

Entretien sur le métamorphisme n° I

○○○○○

Introduction au métamorphisme

SOMMAIRE

<i>Avant-propos</i>	page 3
<i>Le blason du Muséum</i>	page 4
<i>Introduction sur le métamorphisme</i>	page 5
 1. Première partie.	
<i>Entrée en matière</i>	
1.1. Présentation des Entretiens : cadre et limites	page 6
1.2. La question des terrains d'expérience	page 8
1.3. Une brève définition du métamorphisme	page 8
1.4. Remerciements de l'auteur	
Bibliographie générale	page 10
 2. Seconde partie.	
<i>Un outil nécessaire, la pétrographie.</i>	
<i>Introduction à la pétrographie. Bases physiques et méthodes</i>	
2.1. Pétro sans peine ? Non, mais jubilatoire !	page 11
2.2. Exposé du plan	page 11
2.3. Rappel d'optique et application immédiate	page 12
2.4. Préparation des lames minces	page 12
2.5. Observation en transmission et lumière polarisée ; microscope à transmission	page 13
2.6. Microscopie et photographie des lames minces	page 15
2.7. Observation en lumière « naturelle » (LPNA)	
2.7.1. Examen au scanner en transmission	page 17
2.7.2. Observation au microscope, en lumière parallèle	page 19
2.8. Observation en lumière polarisée analysée (LPA)	page 23
2.9. Interférences et teintes de Newton	page 24
 <i>Bibliographie</i>	page 29

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

Avant-propos

Le Muséum national d'Histoire naturelle est lié depuis toujours au monde des amateurs et ceux-ci ont d'ailleurs joué un rôle parfois déterminant dans certaines découvertes. C'est ainsi, par exemple, qu'un ordre de plancton siliceux (*Albaillellaria*) porte le nom d'un vigneron des Corbières car celui-ci fournissait les nodules phosphatés ramassés dans ses vignes de Cabrières, en commençant leur dégagement chimique dans une cabane au fond de son terrain... Le Muséum compte aujourd'hui encore, parmi ses chercheurs professionnels, d'anciens amateurs.

C'est que l'étude de la nature peut certes se faire en laboratoire, mais elle doit d'abord commencer... dans la nature et, là, les amateurs présentent incontestablement la meilleure implantation tant en termes de répartition que de densité.

Certains opposent le monde professionnel au monde amateur sur la base de quelques expériences malheureuses, mais c'est alors vouloir cacher la forêt avec un arbre. Il y a certes des brebis galeuses mais n'y en a-t-il pas, dans chaque communauté, avec la même proportion ?

Le monde amateur se caractérise généralement par sa générosité, son enthousiasme, et le présent volume en est une illustration. Dominique Rossier s'est piqué tout jeune d'une passion pour le métamorphisme au hasard d'une conversation et, à sa retraite, il a voulu faire partager son plaisir avec les autres. Il nous offre ainsi le fruit de son travail, magnifiquement illustré.

Le volume se veut une aide à des amateurs de géologie, non spécialistes donc. Il est présenté sous forme « d'entretiens » qui vont du plus général aux applications plus poussées. On sent un souci pédagogique. On sent aussi une approche délibérément naturaliste ; il y a certes des photos, les moyens modernes le permettent, mais il y a aussi nombre de dessins de certaines photos présentées. Je trouve cela remarquable car la pratique du dessin relève d'une démarche bien plus active que la simple observation de la photo.

Bravo M. Rossier, on ne peut qu'applaudir un tel travail qui fait honneur à la SAGA, votre Association, qui est liée avec nous depuis plus de 70 ans.

*Patrick De Wever, professeur
du Muséum national d'Histoire naturelle.*

Le blason du Muséum



Le blason du « Muséum d'Histoire naturelle », sculpté sur la façade de la Grande Galerie de l'Évolution, évoque la vocation de l'Établissement et ses contributions dans l'étude du monde vivant : reptiles, insectes, plantes...

Ce blason, très probablement en calcaire du Lutétien, se trouve au-dessus de l'un des escaliers de la Grande Galerie de l'Évolution, côté jardins. C'est une réduction de celui que l'on connaît aujourd'hui. Il pourrait avoir été placé sur la façade de la Galerie en souvenir du Cabinet d'histoire naturelle qui avait remplacé, au début du XIX^e siècle, l'ancienne galerie sise le long de la rue Cuvier, et que l'on peut encore voir de nos jours entre le siège de la Société des Amis du Muséum, le restaurant de La Baleine et l'amphithéâtre Rouelle. Ce cabinet, ne pouvant plus accueillir dans des conditions optimales l'ensemble des collections, fut remplacé, en 1872, par la Galerie de Zoologie pour exposer l'ensemble des collections zoologiques, soit plus d'un million de spécimens.

Sur ce blason, figurent les principaux éléments symboliques déclinés dans le logo actuel. Le serpent est plus marqué et passe devant la ruche. Il est surmonté d'une abeille. Le serpent symbolise surtout la nature primordiale. Il est lié à la froide, gluante et souterraine nuit des origines et représente « la vie » car il se régénère à la saison venue. Il mue, change de peau : il fait peau neuve.

En revanche pas de présence minérale. Une fleur en bas à droite, symbole probablement de pureté, pourrait rappeler le « Jardin des Plantes ».

*Dr Érik Gonthier, département Préhistoire,
Muséum national d'Histoire naturelle.*

Entretien sur le métamorphisme n° I

*À mon camarade Louis Latouche¹,
qui m'a initié à la géologie et au métamorphisme.*

Résumé

Introduction au métamorphisme

*« C'est ce que j'ai vu »,
Joachim Barrande.
(Voir note 3, ci-après).*

On donne volontiers une image excessivement ingrate à l'étude du métamorphisme. Aussi, les « Entretiens » donnés en exposés et discussions à la SAGA, durant deux années, avaient pour objectif d'initier à cette branche de la géologie et de la faire aimer.

Elle a pour elle d'être pluridisciplinaire, de faire visiter de belles régions de notre pays, et de nécessiter en retour un important travail de laboratoire qui prolonge les joies de la découverte sur le terrain. De plus, le métamorphisme est un passage nécessaire pour qui s'intéresse à la formation et à l'histoire des grands massifs orogènes et à la géodynamique.

En première partie, cette introduction donne le plan des Entretiens, structurés en une première série (les Entretiens n° II, III et IV) qui prépare l'amateur géologue en lui donnant les concepts et le vocabulaire indispensables, et en une seconde série consacrée à des visites de terrains emblématiques de trois thèmes majeurs : le métamorphisme de haute pression (Entretien n° V), le métamorphisme de haute température avec anatexie (Entretien n° VI), et, en synthèse, le métamorphisme régional (Entretien n° VII).

La seconde partie de cet Entretien n° I, d'introduction, est consacrée à une initiation à la pétrographie et à la microscopie en lumière polarisée. En effet, cette technique est incontournable pour aller au-delà des visites de terrain, et l'amateur peut la pratiquer utilement, au niveau le plus simple. Au prix d'un investissement raisonnable, il est tout à fait possible d'atteindre une bonne pratique élémentaire, et rien ne remplace le plaisir d'observer et de photographier sa première lame mince, taillée dans un gneiss ou une cornéenne prélevés par soi-même sur le terrain, mais restés impénétrables jusque-là !

C'est à ce prix que les outils méthodologiques décrits dans les Entretiens n° II (Structures, textures, microstructures...) et n° III (Identification des minéraux) peuvent être utilisés. L'intérêt des voyages d'étude sur le terrain s'en trouve alors décuplé par son prolongement sur la table de travail... C'est à juste titre que le géologue amateur peut alors dire :

« C'est ce que j'ai vu ! ».

Dominique Rossier

¹ Louis Latouche (1941-2003) était chercheur au laboratoire de minéralogie, Muséum national d'Histoire naturelle, spécialiste du Cambrien et de la géologie du Sahara.

1. Première partie

Entrée en matière

1.1. Présentation des Entretiens : cadre et limites

Les « Entretiens sur le métamorphisme » se sont déroulés à la SAGA de novembre 2005 à mai 2007, puis à nouveau en avril 2009², dans le cadre de la Commission de volcanisme. Consacrés pour l'essentiel au **métamorphisme régional**, ils ont été conçus pour permettre aux adhérents de la SAGA de se familiariser avec cette branche de la géologie, et de l'approfondir quand ils en avaient déjà les prémisses. En effet, la tendance naturelle, pour la majorité des amateurs géologues, est de considérer le métamorphisme de loin et avec crainte. Tout au plus lui reconnaît-on l'avantage de procurer parfois de beaux échantillons pour les collections. Pour le reste, son image serait celle d'une science compliquée, voire opaque, et donc aride.

Notre conviction est que ce jugement est tout à fait injuste ! L'étude du métamorphisme procure de grandes satisfactions comme nous espérons le montrer. En effet, elle embrasse de multiples disciplines ; ainsi, elle a le mérite de placer la géologie à une place exceptionnelle : celle d'une science au carrefour d'autres sciences. Citons la mécanique des roches, la pétrographie optique, la minéralogie, la thermodynamique des hautes températures et des hautes pressions, la tectonique... De plus, comment faire l'économie de cette branche quand on sait son importance géographique sur tous les continents et particulièrement en France, où abondent l'Hercynien et les massifs tectonisés, terres d'élection du métamorphisme au côté du magmatisme ! Et, en effet, le métamorphisme régional a un lien étroit avec l'histoire des grands massifs orogènes.

Reste l'image qui est donnée au métamorphisme d'être une science difficile d'accès, et c'était bien le défi à relever. Le parcours choisi consiste à montrer comment le métamorphisme se découvre et s'apprend sur le terrain, puis en laboratoire avec le microscope polarisant. C'est l'objet des Entretiens n° V, VI et VII, qui nous conduiront sur des sites et de beaux affleurements de métamorphisme régional de *haute pression*, puis de *haute température*, et enfin sur des *régions métamorphiques* entières où différents degrés de métamorphisme (on parlera de *faciès*) sont imbriqués (§ 2.1 de l'Entretien n° IV et § 5 de l'Entretien n° VII).

Mais, avant d'y parvenir, mieux vaut être solidement outillé, c'est-à-dire connaître les principes et les concepts, le vocabulaire et les méthodes de travail. C'est bien sûr le prix à payer pour être à l'aise sur le terrain et en laboratoire. Cela est vrai pour toute discipline scientifique. Une fois le seuil franchi, l'étude du métamorphisme devient jubilatoire !

Sur le terrain : carrière des Brochs,
Corrèze, Bas Limousin.
Mesure du pendage et de l'orientation
du plan de foliation, sur la leptynite de Tulle
à intercalations d'amphibolite.



² Sur les écloïtes et les métaécloïtes.

C'est pourquoi les Entretiens n° I à IV ont pour ambition de procurer au géologue amateur ces bases, et aussi le goût de les approfondir en consultant les excellents ouvrages qui existent sur le sujet (voir bibliographie en fin de la première partie), et qui ont été écrits à l'usage des étudiants, du premier au troisième cycle. En effet, les Entretiens ne prétendent nullement se substituer à un cours. Cela n'a jamais été leur objet. Ils évitent donc toute tentation d'exhaustivité. Ils tendent simplement à mettre en appétit et à donner envie de continuer.

On l'a souligné, les Entretiens se veulent modestement une initiation ; ils sont donc lacunaires, en tous cas dans la forme présentée ici, consacrée essentiellement au métamorphisme régional. C'est ainsi qu'aucune place n'est donnée au métamorphisme de contact, ni au métamorphisme de très haute température en phase anhydre (granulites). L'auteur a jugé son expérience insuffisante en la matière. Néanmoins, une conférence a été donnée à la SAGA sur le métamorphisme de contact. Nous avons aussi laissé de côté les métamorphismes très localisés comme le métamorphisme cataclastique (mylonites) et celui d'impact.

***Pour bien « démystifier » les difficultés d'accès,
l'auteur a essayé de faire partager son expérience.***

- Pourquoi et comment utiliser les lames minces et le microscope polarisant, pour goûter aux joies de la *pétrographie* ? C'est la seconde partie de l'Entretien n° I, qui insiste sur le côté pratique des manipulations.
- Comment reconnaître les structures, comment découvrir les textures et le monde fascinant et surprenant des microstructures, et les relier à la *tectonique* ? C'est l'Entretien n° II, où l'on goûtera un peu à la *mécanique des roches*, avec des précisions sur les termes que l'on croit familiers, mais où rien n'est tout à fait évident (les présentations de certains ouvrages ne nous ont pas paru suffisamment claires !).
- Quels sont les *minéraux* qu'il faut bien connaître et comment les observer dans les roches métamorphiques ? C'est l'Entretien n° III où le minéralogiste amateur se trouvera à l'aise.
- Comment *classer* les roches métamorphiques ? C'est l'Entretien n° IV, qui relève ce défi un peu périlleux. En effet, faut-il, pour l'approfondir, s'engager dans la discipline plus ardue qui est la *thermodynamique* des équilibres des phases minéralogiques ? C'était hors de portée pour l'objectif que nous avons défini à l'origine. On ne fait donc que frôler superficiellement ces aspects, pour permettre une classification rustique, mais suffisante pour être utilisable dans les Entretiens n° V à VII.



