

Entretien sur le métamorphisme n° IV

○ ○ ○ ○ ○

Comment classer les roches métamorphiques ?

SOMMAIRE

1. Rappel des entretiens précédents.	page 2
Mettons un peu d'ordre !	
2. Nomenclatures descriptives	page 3
2.1. À partir de la structure	page 3
2.2. À partir de la texture	page 7
2.3. À partir de la composition minéralogique	page 9
2.4. À partir de la nature de la roche d'origine : le protolithe.	page 9
3. Introduction de la notion de faciès	page 9
3.1. Les premiers concepts utilisés : série, zone, isograde.	page 10
3.2. Pourquoi ces concepts sont-ils insuffisants ?	page 11
3.3. L'espace pression/température et les faciès	page 11
3.4. Les gradients du métamorphisme et l'introduction du paramètre temps.	page 13
L'espace P/T/t	
3.4.1. Le gradient d'Abukuma	page 13
3.4.2. Le gradient dalradien	page 14
3.4.2.1. <i>Un gradient « banal »</i>	page 14
3.4.2.2. <i>L'exception du chloritoïde</i>	page 14
3.4.3. Le gradient franciscain	page 16
4. Conclusion	page 17
5. Lexique. Bibliographie.	page 18

Entretien sur le métamorphisme n° IV

Résumé

Comment classer les roches métamorphiques ?

Lors des Entretiens précédents, des numéros I à III, nous avons appris à distinguer les roches métamorphiques, mais en même temps à prendre conscience de leur grande diversité. Nous avons commencé à nous orienter dans ce monde complexe, de façon à l'organiser et à reconnaître des lignes directrices.

Dans la première partie, introductive, de cet Entretien n° IV, nous allons rappeler les résultats acquis.

Dans la seconde partie, nous aborderons la question de la classification, pour tenter de mettre de l'ordre dans les idées ; nous verrons qu'il n'y a pas encore de réponse internationalement reconnue, mais qu'il y a plusieurs nomenclatures descriptives utiles.

Dans la troisième partie, nous introduirons une notion clé du métamorphisme : celle de **faciès**, et nous verrons comment les faciès se placent dans le diagramme fondamental pression/température.

*Les termes suivis d'une * sont définis dans le lexique (chapitre 5).*

1. Rappel des entretiens précédents.

Mettons un peu d'ordre !

L'Entretien n° I offre un panorama des principaux types de roches métamorphiques, avec leur place dans certains paysages géologiques régionaux et une première idée de leurs conditions de formation. Les localisations choisies pour illustrer la suite des Entretiens appartiennent à des régions largement étudiées et assez typiques de leur type de métamorphisme :

- le Bas Limousin, sur l'axe Brive-Tulle, ainsi que les Pyrénées, pour le métamorphisme régional ;
- les Pyrénées, pour le métamorphisme de contact ;
- l'île de Groix et, à nouveau, le Bas Limousin, pour le métamorphisme de haute pression.

L'Entretien n° II a été consacré aux structures et textures des roches métamorphiques. En effet, les aspects structuraux sont visibles à l'œil nu sur le terrain. La reconnaissance d'une schistosité ou d'une foliation est le plus souvent immédiate. Celle d'une linéation est plus délicate. Avec un peu de recherche et de chance, sur un affleurement qui s'y prête, on peut observer une charnière de pli et relier ainsi les surfaces de schistosité au plan axial du pli. L'observation à la loupe d'une cassure fraîche permet en général d'aller plus loin et de donner les premières indications grossières de texture, c'est-à-dire d'arrangement des minéraux entre eux.

On a vu que, pour aller plus loin, il était possible d'utiliser des moyens simples, à la portée de l'amateur : sciage de l'échantillon à la scie diamantée, suivant des plans de section parallèle ou perpendiculaire à la surface de schistosité ou de foliation, suivi d'un polissage. La technique a été présentée dans l'Entretien n° III. De nombreux exemples seront donnés ici et dans les Entretiens suivants. Enfin, l'examen au microscope polarisant sur lames minces permet non seulement de déterminer la texture, mais aussi d'identifier quelques minéraux du

métamorphisme, en particulier les *silicates d'alumine*, comme on a pu le voir dans l'Entretien n° III. L'aboutissement est la description de la fabrique* de la roche.

À la fin de l'Entretien n° III, nous disposons d'éléments suffisants pour introduire les outils conceptuels de la théorie : c'est ce qui va être fait dans le présent Entretien n° IV. Puis nous appliquerons ces outils aux roches métamorphiques des régions choisies, dans les Entretiens n° V, VI et VII.

C'est ainsi que, pour poursuivre et approfondir l'exemple des roches de la région métamorphique du Bas Limousin, nous aurons besoin, pour interpréter leurs paragenèses, de faire appel aux notions de gradient et de degré de métamorphisme, de minéraux index et d'isograde. Le rôle des fluides dans les transformations successives d'un métamorphisme prograde, ou rétrograde, devra être pris en compte, pour son impact sur les cinétiques. Nous découvrirons le paradoxe de la présence, dans les roches échantillonnées, de minéraux témoins de pressions et de températures les plus hautes atteintes, malgré le retour aux conditions normales de température et de pression à la surface. Ce retour est la phase rétrograde ; on parle de rétromorphisme, quand cette phase de retour s'accompagne de transformations notables ou simplement décelables.

Pour expliquer le paradoxe des minéraux témoins, nous aurons recours à un modèle géodynamique qui fera intervenir la rapidité du retour dans les conditions normales et les différentes cinétiques des réactions, soit en présence de fluides, soit en milieu anhydre.

Au-delà de ce paradoxe, il y a un véritable « effet d'aubaine », qui nous permet de nous transformer en archéologues de l'histoire métamorphique des roches !

2. Nomenclatures descriptives

Il n'existe pas encore une classification rationnelle, systématique et unique des roches métamorphiques. Peut-être n'en existera-t-il jamais !

Voilà une situation qui ne facilite pas la présentation de ce domaine de la géologie. C'est une différence importante avec les roches magmatiques, pour lesquelles il existe maintenant une classification internationale sur la base des compositions minéralogique et chimique. Mais, heureusement, nous disposons de nomenclatures, surtout descriptives, qui se complètent mutuellement. Nous allons les passer en revue et, à partir de certaines d'entre elles, aboutir aux méthodes modernes de détermination des roches métamorphiques.

2.1. Nomenclature à partir de la structure

C'est la nomenclature la plus commune. Ce sera donc un rappel. On s'aidera également du lexique pour la compréhension des termes. Les roches servant d'exemples dans ce paragraphe font toutes l'objet de descriptions détaillées dans les Entretiens n° II, III, V, VI et VII.

Tout d'abord, il existe un classement purement descriptif à partir de la structure, fondée sur la présence ou l'absence de schistosité. On distingue simplement *schistes*, *micaschistes* et *gneiss*, qui ont des structures anisotropes, des roches plutôt isotropes comme les *granulites* et les *cornéennes*. Cependant, pour les roches « schisteuses », comment distinguer les *schistes* des *micaschistes* et des *gneiss* ?

