

TRAVAUX PRATIQUES

RECONNAISSANCE DES MINÉRAUX DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

LES MINÉRAUX COMMUNS AUX ROCHES MAGMATIQUES ET MÉTAMORPHIQUES

I. Les minéraux incolores

I.1. Le quartz

Le quartz est un tectosilicate de composition chimique SiO_2 Il existe plusieurs formes de hautes et basses températures du quartz dont la plus courante est la forme de basse température (Quartz α ; $T < 573^\circ\text{C}$) rhomboédrique pseudo-hexagonale.

Lumière polarisée

- Incolore, toujours limpide, jamais altéré.
- Sa forme est xénomorphe (car il cristallise le dernier) au sein de roches à textures grenues. Au sein de roches microgrenues et microlitiques les phénocristaux sont généralement automorphes à subautomorphes, avec des formes pseudo-hexagonales aux angles arrondis et des "golfs de corrosion" qui sont en fait des lacunes de croissance (habitus rhyolitique) [.
- Pas de clivages. Cassures assez fréquentes.
- Relief faible (1.54), considéré comme nul car utilisé comme référence pour estimer celui des autres minéraux.
- Inclusions fréquentes qui peuvent s'arranger suivant des alignements. Il s'agit d'inclusions minérales ou d'inclusions liquides ou gazeuses particulièrement fréquentes (aspect de petites bulles au fort grossissement)

Lumière polarisée et analysée

- Biréfringence faible, au maximum teintes dans les gris clairs et blancs du 1^{er} ordre.
- Extinction droite mais elle est très difficile à déterminer en raison de sa forme fréquemment xénomorphe et en l'absence de clivage. Lorsque la roche a été soumise à des contraintes tectoniques le quartz présente un phénomène d'extinction roulante ou onduleuse : l'extinction n'est pas totale pour toute une même section d'un minéral mais elle se propage suivant des zones floues au travers du minéral
- Jamais de macles.

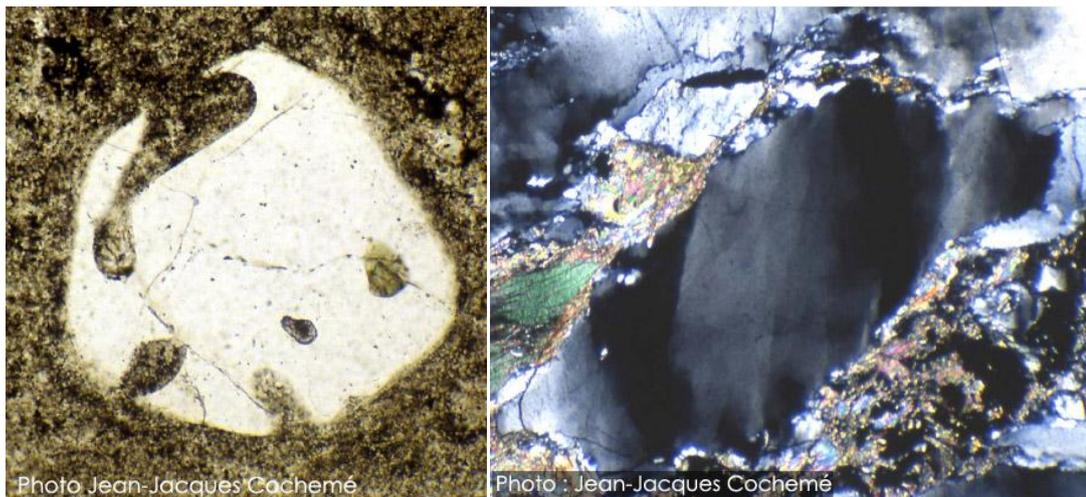


Figure 1. Cristaux de quartz. A gauche, cristal automorphe dans une lave (LP), à droite, cristal xénomorphe dans une roche plutonique (noter l'extinction roulante due à une déformation de la roche).

I.2. Les feldspaths

Les feldspaths sont des tectosilicates et ils cristallisent soit dans le système monoclinique soit dans le système triclinique. Il existe des formes de haute et basse température.

Ils sont partagés en deux groupes principaux suivant leur composition chimique :

- les feldspaths sodi-potassiques ou **feldspaths alcalins**,
- les feldspaths calco-sodiques ou **feldspaths plagioclases**.

Dans le cas des feldspaths plagioclases, il existe une solution solide continue entre un pôle sodique (Albite, $\text{Na AlSi}_3\text{O}_8$) et un pôle calcique (Anorthite, $\text{Ca Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

I.2.1. Caractères communs à tous les feldspaths

Lumière polarisée

- Forme variable, automorphe (section rectangulaire) et xénomorphe.
- Incolores avec une opacité plus ou moins grande lorsqu'ils sont altérés (les minéraux ont un aspect gris, "sali").
- 2 clivages à 90° qui sont généralement mal visibles en lame mince. Cassures fréquentes.
- Relief faible, voisin de celui du quartz.
- Altérations fréquentes, elles sont de deux types :
 - la kaolinitisation : altération par lessivage des alcalins et formation de kaolinite (phyllosilicates) de très petite taille qui donne un aspect gris "sali" parfois associée à l'hématite (oxyde de fer) qui donne alors une légère coloration rosée. La kaolinitisation est typique des Feldspaths Alcalins.
 - la séricitisation : altération qui conduit à l'apparition de fines paillettes de micas blancs (séricite = hydromuscovite) et qui donne un aspect gris "sali" La séricitisation est fréquente surtout chez les plagioclases.

Lumière polarisée et analysée

- Biréfringence faible, au maximum teintes dans les gris clairs du 1er ordre. La kaolinitisation renforcera les teintes sombres du minéral alors que le cas de la séricitisation les paillettes de micas blancs apparaîtront avec des teintes vives.
- La macle simple : Macle de Carlsbad (macle simple par pénétration) et/ou les macles polysynthétiques : Macle de l'Albite, la plus fréquente, et de la péricline (macles par accollement) sont caractéristiques des Feldspaths.