Une autre façon, pour l'auteur, de faire partager l'expérience a été d'illustrer abondamment les textes par les photos prises sur le terrain et en laboratoire, et par des dessins d'interprétation des clichés pris sur coupes polies ou sur lames minces.

De plus, les Entretiens n° I à IV renvoient sans cesse aux Entretiens n° V à VII et réciproquement.

**La SAGA sur le terrain : Aubazine,
Abbaye-aux-Dames, Corrèze,
Bas Limousin.
Mesure du pendage et de l'orientation
du plan de foliation sur un affleurement de
leptynite dite d'Aubazine.**

En composant ses Entretiens, l'auteur a cherché à suivre la devise de Joachim Barrande : « *c'est ce que j'ai vu* »³. Les schémas et les graphiques sont souvent adaptés des ouvrages de référence, et l'origine en est toujours mentionnée.

En septembre 2007, les Entretiens ont été conclus par un voyage d'étude de la SAGA, dans la région métamorphique du Bas Limousin. Le compte rendu en a été publié dans le bulletin *Saga Information* n° 286, en avril 2009.

Une difficulté est classiquement rencontrée par le pétrographe débutant : comment s'orienter dans l'exploitation et l'interprétation d'une lame mince ? Pour l'aider, il disposera de trois « **Petit atlas photographique** » de clichés jugés caractéristiques, placés à la fin des Entretiens n° II, V et VII, en plus des ouvrages de référence signalés.

Comme cette édition suit l'ordre chronologique des Entretiens donnés à la SAGA au cours des années 2006 à 2008, l'exposé ne suit pas une logique strictement cartésienne ! Il y a certainement beaucoup de répétitions et de reformulations. Mais il ne faut pas le regretter, car elles peuvent avoir une vertu pédagogique. Les allers et retours d'un Entretien à l'autre seront de toutes les façons nécessaires au lecteur. Chaque Entretien est accompagné d'une bibliographie, et certains comportent un lexique des termes.

1.2. La question des terrains d'expérience

Le géologue amateur est de plus en plus confronté à des difficultés d'accès aux affleurements intéressants. C'est le cas pour l'amateur de minéraux ou de fossiles. Souvent, les sites se trouvent dans le domaine privé. S'il s'agit de carrières, la réglementation d'accès s'est considérablement durcie. Certains sites remarquables du domaine public ont été clôturés pour assurer une légitime protection. Les accès de galeries de mines sont maintenant souvent hermétiquement scellés, ou effondrés.

Qu'en est-il des sites où l'on pourra observer les roches métamorphiques et les échantillonner ? En Bas Limousin, région d'excellence pour l'étude du métamorphisme régional, la situation s'est aussi dégradée, comme nous avons pu le constater en comparant les conditions d'accès vécues dans les années 70 à celles d'aujourd'hui. Néanmoins, avec une bonne préparation, il est encore possible d'accéder à plusieurs sites bien connus et répertoriés dans la littérature. Mais, par exemple, sur la N89 entre Brive et Tulle qui est le parcours de référence, tous les affleurements ne sont plus accessibles, à cause des grillages, ou certains difficilement à cause de l'envahissement par la végétation. Le cas de la nouvelle voie rapide de contournement de Brive-nord/Malemort est à cet égard significatif. C'est là, juste avant la traversée de la rivière de la Couze, que le gradient métamorphique régional peut être observé sur plusieurs centaines de mètres, grâce à la tranchée creusée par les engins. L'auteur a pu y accéder et conduire les recherches sur l'isograde de la staurolite, pendant la phase de construction. Il n'est plus possible dorénavant de s'y arrêter sans risquer d'être verbalisé par la gendarmerie !

À l'opposé, en montagne, dans les Pyrénées ou dans les Alpes, aucun problème d'accès pour les bons marcheurs et pas (ou peu) de limitation des prélèvements !

1.3. Une brève définition du métamorphisme

On peut donner une définition « sèche » du métamorphisme, empruntée au Dictionnaire de géologie⁴ :

³ Ingénieur et paléontologue, précepteur du petit-fils de Charles X, qui étudia et décrivit entre 1840 et sa mort la géologie de la Bohême. Sa collection de fossiles est exposée au musée d'histoire naturelle de Prague et son œuvre majeure, « *Le système silurien du centre de la Bohême* », tient en 21 volumes !

⁴ *Dictionnaire de géologie*. A. Foucault et J.-F. Raoult. Masson éd. (2003) 5^e édition.

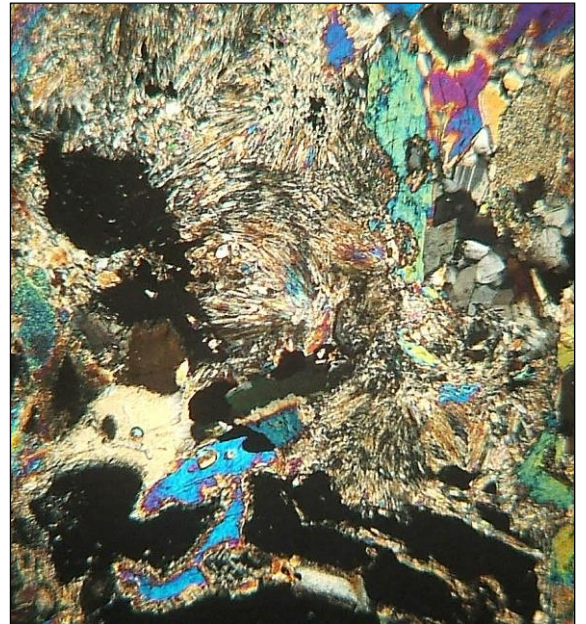
« Transformation d'une roche à l'état solide du fait d'une élévation de température et/ou de pression, avec cristallisation de nouveaux minéraux [...] et acquisition de textures et structures particulières... ».

Que le lecteur se rassure, la définition et la nature du métamorphisme font l'objet de développements dans le cours des Entretiens, au fur et à mesure que se révéleront à nous tous ses aspects et toutes ses richesses. Ainsi, dans l'Entretien n° II, nous verrons les roches du métamorphisme régional apparaître structurées par les déformations lors des transformations subies, pourvues d'une ou plusieurs *schistosités* et *linéations*, ou *foliées*. Puis, dans l'Entretien n° IV, pour interpréter leurs paragenèses, nous ferons appel aux notions de *gradient* et de *degré* de métamorphisme, et à celles de *minéraux index* témoins des conditions de pression et de température de transformation. Auparavant, ces minéraux auront été décrits dans l'Entretien n° III. L'unité des modes de transformation dans des roches d'origines différentes apparaîtra avec la notion de *faciès métamorphique* (Entretien n° IV).

Mais on peut aussi donner une vision plus vaste du métamorphisme, en le reliant aux grands mécanismes tectoniques, à la géodynamique et à l'histoire de la croûte terrestre. Les modèles récents de géodynamique, évoqués au début de l'Entretien n° V, font tous appel aux mécanismes tectoniques de base de la dérive des continents. Ainsi s'expliqueront les différentes trajectoires suivies par les roches enfouies à des profondeurs croissantes, tout au long d'un cycle orogénique comme le cycle hercynien. Ce cycle résulte de la collision entre deux plaques continentales, suivie d'un *raccourcissement*. La pression est directement liée à la profondeur d'enfouissement. À ces grands mécanismes de base s'ajoute le mécanisme dit « de *l'équilibrage isostatique* ». Ce dernier demeure indispensable pour expliquer l'*exhumation* des roches métamorphiques.

En effet, l'amateur s'initiant au métamorphisme sera rapidement confronté à un paradoxe fascinant. C'est celui de la présence, dans les roches échantillonnées, de minéraux témoins de pressions et de températures les plus hautes atteintes, malgré le retour ultérieur aux conditions normales de température et de pression à la surface. Ce retour est la phase rétrograde – on parle de *rétramorphisme* – et cette phase de retour peut être accompagnée 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, le lecteur appréciera cet « effet d'aubaine » offert par le métamorphisme, qui nous permet de nous transformer en archéologues de l'histoire de la Terre !



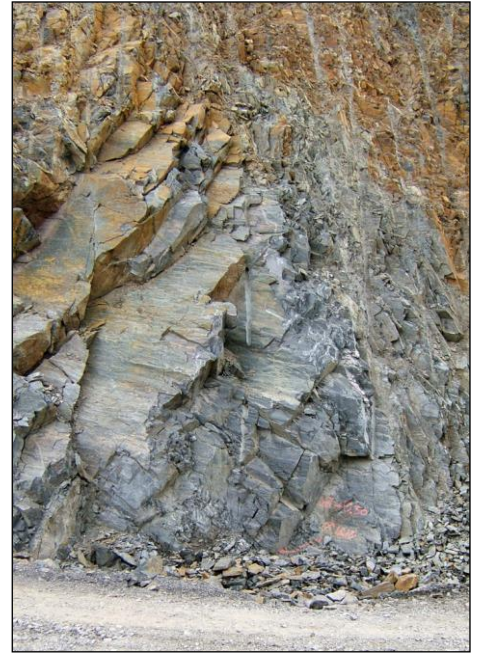
Dans cette éclogite, des réactions à cinétique rapide ont commencé à remplacer les grands cristaux métastables de pyroxène et de pyrope, hérités du métamorphisme de haute pression, par un symplectique de grandes aiguilles d'amphibole. La rapidité de l'exhumation a stoppé à temps la destruction complète. Benayes, Corrèze. Lame mince observée en LPA.

1.4. Remerciements de l'auteur

Je tiens à remercier tous les membres de la SAGA qui m'ont soutenu et aidé dans ce travail : le président Richard Tremblier, qui n'a pas ménagé son appui ; Alain Guillon, leader de la Commission de volcanisme, qui m'a encouragé dès le début et m'a laissé libre de conduire les Entretiens dans le cadre de la Commission ; Philippe Berger-Sabatel, rédacteur en chef de notre bulletin, qui a sans relâche critiqué, corrigé, relu les épreuves et optimisé la mise en page, en espérant ne laisser passer aucun défaut ! Merci aussi à tous ceux qui ont participé au voyage d'étude et aux comptes rendus en séance plénière et dans *Saga Information*.

Sans eux, sans leur attention et leurs relances, je n'aurais jamais cru possible de mener à bien l'aventure de cette rédaction.

Affleurement de micaschiste à biotites et grenats, à l'emplacement précis de l'isograde de la staurolite, dans le talus de la déviation nord de Brive/Malemort en construction. Corrèze, Bas Limousin.



Je dois une reconnaissance particulière à nos amis du GAGN (Groupe des amateurs de géologie de Naves), Jacques Céron et Guy Chantepie. Ils nous ont apporté une aide précieuse dans le déroulement du voyage d'étude, sans compter l'encouragement prodigué à rédiger et à faire connaître la géologie originale de la Corrèze. C'est grâce à eux que j'ai découvert, et exploité pour les Entretiens, les richesses cachées de la carrière du Faucou, à Espartignac (près d'Uzerche, en Corrèze) et de deux sites exceptionnels, celui de l'isograde de la staurolite, près de Malemort, et celui de l'éclogite fraîche de Benayes.



Jacques Céron (GAGN) devant la Pierre-Bouchère, au puy de Ferrière, Corrèze. Affleurement renommé d'éclogites rétro-morphosées. Le site est protégé.

Bibliographie générale sur le métamorphisme

- DERCOURT J. & PAQUET J. (1981) – *Géologie, objets et méthodes*. Chap. 6 de la 1^{re} partie. Dunod université.
- BONIN B. (1998) – *Pétrologie endogène*. Chap. 2, § 2 : *Métamorphismes de la croûte*, Dunod.
- KORNPROBST J. (2001) – *Métamorphisme et roches métamorphiques, signification géodynamique*. 3^e édition. Dunod éd.
- PONS J.-C. (2001) – *La pétro sans peine 2. Minéraux et roches métamorphiques*. C.R.D.P. de l'académie de Grenoble.

2. Seconde partie.

Un outil nécessaire : la pétrographie

Introduction à la pétrographie. Bases physiques et méthodes

2.1. Pétro sans peine ?

Non, mais jubilatoire !

Remarque préliminaire : la présentation n'est pas générale, mais restreinte aux roches « ignées » qui intéressent la Commission de volcanisme de la SAGA.

La pétrographie, c'est la description des roches (*Πετρα* = pierre, et *γραφειν* = écrire, décrire, dessiner). Elle ne prétend pas expliquer, car c'est le rôle de la pétrologie, la science explicative des roches. Mais elle prépare la matière pour la pétrologie, et en retour, utilise les bases et les nomenclatures établies par celle-ci. C'est l'outil indispensable, à parité avec la tectonique, dans l'étude de la géologie d'une région, ou pour des études plus spécialisées de géodynamique, au côté des méthodes plus récentes.

La pétrographie est une étape incontournable dans l'établissement d'une carte géologique et dans la rédaction de sa notice. Elle consiste en :

- la description de la structure de la roche,
- l'identification des minéraux présents dans une roche, et donc la détermination de sa paragenèse,
- la description de la « *fabrique* » de cette roche, c'est-à-dire l'assemblage et l'agencement des minéraux les uns par rapport aux autres, avec tous les aspects texturaux et micro-tectoniques (voir Entretien n° II).