Les *schistes* sont caractérisés par des plans de schistosité relativement serrés, où l'épaisseur des lits inter-schisteux est inférieure ou égale au millimètre (**planche 1**).

Le terme *micaschiste* désigne des schistes micacés, où biotite et/ou muscovite sont très abondantes (**planche 2**).

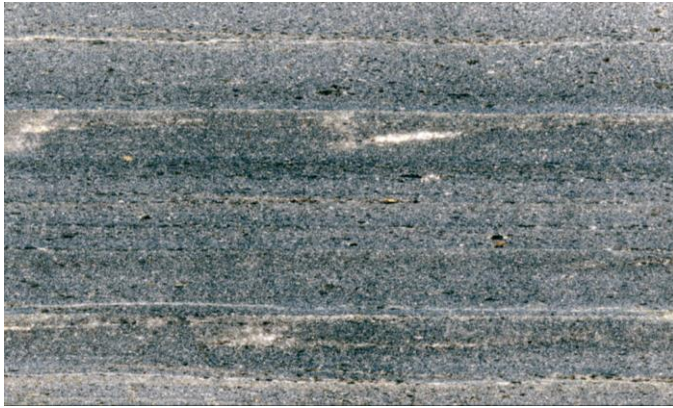
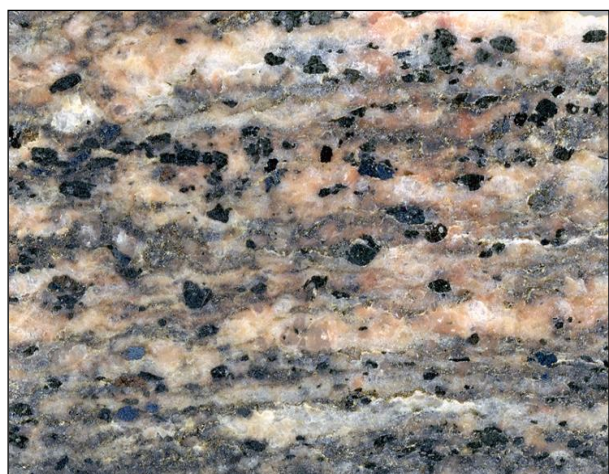


Planche 1. Coupe polie dans un *schiste ardoisier* de la carrière de Travassac, Corrèze.



Planche 2. *Micaschiste albitique* de l'île de Groix, à *grenats almandins* et *chloritoïde*. Les reflets blancs et bleus de la coupe polie sont dus à la *muscovite*, très abondante.

Quant aux *gneiss*, l'espacement entre lits *quartzo-feldspathiques* et lits micacés est au moins de l'ordre du demi-centimètre. Alors apparaît la foliation* (**planches 3 et 3 bis**).

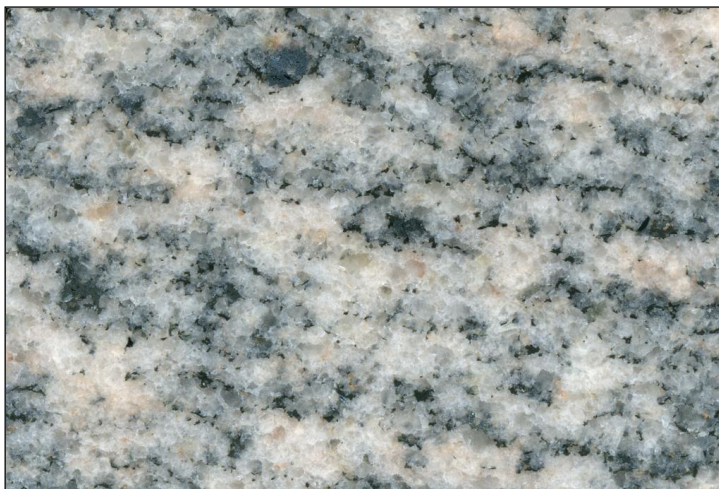


Planches 3 et 3 bis. *Gneiss leptynitique* de Tulle, à *albite-oligoclase*. À droite, coupe polie, montrant la structure rubanée et boudinée de ce *gneiss*, soulignée par l'alternance de lits riches en *biotite* et de lits *quartzo-feldspathiques*. Les grosses ponctuations en amandes noires sont des *amphiboles*. Lieu dit le « Château fort », sur la N120, à 3 km de Laguenne, en direction d'Argentat, Corrèze.

Les lits micacés peuvent être réduits, voire être absents, comme pour les *orthogneiss* de la **planche 4**. Pour la signification d'« ortho », voir le classement par nature du protolithe* (§ 2.4).

Planche 4.

Coupe polie d'un *orthogneiss* de la petite carrière de Bonnel, à la sortie du tunnel routier de la N89, de Brive à Tulle, Corrèze. Il s'agit d'une *leptynite*, dite d'Albussac, dont le rubanement quartzo-feldspathique est intercalé par de minces lits discontinus de biotite noire.



Attention ! Ce classement est uniquement descriptif ; il n'existe aucune raison d'admettre à priori qu'un gneiss corresponde à un degré de métamorphisme plus élevé que celui qui caractérise un micaschiste.

Une catégorie spéciale de schistes est celle des *schistes tachetés* et des *schistes noduleux*. Ces roches, souvent associées au métamorphisme de contact, sont caractérisées par des porphyroblastes*, par exemple de *cordiérite* ou d'*andalousite*, altérés en produits phylliteux (mica blanc, chlorite), dispersés dans une matrice fine (**planche 5**).



Planche 5.

Affleurement de *schiste noduleux* à *andalousite* du Tarbesou, Ariège.

Le Tarbesou se situe en bordure du massif intrusif de la dent d'Orlu et du vaste massif d'*orthogneiss migmatitique* d'Ax-les-Thermes.

Il s'agit d'une roche métamorphique dont le protolithe est un sédiment de l'Ordovicien inférieur et qui a été transformé dans le faciès basse pression des *amphibolites*.

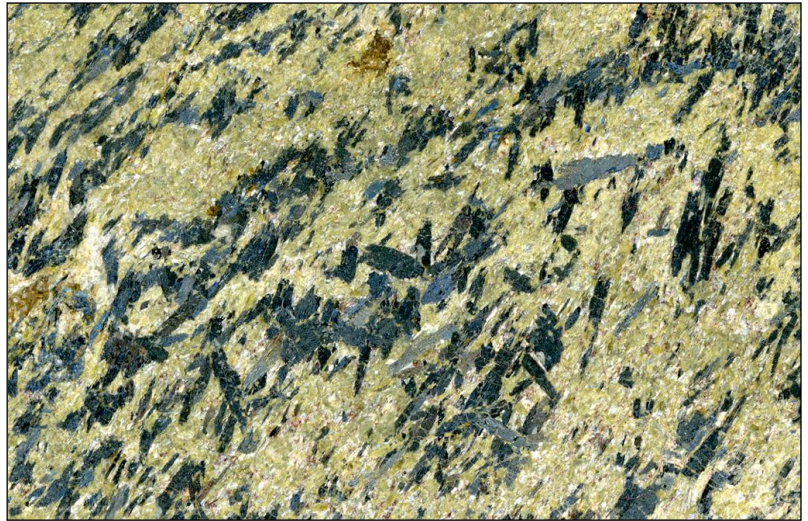
Les ponctuations sombres à la base de l'affleurement sont des prismes d'*andalousite*, tous orientés de la même façon.

