours associé au fer, sont abondants. Ces éléments vont également entrer dans la composition d'aluminosilicates typiques du métamorphisme, pour former une autre famille importante où, souvent, l'eau interstitielle des sédiments d'origine va pénétrer dans les réseaux cristallins des nouveaux minéraux. Ce sont :

la ***staurolite***, les ***grenats***[8], la ***cordiérite*** et le ***chloritoïde.***

Certains sont aussi d'assez bons *minéraux index*, indicateurs des conditions de pression et température du métamorphisme, comme leurs cousins les silicates d'alumine purs. Avec eux, ils forment ce qu'il est convenu d'appeler la famille des « silicates du métamorphisme ».

Parmi les minéraux courants du métamorphisme, il existe également une famille de *phyllosilicates* contenant du magnésium : ce sont les *chlorites.* À vrai dire, ces minéraux sont aussi courants dans les roches ignées que dans les roches du métamorphisme faible. Dans le cas des roches ignées, la *chlorite* abonde dès que les phénomènes d'altération hydrothermale se produisent. Toutefois, la *chlorite*, comme *minéral primaire*[9], mérite l'attention dans l'observation des schistes et des micaschistes, faciès des schistes verts, car son apparition est un bon indicateur de température : c'est l'isograde de la *chlorite*. Ceci est illustré dans l'Entretien n° VII, et dans le *« **Petit atlas photographique des paragenèses…** »* qui lui est associé.

• *Alcalins et alcalino-terreux*

Jusqu'à maintenant, nous avons évoqué ce que l'on a coutume d'appeler les « silicates du métamorphisme » : on a vu que, par convention, cette dénomination désigne des aluminosilicates totalement dépourvus d'éléments *alcalins* ou *alcalino-terreux*. Or, ces autres éléments importants de la classification de Mendeleïev rentrent nécessairement dans les séquences métamorphiques de réactions chimiques des aluminosilicates, puisqu'ils sont généralement présents dans le protolithe. Les plus fréquents sont le *potassium*, le *sodium* et le *calcium*. Avec eux, le métamorphisme recrée des minéraux habituels des roches magmatiques, comme les *phyllosilicates*[10] (les *micas*…), les *feldspaths*, les *pyroxènes*, les *amphiboles* et les *épidotes*… Leur description en tant que telle n'a pas vraiment sa place dans cet Entretien.

Par contre, la pétrographie des roches métamorphiques doit prendre totalement en compte ces minéraux et leur assemblage dans la description et l'interprétation des paragenèses et des

---

[7] Polymorphe : s'applique à des minéraux de même composition chimique mais cristallisant dans des systèmes différents.

[8] Comme nous sommes dans le cas restreint des *métapélites*, il s'agit principalement de l'*almandin* et des composés continus entre *almandin* et *pyrope*.

[9] Qui se forme lors d'une séquence de métamorphisme prograde, par opposition à la formation par altération.

[10] Silicates dont les tétraèdres SiO_4 sont organisés en feuillets (du grec *phullon*, feuille).

« fabriques »[11], comme cela a été remarqué plus haut à propos du quartz libre. C'est ce que nous tenterons de faire dans l'Entretien n° VII, consacré au métamorphisme régional. Ainsi :

- le potassium

C'est l'élément essentiel des *phyllosilicates*, *séricite*, *muscovite*, et aussi *biotite*, ce dernier étant un aluminosilicate contenant fer et magnésium. Ces micas apparaissent dans une très large gamme de conditions du métamorphisme régional, dans les plans de schistosité, puis de foliation.

De nombreux exemples illustrés par des photos seront montrés dans l'Entretien n° VII, et dans le *« **Petit atlas photographique des paragenèses**… »* qui lui est associé.

Mais le *potassium* est aussi l'élément distinctif du *microcline* et des *feldspaths potasso-sodiques*, abondants et très visibles dans certaines roches *orthodérivées*, comme les *gneiss œillés* et les *embréchites* décrits dans l'Entretien n° VII. Le *feldspath potassique* peut aussi apparaître au terme de la montée en température et en pression, sous la forme métastable *orthose*, par la réaction chimique : *muscovite + quartz → orthose + H_2O* ;

- le sodium

Il rentre dans la composition de la grande famille des *feldspaths sodo-calciques*, c'est-à-dire des *plagioclases*. Ces derniers sont présents dans la plupart des roches métamorphiques issues de sédiments continentaux ou volcaniques, et bien sûr dans les roches *orthodérivées*. Le sodium est aussi présent dans l'*omphacite*, intermédiaire entre le *diopside* $CaMg\ Si_2O_6$ et la *jadéite* $Na(Al,Fe^{3+})Si_2O_6$; c'est un *clinopyroxène* du métamorphisme de haute pression, présent dans les *éclogites*[12], que nous décrirons dans l'Entretien n° V.

Le sodium est aussi présent dans un minéral rare, le *glaucophane* : $Na_2(Mg_3Al_2)Si_8O_{22}(OH)_2$, qui est une *amphibole* du métamorphisme de haute pression, que nous décrirons également dans l'Entretien n° V ;

- le calcium

Déjà évoqué à propos des *plagioclases* et des *pyroxènes*, le *calcium* est également présent dans les *hornblendes*, qui sont les *amphiboles* les plus fréquentes des roches métamorphiques. Les *hornblendes* sont des aluminosilicates « attrape-tout », où rentrent, dans une formule chimique complexe, tous les éléments que nous avons passés en revue !

Les *hornblendes* sont abondantes dans les *métabasites*, résultant du métamorphisme de roches basiques, comme les gabbros et les basaltes, dans un large domaine de conditions du gradient dalradien. Elles ont l'avantage d'être très faciles à repérer à l'œil nu, et font l'objet d'un paragraphe distinct dans l'Entretien n° VII, consacré aux *amphibolites*. Enfin, nous verrons dans l'Entretien n° V qu'elles peuvent aussi se former dans des conditions très particulières de métamorphisme rétrograde des *éclogites* (voir plus haut et note 11).

Presque toujours associée à la hornblende dans les amphibolites, la *titanite (= sphène)* $CaTiSiO_5$ est considérée comme un minéral « accessoire », bien que fréquent et assez facile à repérer. Nous la décrivons donc en tant que minéral identifiable sur le terrain (§ 3.1), et aussi par ses caractéristiques en lames minces dans le *« **Petit atlas photographique des paragenèses…** »* : voir le cliché 131, voir également les figures 30 et 32 de l'Entretien n° VII.

Le *zircon* $ZrSiO_4$, également classé « minéral accessoire », est très fréquent en inclusions dans les *biotites*, les *cordiérites* et les *amphiboles*, et bien visible en lame mince par son auréole pléochroïque : voir le cliché 50 dans le *« **Petit atlas photographique des paragenèses**… »* et la figure 29 de l'Entretien n° VII.

---

[11] La fabrique est l'ensemble des éléments structuraux d'une roche, schistosité, linéation et foliation, mais aussi incluant la texture des minéraux avec leurs formes, leurs déformations et leurs imbrications mutuelles.

[12] *Éclogites* : roches de métamorphisme de haut degré, de composition fortement basique, issues pour certaines de la base de la croûte ou du manteau supérieur.

2.2. Les deux familles de silicates d'alumine du métamorphisme

Nous décrivons maintenant plus en détail ces deux familles, qui tiennent une place centrale dans la pétrographie des roches du métamorphisme dalradien, des moyennes pressions, spécialement dans les séries des *métapélites* et des *métagrauwackes*.

Les descriptions sont présentées sous la forme de fiches dans lesquelles nous décrivons les propriétés macroscopiques, et le rôle dans le métamorphisme.

Les propriétés optiques utiles à l'observation en lames minces, au microscope polarisant, sont décrites dans le guide du § 3.2 de la seconde partie de cet Entretien.

2.2.1. Les silicates d'alumine purs et anhydres. Al_2SiO_5

Parmi les silicates du métamorphisme, les trois *polymorphes* sont les minéraux les plus riches en alumine, la teneur en étant de 62 %. Pour cette raison, ils occupent une place centrale dans les paragenèses des roches issues du métamorphisme des roches argileuses, les *métapélites*, très répandues dans les régions appartenant à la vieille chaîne hercynienne.

La figure 2 montre que, dans les conditions de *gradient Abukuma*, c'est l'*andalousite* qui apparaît en premier, alors que dans celles du gradient *dalradien*, c'est la *cyanite* (*disthène)*, suivie par la *sillimanite*.

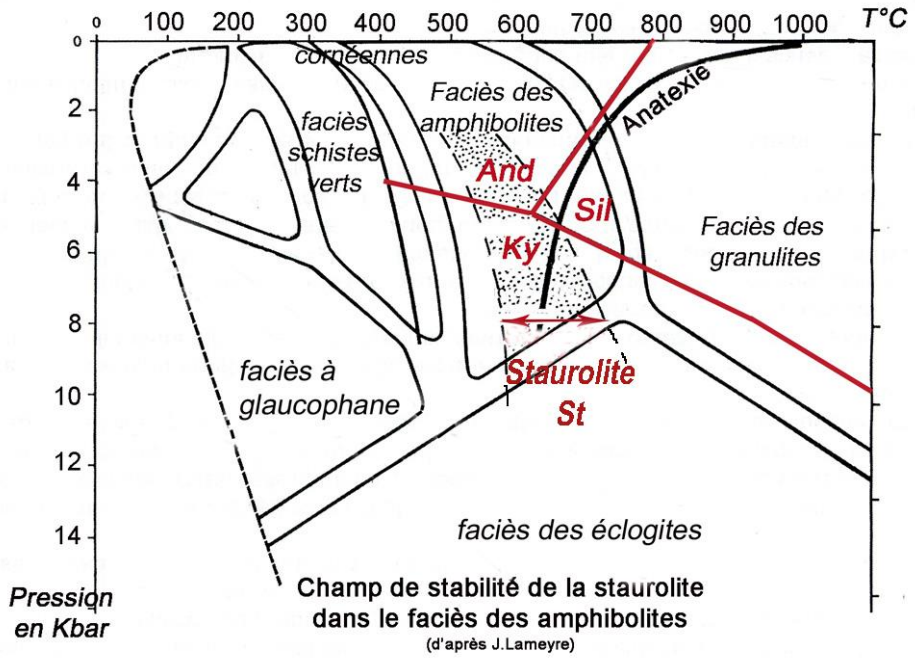


Figure 2. Les domaines respectifs, en pression et température, de chacun des trois représentants polymorphes de l'espèce *silicate d'alumine* pur et anhydre sont délimités par trois segments de droites (en rouge) concourantes en un point triple. Le domaine de stabilité de la *staurolite*, plus restreint, est également indiqué.
***And** = andalousite. **Ky** = cyanite. **Sil** = sillimanite. **St** = staurolite.*