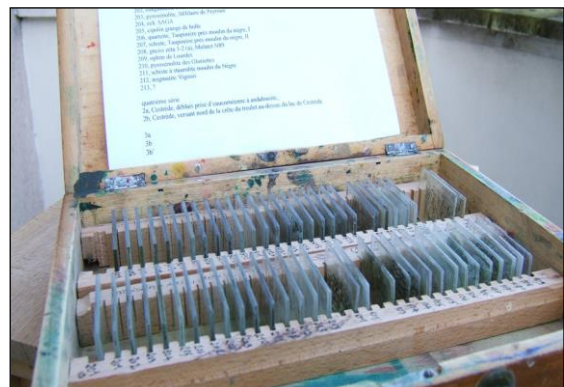
La pétrographie permet le classement de la roche examinée dans les différentes typologies des roches ignées. Ainsi, la pétrographie conduit à l'interprétation que permet la pétrologie, en termes de formation et d'histoire de la roche, replacée dans le contexte de l'affleurement puis de la région géologique.

C'est alors que la pétrographie devient « jubilatoire » ! Une autre source de bonheur est dans l'utilisation du microscope polarisant, puissant outil qui donne l'impression un peu magique d'entrer dans les secrets de la matière. Il y a bien sûr d'autres méthodes d'investigation, mais elles sortent de l'objet des Entretiens.

2.2. Exposé du plan

Dans cette seconde partie de notre Entretien, il n'y aura pas une revue systématique de la pétrographie des roches, comme on peut la trouver dans les livres. L'objectif est de montrer les méthodes de base, mettant en œuvre les lois de l'optique et la microscopie, avec des exemples de cas.

Observer les roches pose immédiatement le rôle central de la *lumière* et de l'*optique* dans les méthodes. Pour cette raison, cet Entretien de la Commission volcanisme de la SAGA avait été précédé de deux « leçons d'optique ».



Sur le terrain, les roches s'observent par *réflexion* de la lumière sur leur surface. Pour aller au-delà de ce simple examen par réflexion, on va utiliser toute les ressources de la lumière et travailler en *transmission*, à travers les cristaux.

Dans le cadre des Entretiens, les observations sont limitées au mode le plus utilisé : le mode en lumière parallèle. L'expérience montre que, pour utiliser le microscope polarisant, il faut avoir une connaissance même élémentaire des principes de base que nous allons exposer.

Pour la compréhension intime et l'approfondissement de ce qui va suivre, nous recommandons vivement au lecteur l'ouvrage de Marcel Roubault :
Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant,
 référencé à la fin du chapitre.
C'est la bible du pétrographe !

2.3. Rappel d'optique et application immédiate

La notion la plus simple ou la plus évidente est celle de dioptre et de réfraction de la lumière dans un minéral⁵ cristallisé. Cependant, l'observation immédiate d'une roche montre qu'on ne voit... rien, ou presque rien, en transmission à travers une plaque sciée, et même polie ! Sauf exception, comme au travers d'une plaque de silice pure. Jusqu'où va-t-il falloir tailler et polir pour obtenir une certaine transparence ? Et que va-t-on observer ?

2.4. Préparation des lames minces

C'est une opération qui demande du soin, et une propreté méticuleuse. Elle peut être grandement aidée par une machine à polir... mais pas n'importe laquelle (**figure 2**).

Figure 1.
 On arrête le polissage à une épaisseur de 30 micromètres, pour une raison que nous verrons au § 2.6 et qui est impérative. Le collage se fait à chaud, en utilisant des quantités strictement contrôlées d'araldite optique dégazée, et de baume du Canada, pour la lamelle couvre-objet ; celle-ci est très fine.



⁵ Ceci suppose que le minéral laisse passer la lumière, qu'il est transparent, cas général pour les silicates, les aluminosilicates et les minéraux autres que les sulfures. Certains oxydes sont très absorbants, mais néanmoins transparents.

Préparation d'une lame mince

Machines à polir : « **Minéraux et machines** »,
 120, rue de Courcelles- 75017 Paris
 Tél. : 01 42 67 32 01
 Email : minerauxetmachines@wanadoo.fr
minerauxetmachines@free.fr
 Site : www.minerauxetmachines.com
 lundi au samedi inclus 9h30-13h 14h30-18h

Nouvelle machine ROXXON avec appui-main latéral, ou appui-guide/étau :
 - Disque alu rigide, porte disques carbo.
 Diamètre 200 mm. Jusqu'à calibre 600
 - Porte disque feutres de finition
 - Bassine de récupération de l'eau.
Prévoir 300 euros TTC

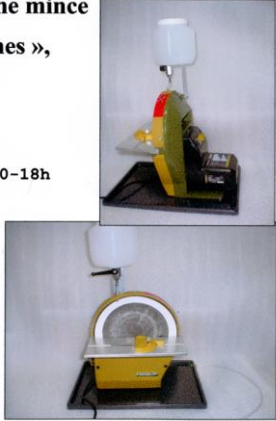


Figure 2.
 Exemple de petite machine économique, bien adaptée à la préparation d'une lame mince. L'appui-main/appui-guide se révèle un avantage décisif.

2.5. Observation en transmission et lumière polarisée, microscope à transmission

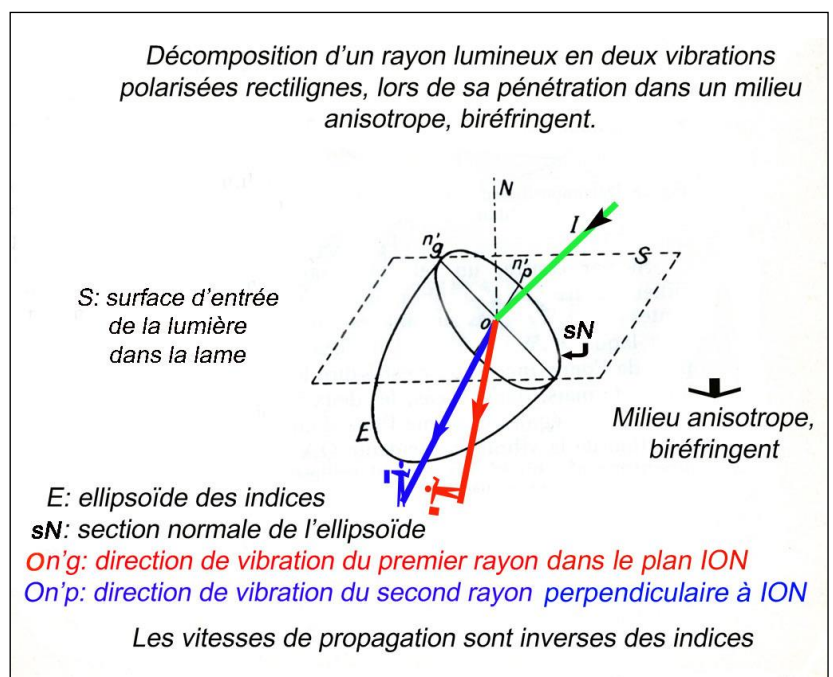
Plaçons-nous au nœud d'un réseau cristallin et émettons de la lumière dans toutes les directions. Le cristal étant anisotrope dans la très grande majorité des cas, la lumière se propagera à des vitesses différentes suivant la direction empruntée par la lumière par rapport aux plans du réseau : pour caractériser cette propagation, on utilise une grandeur physique qui est l'indice de réfraction. Si l'on porte la valeur de l'indice sur l'axe de la direction de la lumière, dans cette même direction, l'extrémité du segment ainsi défini décrit un ellipsoïde quand on explore en angle tout l'espace occupé par le réseau (**figure 3**).

À l'évidence, il va y avoir une relation intime entre la géométrie et les symétries du réseau cristallin, d'une part, et l'ellipsoïde des indices, d'autre part. Ceci est illustré sur la **figure 4** par le cas du quartz dans le système hexagonal.

Revenons à la **figure 3**.

Dans le cas général anisotrope, une onde plane incidente sur le réseau cristallin (symbolisée par le « rayon vert » **IO** sur la **figure 3**) va se réfracter, mais ce ne sera plus une onde plane unique dans le cristal.

Figure 3.
 L'ellipsoïde des indices **E** du milieu anisotrope est orienté de façon quelconque par rapport au plan de la surface d'entrée **S**. Le plan perpendiculaire au rayon incident coupe l'ellipsoïde **E** suivant une section **sN** dite normale. Ce sont les axes **On'g** et **On'p** de l'ellipse de cette section qui déterminent les axes de vibration des deux rayons réfractés se propageant dans l'épaisseur de la lame.
On'g est dans le plan **ION** du rayon incident.
On'p lui est perpendiculaire.



En effet, la symétrie est rompue, puisqu'il n'existe pas un indice unique. On montre que la lumière se propage alors suivant deux ondes planes dont les directions sont entièrement déterminées par la géométrie de l'ellipsoïde des indices.

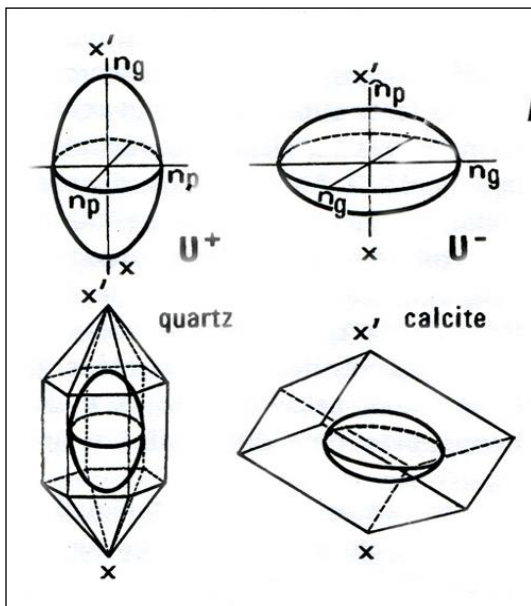


Figure 4.

Réfraction : ellipsoïde des indices.

[D'après Dictionnaire de géologie, par A. Foucault & J.-F. Raoult, (2003) 5^e édition, p. 296-297 (Réfraction)].

C'est là qu'intervient une propriété qui, dans notre cas, va jouer un rôle providentiel !

C'est la polarisation de la lumière !

En effet, les deux ondes planes se propageant à l'intérieur du cristal sont *polarisées linéairement*, et ces plans de polarisation sont orthogonaux entre eux et parfaitement définis par rapport au réseau cristallin, comme le montre la **figure 3**. Nous verrons au § 2.6 comment tirer le meilleur parti de cette situation, mais dès maintenant nous réalisons que, si nous sommes capables de manipuler cette

propriété de polarisation, nous disposerons ainsi d'une véritable « sonde de lumière ».

Pour le moment, nous allons nous contenter de polariser linéairement la lumière qui éclairera la préparation. La lumière polarisée va interagir spécifiquement avec chaque monocristal de minéral, avec chaque réseau cristallin. Elle va explorer les propriétés de symétrie et l'agencement des atomes dans la maille.

Les **figures 5** et **6** montrent le dispositif utilisé pour éclairer, et sa place dans l'instrument. Il est composé d'abord d'un miroir de renvoi, éclairé par la source lumineuse qui doit être uniforme et étendue. La lumière est ensuite concentrée par le condenseur, muni d'un diaphragme, lui-même surmonté d'un dispositif de polarisation linéaire fixe. Le condenseur est éloigné de la lame mince à éclairer : le faisceau qui va être capté par l'objectif est quasi parallèle et ne doit pas converger sur la préparation.

Figure 5.