La nomenclature établie sur la base de la structure concerne principalement les roches métamorphiques issues de roches de la croûte, sédimentaires et granitoïdes. Cependant, le terme de *schiste* s'applique également à certaines roches métamorphiques issues de roches basiques,

d'origine plus profonde : *schistes verts* (schiste à *épidote* et *chlorite*), *schistes à glaucophane*, etc. Ces roches font l'objet de l'Entretien n° V, métamorphisme de hautes pressions (**planche 6**).

Planche 6.

Coupe polie d'un *schiste à glaucophane* de l'île de Groix (pointe des Chats). L'*amphibole sodique* bleue, ou *glaucophane*, domine et forme des lits épais millimétriques à centimétriques, alternant avec des lits également épais d'*épidote* jaune vert. Cette roche est formée dans des conditions de pression exceptionnellement élevée, de l'ordre de 10 kbar.



Certains éléments texturaux (voir § 2.2), de grande dimension, permettent de compléter cette nomenclature en faisant apparaître des caractéristiques remarquables à l'œil nu. Le cas le plus typique est celui des *gneiss œillés*. Ces roches contiennent en abondance des éléments feldspathiques et quartzo-feldspathiques de grande dimension, dispersés dans une matrice orientée à grain plus fin. Dans un grand nombre de cas, les « yeux » des *gneiss œillés* sont associés à des éléments précédant l'épisode de déformation : on dit qu'ils sont antécinématiques ou antétectoniques.

Deux cas peuvent se présenter pour comprendre, à partir de la forme et de la composition des « yeux », quelle est la nature de la roche d'origine (protolithe) :

- soit ce sont des porphyroclastes* de feldspath potassique ou de *plagioclase* dérivant d'anciens phénocristaux de granitoïdes : le *gneiss œillé* (**planche 7**) est dit « orthodérivé ».

Le préfixe « ortho » sera expliqué dans le § 2.4.

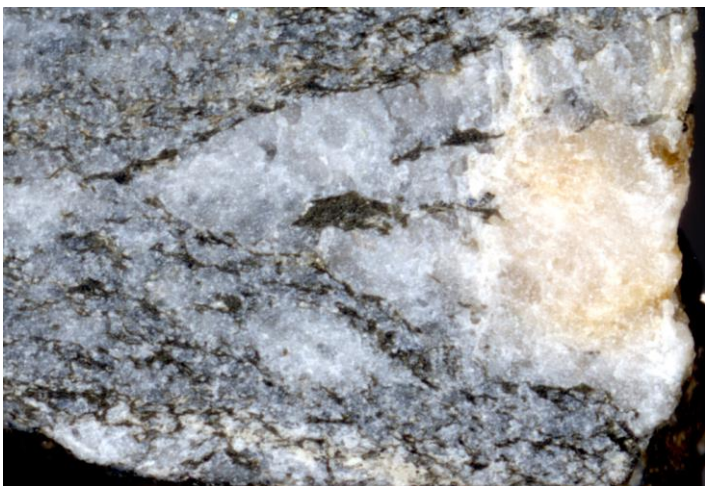


Planche 7.

Claste de microcline et queue de cristallisation dans un orthogneiss de Cornil, récolté dans les falaises au-dessus de la N89, Corrèze. (Coupe polie).

Le mécanisme physico-chimique responsable de la formation des queues de cristallisation est décrit dans l'Entretien n° II.

- soit ce sont des amandes *quartzo-feldspathiques* plus ou moins effilées, anastomosées*, dérivant du boudinage de filonnets granitiques anciennement inclus, par exemple dans une *pélite** migmatisée, comme sur la **planche 8**. Dans ce cas, les *gneiss œillés* sont dits « paradérivés ».

Le préfixe « para » sera expliqué dans le § 2.4.

Planche 8.

Sur cette coupe polie d'un *paragneiss œillé*, récolté sous la Portella de la Coma den Garcia, on peut observer les amandes quartzo-feldspathiques anastomosées, voisinant avec des porphyroclastes, ceinturés par des lits de *biotite* étirés par la contrainte tectonique. Le vallon de la Coma den Garcia aboutit au col de Puymorens,



en Ariège.

2.2. Nomenclatures à partir de la texture

On a déjà vu au paragraphe précédent des emprunts de caractères texturaux pour affiner la nomenclature. L'observation de la texture conduit à une nouvelle nomenclature purement descriptive, très utilisée. Son intérêt vient de ce qu'elle emploie, en plus du régime de contraintes, la géométrie des minéraux néoformés, les « blastes* ».

Les textures granoblastiques caractérisent les roches constituées pour l'essentiel de minéraux dont les formes sont relativement régulières, en grains, comme le *quartz*, les *feldspaths*, le *grenat* et la *cordiérite*. En régime de faible contrainte, au cours de la recristallisation, ces textures sont proches de l'arrangement idéal correspondant à la minimisation de l'énergie de surface, avec des joints de grains à 120°. Les contraintes de cisaillement conduisent à la croissance préférentielle des grains parallèlement à la foliation, et la texture devient granoblastique orientée, l'orientation étant déterminée par la trace de la foliation sur le plan d'observation. Cette texture très fréquente est bien marquée dans les queues de recristallisation des « amygdales » de quartz ou quartzo-feldspathiques, comme on le voit sur la **planche 9**.

**Planche 9.**

Dans cet *orthogneiss œillé* de Cornil, les rubans quartzo-feldspathiques ont été recristallisés et ont une texture granoblastique régulière, avec joints à 120°. Le rubanement est marqué par les lits de biotite.

Au centre, subsiste un « œil » feldspathique en amande. (Coupe polie).

Les textures lépidoblastiques (de *lepidos* = écaille) sont caractéristiques des roches très riches en minéraux phylliteux (*chlorites* et *micas*) disposés parallèlement à la schistosité, comme dans les *schistes* et les *micaschistes* (**planche 10**).

Planche 10. Texture lépidoblastique dans un *micaschiste* satiné à grandes *biotites*, *grenats* et *staurolites*, du Moulin du Nègre, Corrèze. (Voir aussi l'Entretien n° VII et l'Atlas de paragenèses).



Les textures nématoblastiques (de *nematos* = aiguille) sont caractéristiques des roches très riches en minéraux aciculaires comme certaines *amphiboles*, dont l'orientation détermine souvent une linéation* d'allongement (**planche 11**).