I.2.2. Les feldspaths alcalins

Les feldspaths alcalins (sodi-potassiques) les plus fréquents sont les feldspaths potassiques qui existent sous trois formes en fonction de la température :

- A haute température : la **sanidine**
- A moyenne température : l'**orthose**
- A basse température : le **microcline**

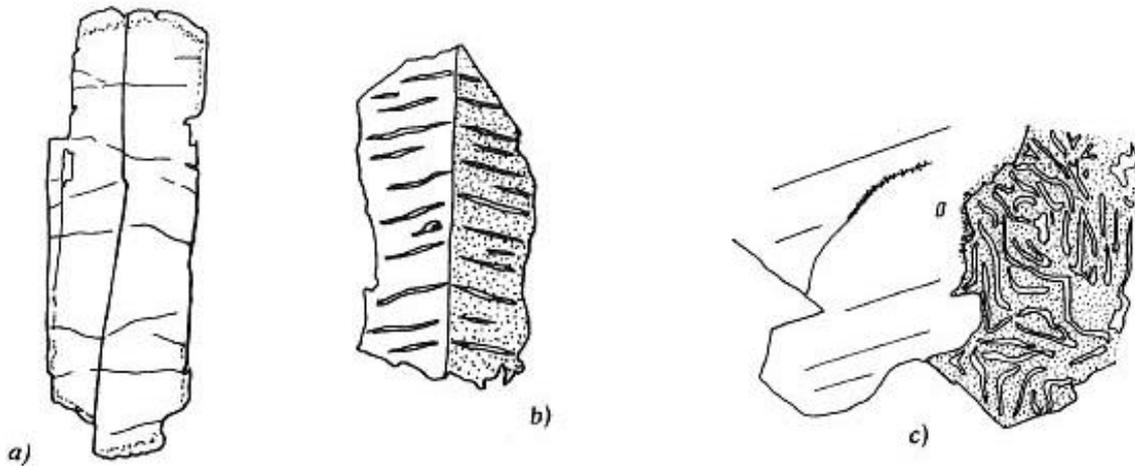


Figure 2. Différents types de feldspaths alcalins : a. cristal de sanidine, b. orthose perthitique, c. myrmékites au contact entre plagioclase et feldspath alcalin (Demant et al., 1988)

a. L'orthose

Composition comprise entre (Or₁₀₀, Ab₀) et (Or₅₀, Ab₅₀). Monoclinique.

Exclusivement dans les roches plutoniques et métamorphiques.

Lumière polarisée

- Forme automorphe rectangulaire à xénomorphe.
- Incolore, avec un aspect gris "sali" lié à l'altération.
- 2 clivages suborthogonaux.
- Relief très légèrement négatif.
- Fréquemment altéré avec un aspect gris "sali": kaolinisation ; plus rarement séricitisation.

Lumière polarisée et analysée

- Teinte grise du 1^{er} ordre.
- Extinction oblique. Angle d'extinction compris entre 3 et 12° sur les sections à un clivage. Extinction droite sur les sections à deux clivages.
- Macle de Carlsbad uniquement.
- Perthites : intercroissance de feldspath sodique (albite) dans un feldspath potassique (orthose ou microcline) lié à une démixtion à l'état solide de ces deux phases et qui donne un aspect de tâches ou de zébrures orientées. Au sein des perthites, l'Albite peut parfois présenter une macle multiple. NB : lorsque l'orthose est altérée, noter les relations entre les perthites et les zones d'altération.
- Développement de myrmékites au contact orthose-plagioclase. Aspect de bourgeon de feldspath plagioclase sodique (albite-oligoclase) comprenant des vermicules de quartz.

b. Microcline

Variété de Basse Température de l'orthose. Composition comprise entre (Or₁₀₀, Ab₀) et (Or₆₀, Ab₄₀). Triclinique.

Exclusivement dans les roches plutoniques et métamorphiques.

Lumière polarisée

- Forme fréquemment xénomorphe car cristallise dans les derniers.
- Incolore, avec un aspect gris "sali" lié à l'altération.
- 2 clivages suborthogonaux difficiles à observer.

- Relief négatif.
- Fréquemment altéré (principalement kaolinisation).

Lumière polarisée et analysée

- Teinte grise du 1^{er} ordre.
- Angle d'extinction impossible à mesurer en raison des macles.
- Macle de Carlsbad fréquente mais aspect très particulier de quadrillage irrégulier, chatoyant et rectangulaire (tissu écossais) lié à l'association de macles polysynthétiques très fines de type albite et péricline. Ce quadrillage disparaît totalement 4 fois par tour complet de platine ce qui, avec son aspect irrégulier, le différencie des Feldspaths plagioclases.
- Perthites : intercroissance de feldspath sodique (albite) dans un feldspath potassique (orthose ou microcline) lié à une démixtion à l'état solide de ces deux phases. Aspect de tâches ou de zébrures orientées dans lesquelles l'Albite peut présenter une macle multiple.
- Développement de myrmékite au contact orthose-plagioclase. Aspect de bourgeon de feldspath plagioclase sodique (albite-oligoclase) comprenant des vermicules de quartz

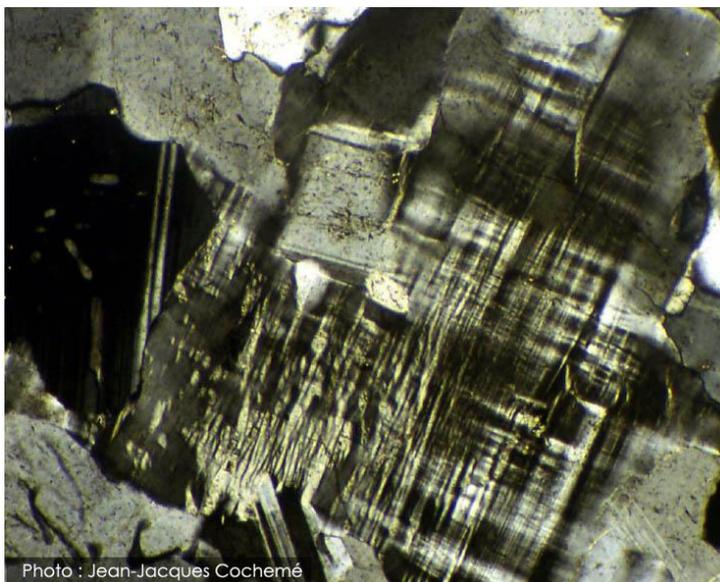


Figure 3. Microcline dans une roche magmatique grenue.