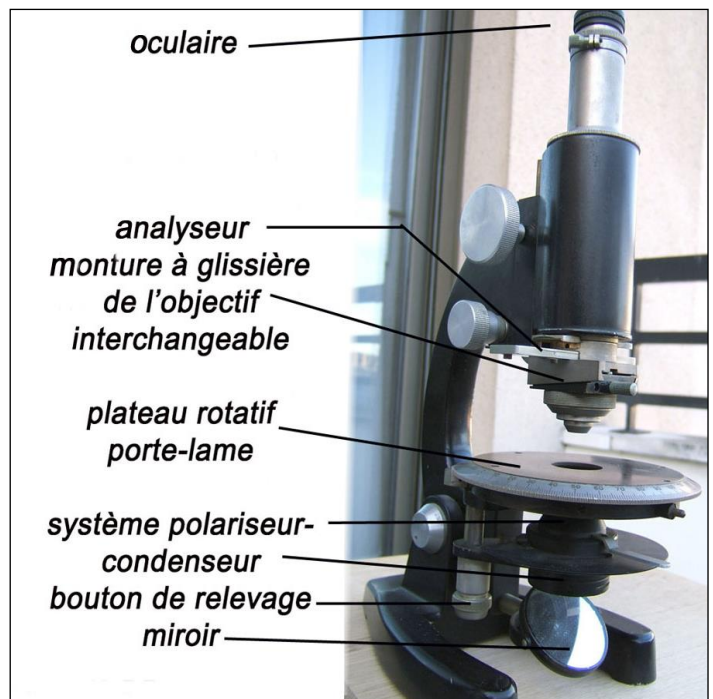


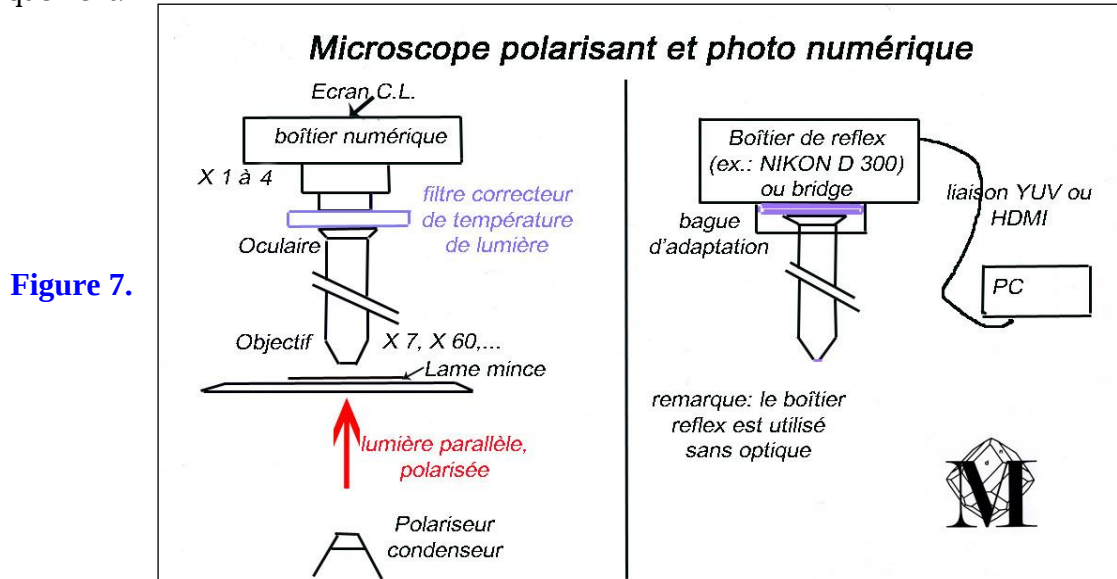
Figure 6.

Miroir de renvoi de la lumière d'éclairage sous le condenseur.

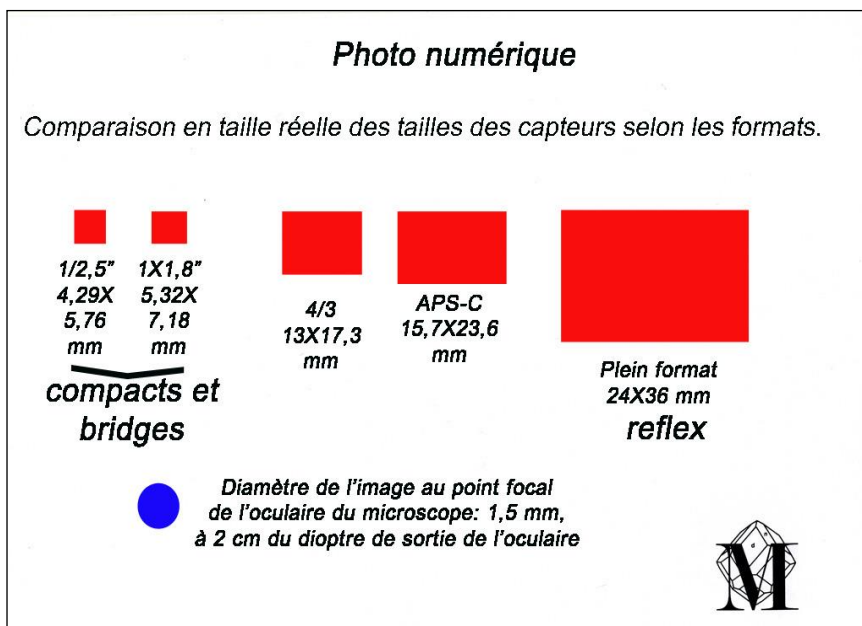
2.6. Microscopie et photographie des lames minces

Avant d'aller plus loin, posons-nous la question de savoir comment nous allons photographier la lame mince à travers le microscope. On dispose l'appareil numérique au-dessus du microscope de façon que l'objectif de l'appareil soit en contact avec l'oculaire du microscope. Avec un appareil numérique « compact », on obtient un résultat exploitable, bien qu'éloigné de l'optimum. Il se révèle, à l'expérience, suffisant pour des travaux d'amateur, avec un grossissement inférieur ou égal à X 60 (**figure 7**).

L'objectif de l'appareil photo combiné à la lentille de l'oculaire produit une image de la lame mince dans le plan focal du capteur de l'appareil photo, image qui est mise au point automatiquement.



Cette image apparaît comme une tache circulaire de diamètre environ 2 mm, inférieure aux dimensions du capteur, qui sont de 5 x 7 mm. On a donc intérêt à utiliser le zoom de l'appareil photo, pour mieux « remplir » la surface du capteur. Pour un objectif de microscope de grossissement X 7, combiné au zoom de X 4 de l'appareil, on obtient l'optimum de l'utilisation du capteur, et un grossissement optique de X 28.



Les professionnels utilisent une méthode radicalement différente, consistant à fixer le boîtier d'un reflex (sans l'optique de l'objectif) au-dessus de l'oculaire, grâce à une bague de hauteur réglable, et à utiliser toute la surface du capteur (**figure 8**).

Figure 8.

La photo numérique peut ensuite être traitée, agrandie et légendée avec l'indication de l'échelle et un texte (**figures 9 à 12**).



Figure 9. Image « brute », formée sur le plan focal du capteur, pour le grossissement X 7 du microscope et sans zoom par l'objectif photo.

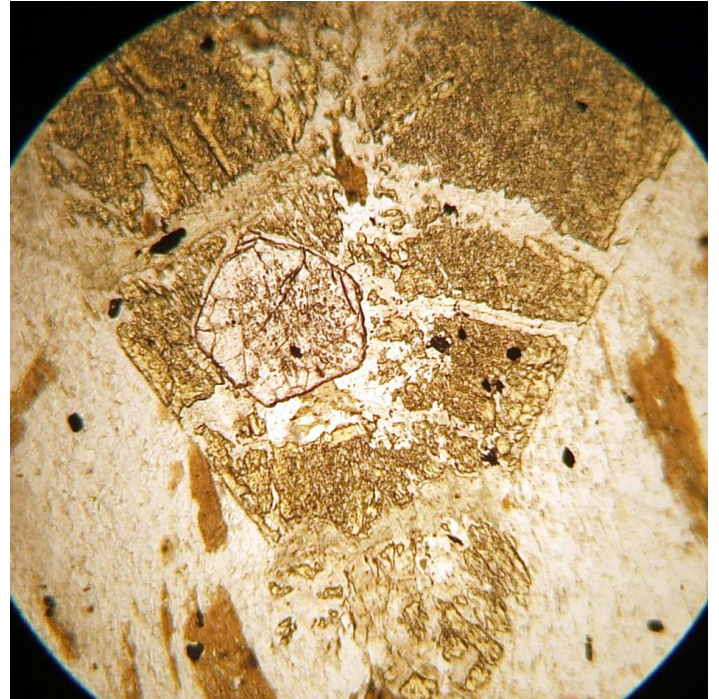


Figure 10.
Grossissement X 7 du microscope,
avec le zoom de X 4 de l'appareil photo.

Figure 11. Détail de la **figure 10**, avec le zoom de X 3 de l'appareil photo.

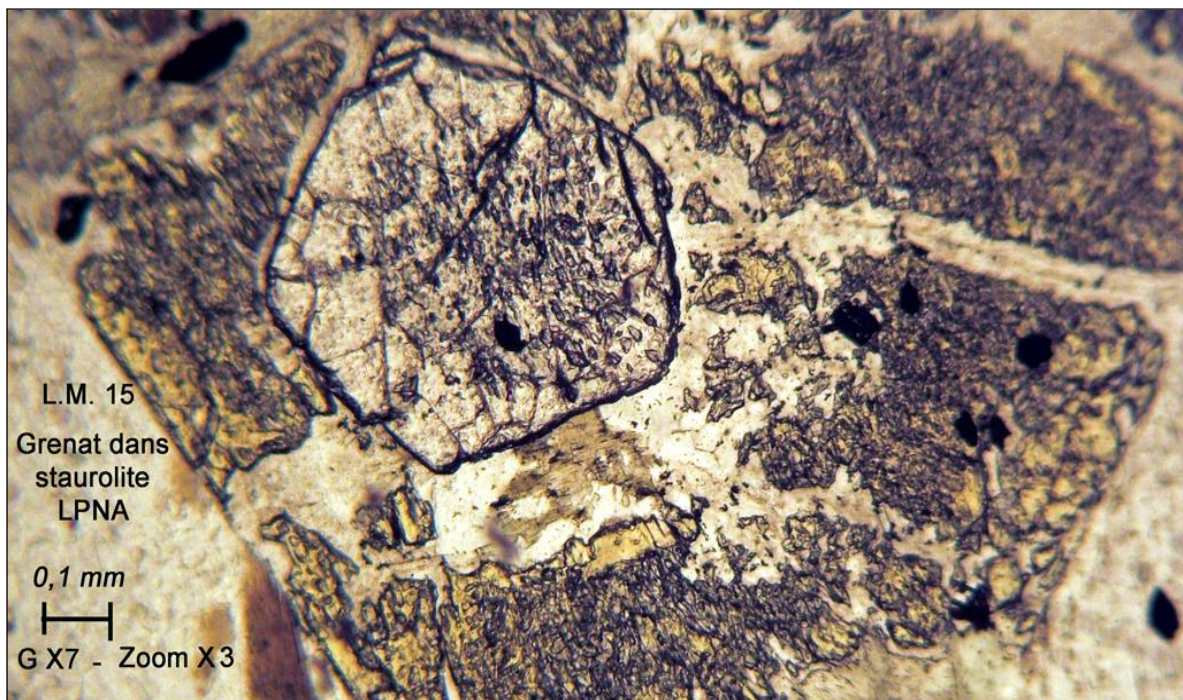
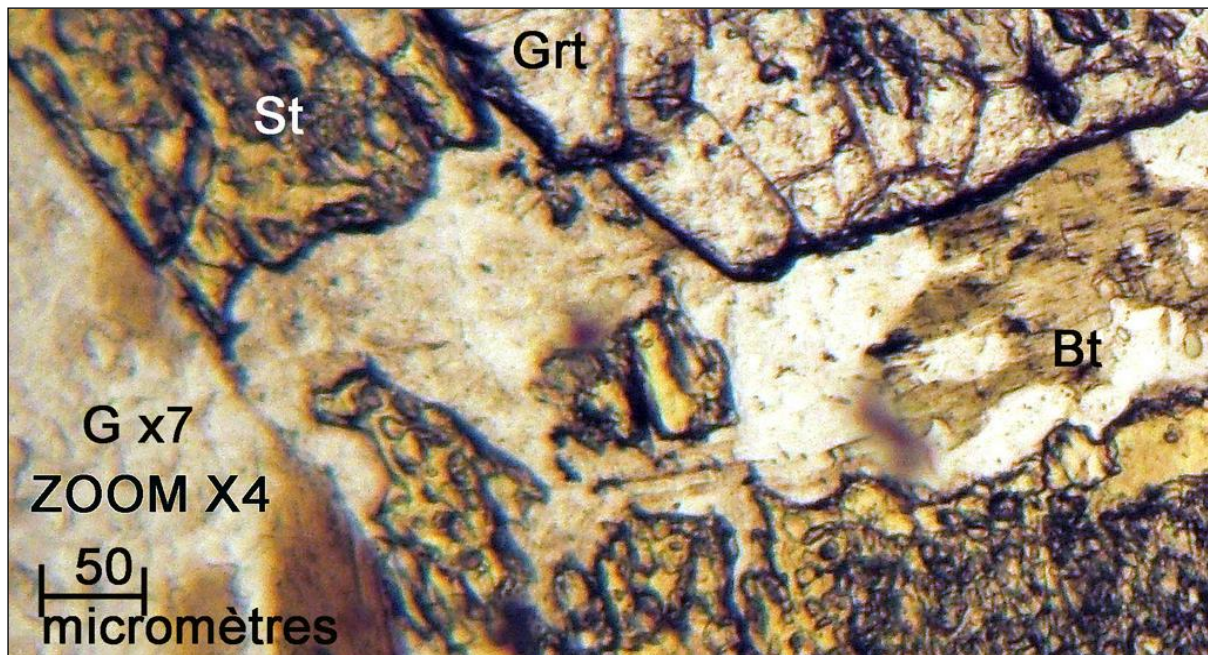


Figure 12. Idem avec zoom X 4 de l'appareil photo et grandissement numérique.



2.7. L'examen en lumière « naturelle ».

En abrégé LPNA, c'est-à-dire lumière polarisée non analysée.

Observons une lame mince en lumière polarisée (« naturelle »), et notons ce que nous observons.

2.7.1. Examen au scanner en transmission

Nous pouvons d'abord l'examiner globalement, en la plaçant sur un scanner par transmission, et en l'éclairant à travers un film polarisant. La **figure 13** montre le montage sur la vitre du scanner. La lame de droite est recouverte d'un film polarisant, et les lames sont éclairées en balayage par une lampe située au-dessus, tandis que le capteur photo se trouve dessous. La résolution de ce type de scanner est de 4 800 dpi, soit 4 800 pixels par inch (1 inch = à peu près 2,5 cm). On peut ainsi résoudre des détails de l'ordre de 0,1 mm et surtout avoir, avec le contraste apporté par le film polarisant, une vue sur l'ensemble de la préparation.