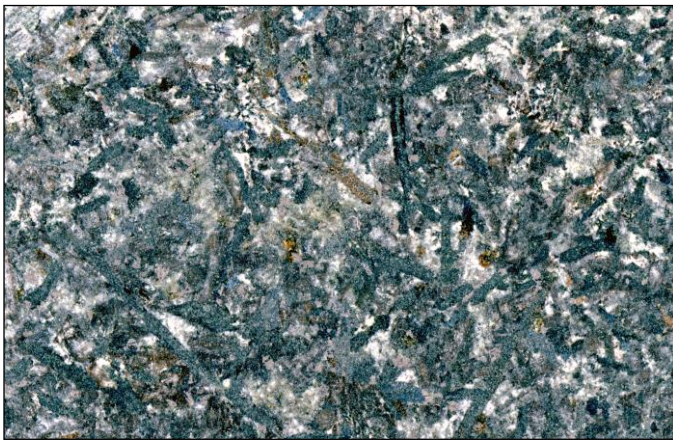


Planche 11.

Coupe polie dans une *amphibolite* à cristaux aciculaires d'*actinote*.

Col de Menté, Les Mourtis, Haute-Garonne.

Cependant, on rencontre le plus souvent l'association dans une même roche, à l'échelle centimétrique, de niveaux riches en minéraux phylliteux ou aciculaires (*amphiboles*), et de

niveaux riches en *quartz* et *feldspaths* (**planche 12**).

Ces textures mixtes, grano-lépidoblastiques et grano-nématoblastiques, sont la règle dans les séries métamorphiques issues de la recristallisation des *pélites** et des *grauwackes**.

Planche 12.

Exemple de texture mixte, grano-lépidoblastique. Coupe polie dans un *orthogneiss* mésocrate* de la série d'Albussac.

La foliation est soulignée par les lamelles de biotite (texture lépidoblastique) et les grosses ponctuations d'*amphibole* identifiables à leurs couleurs changeantes du brun au bleu (dichroïsme en réflexion).

Les masses quartzo-feldspathiques recristallisées ont une texture granoblastique.

Échantillon prélevé au bord de la route de Cornil à Sainte Fortunade, Corrèze.



2.3. Nomenclature à partir de la composition minéralogique

Il s'agit d'un mode descriptif qui n'a rien de systématique, mais qui est largement consacré par l'usage depuis longtemps, et qui continue à être usité. Il faut donc le connaître et le pratiquer, sans en abuser ! C'est ainsi que l'on parle de *micaschiste* à *staurolite* et *cyanite*, de *gneiss* à *sillimanite* et *grenat*, de *cornéenne* à *épidote*, etc.

C'est aussi la base de la nomenclature, très usuelle, des *métabasites* et des roches métamorphiques riches en calcium : ainsi de *amphibolite* et de *pyroxénite* (voir § 3.2 de l'Entretien n° VII). Et, plus précisément, on peut parler de *glaucophanite*, *diopsidite*, *albitite*... ou encore d'*amphibolite* à *épidote*, de *pyroxénite* à *grenat*, etc.

Les *pyroxénites* à *omphacite* et *grenat* sont dénommées universellement *éclogites* (voir Entretien n° V).

Cependant, nous verrons, en abordant le concept central de « faciès », que ce type de nomenclature descriptive est devenu ambigu, précisément parce que certains noms de faciès reprennent les termes familiers de roches décrites par leurs principaux minéraux !

2.4. Nomenclature à partir de la roche d'origine : le « protolithe ».

Il ne s'agit plus maintenant de nomenclatures purement descriptives, puisque ce nouveau mode de désignation suppose un travail d'identification et de raisonnement sur les transformations subies. De plus, il a le mérite d'être simple, puisqu'il a recours à seulement trois « préfixes » du grec ancien : **méta**, **para** et **ortho**. Comment les utiliser ?

Si la roche initiale est encore identifiable, il est commode de lui associer le préfixe « méta ». Exemple : *métapélite*, ou *métagrauwacke*.

Si l'origine est clairement une roche sédimentaire, nous pouvons faire précéder le nom de la roche métamorphique par le préfixe « para ». Exemple : un *paragneiss* dérive de sédiments argileux, ou gréseux, ou de cendres volcaniques en dépôt.

Si l'origine est clairement une roche magmatique, nous utiliserons le préfixe « ortho ». Ainsi, un *orthogneiss* est un granitoïde métamorphisé.

L'Entretien n° VII donne des illustrations de tous ces différents types de roches métamorphiques.

3. Introduction de la notion de faciès

Le moment est venu d'introduire ce concept, avec les outils qui l'accompagnent. Le concept de faciès est central en métamorphisme et largement utilisé pour la description et surtout pour l'interprétation du métamorphisme régional.

Cependant, auparavant, un historique est nécessaire pour comprendre comment il a été introduit et pourquoi. Le renouveau de la connaissance en matière de métamorphisme est récent. Il a commencé en 1925, mais les méthodes quantitatives sont apparues seulement à partir de 1960.

3.1. Les premiers concepts utilisés : série, zone, isograde

Les travaux fondateurs qui ont conduit à l'idée d'un lien entre les paragenèses* et l'intensité, ou degré, du métamorphisme sont ceux de Barrow et Tilley (1925), en Écosse. Travaillant sur les *métapélites* des Highlands d'Écosse, ils ont identifié des zones successives à intensité de métamorphisme croissant ; ces zones sont caractérisées par l'apparition puis la disparition des minéraux index que nous avons décrits dans l'Entretien n° III. Mais ce qui est remarquable, c'est que cette apparition se fait dans un ordre reproductible, appelé « série ». Nous disposons donc de deux nouvelles notions, liées :

- d'une part, celle de « série de minéraux index ». Par exemple, la série formée par l'apparition successive de :

chlorite, biotite, grenat, staurolite, cyanite, enfin sillimanite juste avant l'anatexie.

Une série est étroitement liée à la nature chimique de la roche d'origine, le protolithe. Dans le cas ci-dessus, il s'agit d'une *métapélite* ;

- d'autre part, celle de « zones » où apparaissent successivement ces minéraux index, zones séparées entre elles par des frontières de transition appelées isogrades.

Les zones d'intensité croissante sont : *épizone, mésozone, catazone, ultrazone*.

Les isogrades sont signalés par les symboles **Bt+**, **Gr+**, **Ky+**, **St+**, **Sil+**, pour indiquer l'apparition respective de *biotite*, de *grenat*, de *cyanite*, de *staurolite* et de *sillimanite*.

L'exemple dans l'encadré ci-dessus est également emprunté au cas des *métapélites*.

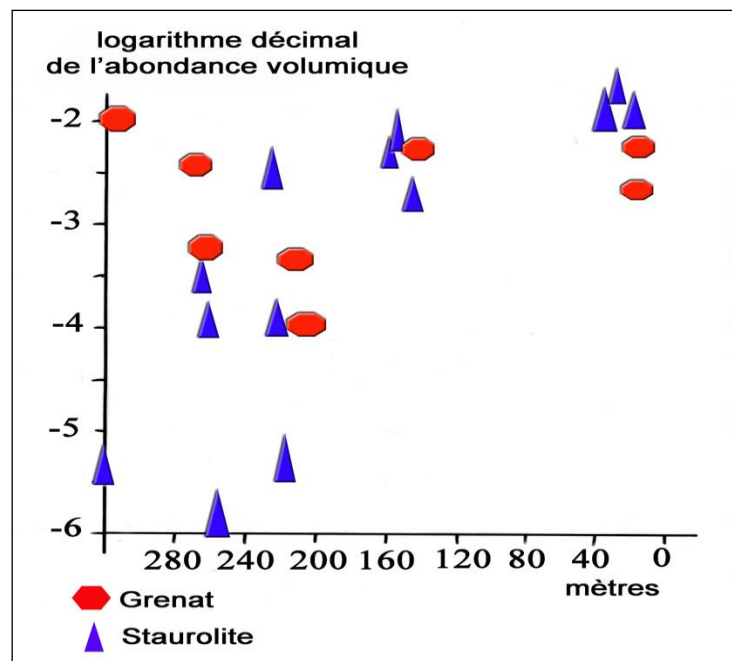
La même approche que celle de Barrow et Tilley devait être appliquée plus tard par Jung et Roques au métamorphisme du Bas Limousin, en bordure du Massif central.