Les silicates d'alumine purs et anhydres

1 – L'ANDALOUSITE

L'*andalousite*,
minéral index,
géobaromètre des métamorphismes
de basse et moyenne pressions
Al_2SiO_5

Structure : l'*andalousite* est un *nésosilicate*, c'est-à-dire qu'elle est bâtie autour de tétraèdres de silice SiO_4, isolés les uns des autres. La structure est orthorhombique. Elle est formée de chaînes d'octaèdres AlO_6 parallèles à l'axe « **c** » et reliées entre elles par les tétraèdres SiO_4 alternant avec les atomes d'aluminium entourés par cinq atomes d'oxygène.
Les prismes, souvent allongés, ont une section proche d'un carré ; mais ils sont souvent déformés et la section est alors plus ou moins losangique et arrondie.

Propriétés physiques : dureté de 7 à 7,5.

Propriétés optiques : pléochroïsme faible. Rosé à translucide, couleur assez variable.

Altération : peu altérable par les agents atmosphériques. Les cristaux sont très souvent recouverts de flocons blancs de *séricite.*

Domaine de stabilité : il est limité aux faibles pressions et aux températures moyennes. À plus hautes températures et surtout à plus hautes pressions, l'*andalousite* est remplacée par les autres formes des *silicates d'alumine*, à savoir la *cyanite* et la *sillimanite.*

Utilisation industrielle : traitée à hautes températures, l'*andalousite* se transforme en *mullite*, qui est le matériau de base des briques réfractaires.

En résumé, l'*andalousite* est un bon indicateur de métamorphisme de faible et moyenne pressions, et de moyennes températures. En effet, quand elle est présente, ses cristaux sont en général nettement visibles et reconnaissables. Sur le terrain, elle peut sauter aux yeux, comme dans de nombreuses régions métamorphiques des Pyrénées (voir la seconde partie).

Elle renseigne immédiatement sur le type de faciès et sur la nature du protolithe.

Les silicates d'alumine purs et anhydres

2 – LA CYANITE

La *cyanite* (ou *disthène*),
minéral index,
géobaromètre du métamorphisme
de hautes pressions et hautes températures
Al_2SiO_5

Structure : la *cyanite* est triclinique. Sa structure est constituée par un empilement cubique compact légèrement déformé des atomes d'oxygène, les atomes d'aluminium occupant exclusivement des sites octaédriques. L'ensemble forme des feuillets parallèles au plan (100), qui est un plan de clivage parfait. Les prismes, allongés suivant l'axe « **c** », sont aplatis sur (100), striés et sont parfois flexueux. Également en agrégats de cristaux plus ou moins aciculaires.
La *cyanite* n'est jamais pœcilitique, ce qui aide à la distinguer de la *staurolite*. Cette propriété est liée à sa formation à haute pression.

Propriétés physiques : dureté variant, suivant l'orientation, entre 4,5 et 7. C'est une propriété unique qui l'avait fait nommer *disthène* (du grec *dis*, deux, et *sthenos*, force). Formé à hautes pressions, c'est le plus dense des polymorphes.

Propriétés optiques : en macroscopie, la couleur est gris-bleu, d'où le nom de *cyanite* (*kyanite* en anglais).

Altération : elle est inaltérable aux agents atmosphériques.

Métamorphisme : minéral index du métamorphisme de haute pression, c'est donc un « géobaromètre ».
C'est un minéral typique des *métapélites* et des roches ayant une phase argileuse d'origine, métamorphisées dans le *faciès amphibolite*.

Domaine de stabilité : il est limité aux hautes pressions, supérieures à 5 kbar et aux températures supérieures à 500 °C.
La cyanite est classiquement associée à la *staurolite*, mais elle peut aussi provenir de la transformation de l'*andalousite* par augmentation de la pression.
Au-delà de 620 °C, elle peut être transformée en *sillimanite*, mais peut aussi rétromorphoser en *séricite*.

En résumé, associée à la *staurolite* dans les *métapélites*, la *cyanite* est un excellent indicateur de métamorphisme de conditions de pression et de température assez élevées.

Les silicates d'alumine purs et anhydres

3 – LA SILLIMANITE

La *sillimanite*, minéral index, géothermomètre du métamorphisme de hautes températures

Al_2SiO_5

Structure : la *sillimanite* est orthorhombique, comme l'*andalousite*. La structure consiste en colonnes d'octaèdres AlO_6, parallèles à l'axe « **c** », et reliées par des chaînes faites de l'alternance de tétraèdres SiO_4 et AlO_4. Ces chaînes forment en réalité des rubans. De ce fait, c'est un *inosilicate*, ce qui lui donne son apparence fibreuse.
On l'observe le plus souvent en longues aiguilles enchevêtrées, en intercalations fibreuses et flexueuses dans des roches schisteuses, ou des gneiss, où elles enveloppent des amandes quartzo-feldspathiques. Imprégnée de quartz, elle devient la *fibrolite*. Toutefois, quand elle est formée dans les conditions de plus haut degré de métamorphisme, à très hautes températures, elle prend l'aspect de prismes très allongés, à section en « diamant ».

Propriétés physiques : dureté 7,5. La forme *fibrolite* est exceptionnellement tenace (lames de haches du Néolithique).

Propriétés optiques : couleur blanche, assez variable. Éclat soyeux dans la variété fibreuse.

Altération : inaltérable aux agents atmosphériques.

Métamorphisme : la sillimanite est présente, associée aux micas, dans les roches de haut degré métamorphique, issues de roches riches en alumine. Minéral index du métamorphisme de haute température, c'est un bon géothermomètre.

Domaine de stabilité : il est limité aux températures supérieures à environ 600 °C. Les *métapélites* qui en renferment ont pu être placées à des conditions de températures qui, si une teneur résiduelle en eau subsistait, étaient juste en dessous des conditions d'anatexie.
La sillimanite ne subit jamais de rétromorphose.

En résumé, la présence de *sillimanite* est l'indice d'un métamorphisme de hautes températures, mais ne renseigne pas sur la pression. L'observation directe visuelle sur le terrain est difficile, mais sa présence dans une roche *paradérivée* peut se traduire par l'extrême ténacité de celle-ci et la difficulté à prélever un échantillon !

2.2.2. Les silicates d'alumine, hydroxylés ou non, contenant Fe et/ou Mg

Dans cette famille, le minéral le plus proche des silicates d'alumine décrits plus haut est la staurolite.

1 – LA STAUROLITE

C'est le minéral véritable « cousin » de la *cyanite*, avec laquelle il peut cohabiter dans certaines paragenèses. Il est suivi des *grenats*, de la *cordiérite* et du *chloritoïde*.

La *staurolite*,
minéral index,
bon géothermomètre du métamorphisme
de moyenne pression
$(Fe^{2+},Mg,Zn)_2Al_9(Si,Al)_4O_{22}(OH)_2$

Structure : orthorhombique. Cristallise en bons prismes allongés, souvent maclés en croix, à section grossièrement hexagonale.
Aluminosilicate de fer, hydroxylé, c'est-à-dire avec (OH), et un peu de Mg se substituant au fer. Le pourcentage d'alumine est de 54 %, un peu inférieur à celui des silicates d'alumine purs. On peut considérer la structure comme une alternance de feuillets de *cyanite* et de feuillets de composition $Al_2Fe_4O_8H_2$.
Souvent pœcilitique à inclusions quartzeuses.
Propriétés physiques : dureté 7,5. Densité 3,7 à cause de la concentration en fer.
Propriétés optiques : macroscopiquement brun rouge.
Altération : la *staurolite* est résistante à l'altération par les agents atmosphériques.
Métamorphisme : elle n'apparaît que dans les *métapélites* suffisamment riches en alumine, souvent en association avec la *biotite* et le *grenat almandin*. Son domaine est celui des moyennes pressions, mais en même temps son domaine de stabilité en température est plutôt étroit, entre 500 °C et 600 °C, ce qui la qualifie comme un bon géothermomètre.
Ainsi, vers les hautes températures, la *staurolite* est déstabilisée en *cyanite*. La rétromorphose peut la faire disparaître, par transformation en *phyllosilicates*.

En résumé, la *staurolite* est un minéral typique du métamorphisme dalradien, que son étroit domaine de stabilité qualifie comme bon géothermomètre. Comme minéral apparaissant dans les *métapélites*, il est presque toujours associé à la *biotite* et à l'*almandin*.

Les silicates d'alumine, hydroxylés ou non, contenant Fe et/ou Mg

2 – LES GRENATS

Le *grenat almandin*, minéral index, géothermomètre du métamorphisme de moyenne pression

Structure : cubique. Il cristallise facilement en gros grains ou en cristaux automorphes à nombreuses troncatures.
C'est un nésosilicate alumineux, non calcique, de formule pouvant associer de façon isomorphe $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$, l'*almandin* proprement dit, à une certaine proportion de *pyrope* $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$.
Les grenats métamorphiques présentent souvent une microstructure interne en hélice, dite hélicitique, marquée par les nombreuses inclusions, et développée par rotation du cristal entre deux feuillets schisteux glissant l'un sur l'autre sous contrainte de cisaillement.
Propriétés physiques : dureté 7,5. Dense à cause de la forte proportion de fer ; c'est le plus lourd des silicates du métamorphisme : $d = 4{,}32$.
Propriétés optiques : macroscopiquement brun rouge à rouge sang, à éclat adamantin.
Altération : résiste à l'altération par les agents atmosphériques.
Métamorphisme : c'est le *silicate d'alumine* ferromagnésien le plus répandu dans les micaschistes et les paragneiss.
Il apparaît à moyennes pressions dans un large intervalle de température de 400 °C à 700 °C, par réaction entre la *staurolite* ou la *chlorite* et le *quartz*. En dessous de 400 °C, il peut recristalliser en *biotite* et en *chlorite* si le climat métamorphique rétrograde et la cinétique de refroidissement le permettent.