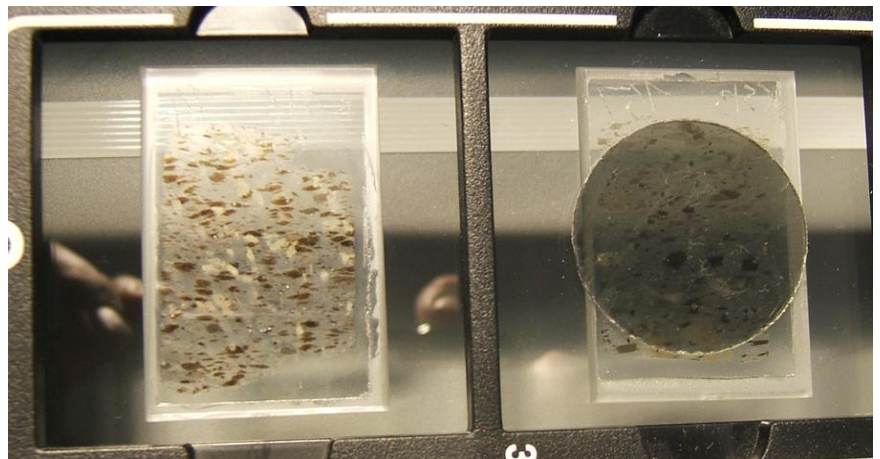


Figure 13.
Montage sur scanner.

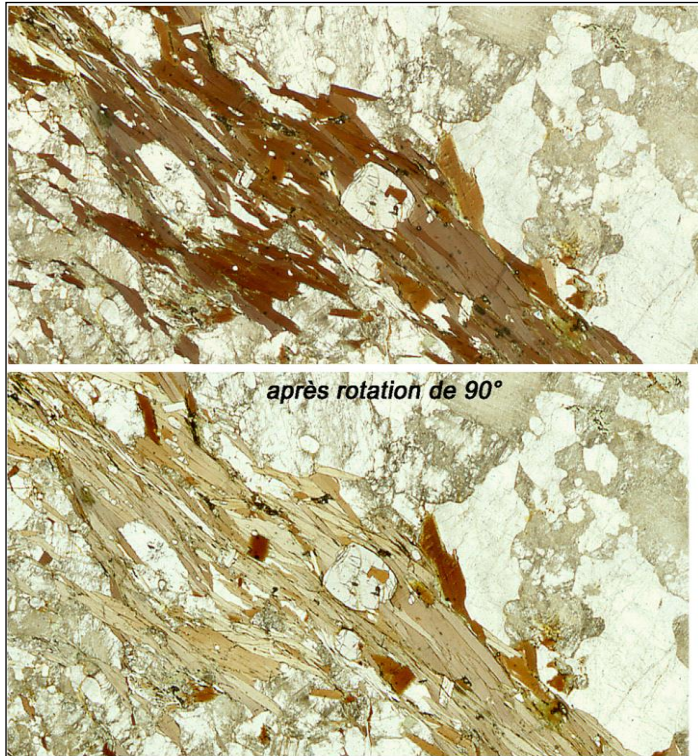


Figure 14.
Pléochroïsme des biotites
dans une migmatite, avant et après
rotation du polariseur de 90°.

La **figure 14** montre une lame mince taillée dans une *migmatite* et photographiée par un scanner.

Il apparaît plusieurs types de minéraux, avec des comportements très différents en lumière polarisée.

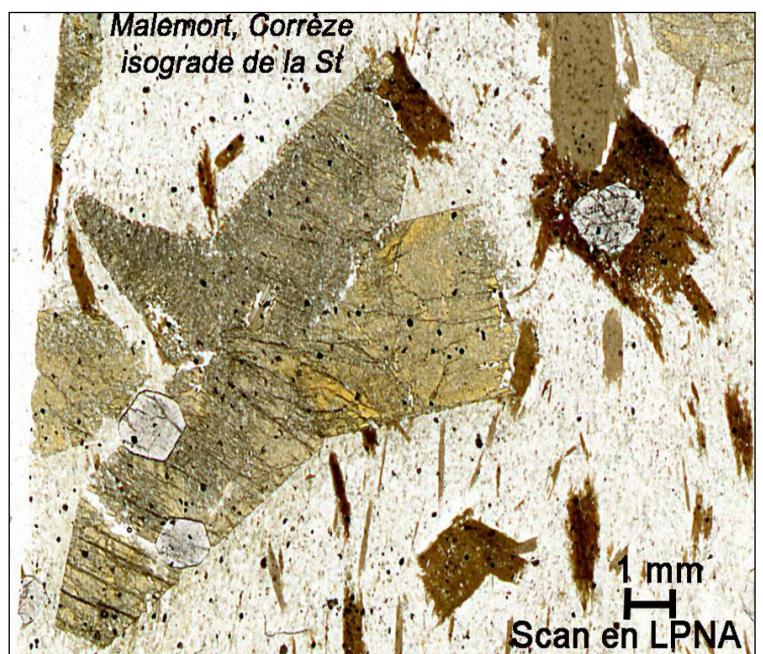
- Tout d'abord, certains minéraux ne sont pas du tout affectés par l'orientation de la polarisation. Ce sont :
 - des minéraux transparents et limpides, comme le *quartz* ;
 - des minéraux transparents mais non limpides, voire gris sale ; ce sont fréquemment les *feldspaths*. Il y a aussi la *cordiérite* ;
 - des minéraux à contour net polygonal, bien transparents, avec des défauts en fort relief ; ce sont les *grenats* ;
 - des minéraux en fines lamelles, parfaitement limpides ; ce sont des *muscovites*, ou aussi des *sillimanites*.
- Dans une seconde catégorie, les minéraux sont au contraire colorés, et la couleur change d'intensité avec l'orientation du polariseur, tout en restant dans la même « palette » des bruns rouges. Ils présentent aussi du relief. Dans le cas présent, ce sont des biotites ; elles sont dites *pléochroïques* (du grec *pleon*, davantage).

On dispose ainsi d'une première méthode de tri, avec plusieurs critères qu'il faut combiner : **limpidité, relief, couleur, pléochroïsme, existence de défauts.**

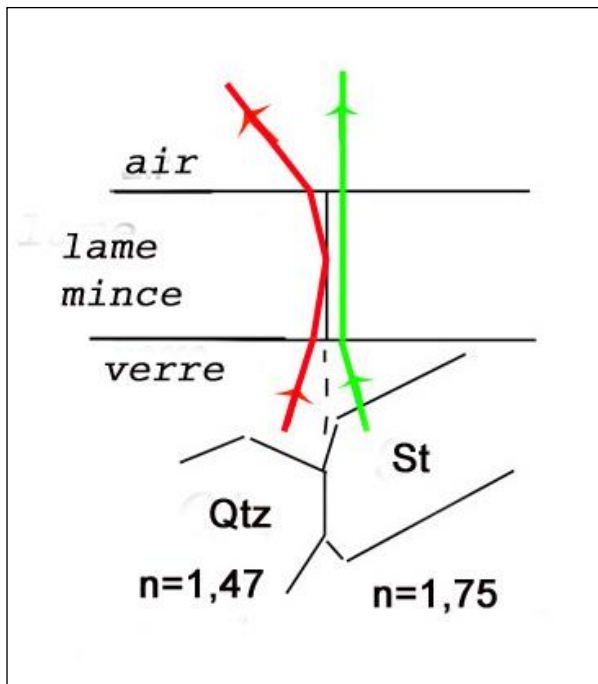
Autre exemple, la *staurolite* de la **figure 15**, photo par scanner.

La *staurolite* est facilement décelable, même en faibles quantités, par son relief et sa couleur jaune d'or pâle, faiblement – voire pas du tout – pléochroïque.

Figure 15.
Macle multiple de *staurolite*, avec
intrusion de grenats tardifs, dans un
schiste tacheté, photographié au scanner
et en lumière « naturelle ».



2.7.2. Observation au microscope, en lumière parallèle



La **figure 16** ci-dessous explique le principe optique qui crée l'impression de relief.

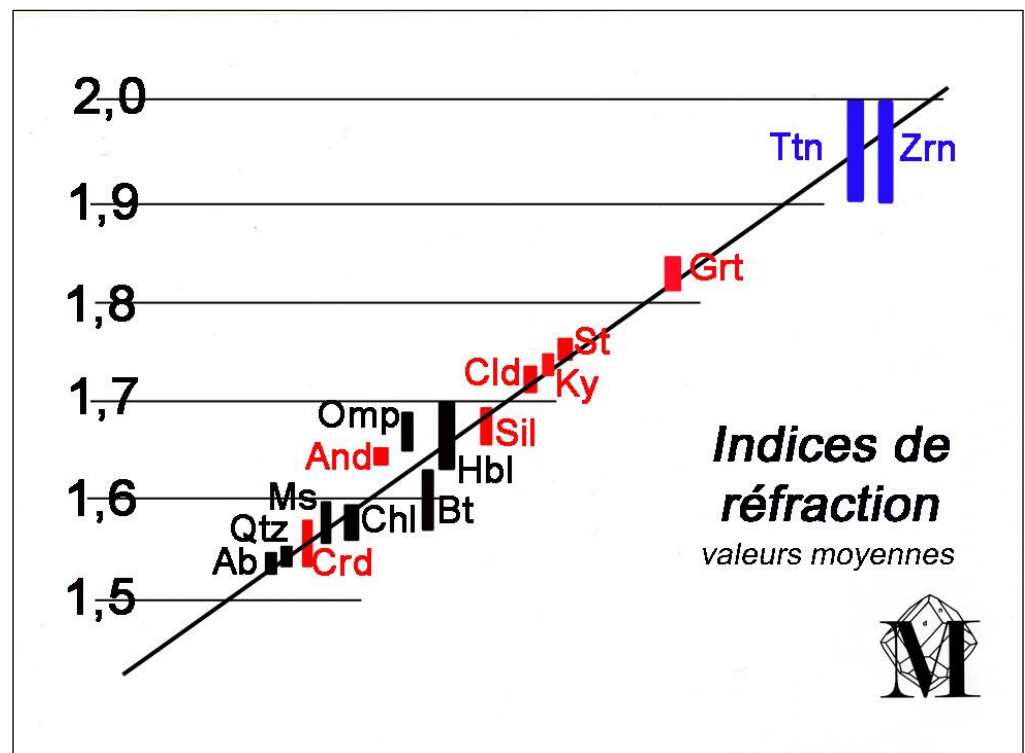
Figure 16.

Examen en lumière « naturelle », simplement polarisée linéairement. La netteté des contours et le relief sont liés à la réflexion totale sur les bords ; ils augmentent avec l'indice ou la différence d'indice. Idem sur les discontinuités intérieures du type clivage, cassure, inclusion.
Remarque : le condenseur est en position basse.

La **figure 17** donne quelques valeurs d'indices de réfraction pour les minéraux colorés, comme les biotites, les chlorites et les amphiboles, et certains silicates d'alumine, minéraux du métamorphisme. Les minéraux sont désignés par leur abréviation qui fait l'objet d'une convention internationale.

Figure 17
Par ordre
d'indice croissant :

Ab : albite
Crd : cordiérite
Qtz : quartz
Ms : muscovite
Chl : chlorite
Bt : biotite
And : andalousite
Hbl : hornblende
Omp : omphacite
Sil : sillimanite
Cld : chloritoïde
Ky : cyanite
St : staurolite
Gt : grenat
Ttn : titanite
Zrn : zircon

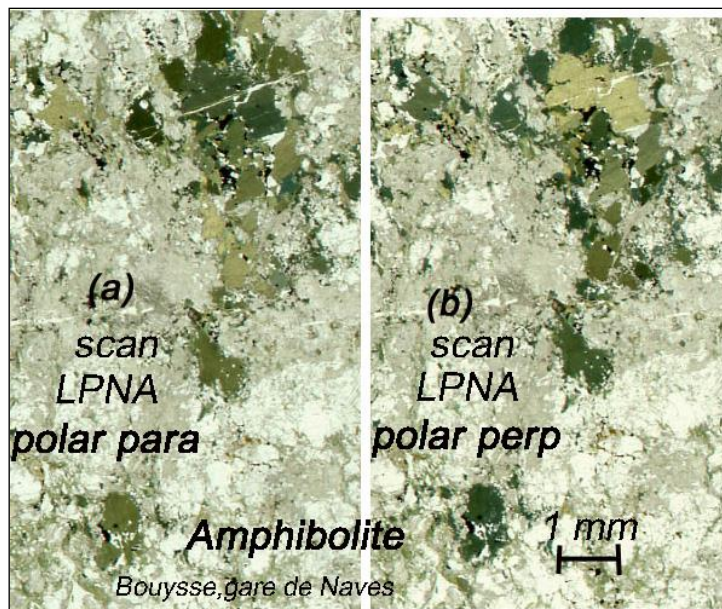


Quelle est alors la méthode de travail en lumière naturelle ?