Nous donnons ci-dessous un exemple de détermination de la position de l'isograde de la *staurolite*, comme frontière de séparation entre deux zones, effectuée dans la mésozone du Bas Limousin.

Planche 13.

L'abondance en volume des grenats et de la *staurolite* a été mesurée sur des échantillons prélevés au voisinage et à l'ouest du nouveau viaduc construit sur la Couze. L'abondance de la *staurolite* augmente brusquement entre 300 et 200 mètres avant le début du viaduc de la Couze (position 0 sur l'échelle des distances). Puis la taille des cristaux augmente jusqu'au demi-centimètre, alors que l'abondance ne croît que lentement, jusqu'à atteindre quelques % à l'entrée du viaduc. Sur la même distance, l'abondance de l'*almandin* reste

toujours supérieure à quelques dix millièmes, et plutôt de l'ordre de quelques millièmes. La taille ne dépasse pas le millimètre.



L'ouverture, en 2008, de la voie de contournement nord de la commune de Malemort, juste à l'est de Brive (Corrèze)¹, nous a donné l'occasion d'échantillonner dans le talus du chantier, et dans des conditions idéales, sur une longueur de plusieurs centaines de mètres. La **planche 13** montre que l'apparition de la *staurolite* se fait « franchement », sur une échelle de quelques dizaines de mètres ! L'exemple offert par cet affleurement remarquable fait l'objet d'une présentation complémentaire dans l'annexe de l'Entretien n° II, au § 2.1 traitant de l'influence du régime de contraintes tectoniques.

En conclusion, la position de l'isograde **St+** de la *staurolite* s'étale sur une centaine de mètres autour de la cote, à 240 mètres de l'entrée du viaduc. À plus de 300 mètres vers l'ouest, la *staurolite* n'est plus détectée, l'abondance de celle-ci étant inférieure à 10⁻⁶.

***L'apparition (et la disparition) d'un minéral index
est donc un phénomène bien net :
les minéraux index sont de véritables « marqueurs »
du degré de métamorphisme.***

3.2. Pourquoi ces concepts sont-ils insuffisants ?

La cartographie des isogrades reste la technique de base pour aborder l'étude d'une série métamorphique sur le terrain, mais elle n'est pas assez fiable pour conduire aux objectifs fondamentaux de l'interprétation finale : établir l'origine de la roche et le mode de formation.

En effet, dans une région suffisamment vaste (plusieurs dizaines de kilomètres), les séries ne sont pas toujours homogènes ! Or, l'apparition ou la disparition d'une phase minérale dépend aussi de la composition de la roche d'origine. Si bien que la répartition des minéraux index peut très bien ne pas indiquer les isogrades de façon absolue. De plus, ces isogrades peuvent avoir été bouleversés par les événements tectoniques postérieurs.

Plus grave, la présence de tel ou tel minéral index peut résulter de plusieurs types de réactions, se produisant à des conditions de température et de pression différentes entre elles.

3.3. L'espace pression/température et les faciès

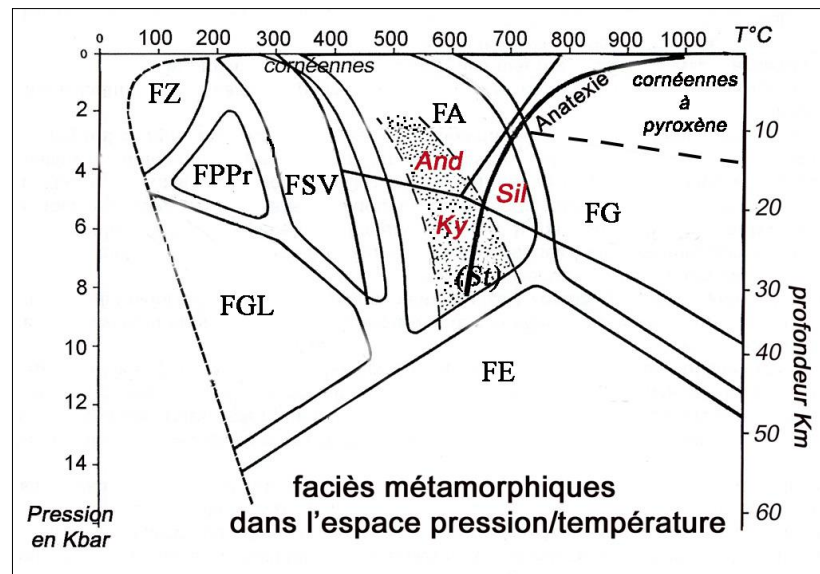
L'invention des faciès métamorphiques, ou faciès minéralogiques, remonte à 1915 ! C'est le finlandais Eskola qui les a utilisés, dès cette époque, pour évaluer l'*intensité*, ou *degré*, du métamorphisme. Or, le degré de métamorphisme est intimement lié aux pressions et températures atteintes par la roche au cours de son histoire. L'idée d'Eskola était la bonne, mais il fallut attendre 1960/1965 pour que les outils qui accompagnent cette représentation soient développés et utilisés universellement. Voici la définition d'un faciès :

un faciès regroupe les roches qui, quelle que soit leur composition chimique, ont subi le métamorphisme dans des conditions thermodynamiques similaires.

La représentation adoptée pour les faciès est celle de l'espace pression/température, et elle est particulièrement synthétique et parlante. Elle est représentée sur la **planche 14**, ci-dessous, tirée et adaptée de l'ouvrage de Jean-Claude Pons, cité en référence.

¹ Signalée à l'auteur par Guy Chantepie et Jacques Céron, du GAGN. (Voir chapitre 5, **Remerciements**).

Planche 14.
 En pointillé, domaine de
 stabilité de la *staurolite*,
 notée (*St*).
And : andalousite
Ky : cyanite
Sil : sillimanite



Sur ce graphique à deux dimensions, où l'abscisse est la température et l'ordonnée la pression, on a reporté la répartition des faciès ainsi que les transitions et le point triple des *silicates d'alumine*.

On voit apparaître les domaines occupés par les faciès d'Eskola : ce dernier en avait décrit sept. Nous nous limiterons à ces sept domaines, même si, aujourd'hui, on a été conduit à définir jusqu'à une quinzaine de sous-faciès !