1.2.3. Les feldspaths plagioclases

Il existe une solution solide continue entre un pôle sodique (albite) et un pôle calcique (anorthite). En conséquence, leurs propriétés optiques vont évoluer de façon continue en fonction de leur composition. Ils cristallisent dans le système triclinique.

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe rectangulaire.
- Incolore, plus ou moins limpide en fonction du degré d'altération qui lui donne un aspect gris "sali".
- 2 clivages suborthogonaux.
- Relief variable en fonction de la composition, négatif pour l'albite et positif pour l'anorthite.
- Altération fréquente (séricitisation).

Lumière polarisée et analysée

- Teinte grise du 1^{er} ordre.
- Macles polysynthétiques extrêmement fréquentes (surtout la macle de l'albite associée ou non à celle du péricline) et caractéristiques des feldspaths plagioclases. La macle de Carlsbad peut aussi être présente mais toujours associée à la macle de l'albite.

- Angle d'extinction variable en fonction de la composition, il augmente avec la teneur en calcium.
- Zonage concentrique fréquent qui est la conséquence du développement de zones de composition différentes au cours de la cristallisation, ces zones ne s'éteignent pas en même temps

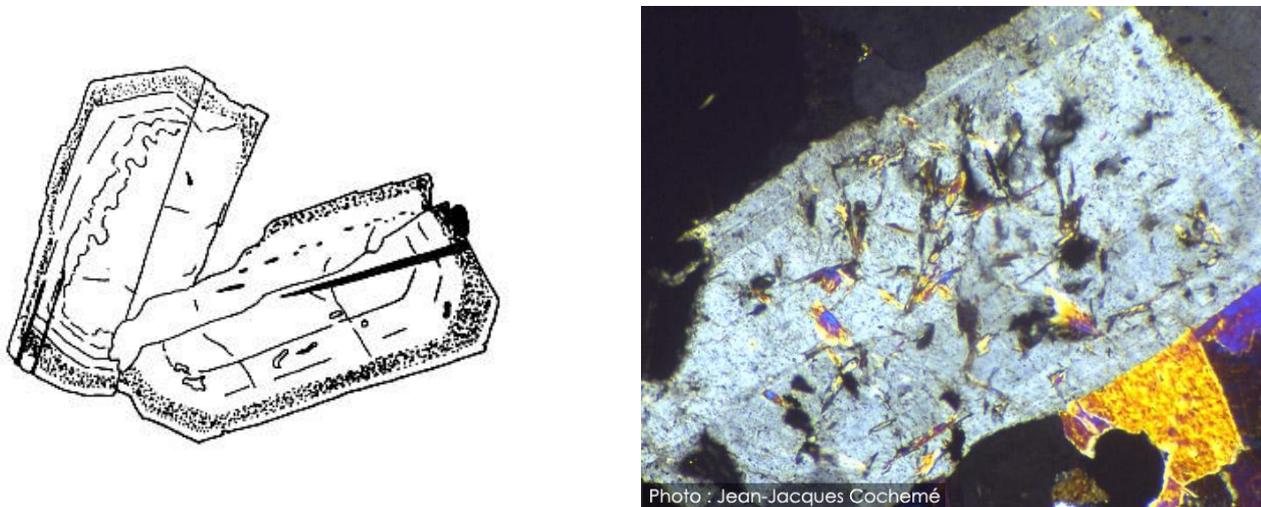


Figure 4. Cristaux de feldspaths plagioclase. A droite cristaux zonés (Demant et al., 1988) et à gauche, plagioclase présentant une altération en séricite (LPA)

II. Les minéraux colorés

II.1. Les micas

Les micas sont des phyllosilicates hydratés qui cristallisent tous dans le système monoclinique, mais sont pseudo-hexagonaux.

On distingue 2 grandes familles de micas :

- les micas bruns ou **biotites** (de composition riche en Fer et Magnésium, solution solide entre un pôle ferreux et un pôle magnésien),
- les micas blancs ou **muscovites** (de composition riche en Aluminium).

II.1.1. Caractères communs à tous les micas

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe. Les sections longitudinales sont rectangulaires et leurs extrémités sont crenelées. Les sections basales sont subhexagonales.
- 1 clivage très facile visible uniquement sur les sections longitudinales ou obliques.
- Relief positif moyen.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes du 2ème - 3ème ordre.
- Extinction droite pour les sections avec le clivage visible. Sections basales toujours éteintes.
- Pas de macle.