Le grenat étant ubiquiste dans les *métapélites* et les *métagrauwackes*, pour une large gamme de températures et de pressions, il ne peut pas être considéré comme un bon thermomètre ou un bon baromètre. Toutefois, l'observation des microstructures internes et externes est utile pour la connaissance de la chronologie et des conditions de microtectonique subies par la roche.

La proportion de *pyrope* dans la solution solide du grenat *almandin* dépendant de la composition du protolithe, elle est à priori nettement plus importante dans les grenats issus de roches basiques, riches en magnésium. Prenons le cas des *éclogites* formées à grande profondeur, par exemple dans un plan de subduction. Ce sont des roches de hautes pressions, celles-ci pouvant dépasser les 20 à 25 kbar, pour une large gamme de hautes températures.

Dans ces conditions de pressions exceptionnelles, la solution solide de grenat peut incorporer une proportion notable de pyrope. Mais, dès que la pression et la température diminuent, la solution se déstabilise et on assiste à une rétromorphose très caractéristique, décrite dans l'Entretien n° V.

Les silicates d'alumine, hydroxylés ou non, contenant Fe et/ou Mg

3 – LA CORDIÉRITE

La *cordiérite*, minéral index, bon géobaromètre du métamorphisme de basse pression

$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$

Structure : orthorhombique, pseudo-hexagonale, formée d'anneaux de six tétraèdres (Si_5AlO_{18}) reliés entre eux par des octaèdres (AlO_6) et par des tétraèdres (AlO_4).
Le magnésium est largement majoritaire par rapport au fer.

Propriétés physiques : dureté de 7 à 7,5. Généralement en masses vitreuses, le plus souvent altérées. Cristaux en prismes à section pseudo-hexagonale.

Propriétés optiques : masses plus ou moins transparentes, gris à bleu ou bleu-vert foncé, à l'éclat cireux. Les bons cristaux, fort rares, sont dichroïques.

Altération : elle est très fréquente, par hydroxylation, en un mélange de paillettes et de fines aiguilles de *séricite* et de *chlorite* : c'est la *pinite*.

Métamorphisme : elle est fréquente dans les cornéennes, associée à l'*andalousite*, et dans les schistes, micaschistes et gneiss du métamorphisme régional de basse pression, de type Abukuma.

Domaine de stabilité : vaste domaine de stabilité en température, mais au-dessus de 450 °C. Typique du métamorphisme de « haut grade », puisqu'elle peut être associée à la *sillimanite*.

En résumé, la *cordiérite* est un bon minéral index, puisqu'elle n'existe qu'aux pressions relativement basses et au-dessus d'un seuil en température de 450 °C.

Des paragenèses avec *cordiérite* sont décrites dans l'Entretien n° VIII, relatif aux migmatites, pour le dôme métamorphique de Gavarnie/Héas, dans les Hautes-Pyrénées.

La *cordiérite* est relativement facile à identifier macroscopiquement, à l'œil nu, mais difficile à distinguer des feldspaths en lame mince.

Silicates d'alumine, hydroxylés ou non, contenant Fe et/ou Mg

4 - LE CHLORITOÏDE

Le *chloritoïde*,
minéral rare,
spécifique de fortes concentrations en fer ferreux
et du métamorphisme
de températures peu élevées
$(Fe^{2+},Mg,Mn)_2Al_4Si_2O_{10}(OH)_4$

Structure : monoclinique. Il est considéré comme apparenté aux phyllosilicates.

Propriétés physiques : fait partie du groupe des « micas durs ». Densité comparable à celle de la *cyanite* et de la *staurolite*, comprise entre 3,5 et 3,8.
Cristaux lamellaires à clivage facile, ou en rosettes**.**
Cristaux à contour hexagonal.

Propriétés optiques : éclat vitreux, vert à gris verdâtre.

Métamorphisme : le *chloritoïde* est un minéral rare du fait de sa composition particulière, nécessitant un fort pourcentage de fer Fe^{++}.
Il peut se développer dans une large gamme de pression, mais toujours à des températures modestes.

Domaine de stabilité : quand il apparaît dans les métapélites, associé à la *biotite* et à la *staurolite*, son domaine d'existence est limité à des pressions de 4 à 6 kbar et à un intervalle de température de 550 °C à 570 °C. Ce domaine étroit en fait un très bon géothermomètre… quand il est présent !

La composition du *chloritoïde*, où l'alumine est plus abondante que la silice, est assez particulière et rend sa présence plutôt exceptionnelle. Il peut apparaître dans des conditions de métamorphisme de contact.

3. Seconde partie.
Comment reconnaître et identifier les minéraux d'un affleurement, en particulier les silicates du métamorphisme ?

La technique de base, « incontournable », est celle mettant en œuvre des lames minces taillées dans un échantillon et observées au microscope en lumière polarisée. Mais auparavant, sur le terrain, il importe de reconnaître la nature de la roche rencontrée, en termes de structure et de texture (voir Entretien n° II) et de tenter de reconnaître quelques premiers indices minéralogiques, allant au-delà des trois composants standards que sont le *quartz*, les *feldspaths* et les *micas.*

3.1. Cas le plus simple : monominéral visible à l'œil nu.
Quelques exemples de pétrographie de terrain

Il faut bien reconnaître que les minéraux qui nous intéressent particulièrement, les silicates du métamorphisme, sont souvent de taille insuffisante pour être facilement identifiés sur le terrain. Cependant, il y a quelques exceptions, et la reconnaissance de l'un d'entre eux, à la loupe, sur une cassure fraîche, peut être utile pour décider d'un prélèvement, en vue d'un examen plus approfondi. La technique simple de la coupe polie améliore encore les chances de trouver les minéraux intéressants, et nous en donnons quelques exemples[13]. On s'efforcera, quand c'est possible, de couper l'échantillon prélevé suivant deux plans, plus ou moins orthogonaux : un plan parallèle à la schistosité ou à la foliation, et un second perpendiculaire. D'ailleurs, cette opération est le préliminaire indispensable à la préparation de la taille de lames minces ; à cet effet, on scie un parallélépipède de base 3 x 2 cm et d'épaisseur inférieure ou égale à 0,5 cm.

Technique de la coupe polie
(Photos 1 à 5)

L'échantillon est scié à la scie diamantée. Les faces obtenues sont polies manuellement sur une dalle de verre épais, ou sur une polisseuse mécanique, à l'aide de poudres de minéraux abrasifs, de grains de tailles décroissantes. Entre ces opérations de polissage, jusqu'au poli « marbre », les nettoyages et rinçages doivent être conduits minutieusement, de façon à éliminer jusqu'au dernier grain d'abrasif, avant de passer à la taille inférieure !

L'auteur utilise une lame circulaire d'acier diamanté par brasage, de diamètre 250 mm, refroidie à l'huile de coupe ou à l'eau. L'épaisseur de la lame est de 1 mm.

• Poudres à polir, au *carborandum* :

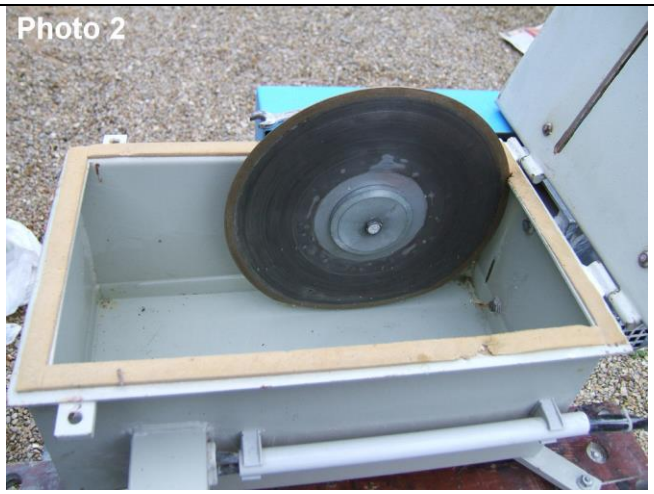
Calibre grain	micromètres
200	60
400	40
800	20

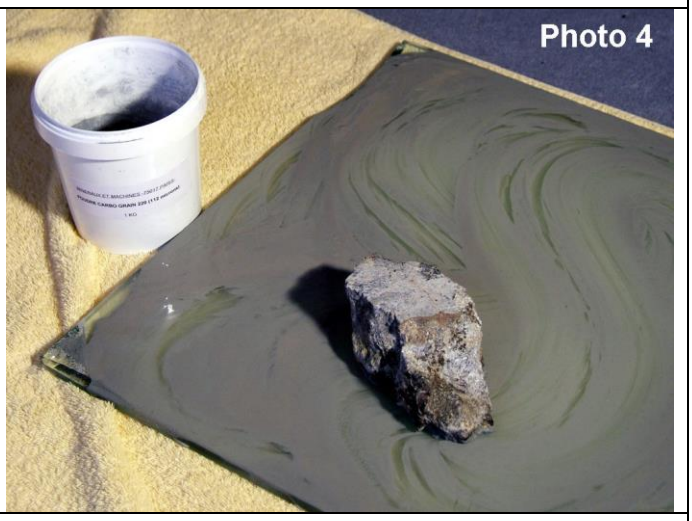
• Au *corindon*, sur feutre :

1 200	15

[13] Nous avons vu cette technique utilisée sur le terrain par des géologues professionnels : ils avaient adapté leur véhicule de façon à l'équiper d'une petite scie à disque diamanté !

Technique de la coupe polie





Voici maintenant quelques exemples illustrés pour les minéraux les plus utiles à identifier sur le terrain, et en coupe polie.