En partant des plus basses pressions et températures, on trouve successivement :

- **FZ** faciès des *zéolites*
- **FP Pr** faciès à *pumpellyite* et *prehnite*
- **FSV** faciès des *schistes verts* et des *cornéennes* à *albite-épidote-pyrophyllite*
- **FGL** faciès à *glaucophane-lawsonite*
- **FA** faciès à *amphibolites* et *cornéennes* à *hornblende*
- **FE** faciès des *éclogites*
- **FG** faciès des *granulites* et des *cornéennes* à *pyroxènes*

Attention ! La séquence* qui est prise comme référence n'est plus la séquence alumineuse comme pour les descriptions précédentes (§ 3.1) par zones et séries, mais la séquence basique (métabasites, *métabasaltes*) pour laquelle il existe de nombreuses transformations couvrant bien le champ P/T, c'est-à-dire pression/température.

Des roches de même composition chimique globale, métamorphisées dans les mêmes conditions, vont renfermer les mêmes paragenèses. Il s'agit donc, pour chaque faciès et aussi pour chaque séquence, de décrire la paragenèse minérale.

On a pu ainsi constituer des *grilles pétrographiques* qui permettent, à partir de l'identification de la paragenèse de la roche étudiée, de la situer sur le diagramme universel des faciès et sous-faciès. On trouvera les éléments de ces grilles dans les ouvrages cités en référence, de Jean-Claude Pons d'une part et de Jacques Kornprobst d'autre part (chapitre 5).

De multiples exemples de paragenèses sont donnés dans les Entretiens n° II, III, V, VI et VII, et dans le § 3.4 suivant, où ils sont resitués dans le cadre des gradients métamorphiques.

3.4. Les gradients du métamorphisme et l'introduction du paramètre temps.

L'espace P/T/t

Nous disposons maintenant d'un outil pour classer une roche dans un faciès déterminé de l'espace P/T, à partir de sa paragenèse. Mais une région métamorphique, malgré l'évidence qu'elle peut présenter en faveur d'une réelle unité géologique, offre en général une grande variété de roches, avec des assemblages différents, et donc appartenant à des sous-faciès, voire même des faciès distincts. Comment les relier entre eux ?

La réponse est dans l'introduction d'un nouveau paramètre fondamental, au côté de la pression et de la température : le paramètre « temps ». Nous pouvons nous interroger sur la succession de ces faciès lors d'une « histoire tectonique » complète, avec le premier épisode *prograde*, suivi de l'épisode *rétrograde*.

Rappelons la première figure qui ouvre l'Entretien n° III (**planche 15**).

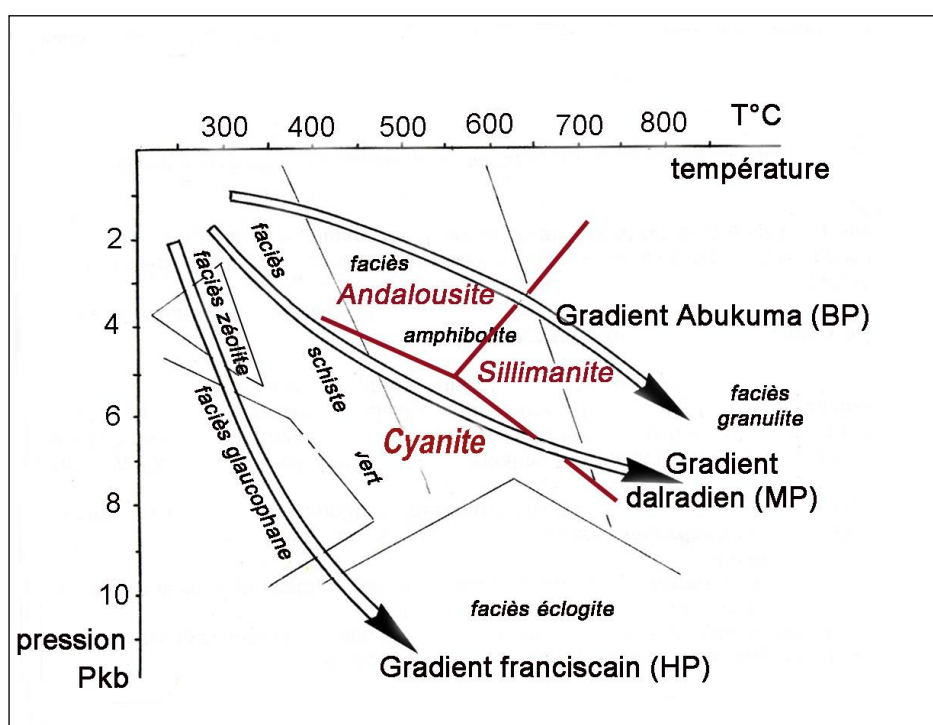


Planche 15. L'espace P/T/t

La courbe trajectoire dans le plan P/T, qui décrit la montée simultanée en pression et en température, est dénommée « *gradient* ». Cette courbe trajectoire traverse successivement plusieurs faciès et, par conséquent, le *protolithe* passe par un grand nombre de transformations, avec apparitions et disparitions successives des paragenèses propres à sa séquence*. Il existe trois principaux gradients, qui ont été abondamment décrits en termes de successions de paragenèses (Miyashiro, 1961).

3.4.1. Le gradient d'Abukuma

C'est le gradient des pressions basses à moyennes, très présent dans la zone axiale des Pyrénées. Il a certaines ressemblances avec le métamorphisme de contact que nous décrivons dans l'Entretien n° VIII.

Les principales caractéristiques de ce gradient sont :

- présence d'*andalousite* et de *cordiérite* ;
- absence de *chloritoïde* et de *disthène*, ce dernier étant remplacé par l'*andalousite* dans ce climat ;
- présence exceptionnelle de *staurolite*.

En résumé : *chlorite* – *biotite* – *andalousite* – *cordiérite* – *sillimanite*

Ainsi, l'assemblage **Qtz + And + Pl + Bt + Chl** est décrit dans l'Entretien n° II, à propos des schistes noduleux à *andalousite* du Tarbesou. Voir également la **planche 5** du présent Entretien.

L'assemblage **Qtz + Sil + Crd + Ms + Bt** est décrit dans l'Entretien n° III, au § 3.1, à propos des *gneiss* à *cordiérite* de la fenêtre de Gavarnie/Héas (exemple 5).

Il est fait usage des abréviations standard pour désigner les minéraux :

Qtz = quartz, **And** = *andalousite*, **Pl** = *feldspath plagioclase*, **Bt** = *biotite*, **Chl** = *chlorite*, **Sil** = *sillimanite*, **Crd** = *cordiérite*, **Ms** = *muscovite*.

3.4.2. Le gradient *dalradien* (« ou *barrowien* »)

3.4.2.1. Un gradient « banal »

C'est le gradient présent dans la bordure ouest de la chaîne hercynienne, tel que nous le décrivons en détail dans l'Entretien n° VII, pour la région du Bas Limousin.

Il a été défini pour la première fois en Écosse, mais il est aussi très bien représenté dans la série du Bas Limousin. Les pressions atteintes ont des valeurs intermédiaires, en tous cas plus élevées que pour le gradient précédent d'Abukuma.