II.1.2. Les micas bruns ou biotites

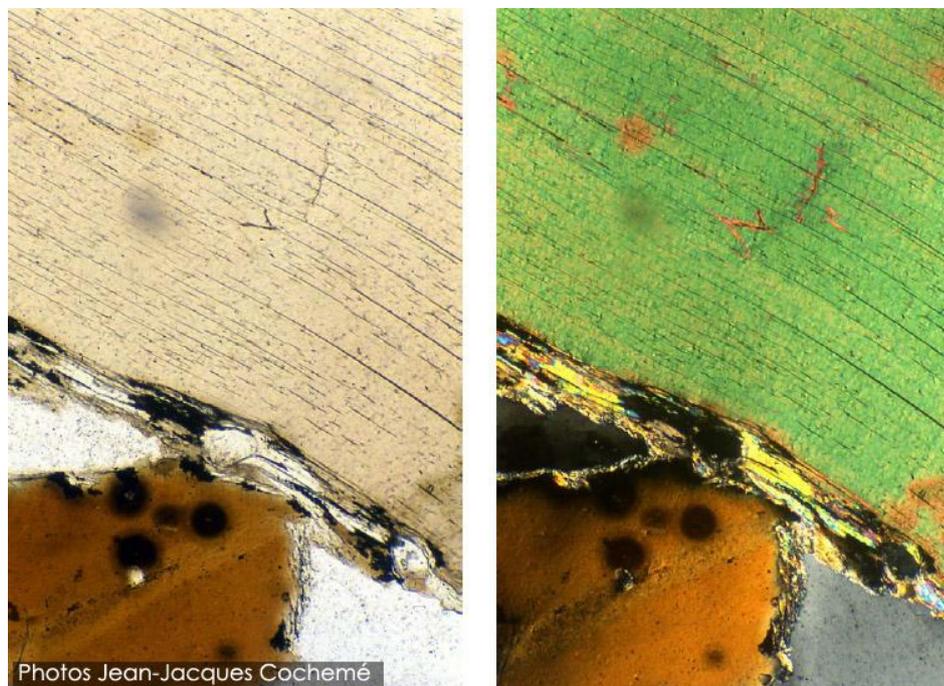
Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe. Les sections longitudinales sont rectangulaires et leurs extrémités sont crenelées. Les sections basales sont subhexagonales.

- Couleur foncée de brun-rouge (biotite magnésienne) à brun-vert (biotite ferrifère).
- Pléochroïsme direct et très fort uniquement visible sur les sections allongées. Sections basales non pléochroïques.
- 1 Clivage très facile, uniquement visible sur les sections allongées.
- Relief positif moyen.
- Altération fréquente en chlorite (phyllosilicates hydratés du groupe des micas) qui donne une couleur vert-pâle (altération qui se propage à partir de la bordure et suivant les plans de clivage et qui s'accompagne par une expulsion de Fer qui s'accumule dans les plans de clivage sous forme de minéraux opaques).
- Inclusions fréquentes de Zircon (minéral incolore avec un très fort relief positif) entouré d'une auréole noire pléochroïque.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes du 2^{ème} - 3^{ème} ordre plus ou moins masquées par la couleur du minéral.
- Extinction droite pour les sections avec le clivage visible. Sections basales toujours éteintes
- Pas de macle.



Photos Jean-Jacques Cochemé

Figure 5. Cristaux de biotite dans une roche grenue. A gauche LP, à droite LPA. La section du haut est une section longitudinale (1 clivage fin) et celle du bas est une section basale qui comprend des inclusions de zircon.

II.1.3. Les micas blancs ou muscovite

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe. Les sections longitudinales sont rectangulaires et leurs extrémités sont crenelées. Les sections basales sont subhexagonales.
- Incolore et limpide (car résistant à l'altération).
- Pas de pléochroïsme.
- 1 Clivage très facile, uniquement visible sur les sections allongées.
- Relief positif moyen.
- Inclusions rares.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes très vives du 2^{ème} - 3^{ème} .

- Extinction droite pour les sections avec le clivage visible. Sections basales toujours éteintes.
- Pas de macle.

II.2. Les pyroxènes

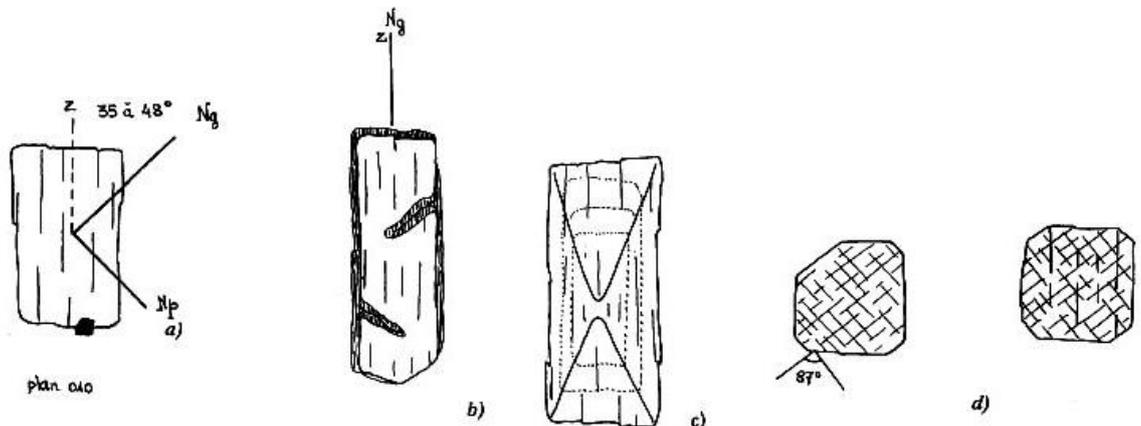
Les pyroxènes sont des Inosilicates en chaînes simples, et ils cristallisent soit dans le système orthorhombique (Orthopyroxènes) soit dans le système monoclinique (Clinopyroxènes). Leur composition chimique est très complexe et il existe de nombreuses solutions solides. Ce sont des minéraux anhydres (à la différence des Amphiboles, inosilicates en chaîne double).

- Les orthopyroxènes sont des minéraux pour lesquels il existe une solution solide entre un pôle magnésien (Enstatite) et un pôle ferrifère (Ferrosillite). L'orthopyroxène le plus fréquent, l'Hyperstène, est un terme intermédiaire.
- Les clinopyroxènes sont divisés en 2 familles principales :
 - les clinopyroxènes sodiques : série de l'Aegyrine (non traitée ici),
 - les clinopyroxènes calciques et ferromagnésiens représentés principalement par les Augites qui sont des termes intermédiaires dans une solution solide entre un pôle magnésien et un pôle ferrifère. De plus il existe une solution solide entre les augites calciques et celles sodiques.