- Première étape

On repère les cristaux ayant la propriété de pléochroïsme, c'est-à-dire un changement de teinte avec la rotation de la lame par rapport au plan de polarisation du polariseur : **figure 18**, pour une *amphibole*, et **figure 19**, pour une *biotite*. De plus, dans ce dernier cas de la biotite, le clivage « facile » suivant (001)⁶, très fin et régulier, apparaît très nettement. Pour le grand cristal examiné, ce plan (001) est parallèle au plan de vibration du polariseur, indiqué par le réticule : ce sont les conditions les plus favorables pour une coloration au maximum d'intensité.

Figure 18.
Scan en LPNA d'une amphibolite
de Bouysse, gare de Naves.
(b) est observée après rotation de 90°
par rapport à (a).



L'intensité du pléochroïsme est donc géométriquement liée aux axes du réseau cristallin. C'est une propriété intrinsèque du minéral.

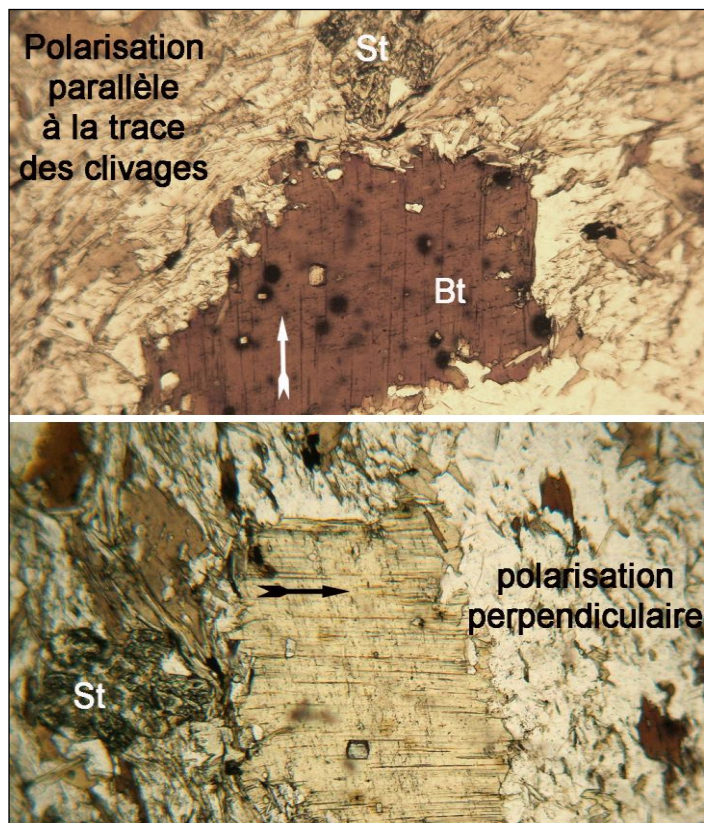


Figure 19.

Observation en LPNA d'une grande biotite, dans un schiste tacheté prélevé sur la route de Travassac à Sainte-Féréole (Corrèze).
En haut : polarisation du condenseur parallèle à la trace des clivages (flèche blanche).
En bas : polarisation du condenseur perpendiculaire à la trace des clivages (flèche noire).

St : staurolite.
Bt : biotite.

⁶ Le plan (001) est associé aux faces d'aplatissement des prismes pseudo-hexagonaux des phyllites. C'est suivant ces surfaces que les micas se débitent en lamelles minces et flexibles.

- Seconde étape

On repère les minéraux à fort indice, très réfringents, dont les contours apparaissent nettement, même s'ils ne sont pas colorés en lame mince, comme les grenats. Les zircons, visibles aussi sur la **figure 19**, sont inclus dans les biotites et rendus très visibles à cause de leur réfringence énorme, et aussi par la distorsion qu'ils exercent sur la maille de la biotite. Cette distorsion crée un halo pléochroïque noir dans la matrice de biotite.

Autres exemples, avec un indice de réfraction croissant :

- **figure 20**, la *sillimanite* en petits prismes allongés limpides, à fort contraste ;
- **figure 21**, le *chloritoïde*, présentant le phénomène de réflexion totale sur le toit du cristal ;
- **figure 22**, les défauts dans un *grenat*, zonation et hélicité, traces de son histoire ;
- **figure 23**, le *zircon*, déjà nommé, dont l'indice de réfraction bat tous les records, et qui abonde en inclusion dans certaines biotites. Les atomes radioactifs d'uranium et de thorium qu'il contient font gonfler le petit cristal de zircon, pouvant aller jusqu'à détruire la régularité de sa maille et lui donner l'état *métamicté*⁷.

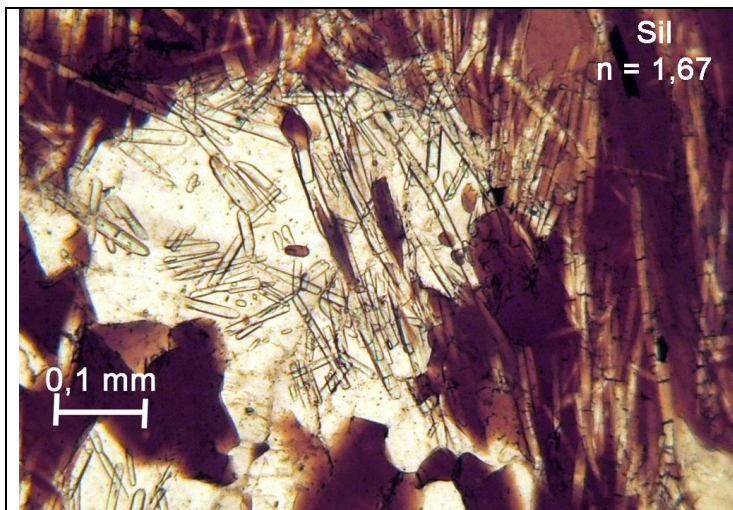


Figure 20.

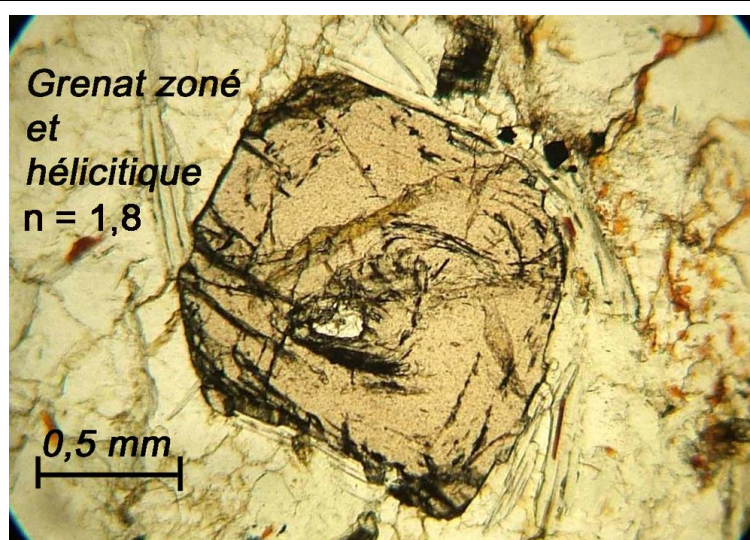
Fins et longs prismes de *sillimanite* dans le mélanosome d'une migmatite. La *sillimanite* présente un fort contraste et est totalement limpide et non pléochroïque. Les prismes se détachent sur un quartz, mais la *sillimanite* a aussi envahi les biotites rouge-brun voisines.



Figure 21.

Cristaux de *chloritoïde* à fort relief, en forme de navettes, dans un schiste. L'indice de réfraction est élevé et crée, au milieu de tous les cristaux observés, une zone opaque, par réflexion totale sur des défauts.

⁷ C'est-à-dire amorphe par bombardement

**Figure 22.**

Grenat hélicitique dans un schiste. Le fort indice est responsable du relief du cristal et des défauts à l'intérieur de ce grenat. Apparaissent ainsi :

- des traces sigmoïdes qui sont la mémoire de la mise en rotation du cristal par les contraintes de cisaillement, pendant la croissance ;
- de multiples zonations marquant les étapes à la fin de la croissance.

**Figure 23.**

Petit prisme de zircon enchâssé dans la biotite du mélanosome d'une migmatite à sillimanite. L'effet de relief est augmenté par l'auréole pléochroïque associée à la déformation du réseau par le bombardement occasionné par les éléments radioactifs contenus dans le zircon.

On peut ainsi dresser pour tous les minéraux des roches ignées, magmatiques, volcaniques et métamorphiques, un tableau des propriétés en lumière « naturelle », conduisant à un diagnostic (**figures 24 et 25**). Se reporter à l'Entretien n° III pour les tableaux relatifs aux roches métamorphiques.

Observation en lumière "naturelle"

*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 <i>kéyiphites</i> des élogites rétro-morphosées

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 <i>p</i> . Lamelles de clivage cassées	Vert olive à gris vert, avec pléochroïsme.	Rare. Faciès des amphibolites à épidote, HP.

Figure 24.
Exemple des amphiboles
et du chloritoïde, tiré
de l'Entretien n° III.

Examen en lumière "naturelle"	
Coloration des minéraux en lame mince (suite)	
Minéraux incolores: quartz, feldspath, muscovite, diopside	Silicates d'alumine Cyanite, sillimanite grenat, cordiérite
Minéraux légèrement pléochroïques: chlorite ferrique	andalousite? cordiérite
Minéraux nettement pléochroïques: actinote, hornblende, biotite	chloritoïde

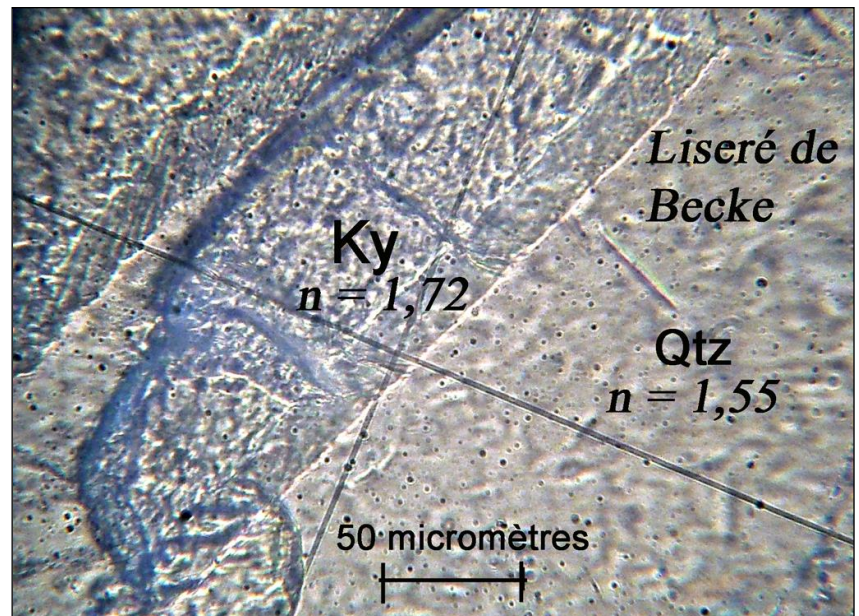


Figure 25.
Tableau de synthèse
donnant les combinaisons
de couleur et de pléochroïsme
pour quelques minéraux
importants en métamorphisme.

La mesure directe de l'indice de réfraction d'un minéral en lame mince sortant du cadre de cette introduction, on peut signaler une méthode particulièrement simple et élégante pour comparer les indices de deux minéraux contigus dans la préparation : il s'agit de la méthode dite « du liseré de Becke », **figure 26**, ci-contre.

On se reportera à l'ouvrage de référence sur l'observation des lames minces à la fin de cette seconde partie.

Figure 26.
Ky : cyanite. **Qtz** : quartz.



2.8. Observation en lumière polarisée analysée (LPA)

Jusqu'à maintenant, nous avons fait les observations en lumière « naturelle », que ce soit au scanner ou au microscope. Mais nous n'avons pas complètement tiré parti de toutes les propriétés de cette sonde remarquable qu'est la lumière polarisée, dans son interaction avec une lame mince d'un minéral monocristal. En effet, nous ne l'avons pas encore « analysée » à la sortie de la lame. Pour l'« analyser » dans ce contexte, il faut que la lumière sortant de la lame mince passe dans un second polariseur avant d'être conduite vers l'objectif du microscope, sa direction étant perpendiculaire à celle du polariseur d'éclairement : on dit que les deux polariseurs sont « croisés ».

Nous savons qu'une onde plane se divise en deux ondes à l'intérieur d'un cristal, dont les plans de polarisation sont orthogonaux. D'autre part, si nous plaçons la lame entre deux polariseurs de plans de polarisation respectivement perpendiculaires, les polariseurs croisés, nous nous attendons à un effet d'extinction. Le second dispositif polariseur s'appelle l'*analyseur* (**figure 27**).

Or, on observe bien quelques effets d'extinctions, mais la surprise vient de ce qu'un nouvel effet fait irruption, qui bouleverse complètement la scène par l'apparition massive de *teintes* souvent vives et très variées ! La couleur apparaît comme une « troisième dimension » qui s'offre à l'observation, démultipliant la capacité d'analyse et d'identification des cristaux.

Toutefois, l'interprétation du phénomène est un peu délicate et nécessite de recourir aux notions qui sont liées au phénomène d'*interférence*.