Des sous-faciès ont été décrits, en particulier pour la séquence* pélitique. Ils font appel aux minéraux index suivants :

***chlorite* – *biotite* – *almandin* – *staurolite* – *disthène* – *sillimanite*.**

Nous l'avons abondamment illustré dans l'Entretien n° VII et le « **Petit atlas de paragenèses du Bas Limousin** », pour les paragenèses suivantes des *métapélites* et des *métagrauwackes* :

Qtz + Ms + Bt + Chl, puis **Qtz + St + Alm + Ms + Bt**, pour les schistes tachetés à *staurolite*, puis **Qtz + Ky + Alm + Ms** et **Qtz + Sil + Alm + Or**, pour les *gneiss* gris du Bas Limousin. (Or désigne l'*orthose*, et Alm le *grenat almandin*).

3.4.2.2. L'exception du *chloritoïde*

L'apparition (et la disparition) d'un minéral index, comme les *silicates d'alumine* des deux familles (voir Entretien n° III), se fait dans un champ de pression/température relativement étendu. Mais il y a une exception intéressante, c'est celle du *chloritoïde*, qui doit être inclus dans la liste des *silicates d'alumine*. Son champ de stabilité en température est si étroit que ce minéral n'apparaît que rarement, et c'est ce qui fait tout son intérêt.

Nous ne l'avons observé que dans les *micaschistes albitiques* qui constituent l'essentiel des roches acides de l'île de Groix, en dehors des zones à *glaucophanite* bien connues. La zone d'apparition du *chloritoïde* est confinée dans une plage étroite de température de 560 °C à 580 °C, dans le domaine des moyennes pressions de 4 à 6 kbar, comme le montre le diagramme² P/T de la **planche 16**, pour la séquence des *pélites*.

² Adapté des données tirées de l'article de Jean-Christian Goujou : « *Voyage dans les profondeurs de la Terre... avec les minéraux du métamorphisme* ». Publié par la revue *Le Règne Minéral*, n° 36, novembre/décembre 2000.

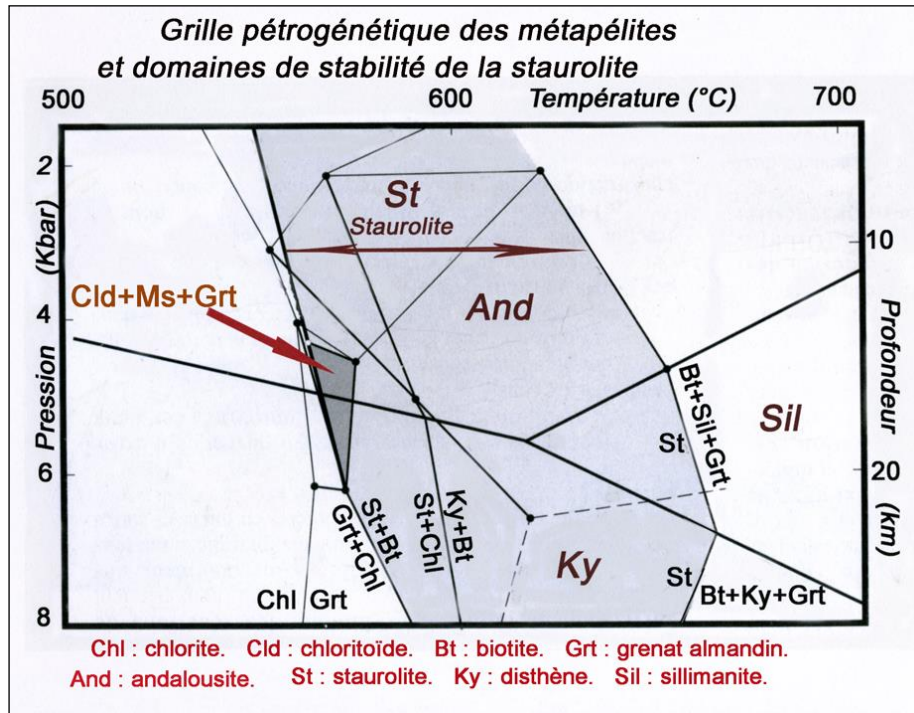


Planche 16. Ce diagramme P/T, centré sur les domaines respectifs de stabilité de la *staurolite*, en gris léger, et du *chloritoïde*, en gris foncé, montre que le domaine de ce dernier est exceptionnellement réduit et qu'il définit des conditions de pression et de température qui sont plutôt rarement réunies. (Tiré de l'article de J.-C. Goujou, note 2, page 14).

Sur la **planche 17**, les **clichés 17a** et **17b** montrent comment apparaissent les cristaux de *chloritoïde*. Leur dimension est inférieure au demi-millimètre. Ce minéral rare se présente ici en cristaux simples ou imbriqués, et non dans la forme en rosette souvent signalée.

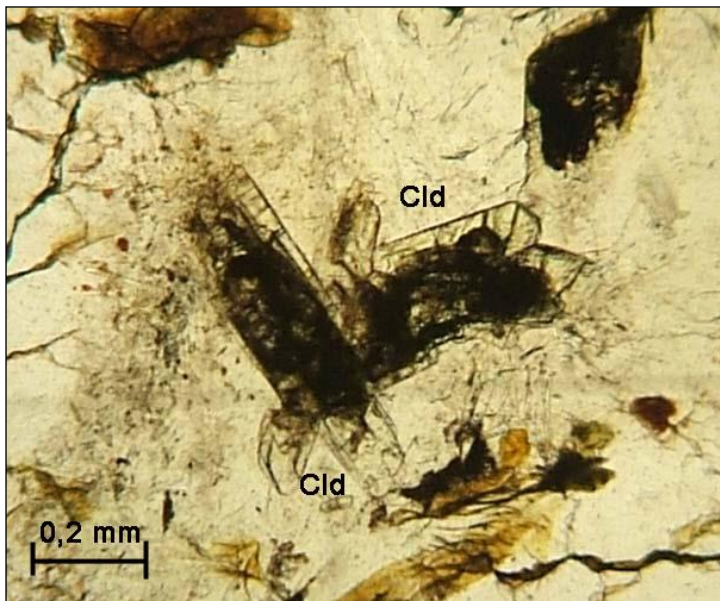


Planche 17, cliché 17a.

En LPNA, les cristaux de *chloritoïde* sont à assez fort relief et quasi incolores (vert très léger). Ils présentent toujours le même habitus en navette à terminaisons bien formées. Malgré ces formes géométriques, les cristaux présentent tous en leur milieu une zone quasi opaque, dont il n'a pas été possible de déterminer la cause : macles, cassures ou inclusions métalliques ?

Cld désigne le chloritoïde.

Planche 17, cliché 17b.

En LPA, la biréfringence étant faible, le *chloritoïde* polarise dans les gris à orangé du 1^{er} ordre, comme le montre la « navette » du milieu sur le cliché.

Toutefois, les teintes anormales sont fréquentes et visibles sur les deux autres « navettes », violacées ou verdâtres.