Exemple 1 : les grenats

Parmi les silicates du métamorphisme aisément repérables, les *grenats* viennent en premier grâce à leur couleur et leur éclat, et aussi grâce aux formes géométriques de leurs cristaux, le plus souvent automorphes. Comme ces minéraux ont une grande facilité de développement dans des conditions très larges de métamorphisme régional, leurs dimensions dépassent souvent la fraction de millimètre, voire le millimètre. Leurs cristaux, roses ou rouges, se détachent bien sur le fond sombre d'une *métapélite* ou d'une *amphibolite*. Leur présence attire l'attention, et incite à rechercher les minéraux « compagnons » de la paragenèse.

Exemple 2 : l'andalousite

Un autre cas, remarquable, est celui de l'*andalousite*. C'est un minéral fréquent et facilement reconnaissable dans les *cornéennes* issues de protolithes argileux (voir l'Entretien n° VIII sur le métamorphisme de contact) et dans le métamorphisme régional de basses pressions (dit « Abukuma »), faciès des amphibolites.

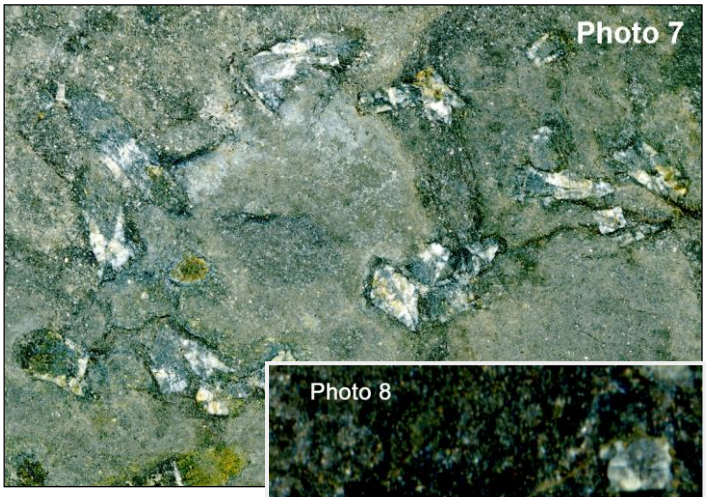
La **photo 6** montre un affleurement de schiste noduleux à *andalousite*, au sommet du pic de Tarbesou, en bordure est du massif d'*orthogneiss* de l'Aston (Ariège). Il s'agit d'un métamorphisme de faibles pressions, de type Abukuma. Les nodules d'andalousite sont plurimillimétriques à centimétriques et ressortent en relief (nodules) par l'érosion différentielle de la surface.

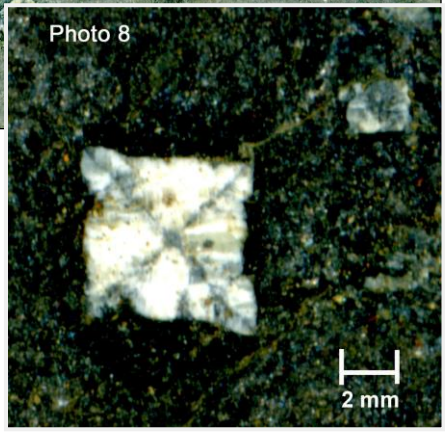
Les deux **photos 7 et 8** montrent une coupe polie dans un échantillon de Silurien métamorphique à *chiastolite* (le site du Maillet, cirque de Troumouse, Hautes-Pyrénées).

Les cristaux d'*andalousite* sont bien identifiables par les figures géométriques dessinées par les inclusions carbonées sur les faces des cristaux.

Les schistes à *andalousite* du Paléozoïque sont fréquents dans la zone axiale des Pyrénées, où ils peuvent constituer de véritables massifs.

Du reste, les gisements d'*andalousite* monominérale peuvent avoir un intérêt économique pour l'industrie des céramiques de haute résistance aux chocs thermiques (*mullite*).





Exemples 3 : la cyanite et la sillimanite

Les deux autres variétés polymorphiques du silicate d'alumine, la *cyanite* et la *sillimanite*, ne sont malheureusement pas aussi faciles à repérer. La **photo 9** illustre un cas exceptionnel de *cyanite géodique* centimétrique, dans une migmatite de la région métamorphique du Bas Limousin[14]. Les prismes bien formés, translucides, sont bleu clair à bleu intense, et certains verdâtres. Ils sont enchâssés dans le quartz.

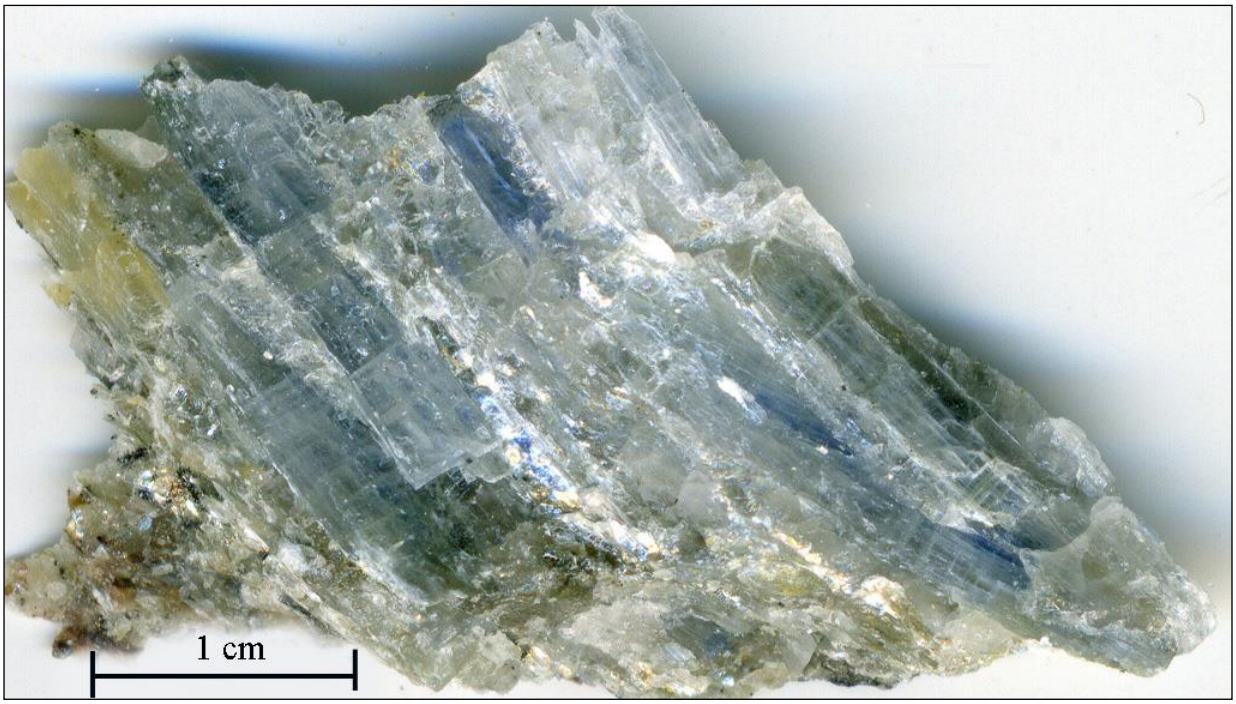


Photo 9. Prismes de *cyanite géodique*, prélevés dans la *migmatite* de la carrière du Faucou, commune d'Espartignac, près d'Uzerche, en Corrèze. Dans certains échantillons prélevés dans cette même carrière, on peut parfaitement observer, dans la matrice de quartz, le changement de phase[14] *cyanite*/*sillimanite* en grandes fibres, de la variété *fibrolite*.

La variété *fibrolite* de la *sillimanite* peut être visible à l'œil nu, et apparaît sur un fond de quartz, en taches blanchâtres, nacrées, à l'éclat soyeux. C'est le cas d'échantillons prélevés dans la même carrière que celle qui a donné les cyanites géodiques de la **photo 9**.

La variété de la *sillimanite* de plus haut degré de métamorphisme, en longs prismes absolument limpides, n'est guère visible sur le terrain, à cause de la taille des cristaux. Heureusement, elle apparaît très bien en lames minces, comme nous le verrons en § 3.2.

Exemple 4 : la staurolite

Quant à la *staurolite*, elle n'est pas toujours aussi facile à identifier que sur les sites emblématiques du Morbihan, bien connus des collectionneurs (*staurolite* « pierreuse »).

[14] Voir également les clichés des lames minces n° 140, 141, 150, 151 et 152 dans le « ***Petit atlas photographique des paragenèses***… ».

Toutefois, la technique de la coupe polie permet de les repérer dans les *métapélites*, car elles peuvent être très abondantes, et de dimension millimétrique, dès que les conditions de température requises ont été atteintes. Les coupes polies des **photos 10** et **11** les montrent en association avec le *grenat almandin* et la *biotite*, au voisinage des isogrades respectifs de la *staurolite* et de la *cyanite*, dans le climat de métamorphisme dalradien typique du Bas Limousin (voir l'Entretien n° VII).

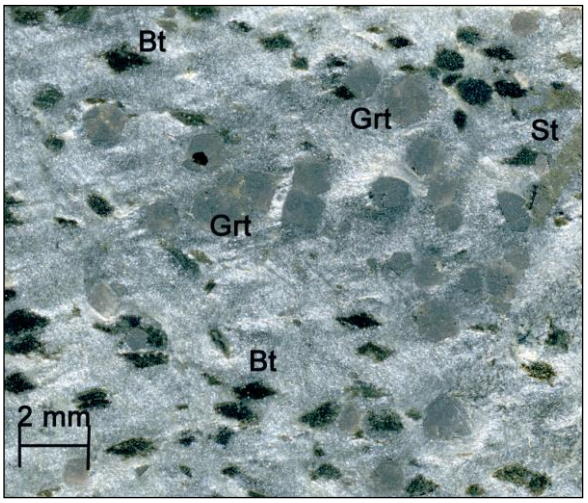


Photo 10. Coupe polie d'un schiste de la série de Donzenac (voir Entretien n° VII), au voisinage de l'isograde de la *staurolite*.
La coupe est taillée parallèlement au plan de schistosité. Cette dernière apparaît dans son habitus losangique en fuseaux allongés, dans l'angle droit en haut de la photo.
St = *staurolite*
Grt = *grenat almandin*
Bt = *biotite*.