Figure 27.
La plaquette coulissante au-dessus
de l'objectif permet d'interposer
l'analyseur sur le parcours
du faisceau lumineux.



2.9. Interférences et teintes de Newton

Par un raisonnement simpliste, on pourrait s'attendre à une extinction complète, quelque soit la position de la lame sur la platine, puisque les dispositifs polariseur et analyseur sont croisés, leurs plans de polarisation étant orthogonaux. Ceci s'observe effectivement pour une plaque de verre nu, et aussi pour quelques minéraux, ceux dont le réseau est cubique. On sait qu'ils sont optiquement isotropes, et l'ellipsoïde des indices est une sphère. C'est le cas des grenats. Il en serait de même, par exemple, pour la fluorine, les spinelles... Mais c'est tout !

Voici maintenant ce que l'on observe réellement pour tous les autres minéraux, c'est-à-dire tous ceux qui ne sont pas de symétrie cubique :

- les minéraux présentent des *teintes* caractéristiques, qui subissent des *extinctions* uniquement dans des directions bien particulières, se produisant deux fois, à 180° l'une de l'autre, en un tour complet de la préparation sur la platine qui la supporte ;
- l'éclairement varie avec l'angle entre deux extinctions. Enfin, pour un type de minéral de symétrie non cubique, la teinte varie avec l'orientation du cristal dans la lame.

Bien d'autres observations peuvent être faites, mais pour l'instant arrêtons-nous sur ces trois critères, pour interpréter le phénomène. Pour cela, revenons à la **figure 3** qui a été présentée dans le § 2.5. À l'ellipsoïde des indices est associée la décomposition d'une onde plane incidente en deux ondes planes, par rupture de symétrie. À la sortie de la lame, à l'air libre, ces deux ondes vont se recombiner. On dit qu'elles vont *interférer*. Or, elles n'ont pas suivi le même chemin optique dans la lame : elles sont *déphasées* entre elles (**figure 28**). La différence de chemin est le produit de l'épaisseur de la lame par la différence entre les deux indices le long des chemins optiques, soit $\Delta = e (n'_g - n'_p)$.

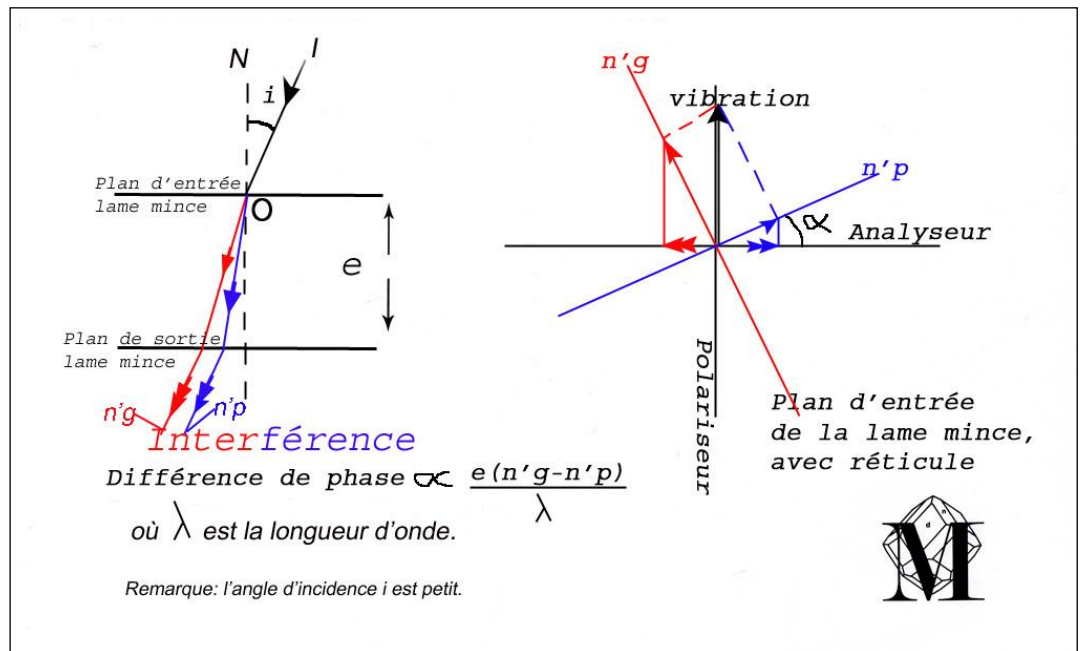
Enfin, le déphasage, c'est-à-dire l'angle de déphasage entre les deux ondes, est relié à cette différence de chemin par la relation :

$$\text{déphasage} = 2\pi e (n'_g - n'_p) / \lambda$$

où e est l'épaisseur de la lame, λ est la longueur d'onde de la lumière, et $n'_g - n'_p \leq n_g - n_p$. Le terme $n_g - n_p$ s'appelle la *biréfringence*. Cette dernière est un paramètre optique fondamental, attaché à chaque minéral.

La valeur $n_g - n_p$ est la valeur maximum prise par $n'g - n'p$ quand le plan d'incidence ION (figures 3 et 28) accomplit un tour complet autour de la verticale ON .

Figure 28.
Phénomène
de polarisation
chromatique.



Pour observer un effet notable d'interférence, il faut que la différence de chemin optique soit comparable à la longueur d'onde λ de la lumière de la source, soit environ 0,5 micromètres ou 500 nanomètres (**nm** en abrégé). Plus précisément, il faut tailler la lame pour que l'angle de déphasage $2\pi e (n_g - n_p) / \lambda \approx \pi$

La biréfringence est fonction de la nature du minéral, c'est une de ses propriétés intrinsèques. Les valeurs courantes varient de 0,009 pour le *quartz*, à 0,15 pour la *titanite*⁸ (valeur énorme !). On se règle sur le *quartz*, ce qui conduit à $2e = 55\,000\text{ nm}$, soit une épaisseur e légèrement inférieure à 30 micromètres.

Mais ce n'est pas tout ! Maintenant que nous avons réglé l'épaisseur de la lame, pour que les effets d'interférence soient maxima, il faut utiliser la polarisation de la lumière.

Sur la partie gauche de la **figure 28**, on a représenté la propagation des deux composantes d'ondes polarisées⁹ à travers la lame en coupe : elles interfèrent en sortie de la lame mince, avec l'angle de déphasage que nous avons calculé plus haut.

D'autre part, sur la moitié droite de cette même figure, on a représenté les vibrations lumineuses cette fois projetées en vue de dessus. La vibration incidente, polarisée linéairement, est représentée par la flèche noire verticale. En franchissant la face d'entrée de la lame, elle se projette sur les axes de la section normale de l'ellipsoïde, $n'g$ et $n'p$, suivant les deux ondes de propagation à travers le cristal. Enfin, à la sortie, l'analyseur les projette à nouveau cette fois sur son axe qui est l'axe horizontal sur la **figure 28**.

On peut vérifier facilement que, si la biréfringence est nulle, il n'y a pas de déphasage et les deux vibrations sont exactement opposées : il y a extinction. Par contre, si le cristal induit un déphasage par sa biréfringence, il n'y a plus extinction. La vibration lumineuse **I** qui en résulte, et qui est observée, a son amplitude proportionnelle au carré du sinus du déphasage :

$$I \approx \sin^2 [\pi e (n'g - n'p) / \lambda]$$

⁸ Ou *sphène*.

⁹ Avec les mêmes conventions de couleur rouge et bleu pour les deux ondes de réfraction que dans la **figure 3**.

L'intensité lumineuse va dépendre de façon critique de la valeur du chemin optique $e(n'g - n'p)$ comparée à la demi-longueur d'onde λ . Elle va osciller et passer par des extinctions chaque fois que $e(n'g - n'p)$ sera un multiple de λ .

Cette propriété est très importante et conditionne complètement l'interprétation des images obtenues en LPA (lumière polarisée analysée). La **figure 29** traduit cette propriété dans un abaque où est figurée la fonction oscillante de l'intensité **I** pour quatre valeurs de la longueur d'onde du spectre visible, et pour quatre oscillations successives – on parle alors de quatre « ordres » : *premier ordre, second ordre, etc.*

Longueur d'onde λ en nm	Couleur
393	Indigo
486	Bleu
551	Jaune
628	Rouge orange

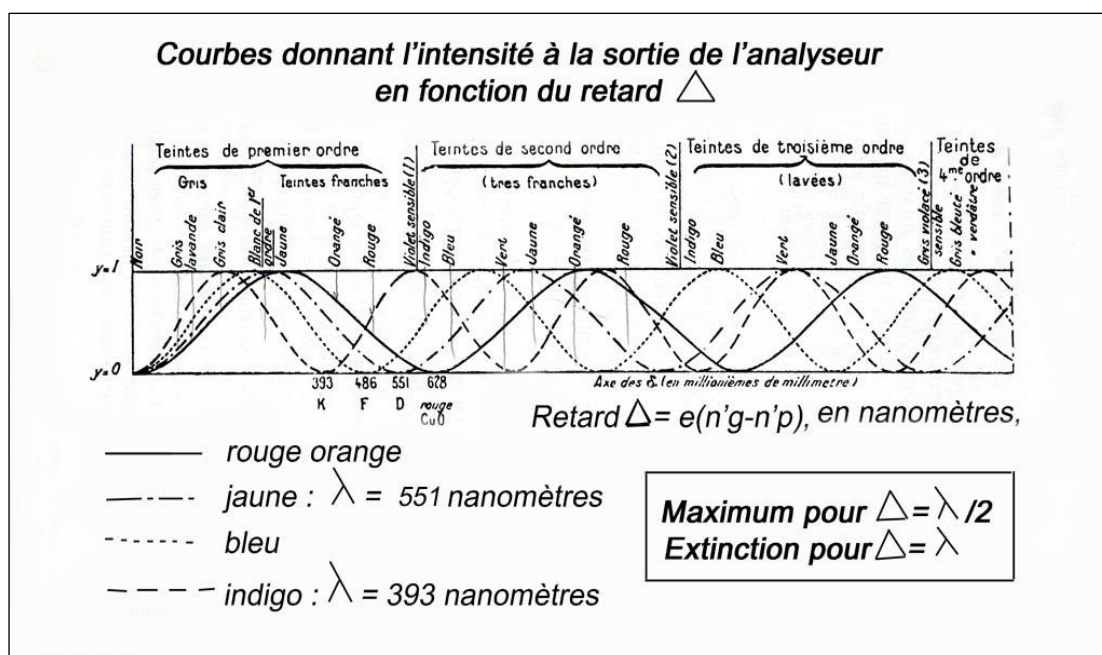


Figure 29. Courbes donnant, en fonction du retard Δ , c'est-à-dire de la différence entre les chemins optiques, $\Delta = e(n'g - n'p)$, les valeurs de l'intensité **I** pour différentes valeurs de la longueur d'onde λ , correspondant à diverses régions du spectre visible. [Tiré de « Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant », de Marcel Roubault. Éd. Lamarre-Pointat].

Mais là intervient une nouvelle complication, à savoir que la lumière de la source est une lumière blanche, couvrant tout le spectre visible, et non pas une longueur d'onde unique, comme sur l'abaque de la **figure 29**. Dans la pratique, il se produit un défilement complexe de teintes quand on parcourt l'axe des retards, comme cela apparaît sur la **figure 30**.

Ces teintes sont appelées « teintes de Newton », par analogie avec les teintes décrites par le grand physicien en observant les interférences produites par un mince film d'huile.