II.2.1. Caractères communs à tous les pyroxènes

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe. Les sections longitudinales sont trapues et rectangulaires. Les sections basales sont carrées et peuvent être tronquées aux angles (forme octogonale).
- Faiblement coloré sauf dans certains cas.
- Pléochroïsme très faible et direct.
- 2 clivages, plus ou moins difficiles, formant un angle d'environ 90° visibles uniquement sur les sections basales; les autres sections ne présentant qu'une seule direction de clivage.
- Cassures fréquentes.
- Relief positif fort.



Différentes sections de pyroxènes a. longitudinale cpx, b. longitudinale opx avec début d'altération, c. sectorisation en sablier d'un cpx, d. basales cpx et opx. D'après Demant et al., 1988.

Figure 6 - Différentes sections de pyroxènes a. longitudinale cpx, b. longitudinale opx avec début d'altération, c. sectorisation en sablier d'un cpx, d. basales cpx et opx (Demant et al., 1988)

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence supérieure au gris de 1er ordre et pouvant atteindre les teintes vives du 2^{ème}-3^{ème} ordre.

- Existence de macles.

II.2.2. Les orthopyroxènes

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe. Les sections longitudinales sont rectangulaires et plus allongées que celles des clinopyroxènes. Les sections basales sont carrées et peuvent être tronquées aux angles (forme octogonale).
- L'hypersthène est faiblement coloré dans les beiges plus ou moins jaunâtres, verdâtres, rosâtres (cette dernière couleur étant la plus caractéristique). L'enstatite est incolore.
- Pléochroïsme léger et direct qui différencie l'hypersthène de l'enstatite qui est incolore.
- 2 clivages, plus ou moins difficiles, formant un angle d'environ 90° visible uniquement sur les sections basales. De plus, sur les sections basales, un troisième clivage, très fin et très facile, peut se superposer à 45° des deux autres. Les sections longitudinales ne présentent qu'une seule direction de clivage.
- Relief positif fort.
- Inclusions métalliques (opaques) fréquentes le long des clivages.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence du gris pour l'enstatite au jaune-orangé de 1^{er} ordre pour l'hypersthène.
- Extinction droite.
- Pas de zonage.

II.2.3. Les clinopyroxènes (augites)

Les augites étant les termes intermédiaires d'une solution solide, leurs propriétés optiques varient progressivement en fonction de leur composition chimique.

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe. Les sections longitudinales sont rectangulaires et plus allongées. Les sections basales sont carrées et peuvent être tronquées aux angles (forme octogonale).
- La couleur permet de différencier 3 types d'augites différentes
 - Augite indifférenciée, faiblement colorées en beige jaunâtre ou verdâtre,
 - Augite titanifère (augite riche en Titane), colorée en beige violacé ou rosé,
 - Augite aegyrienne (augite riche en Sodium), colorée en vert plus ou moins intense.
- Pléochroïsme direct très faible voire non pléochroïque (sauf pour l'augite aegyrienne où il peut être plus ou moins fort).
- 2 clivages, plus ou moins difficiles, formant un angle d'environ 90° visible uniquement sur les sections basales. Les sections longitudinales ne présentent qu'une seule direction de clivage.
- Cassures fréquentes.
- Relief positif fort.
- Altération fréquente en chlorite qui leur donne une couleur vert-pâle ou métamorphisme en hornblende verte qui calque son orientation cristalline sur celle de l'augite initiale.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence de la fin du 1^{er} ordre au début du 2^{ème} ordre.
- Extinction fortement oblique ($39 < \alpha < 45^\circ$) sauf pour les augites aegyriennes ($0 < \alpha < 40^\circ$).
- Macles simples ou multiples fréquentes.
- Zonages fréquents de type concentrique ou "en Sablier" (le minéral est divisé en secteurs qui reproduisent la forme d'un sablier; fréquente dans les Augites titanifères).

II.3. Les amphiboles

Les amphiboles sont des inosilicates en chaîne double (ou en ruban), et elles cristallisent soit dans le système monoclinique (clino-amphiboles) soit dans le système orthorhombique (ortho-

amphiboles). Ce sont des minéraux faiblement hydratés (présence de groupement OH-).

Les clino-amphiboles ont une formule chimique très complexe et variable qui se traduit par l'existence de nombreuses solutions solides. On distingue cependant deux familles principales :

- Les amphiboles sodiques (exemple glaucophane),
- Les amphiboles calciques (et, ou pas, alumineuses) que l'on appelle les hornblendes. Nous nous limiterons ici aux amphiboles calciques et alumineuses qui sont les plus fréquentes dans les roches magmatiques.

La famille des hornblendes est elle même subdivisée en 2 :

- Hornblende verte
- Hornblende brune (ou hornblende basaltique).