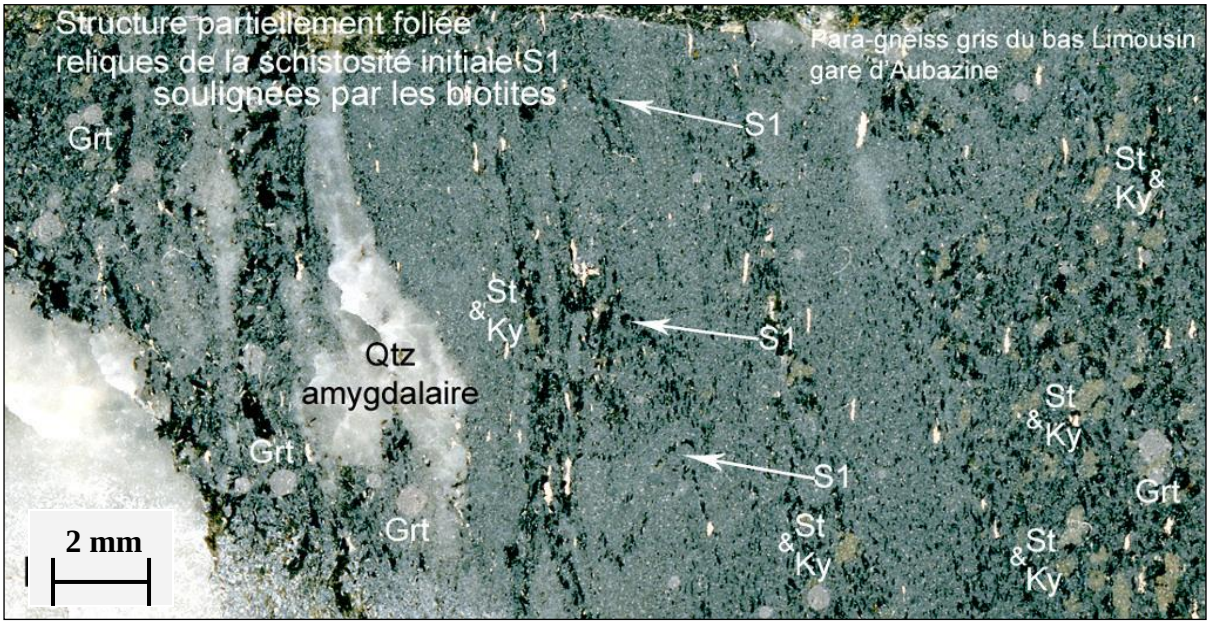


Photo 11. Coupe polie d'un gneiss de la série de la vallée de la Corrèze, au voisinage de l'isograde de la *cyanite* (voir Entretien n° VII).
La coupe est taillée perpendiculairement au plan de foliation. Le passage de la structure micaschiste à la structure gneiss n'est pas complet. Dans le tiers droit de la photo apparaissent les prismes bruns de *staurolite*, orientés parallèlement entre eux. Le grenat almandin est bien visible. La cyanite n'est pas visible à l'œil nu, et apparaît au microscope au voisinage des staurolites.
Noter l'étirement en amygdales des niveaux quartzo-feldspathiques et les charnières de plis soulignées par les biotites : la structure et la texture de cet échantillon de gneiss sont commentées dans l'Entretien n° II.
Ky = *cyanite*

Exemple 5 : la cordiérite

La *cordiérite* est un géothermomètre/géobaromètre intéressant, puisqu'il n'apparaît que dans les conditions de pressions plutôt faibles (absence totale de *cyanite*), comme dans les régions métamorphiques du Paléozoïque pyrénéen. Elle apparaît presque toujours altérée en *pinite*, et il est relativement rare de pouvoir observer son dichroïsme du violet au gris, si remarquable !

Malgré tout, elle est bien repérable à l'œil nu en grains ou masses vitreuses vert sombre. Les **photos 12** et **13** sont prises sur une coupe polie d'une migmatite du dôme métamorphique de Gavarnie/Héas, dans les Hautes-Pyrénées. Cet échantillon permet d'observer des cristaux centimétriques en bon état, mais il est exceptionnel et n'est pas représentatif des migmatites plus banales que l'on peut collecter dans les « fenêtres » de Gavarnie et de Héas (**photo 14**). Elles feront l'objet d'une présentation en lame mince dans le § 3.2. Les conditions de formation de ces migmatites ont été établies à une pression ne dépassant pas 3,5 kbar et une température de 650 °C, indiquant un début de fusion du gneiss en présence d'une forte pression d'eau. Néanmoins, les pressions atteintes sont encore celles du type Abukuma (voir **figure 1**).

Photo 12. Coupe polie dans une migmatite du dôme métamorphique de Gavarnie, montrant un amas concentré de prismes de *cordiérite* dans le leucosome. Le gneiss d'origine (paléosome) apparaît de chaque côté. La structure paraît bréchique.

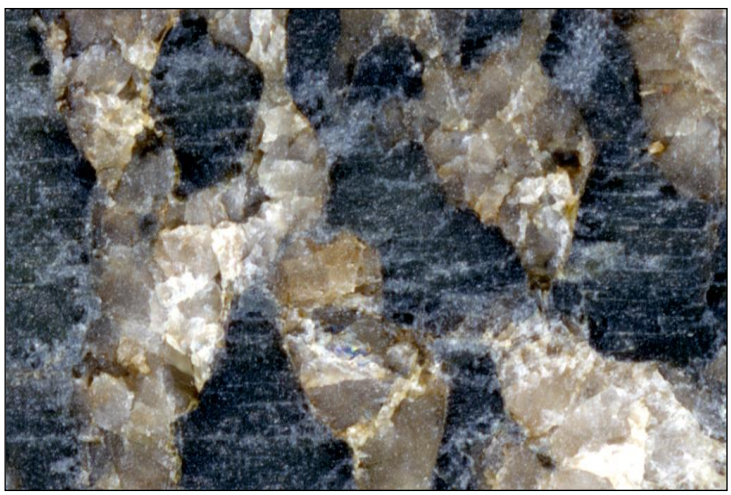


Photo 13. Détail des sections de prismes de *cordiérite* faisant apparaître leur structure maclée et le dichroïsme entre bleu-violet et gris-bleu clair. Les cristaux sont bordés d'un liseré de micas d'altération.

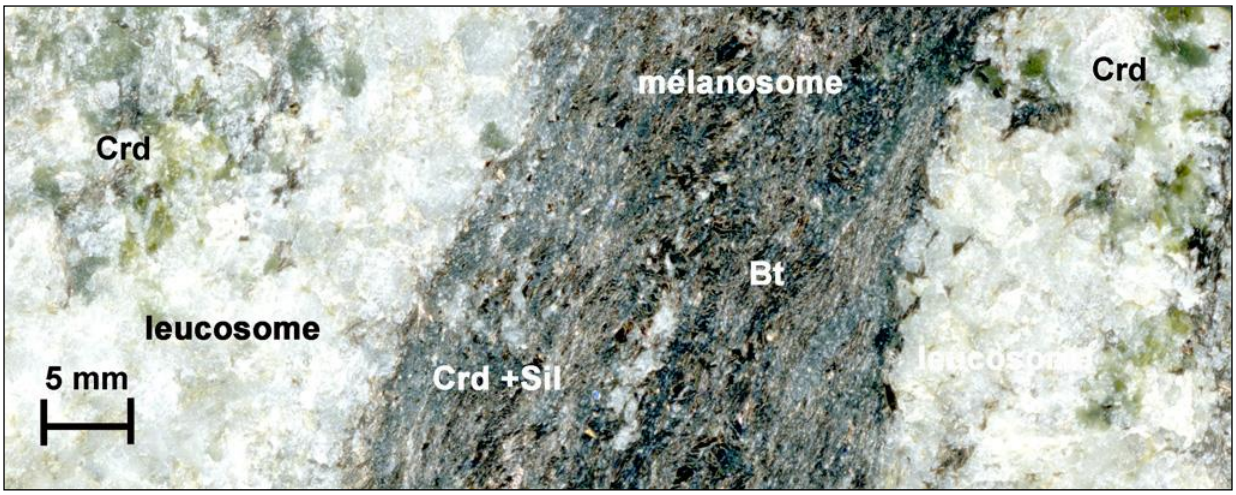


Photo 14. Migmatite à *cordiérite* dans le dôme métamorphique de Gavarnie/Héas.
Barrage des Gloriettes, Hautes-Pyrénées.
Les gros cristaux verts translucides de *cordiérite* sont en amas lâches au sein du *leucosome*.
La *cordiérite* est aussi présente au côté de la *biotite* dans le *mélanosome*, où l'analyse en lame mince (§ 3.2) fait apparaître la *sillimanite,* dans sa variété de métamorphisme de haut degré.
Crd = cordiérite.

Exemple 6 : les minéraux accessoires du métamorphisme zircon, titanite et apatite

Le *zircon*, abondant en inclusions dans les biotites, s'observe aisément en lame mince, mais est trop petit pour être observable à l'œil nu.

La *titanite (*ou *sphène)*, fréquente dans les *amphibolites*, peut se révéler par son fort contraste sur une coupe polie. Les **photos 15** et **16** montrent des cristaux bien formés, dans les *amphibolites* de la carrière du Faucou, déjà mentionnée à propos de la *cyanite*, dans une région de métamorphisme de haut degré, où l'on peut observer le contact entre *amphibolites* et *migmatites*.

Photos 15 et 16. Cristaux millimétriques à subcentimétriques de *titanite*, dans une *amphibolite*.
Carrière du Faucou, Espartignac, Corrèze.

Les *apatites* sont également visibles en coupe polie, comme le montre la **photo 17**.