Le critère de reconnaissance le plus important est l'angle d'extinction, mesuré entre 7° et 13°, à allongement négatif.

Le fond est tapissé de grands *feldspaths* et de *muscovites*



La paragenèse observée sur ces micaschistes acides de l'île de Groix est la suivante :



(**Ab** désigne l'albite, **Cld** le *chloritoïde* et **Alm** le *grenat almandin*).

3.4.3. *Le gradient franciscain*

(de la région de San Francisco)

C'est le gradient typique des hautes pressions et des températures modestes. On le rencontre surtout dans les transformations subies par les protolithes basiques, entraînés dans une subduction de la croûte océanique, et dans des conditions extrêmes de pression.

Les paragenèses typiques sont à base soit de *glaucothane*, soit d'*omphacite* (voir Entretien n° III).

Les paragenèses que nous avons décrites dans l'Entretien n° V, qui y est entièrement consacré, sont les suivantes :

- **Qtz + Omp + Prp**, pour les *éclogites* fraîches du Bas Limousin, puis, par rétro-morphose, **Qtz + Pl + Hbl**, les *grenats* subsistant ou disparaissant.

Omp désigne l'*omphacite*, **Prp** le *grenat pyrope*, en réalité partiellement seulement. **Hbl** désigne la *hornblende* (amphibole) ;

- **Gln+Ep**, pour les *glaucophanites* de la Pointe des Chats, à l'île de Groix, et où **Gln** désigne l'*amphibole* bleue *glaucothane*, et **Ep** l'*épidote*.

Par rétro-morphose, on observe **Am + Ab + Chl**, où **Am** désigne une *amphibole* bleu-vert ;

- **Omp + Grt + Am** pour les *éclogites* de la côte sud de l'île de Groix, au voisinage de la Pointe des Chats. L'*amphibole* est soit bleue (**Gln**), soit verte. Cette paragenèse contient aussi de l'*épidote* de rétro-morphose en relative abondance, et un mica blanc.

4. Conclusion

Loin d'être un exercice formel, et un peu vain, le travail de classification oblige à un travail de réflexion sur le monde du métamorphisme. De ce point de vue, l'effort de classification a joué un rôle historique et a conduit, par degrés, à approfondir la compréhension de la nature de ces roches. Il a fait éclore de nouveaux concepts puissants comme celui de faciès qui, une fois maîtrisé, éclaire une scène malgré tout assez complexe.

Que peut retenir l'amateur, dont le besoin essentiel est de s'orienter dans la pratique de la pétrographie, tout en lui conservant un caractère plaisant, voire ludique ?

Nous lui conseillons de progresser pas à pas, en commençant par bien maîtriser les classifications descriptives.

S'il fait le pas de l'utilisation des lames minces et du microscope polarisant, sa vision de la pétrographie changera du tout au tout. C'est un peu un « nouveau monde » qui s'ouvrira à lui, par la richesse de l'information accessible. Sans compter la satisfaction esthétique qu'offre l'observation des lames minces en lumière polarisée. Mais il devra passer par une phase d'apprentissage, qui lui apprendra à trier dans le foisonnement des images, de façon à aller chaque fois à l'essentiel.

À ce stade, beaucoup de temps peut être gagné en s'exerçant sur des lames minces de référence et en consultant les atlas. C'est à l'intention de l'apprenti pétrographe que nous avons choisi, parmi toutes les lames minces taillées à partir des affleurements étudiés, celles qui pouvaient le mieux illustrer un minéral, ou un assemblage, ou enfin un type de fabrique avec ses caractères tectoniques. Ces clichés, avec leurs légendes et les liens avec les textes des Entretiens, sont présents dans tous les Entretiens ; de plus, certains ont été rassemblés dans trois petits atlas :

- ***Petit atlas de structures et de microstructures.***

Il se situe en annexe de l'Entretien n° II.

- ***Petit atlas photographique de paragenèses métamorphiques rencontrées dans le métamorphisme régional du Bas Limousin.***

Il fait suite à l'Entretien n° VII ;

- ***Petit atlas de paragenèses des éclogites du Bas Limousin.***

Il est inclus dans l'Entretien n° V.

Après son apprentissage, l'amateur de pétrographie saura associer un faciès à chaque affleurement, puis les relier entre eux dans un cadre régional pour découvrir la cohérence d'ensemble. Enfin, il sera à même d'établir l'origine de la roche et son mode de formation.



5. Lexique. Bibliographie

Lexique

Définitions tirées du « Dictionnaire de géologie » édité par Dunod.
(Voir bibliographie).

***Anastomose** : se dit du processus de déformation sous contrainte tectonique intense (cisaillement ou compression) qui donne à un cristal une forme assez inhabituelle en « œil de poisson » (*fish-eye*). L'étirement peut sectionner le cristal en plusieurs parties anastomosées.

***Blaste** (du grec *blastos*, bourgeon) : terme ou préfixe s'appliquant à des minéraux formés pendant (syncinématiques) ou après (postcinématiques) une phase métamorphique donnée.

***Claste** : fragment inclus dans une roche, de quelque nature qu'il soit.

Porphyroclaste : fragment de cristal inclus dans une roche métamorphique.

***Fabrique** : ensemble des caractères structuraux d'une roche.

***Foliation** : structure visible, qui s'ajoute à la schistosité, sous forme de différenciation pétrographique des lits formant ainsi des feuillets. C'est l'indice d'un métamorphisme plutôt intense.

***Grauwacke** (provient d'un terme anciennement utilisé par les mineurs allemands) : sédiment détritique à grain moyennement fin, composé exclusivement de débris de roches acides. L'augmentation de la teneur en quartz fait passer aux grès. Les *grauwackes* donnent des roches lithiques.

***Linéation** : toute structure acquise tectoniquement, se traduisant par des lignes parallèles entre elles.

***Mésocrate** : s'applique aux roches contenant des pourcentages voisins de minéraux blancs (quartz et feldspath) et noirs (ferromagnésiens).

***Paragenèse** : association, dans une roche, de minéraux stables ensembles, dans certaines conditions de température et de pression, et caractérisant en outre le chimisme de la roche.

* **Pélite** : sédiment détritique à grain fin (beaucoup plus que les *grauwackes*) et pouvant contenir une certaine proportion de carbonates.

***Protolith** : roche d'origine d'une roche métamorphique.

***Séquence** : désigne la série métamorphique obtenue à partir d'un même type de roche. Par exemple, on parle de la séquence des roches magmatiques basiques, de la séquence pélitique.

Bibliographie

FOUCAULT A., RAOULT J.-F. (2005) – *Dictionnaire de géologie*. Dunod éd. 6^e édition.

GOUJOU J.-C. – *Voyage dans les profondeurs de la Terre... avec les minéraux du métamorphisme*. Publié par la revue « Le Règne Minéral », n° 36, nov./déc. 2000.

KORNPORST J. (2001) – *Métamorphisme et roches métamorphiques, signification géodynamique*. Dunod éd. 3^e édition.

PONS J.-C. (2001) – *Minéraux et roches métamorphiques, la pétrologie sans peine*. Collection Focus, CRDP de l'académie de Grenoble.