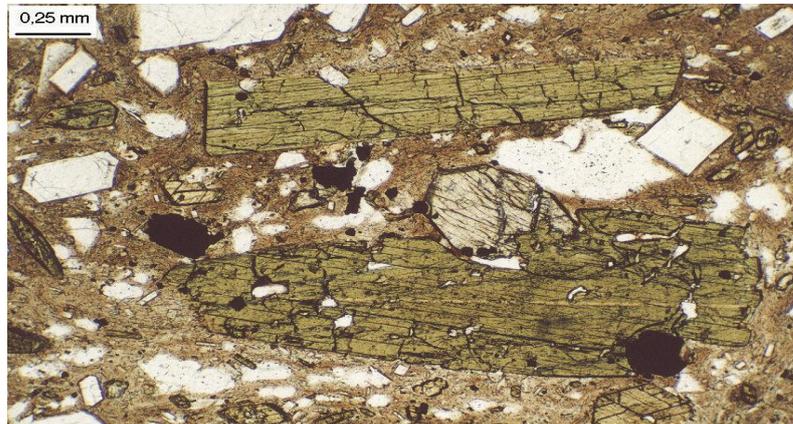
II.3.1. Caractères communs à toutes les hornblendes

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe. Les sections longitudinales sont allongées (bacillaires : en forme de baguette). Les sections basales sont losangiques, et parfois tronquées (forme à 6 côtés).
- Couleurs plus ou moins intenses avec un pléochroïsme direct et bien marqué.
- 2 clivages, plus ou moins difficiles, formant un angle d'environ 60° visible uniquement sur les sections basales. Les autres sections ne présentent qu'une seule direction de clivage.
- Cassures fréquentes.
- Relief positif moyen à fort.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de la fin du 1er ordre à celles du 2^{ème}-3^{ème} ordre.
- Extinction faiblement oblique ($\alpha < 27^\circ$) pour les sections avec une seule direction de clivage visible.
- Macles simples fréquentes.



Figures 7. Différentes sections de hornblendes en lumière polarisée dans une lave à texture microlitique. Noter le clivage sur le minéral du haut (section longitudinale) et les deux clivages sur la section du bas (angle de 124°).

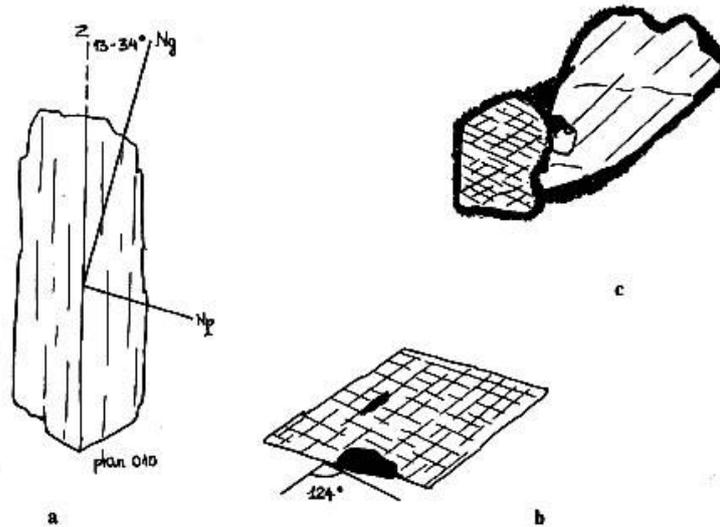


Figure 8 - Différents types de section de hornblende. a. longitudinale (1 clivage), b. basale (2 clivages à 124°), c. résorption de hornblende en minéraux opaques dans les laves (Demant et al., 1988)

II.4.2. La Hornblende verte

On la trouve dans les roches plutoniques.

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe. Les sections longitudinales sont allongées (bacillaires : en forme de baguette). Les sections basales sont losangiques, et parfois tronquées (forme à 6 côtés).
- Couleur verte plus ou moins intense.
- Pléochroïsme direct et plus ou moins fort.
- 2 clivages, plus ou moins difficiles, formant un angle d'environ 120° visible uniquement sur les sections basales. Les autres sections ne présentent qu'une seule direction de clivage.
- Relief positif moyen à fort.
- L'altération en chlorite donne une couleur vert-pâle et se propage progressivement depuis les bords et les clivages.

Lumière polarisée et analysé

- Teintes du jaune 1er ordre à celles du 2ème-3ème ordre.
- Extinction oblique ($15^\circ < \alpha < 27^\circ$) pour les sections avec une seule direction de clivage visible.
- Macles simples fréquentes

II.3.3. La hornblende brune

On la trouve dans les roches volcaniques.

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe. Les sections longitudinales sont allongées (bacillaires : en forme de baguette). Les sections basales sont losangiques, et parfois tronquées (forme à 6 côtés). Ses sections sont souvent bordées par une auréole de minéraux opaques (oxydes de fer et de titane...).
- Couleur brune intense.
- Pléochroïsme direct et fort.
- 2 clivages, plus ou moins difficiles, formant un angle d'environ 120° visible uniquement

sur les sections basales. Les autres sections ne présentent qu'une seule direction de clivage.

- Cassures fréquentes
- Relief positif fort.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes du 2^{ème}-3^{ème} ordre souvent masquée par la couleur propre du minéral.
- Extinction oblique ($0 < \alpha < 10^\circ$) pour les sections avec une seule direction de clivage visible.
- Macles simples fréquentes.

III. Les minéraux accessoires

III.1. Les minéraux accessoires silicatés

III.1.1. Le zircon

Nésosilicate de formule $Zr(SiO_4)$, qui cristallise dans le système quadratique.

Se présente souvent sous la forme de minéraux de petite taille en inclusion dans la Biotite.

Lumière polarisée

- Petits cristaux prismatiques ou grains arrondis.
- Incolores. Lorsqu'ils sont en inclusion dans la Biotite, ils sont entourés d'une auréole noire pléochroïque.
- Très fort relief positif.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence très vives du 2^{ème}-3^{ème} ordre.
- Extinction droite.

III.1.2. Le sphène ou titanite

Nésosubsilicate de formule $CaTi(SiO_4)(O, OH, F)$ qui cristallise dans le système monoclinique.

Lumière polarisée

- Sections losangiques ou prismatiques avec les terminaisons pointues.
- Faiblement coloré dans les beiges.
- 1 Clivage oblique par rapport à l'allongement des cristaux.
- Fines craquelures qui donne à sa surface un aspect gris piqueté qui masque sa couleur.
- Très fort relief positif.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence délavées du 4^{ème} ordre.
- Extinction oblique et souvent incomplète.

III.1.3. La tourmaline

Cyclosilicate complexe de Fe, Mg, Na, Li... qui cristallise dans le système rhomboédrique.