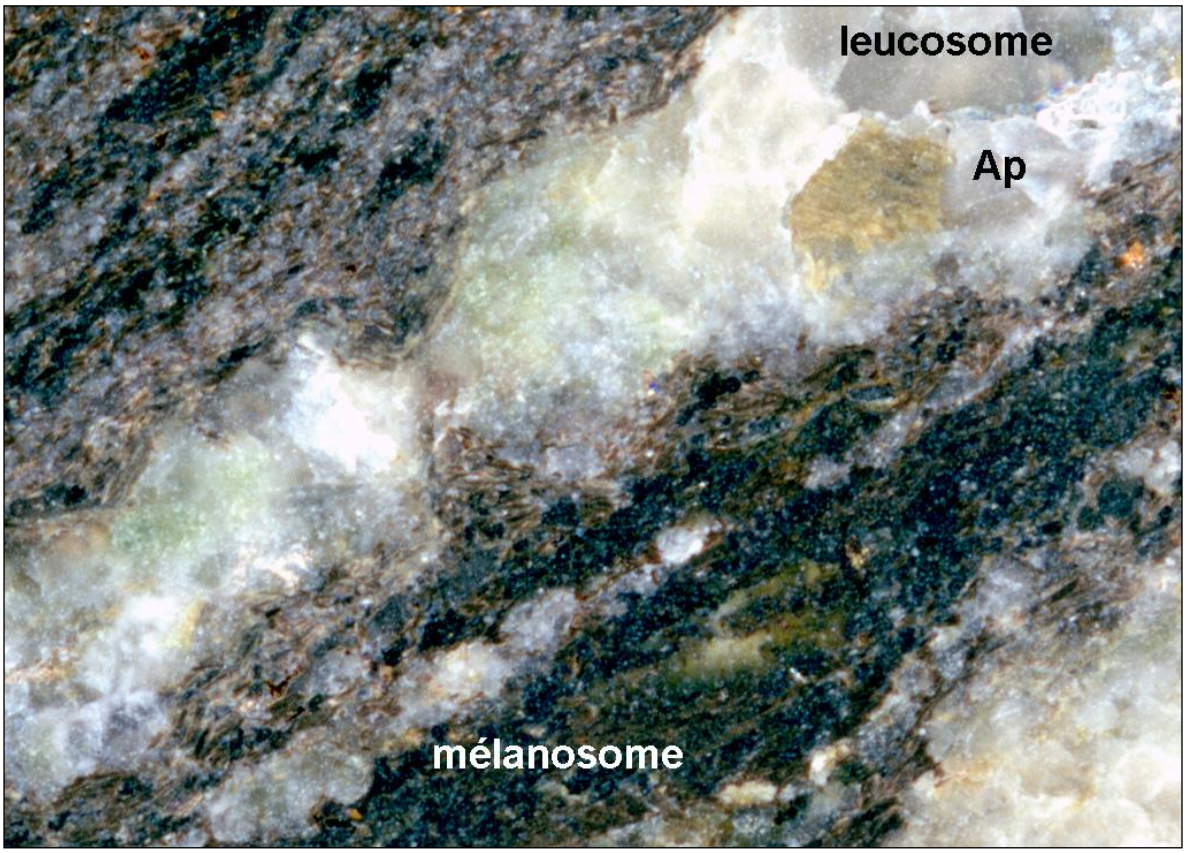


Photo 17. Cristal submillimétrique d'*apatite*, dans un *leucosome* à *cordiérite*.
Migmatite du barrage des Gloriettes, dôme métamorphique de Héas, Hautes-Pyrénées.
Ap = *apatite*.

3.2. Guide d'identification des minéraux sur lames minces de roches métamorphiques

L'outil de base de la pétrographie pour amateurs

Ce guide décrit comment rechercher et identifier des minéraux dans une lame mince taillée dans une roche métamorphique, par l'utilisation du microscope polarisant. Contrairement à une idée répandue, il n'est pas besoin d'utiliser un appareil sophistiqué pour conduire des observations utiles pour l'amateur. L'auteur a acquis toute son expérience en utilisant un microscope ancien, de type Nachet.

C'est un appareil très simple à utiliser, destiné autrefois aux travaux pratiques de minéralogie en faculté des sciences. De nombreuses photos ont été réunies dans le « ***Petit atlas photographique de paragenèses rencontrées dans le métamorphisme régional du Bas Limousin*** » qui accompagne l'Entretien n° VII, et dans le « ***Petit atlas des paragenèses des éclogites du Bas Limousin*** » de l'Entretien n° V.

Dans ce cas, les numéros des clichés sont mentionnés, précédés de [ATLAS].

3.2.1. Méthodologie

Pour chaque espèce minérale commune, on décrit par un tableau la progression de la recherche en deux étapes :

> ***1 - examen en lumière polarisée non analysée, ou lumière naturelle.***
> *Réfringence* indiquée qualitativement ainsi que l'intensité du *relief*. *Couleur* et *pléochroïsme*, par rotation du polariseur de 90°. Traces des plans de *clivage* et des formes des *sections* dans le cas de cristaux automorphes ;
> ***2 - examen en lumière parallèle polarisée analysée.***
> *Biréfringence* donnée par sa valeur numérique, pour permettre de se reporter à la table des *teintes de Newton* jointe au présent guide. Détermination des angles d'*extinction* pour chaque espèce. Identification des feldspaths par les macles.

Chaque tableau d'espèce minérale comprend aussi une rubrique « Commentaires », sur certaines caractéristiques utiles, observables en lame mince, comme les inclusions, altérations, etc.

Enfin figurent, pour chaque espèce, la liste des photos prises au microscope polarisant, avec leurs références dans les Entretiens, et le renvoi au ***« Petit atlas photographique de paragenèses rencontrées dans le métamorphisme régional du Bas Limousin*** » par la mention [ATLAS…], ou au « ***Petit atlas des paragenèses des éclogites du Bas Limousin*** » annexé à l'Entretien n° V, ou encore au « ***Petit atlas de textures et de microstructures*** » en annexe à l'Entretien n° II. Le chapitre se termine par des « Conseils pratiques ».

Plan du paragraphe 3.2

• Dans la première partie (§ 3.2.2), nous allons passer en revue des minéraux usuels, présents dans toutes les roches cristallophylliennes. Ils ne sont pas propres au métamorphisme, mais l'identification et la description sont indispensables à chaque examen de lame mince.

• Dans la seconde partie (§ 3.2.3), nous décrirons les caractéristiques des minéraux vraiment spécifiques du métamorphisme, ainsi que les minéraux dits « accessoires ».

Photo 18. Rangées dans une boîte spécialement conçue à cet effet, les lames minces sont la synthèse et la quintessence du travail sur le terrain ; elles remplacent des kilos d'échantillons encombrants !

3.2.2. Première partie

Les minéraux usuels, présents dans toutes les roches cristallophylliennes

Quartz

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Très faibles	Formes très variées. Clivages invisibles	Parfaitement incolore	Jamais altéré, mais peut être corrodé et fracturé ou écaillé

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
0,0091	Gris clairs et blancs du 1er ordre	Roulante en présence de contraintes	Cristaux xénomorphes de dernière génération. Texture myrmékitique dans feldspaths alcalins

Feldspaths alcalins, potasso-sodiques. Orthose et microcline.

Les perthites sont des microclines avec intercroissances d'albite.

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Faible. Relief très faible	Clivage net, fin et régulier. ***Microcline*** : triclinique, minéral des gneiss œillés. ***Orthose*** : monoclinique. Forme HT métastable	Incolore, mais souvent trouble et brunâtre par kaolinisation. Non pléochroïque	***Microcline*** : dans les roches métamorphiques, mais généralement de plus basses températures ou plus anciennes que l'***orthose***

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction, macles	Commentaires
0,007	Gris clairs du 1er ordre	Macle Carlsbad fréquente. Macles polysynthétiques en quadrillage chatoyant	Le quadrillage disparaît quatre fois par rotation

[ATLAS 80, 90, 100, 110]

Feldspaths sodo-calciques : plagioclases.
De l'albite à l'anorthite

Les antiperthites sont des plagioclases contenant des films ou des fenêtres de microcline.

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	**Section normale. Clivages**	**Coloration, pléochroïsme**	**Commentaires**
Faible, sauf pour la limite très calcique. Relief très faible	Clivages fins et suborthogonaux	Incolore, souvent altéré en produits finement cristallins. Non pléochroïque	Altération en damourite, fines paillettes de mica blanc, orientées sur les macles et les clivages

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	**Teintes de Newton**	**Extinction**	**Commentaires**
De 0,007 à 0,013	Gris clairs, blancs et jaune pâle du 1er ordre. Gris orangé à gris bleu	Détermination du taux d'*anorthite* par la méthode de Michel-Lévy[15]	*Macles polysynthétiques* de l'*albite*, extrêmement fréquentes en bandes parallèles. Zonage

[ATLAS 70, 71, 72, 161]. Clichés des figures 29 et 35, dans l'Entretien n° VII, et cliché 5b dans l'Entretien n° II.

Micas : micas noirs ou ferromagnésiens.
Biotite

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	**Section normale. Clivages**	**Coloration, pléochroïsme**	**Commentaires**
Moyenne. Relief peu accentué	Clivage ***p*** parfait et excessivement facile. Dépôts opaques d'oxydes de fer dans les clivages	Forte dans les bruns à rouges. Pléochroïsme intense pour les sections normales à ***p***	Inclusions fréquentes : zircons avec auréoles pléochroïques sombres

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	**Teintes de Newton**	**Extinction**	**Commentaires**
Forte : de 0,040 à 0,055	Teintes du troisième ordre. Vivacité souvent atténuée à cause de la couleur du minéral	Extinction droite par rapport à la trace du clivage	Se forme au-dessus de 520 °C. Facilement altérée en *vermiculite* ou *chlorite*

[ATLAS 10, 11, 20, 21, 22, 31, 32, 34, 35, 40, 41, 50, 51, 53, 60, 61, 70, 71, 100, 160, 161]

[15] Méthode statistique, sûre et facile à mettre en œuvre, par mesure des angles d'extinction de sections normales à (010). Faire les déterminations sur au moins dix macles de l'albite indépendantes les unes des autres.