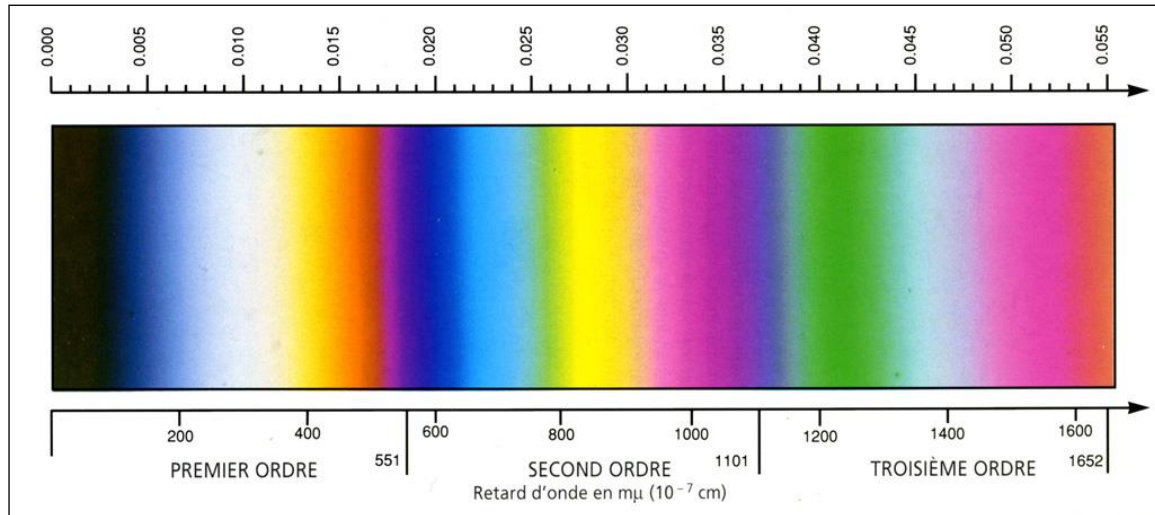
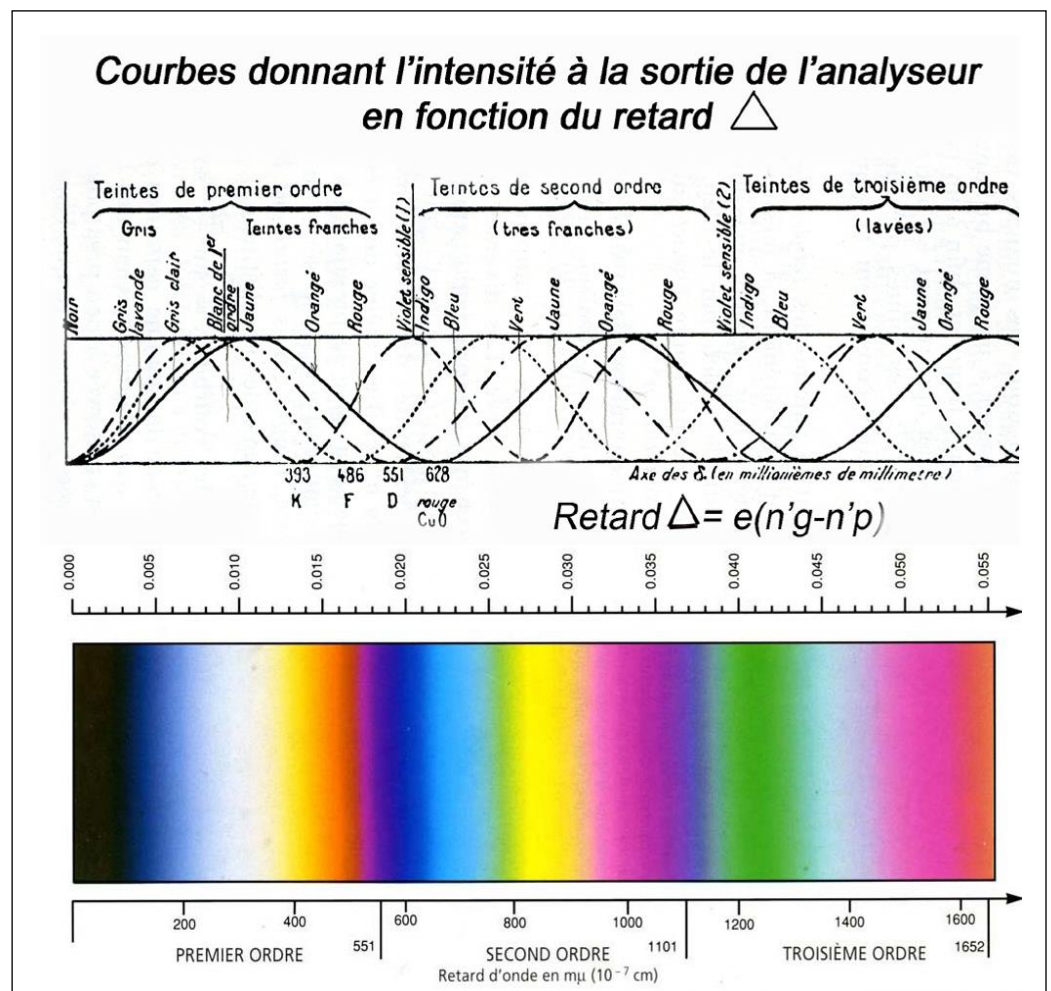


Figure 30. Succession des teintes de Newton, en fonction du retard Δ exprimé en nanomètres (Δ est la différence des chemins optiques), et pour trois ordres successifs.

[Tiré de « Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant », de M. Roubault. Éd. Lamarre-Pointat].

Figure 31. Cette figure met en regard l'abaque de la figure 29, avec la charte des teintes de la figure 30, pour bien faire comprendre l'origine physique de ces teintes et leur lien avec la valeur de la biréfringence du minéral observé.



Maintenant, comment mettre en œuvre ce subtil effet physique des teintes de Newton au service de la pétrographie ?

Sans doute, le lecteur comprend-il à présent qu'il dispose ainsi d'un outil exceptionnel : une lame mince en lumière polarisée analysée peut être idéalement considérée comme un interféromètre de précision, permettant, à la lecture de l'abaque, la traduction instantanée d'une teinte en termes de biréfringence. Comme la biréfringence est dépendante de la nature du minéral, la teinte correspondante va constituer une véritable signature de ce minéral. Nous avons regroupé, dans l'abaque de la **figure 32** ci-dessous, les biréfringences pour les teintes du 1^{er} ordre et du début du 2^e ordre, pour quelques minéraux rencontrés en métamorphisme.

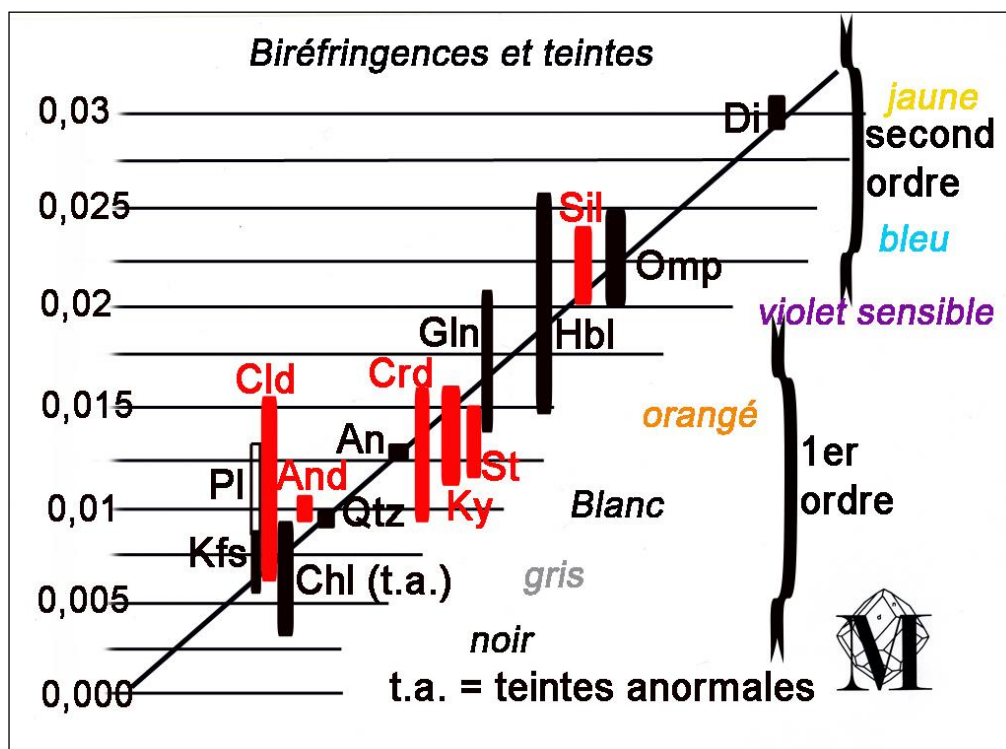


Figure 32. En échelle verticale, sont portées les biréfringences qui peuvent prendre, pour la plupart des minéraux, une certaine gamme de valeurs. Par ordre de biréfringence croissante, **Kfs** : feldspath potassique, **Pl** : plagioclase, soit feldspath calco-sodique, **Cld** : chloritoïde, **Chl** : chlorite, **And** : andalousite, **Qtz** : quartz, **An** : anorthite, **Crd** : cordiérite, **Ky** : cyanite, **St** : staurolite, **Gln** : glaucophane, **Hbl** : hornblende, **Sil** : sillimanite, **Omp** : omphacite, **Di** : diopside. [Les valeurs ont été extraites des tableaux très complets qui se trouvent en fin de l'ouvrage de référence : « Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant », de Marcel Roubault].

Le livre de Marcel Roubault (référence constante de cette partie) donne pour chaque minéral toutes les indications détaillées pour interpréter les observations en LPA, et aussi la façon de les associer à celles en LPNA (§ 2.7). Une synthèse est également donnée dans l'Entretien n° III. Une multitude d'exemples en LPA, et souvent associant LPNA et LPA, sont donnés dans les trois « **Petit atlas photographique** » joints aux Entretiens n° II, V et VII.

Une des méthodes, couramment utilisée, consiste à mesurer l'angle d'extinction d'un minéral repéré par une direction cristallographique privilégiée, souvent la direction préférentielle de clivage. L'angle est un paramètre important pour affiner l'identification et parfois même pour renseigner sur la composition du minéral. C'est l'unique exemple que nous donnons ici pour illustrer la méthode d'observation en LPA (**figure 33**).

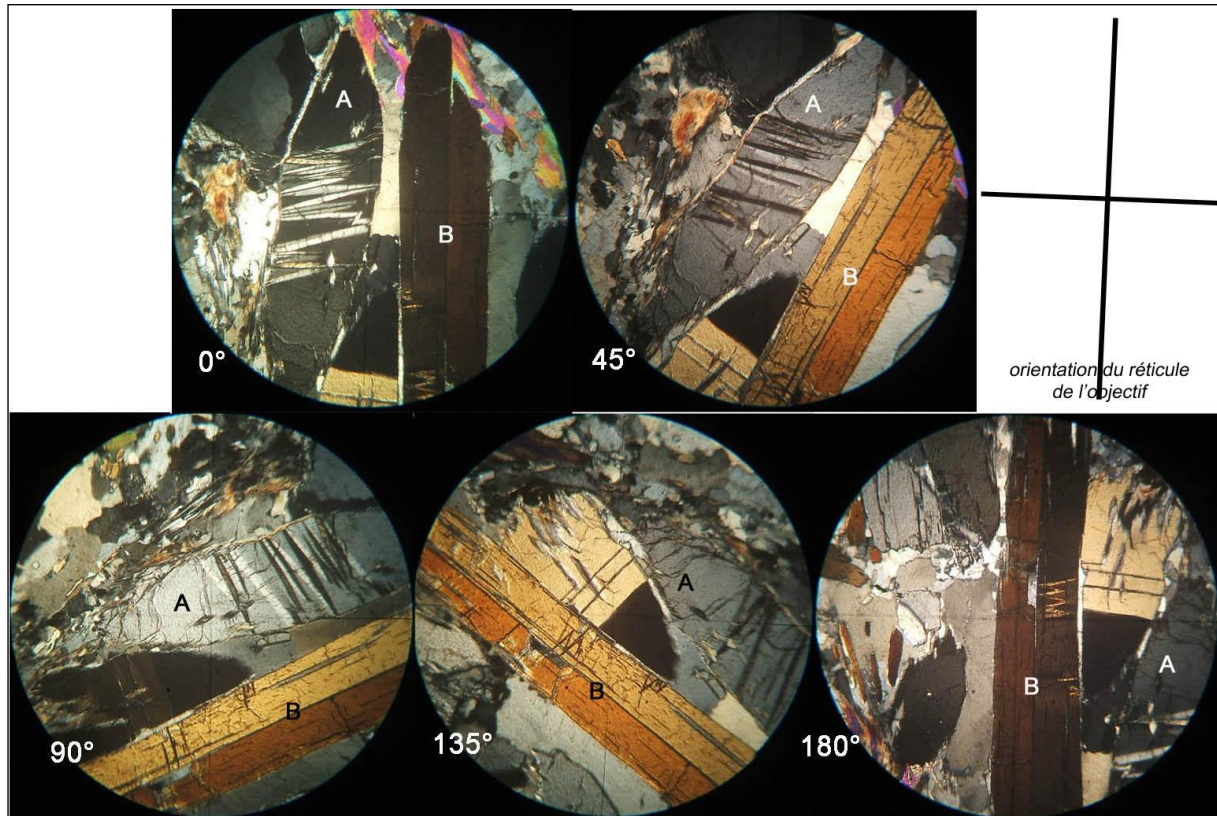


Figure 33. Cette lame mince contient de grands cristaux plurimillimétriques de cyanite, indexés par les lettres **A** et **B**. Le cristal **B** est un prisme allongé, caractéristique de la cyanite, avec l'axe cristallographique **c** couché dans le plan de la lame. **B** polarise dans les jaunes orangés du premier ordre, alors que le cristal **A**, qui est incliné sur le plan de la lame, polarise dans les gris. On peut repérer l'orientation des grands axes par rapport au réticule du microscope ; la direction du polariseur est indiquée par la branche verticale de ce dernier. On fait tourner quatre fois la préparation de 45° pour suivre les changements de transparence des cristaux et leur extinction. Dans la position initiale (0°), où le grand axe du cristal **B** est dans la direction du polariseur, il est proche de l'extinction totale. Celle-ci se produit à nouveau après rotation de 180°. En se repérant plus précisément par rapport à l'axe vertical du réticule, on mesure un angle d'extinction d'une dizaine de degrés. Mesuré sur un grand nombre d'autres cristaux présents dans la lame, on trouve que l'angle maximum d'extinction est de 30°, ce qui correspond bien aux propriétés optiques de la cyanite.

Bibliographie

La référence bibliographique est l'ouvrage : *Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant*, de Marcel Roubault. Éd. Lamarre-Pointat. Troisième édition, revue et augmentée de 1982.