Lumière polarisée

- Section longitudinale prismatique allongée. Section basale subtriangulaire.
- Fortement coloré en brun, vert, bleu, jaune. Zonation de la couleur très bien marquée.
- Pléochroïsme très bien marqué et inverse (C'est le seul minéral avec un pléochroïsme inverse que vous rencontrerez).

- Pas de clivage.
- Craquelures perpendiculaires à l'allongement des sections longitudinales.
- Relief positif moyen.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence vives du 2ème-3ème ordre souvent masquées par la couleur du minéral.
- Extinction droite. Les sections basales sont toujours éteintes.

III.2. Les minéraux accessoires non silicatés

III.2.1. L'apatite

Phosphate de formule $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$, qui cristallise dans le système hexagonal.

Lumière polarisée

- Sections prismatiques ou hexagonales de petite taille.
- Incolore et limpide.
- Fort relief positif.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence grises du 1^{er} ordre.
- Extinction droite.

III.2.2. Les spinelles

Oxydes de formule chimique complexe qui cristallisent dans le système cubique.

Minéraux typiques des roches ultrabasiques (Péridotites).

Lumière polarisée

- Sections automorphes pseudo-losangiques.
- Couleur brune plus ou moins intense.
- Pas de pléochroïsme.
- 1 Clivage difficile à observer.
- Très fort relief positif.

Lumière polarisée et analysée

- Sections toujours éteintes car minéraux isotropes (cubiques).

III.2.3. Les minéraux opaques

On regroupe, sous cette appellation, différents minéraux qui n'ont en commun que leur opacité. Leur étude ne peut s'effectuer avec le microscope optique polarisant mais avec un microscope qui utilise la lumière réfléchie. Ce sont généralement des oxydes : la magnétite ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$), la chromite ($\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$), l'ilménite (FeTiO_3).

LES MINÉRAUX DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

Dans les roches métamorphiques, les assemblages minéralogiques sont symptomatiques des conditions de pression et de température qui ont présidé à leur genèse. Chaque minéral présente en effet un champ de stabilité dans un domaine de pression et de température bien précis. Ces champs de stabilité sont établis par la pétrologie expérimentale.

La plupart des minéraux des roches magmatiques se retrouvent cependant dans les roches métamorphiques. A ces minéraux s'ajoutent les minéraux spécifiques du métamorphisme.

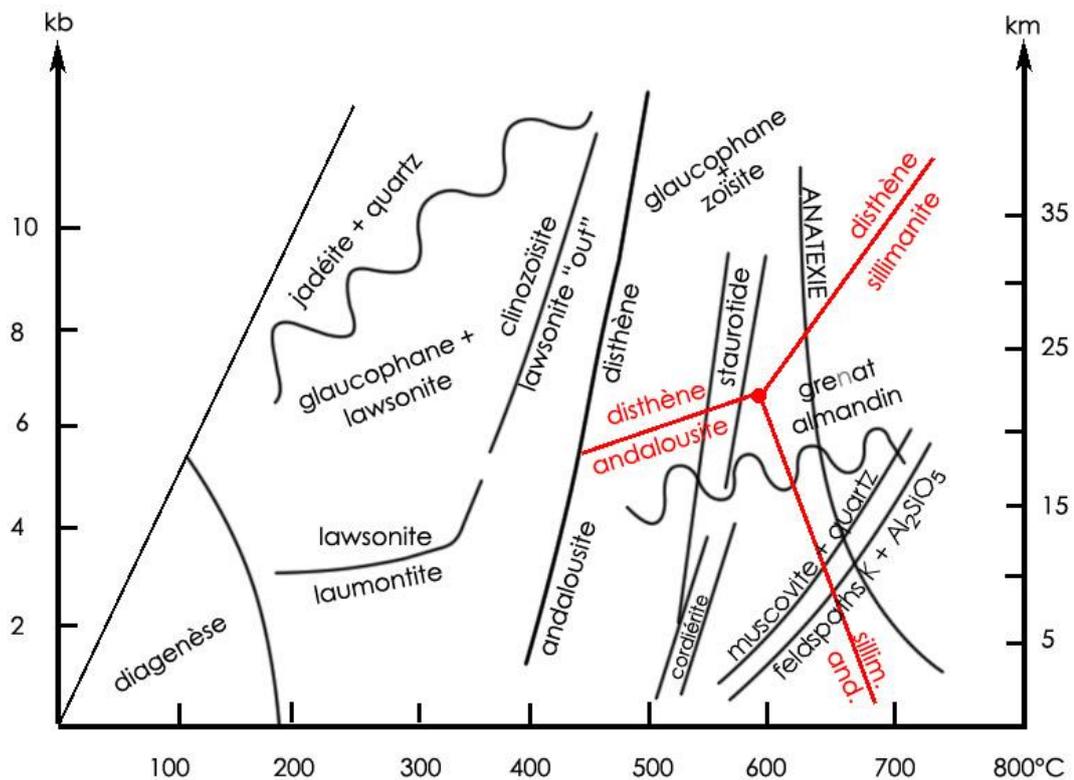


Figure 9 Diagramme de stabilité Pression - Température de certains minéraux du métamorphisme

I. Les grenats

Les grenats sont des néosilicates (silicates à tétraèdres isolés). Ils se divisent d'après leur composition chimique en deux grands groupes :

- les grenats alumineux de formule chimique générale $[\text{SiO}_4]_3\text{Al}_2\text{X}_3$ dans laquelle X représente des cations bivalents qui peuvent être :
 - Fe^{2+} dans le cas de la variété **almandin**
 - Mg^{2+} dans le cas de la variété **pyrope**
 - Mn^{2+} dans le cas de la variété **spessartine**
- les grenats calciques $[\text{SiO}_4]_3\text{Al}_2\text{Y}_3$ dans laquelle Y représente cette fois des cations trivalents qui peuvent être
 - Al^{3+} dans le cas de la variété **grossulaire**
 - Fe^{3+} dans le cas de la variété **andradite**.