Micas blancs : muscovite, séricite

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Moyenne. Relief moyen	Clivage parfait suivant ***p***, fin	Incolore et limpide, légèrement teintées de vert pour la *muscovite* ferrifère. Non pléochroïque	*Séricite* en paillettes dès le début du métamorphisme. *Muscovite* en grands feuillets à plus hautes températures

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
Forte : 0,035	Teintes du 2e ordre très vives. Les teintes sont très pures à cause de l'absence de coloration intrinsèque	Extinction droite	Ne s'altère pas. Parfois en lamelles et feuillets flexueux

[ATLAS 30, 50, 51, 52, 53, 90, 161]. Clichés 8b et 11a dans le « ***Petit atlas de textures et de microstructures*** » de l'Entretien n° II.

Chlorites magnésiennes : pennine et clinochlore

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Moyen. Relief assez prononcé	Clivage parfait et facile, net et fin	Purement magnésiennes : incolore, pour le *clinochlore*. En présence de fer : vert ou vert-jaune plus ou moins foncé. Pléochroïque	Lamelles flexibles. Inclusions opaques ferrugineuses le long des clivages, souvent abondantes

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
Faible : de 0,003 à 0,009	Teintes de polar du 1er ordre, souvent anormales, brun à violacé	Droite par rapport à la trace du clivage parfait	Souvent associé à la *séricite* dans le faciès schiste vert appliqué à une métapélite

[ATLAS, 10, 11, 21, 22]

Remarque sur la chloritisation par rétromorphose et passage dans le faciès des schistes verts

La biotite perd irrégulièrement sa coloration, passant du brun-rouge au vert ; cela traduit la perte du fer ferrique, la conservation du fer ferreux et le lessivage du potassium de la biotite. La biotite recristallise en chlorite.

Inversement, pour des températures supérieures au faciès des schistes verts, la chlorite réagit avec la *muscovite* pour donner la *biotite* et la *staurolite* (l'*andalousite* aux basses pressions). La chlorite est un bon « combustible » du métamorphisme prograde.

Les différents états du fer

• Ion *ferreux* Fe^{++}, colorant en vert ⟶ roches de basses températures.
• Ion *ferrique* Fe^{+++}, colorant en marron rouge ⟶ roches de hautes températures.
Son rayon ionique est plus petit que celui de Fe^{++} ; il est comparable à celui de l'*aluminium*.
Ainsi, Fe^{+++} peut se substituer à Al, comme dans le cas de l'*andalousite*.

Clinopyroxènes, monocliniques. Pyroxènes calciques et ferromagnésiens, série du diopside et omphacite

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	**Section normale. Clivages**	**Coloration, pléochroïsme**	**Commentaires**
Forte	Prismes trapus. Section normale à l'allongement pseudo-octogonale. Deux clivages suborthogonaux	*Diopside* et *omphacite* incolores. *Hédenbergite* verte, pléochroïque	Macle fréquente

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	**Teintes de Newton**	**Extinction**	**Commentaires**
Forte : de 0,028 à 0,031 pour le *diopside* ; de 0,020 à 0,025 pour l'*omphacite*	Teintes vives du milieu du second ordre (*diopside*), du début du second ordre (*omphacite*)	Oblique	L'angle maximum d'extinction des sections est caractéristique de chaque espèce

Voir clichés de *diopside* dans l'Entretien n° VIII : « Métamorphisme de contact ».

Les clinopyroxènes sont peu fréquents dans les roches métamorphiques, à l'exception de celles formées dans des conditions extrêmes, soit de pression comme les *éclogites* (avant rétromorphose), soit de température de pression, comme les *granulites*. Voir clichés sur l'*omphacite* dans l'Entretien n° V et son « ***Petit atlas des paragenèses des éclogites*** », ainsi que celui de la **figure 36** dans l'Entretien n° VII.

Amphiboles monocliniques non alumineuses, calciques et ferromagnésiennes. Actinote et trémolite (magnésienne uniquement)

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Moyenne à forte	Sections normales d'allure hexagonale. Prismes allongés, parfois aciculaires. Clivages constants à 56° (ou 124°)	Vert-bleu à vert clair. Pléochroïsme net, grâce au fer *Trémolite* incolore	Métamorphisme faible, faciès du schiste vert

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Couleurs	Extinction	Commentaires
moyenne : de 0,016 à 0,024	Seconde moitié du 1er ordre et première moitié du second ordre	Oblique, angle maximum de 11 à 17°	Produit d'ouralisation particulièrement fréquent

Amphiboles monocliniques alumineuses, calciques et ferromagnésiennes. Série de la hornblende

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Moyenne à forte	Sections normales montrant les deux clivages losangiques constants à 56° (ou 124°)	Coloration intense dans les verts, avec pléochroïsme net	Composante essentielle des amphibolites. Minéral des couronnes et des kélyphites des éclogites rétromorphosées

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
Moyenne : de 0,014 à 0,026	Du jaune du 1er ordre au bleu du second ordre	Angle maximum d'extinction de 15° à 27°. Allongement positif	Macles simples ou multiples fréquentes

Clichés des figures 28 à 36 dans l'Entretien n° VII. Planches 12 à 15 et clichés du « ***Petit atlas des paragenèses des éclogites*** » dans l'Entretien n° V.

3.2.3. Seconde partie

Les deux familles de silicates du métamorphisme

Silicates d'alumine purs et anhydres, polymorphiques	*Silicates d'alumine, hydratés ou non, contenant du fer et du magnésium*
***Andalousite* : MT, BP** ***Cyanite (disthène)* : HT, HP** ***Sillimanite* : HT**	***Staurolite* : MT, BP et MP** ***Grenats* : MT et HT, MP et HP** ***Cordiérite* : MT et BP** ***Chloritoïde* : BT et HP**

Abréviations :
B = basse, **M** = moyenne, **H** = haute. **T** = température. **P** = pression.

1. Silicates d'alumine proprement dit, purs et anhydres

Andalousite

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	**Section normale. Clivages**	**Coloration, pléochroïsme**	**Commentaires**
Assez élevée, relief marqué	Presque rectangulaire. Clivages rarement visibles	Incolore, ou rosâtre (Fe^{+++} substitué à Al). Pléochroïsme peu net	Variété *chiastolite* fréquente, avec inclusions dessinant des croix opaques caractéristiques

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	**Teintes de Newton**	**Extinction**	**Commentaires**
Faible : de 0,009 à 0,011	Gris, blanc et jaune pâle du 1er ordre	Droite	Souvent damouritisée, et même pseudomorphosée par des micas blancs en fines paillettes

Clichés dans l'Entretien n° VIII : « Métamorphisme de contact ».

Cyanite

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Forte. Bon relief	Plaquettes allongées. Clivage fin, régulier et parfait, et striation parallèle à l'axe **b**	Incolore	Macles mécaniques fréquentes sur les plaquettes déformées. Jamais pœcilitique

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
Moyenne : de 0,012 à 0,016	Jaune du 1er ordre	Rarement oblique, angle maximum de 30°. Allongement positif	Fines bordures d'altération de mica

[ATLAS 60, 61, 132, 133, 141, 142]. Figure 33 de l'Entretien n° I.

Sillimanite

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Forte. Relief marqué	Prismes très allongés, à section losangique subcarrée, ou aiguilles en paquets flexueux. Clivage très net	Incolore et parfaitement limpide	La variété courante est la *fibrolite*, où les amas de fines aiguilles sont intimement enchevêtrés au *quartz*. Les prismes nécessitent des conditions de formation à températures plus élevées

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
Assez forte : de 0,020 à 0,023	Seconde moitié du 1er ordre, jaune orangé à rouge	Droite. Allongement positif	Très stable et jamais rétromorphosée

[*Fibrolite* : ATLAS, 132, 133, 140, 141, 142].
Pour la forme de hautes températures, voir clichés dans l'Entretien n° VI : « Anatexie et migmatites ».

2. Silicates d'alumine hydroxylés ou non, contenant Fe et/ou Mg.

Staurolite

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Très forte. Relief très fort	Prismes à section losangique allongée. Clivage moyen	Jaune pâle à jaune d'or intense, nettement pléochroïque	Très souvent fortement pœcilitique, à inclusions de *quartz*

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
Assez faible : de 0,012 à 0,015	Jaunes du 1er ordre.	Droite	Damouritisation possible

[ATLAS 24, 31, 32, 34, 35, 40, 41, 50, 52, 60, 62, 6].
Clichés 5 à 9 dans l'annexe à l'Entretien n° II.

Grenats alumineux : almandin et pyrope. Grenat calcique : grossulaire

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Très forte. Fort relief	Sections géométriques, ou plus ou moins arrondies	Incolore	Craquelures et inclusions très fréquentes, celles-ci pouvant dessiner des figures dites « hélicitiques », témoins de la microtectonique. Également zonages

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
Nulle ou très faible (anomalie)	Noir !	Complètement éteint en LPA	Coronitisation dans les éclogites rétromorphosées

Grenats alumineux : *almandin*, dans ATLAS 23, 30, 36, 40, 41, 50, 51, 52, 61, 160, 161.
Pyrope, dans les clichés du « ***Petit atlas des paragenèses des éclogites*** » de l'Entretien n° V.
Grenat calcique : *grossulaire*, dans les figures de l'Entretien n° VIII sur le métamorphisme de contact. Voir également l'Entretien n° II et son annexe.

Cordiérite

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Faible, voisine de celle du quartz	Rarement des formes géométriques définies	Incolore seulement en l'absence d'altération !	Inclusions de zircon avec auréole pléochroïque jaune citron

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
0,009 à 0,016	Blancs à jaunes du premier ordre	Non déterminable !	Presque toujours altérations importantes

Clichés dans l'Entretien n° VI.

Micas durs : chloritoïde

Lumière polarisée non analysée

Réfringence, relief	Section normale. Clivages	Coloration, pléochroïsme	Commentaires
Forte	En rosettes ou masses avec, parfois, figures en sablier. Clivage net et fin suivant ***p***. Lamelles de clivage cassées	Vert olive à gris vert, avec pléochroïsme	Rare. Faciès des amphibolites à *épidote*, HP

Lumière polarisée analysée

Biréfringence	Teintes de Newton	Extinction	Commentaires
Faible : de 0,006 à 0,016	Gris à orangé du 1er ordre, avec teintes anormales assez fréquentes	Extinction proche de la trace de clivage principal	Souvent maclé suivant ***p***. Macles polysynthétiques

Clichés au § 3.4.2.2 de l'Entretien n° IV. Cliché 14, annexe de l'Entretien n° II.

3.2.4. Conclusion du chapitre

L'outil de base de la pétrographie des roches métamorphiques

Avec ce chapitre consacré à la méthode de détermination des minéraux sur lames minces, nous disposons de l'outil de base élémentaire pour la pétrographie, c'est-à-dire la science descriptive des roches cristallophylliennes, et donc en particulier métamorphiques. Or la pétrographie est la base de départ incontournable pour aborder la pétrologie, dont l'objectif, plus ambitieux, est la classification et l'interprétation de la genèse de ces roches.

Notre but a été de montrer aux amateurs, qui veulent progresser dans ce domaine, que la première étape purement pétrographique leur est accessible. Outre la satisfaction de donner au travail d'observation et de collecte sur le terrain un aboutissement, la maîtrise de cette étape permet de mieux lire les cartes géologiques, et de mieux comprendre leurs notices et la littérature scientifique relative à la région et aux affleurements étudiés.

Conseils pratiques

Pour s'initier à la pétrographie et à l'observation des lames minces, l'ouvrage de Marcel Roubault : ***Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant***[16] est la référence indispensable. C'est un guide très clair pour un apprentissage progressif des multiples et fascinantes possibilités offertes par ce type de microscope, même dans sa forme la plus rustique. De plus, l'ouvrage comporte une partie minéralogique systématique et complète, à laquelle on peut se référer chaque fois que l'on a un doute sur une détermination. Son seul défaut est de n'offrir que des planches en noir et blanc. On complétera utilement par des atlas modernes en couleur, donnant des clichés de qualité pour les principaux minéraux du métamorphisme, comme l'« Atlas » de W. S. Mackenzie et A. E. Adams, édité chez Dunod.

Dans la seconde partie de l'Entretien n° II, nous présentons, de la façon la plus simple possible, les bases physiques de l'observation d'une lame mince en lumière polarisée. Puis, nous donnons des conseils pratiques pour la marche à suivre dans la détermination des minéraux.

Photo 19. Microscope Nachet, pour l'observation des lames minces en lumière polarisée. Il s'agit du modèle le plus simple, pour étudiants. La prise de vue se fait de façon la plus simple possible, en plaçant l'objectif de l'appareil photo contre l'oculaire du microscope. L'appareil doit être maintenu par un support indépendant. Choisir un objectif grand angle pour l'appareil photo, pour obtenir une résolution satisfaisante sur les bords de la préparation.

Si la température de couleur de la source (exemple : filament de tungstène) n'est pas optimale pour le rendu des teintes de Newton, on peut l'améliorer en interposant entre l'oculaire du microscope et l'objectif de l'appareil photo un filtre correcteur pour source 3 200 K, par exemple le filtre multicouche, type 80A, de la société Hoya.
L'expérience montre que le filtre est vraiment nécessaire, principalement en **lumière polarisée non analysée** car il augmente considérablement le contraste des images et supprime la teinte jaune désagréable.

[16] Éditions Lamarre-Poinat, avec la collaboration de J. Fabriès, J. Touret et A. Weissbrod.

La lame du polariseur est fixée au-dessus du condenseur. La molette de réglage du condenseur permet de l'éloigner de la platine tournante, ce qui accentue le relief en ***lumière naturelle,*** c'est-à-dire ***sans analyseur***.

On ne saurait trop insister sur l'importance primordiale de l'observation préliminaire en lumière naturelle, avant de passer à l'examen en lumière analysée, comme le souligne Marcel Roubault dans l'ouvrage cité. Voici ses propres termes :

« Une étude approfondie des minéraux dans ces conditions est fondamentale et fournit toujours des indications très précieuses pour la suite. Pour un observateur un peu entraîné, elle permet même le diagnostic immédiat d'un grand nombre d'espèces minérales, que les opérations ultérieures, examen en lumière polarisée parallèle ou convergente, se borneront simplement à confirmer. »

Photo 20. Gros plan sur les dispositifs placés au-dessus de l'objectif. Ce dernier coulisse sur des glissières et est donc interchangeable. Les grossissements utilisés par l'auteur sont de X 7 et X 60. Au-dessus des glissières de l'objectif, on distingue d'abord la réglette mobile qui permet d'interposer l'analyseur ou de le retirer, puis la fenêtre dans laquelle on peut insérer la réglette support d'une lame quart d'onde.

Photo 21. Chaque lame mince, dont l'épaisseur doit être impérativement calibrée à 30 micromètres lors du polissage final, est collée sur une plaque de verre de 45 x 30 mm, et protégée par une fine lamelle de verre. Le verre doit être gravé avec un code de reconnaissance, permettant un rangement rationnel.

Teintes de Newton, soit encore « **échelle de biréfringence** » : ce sont les couleurs d'interférence d'un minéral incolore de biréfringence donnée, en lame mince de 30 micromètres, pour une orientation de la coupe donnant la valeur maximale de la couleur.

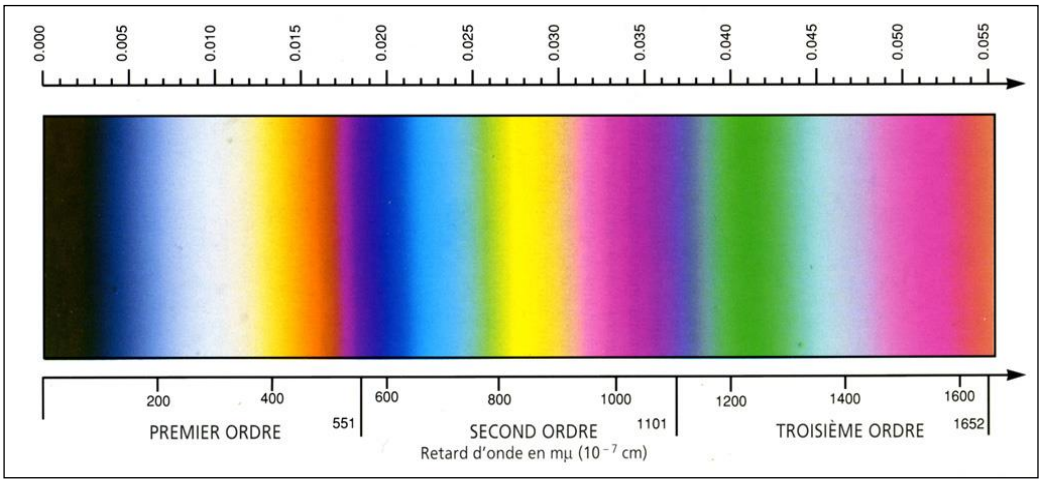


Photo 22. L'échelle du haut est l'échelle de biréfringence. (D'après l'Atlas Dunod, ouvrage cité)

4. Lexique

Géobaromètre : minéral permettant de déterminer le domaine de pression du métamorphisme.
Géothermomètre : minéral permettant de déterminer le domaine de température du métamorphisme.
Isograde : courbe joignant sur la carte les points affectés par le même degré de métamorphisme.
Orthodérivée (roche) : roche métamorphique dérivant d'une roche magmatique.
Paradérivée (roche) : roche métamorphique dérivant d'une roche sédimentaire.
Pœcilitique : caractérise un cristal d'un minéral contenant de nombreux petits cristaux d'un autre minéral.
Rétromorphose : transformation d'une roche métamorphique en une autre roche de degré métamorphique plus faible.
Prograde (métamorphisme) : correspond à une transformation à des conditions de pression et de température croissantes, à partir d'un état donné d'équilibre.
Rétrograde (métamorphisme) : correspond à une transformation à des conditions de pression et de température décroissantes, à partir d'un état donné d'équilibre.
Nombreuses autres définitions en bas de page dans le texte.

Lexique du paragraphe 3.2
Observation des lames minces en lumière polarisée

Biréfringence : mesure de la double réfraction de la lumière dans un cristal non cubique.
Dichroïsme : propriété de changement de teinte en fonction de l'angle d'observation à l'œil nu.
Extinction (angle d'extinction) : angle entre les directions de vibration des rayons réfractés, dites directions d'extinction, et les directions/repères cristallographiques.
Kélyphite : agrégat de petits cristaux formant une couronne de réaction autour d'un minéral.
Myrmékite : cristal de feldspath plagioclase contenant de fins vermicules de quartz buissonnant.
Pléochroïsme : en lumière naturelle, propriété de changement de couleur suivant l'orientation d'un cristal par rapport au polariseur.
Réfringence : propriété de réfracter un rayon de lumière. Le « relief » du minéral est d'autant plus élevé que sa réfringence est forte.

5. Bibliographie

KORNPROBST J. (2001) – *Métamorphisme et roches métamorphiques, signification géodynamique*. 3e édition. Dunod éd.
PONS J.-C. (2001) – *Minéraux et roches métamorphiques, la pétrologie sans peine*. Collection Focus, CRDP de l'académie de Grenoble.
BARIAND P., CESBRON F., GEFFROY J. (1977) – *Les minéraux, leurs gisements, leurs associations*. BRGM éd.
FOUCAULT A., RAOULT J.-F. (2004) – *Dictionnaire de géologie*. 5e édition. Masson éd.
ROUBAULT M. – *Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant*. Éditions Lamarre-Poinat, avec la collaboration de J. Fabriès, J. Touret et A. Weissbrod.
MACKENZIE W. S. & ADAMS A. E. (1999) – *Atlas, initiation à la pétrographie*. Dunod éd.