La plupart des grenats sont des solutions solides entre ces différents pôles.

Tous les grenats cristallisent dans le système cubique.

Lumière polarisée

- Sections automorphes de forme dodécaédriques, globuleuse.
- Incolores
- Pas de pléochroïsme.
- Renferment souvent des inclusions de petite taille (quartz) parfois disposés en hélice (mouvement du cristal au cours de la cristallisation, liés aux déformations tectoniques) = grenats hélicitiques
- Pas de clivage mais de nombreuses craquelures irrégulières.
- Très fort relief positif.

Lumière polarisée et analysée

- Sections toujours éteintes car minéraux isotropes (cubiques).



Figure : 10 Grenats : de gauche à droite, grenat hélicitique (Demant et al., 1988), section de grenat dans un micaschiste des Maures observé en LP et LPA.

II. Les silicates d'alumine Disthène - Andaloussite - Sillimanite

Ces trois minéraux sont des polymorphes c'est-à-dire des minéraux ayant la même composition chimique mais cristallisant dans des systèmes cristallins différents. Ces silicates d'alumine sont des néosous-silicates qui répondent à la formule chimique suivante Al_2SiO_5 . Ils ne sont pas stables dans les mêmes conditions de pression - température (voir courbe en rouge sur la figure 22). Leur coexistence (exceptionnelle) permet de contraindre les conditions de pression-température du métamorphisme.

II.1. Andaloussite

Cristallise dans le système orthorhombique. C'est le polymorphe de basse pression que l'on rencontre surtout dans le métamorphisme de contact mais aussi le métamorphisme régional de basse pression-haute température.

Lumière polarisée

- Sections automorphes mais pœcilitique (renferme des inclusions de quartz principalement), cristaux allongés, subcarrés (sections basales) ou rectangulaires (sections longitudinales).
- Incolores
- Présence d'inclusions noires en forme de croix qui sillonnent les cristaux (variété chiastolite), ce sont des inclusions charbonneuses.
- Pas de pléochroïsme.
- Une ou deux directions de clivage bien visibles.
- Relief élevé.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence faibles grises à jaunes du 1^{er} ordre.
- Extinction droite.



Figure 11 Cristal d'andalousite présentant des inclusions charbonneuses en croix (variété chiastolite)

II.2. Disthène

Cristallise dans le système triclinique. C'est le polymorphe de haute pression que l'on rencontre surtout dans le métamorphisme des zones de subduction (gradient barrovien) et dans le métamorphisme régional de température et pression moyennes des séries pélitiques (exemple des micaschistes du Massif des Maures).

Lumière polarisée

- Sections automorphes en prismes aplatis
- Incolores (bleu pâle en macro)
- Pas de pléochroïsme.
- Une ou deux directions de clivage (angle de 80°), bien visibles mais très serrées qui donnent aux cristaux un aspect gris. Aspect de barreaux d'échelle.
- Relief élevé.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence faibles grises du 1^{er} ordre.
- Extinction oblique pour les sections à un seul clivage (30°).

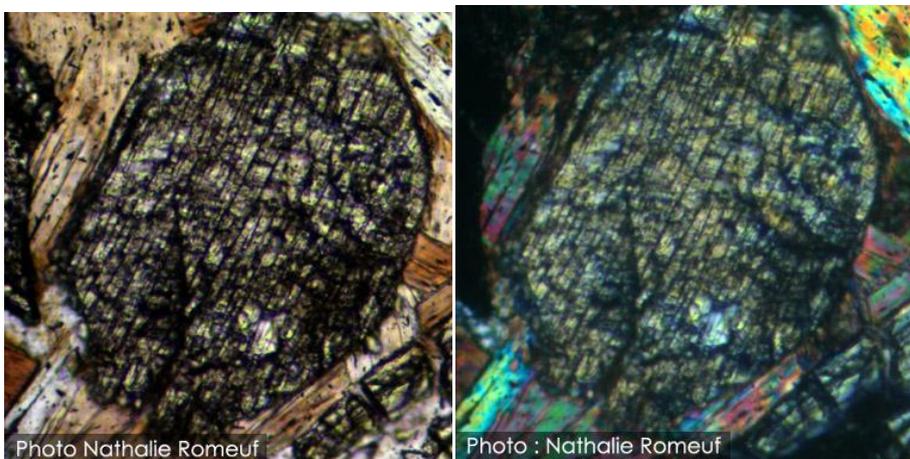


Figure 12 Cristal de disthène dans un gneiss du Massif des Maures (LP à gauche, LP à droite)

II.3. Sillimanite

Cristallise dans le système orthorhombique. Assez fréquent dans le métamorphisme régional de haut degré (faciès amphibolite et granulite).

Lumière polarisée

- Sections automorphes, prismatiques (rares) ou en amas fibreux (amas flexueux = variété fibrolite)
- Incolores, limpides mais aspect fréquemment gris sale en raison de l'altération
- Pas de pléochroïsme.
- Une direction de clivage pour les sections prismatiques.
- Relief élevé.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence, fin du 1^{er} ordre, début du 2^{ème} ordre.
- Extinction droite



Photos : Jean-Jacques Cochemé

Figure 13- Cristaux de sillimanite en amas chevelu ou flexueux (variété fibrolite)

III. La staurotide

Famille des nesosubsilicates de composition chimique proche de celle des silicates d'alumine. Du fer rentre cependant dans sa structure et c'est en outre un minéral hydraté. Sa formule chimique est assez complexe $Al_2 [O SiO_4]Fe(OH)_2$. On peut souligner la présence d'oxygènes non liés à la silice.

Souvent associée au disthène et au grenat dans les séries du métamorphisme régional.

Cristallise dans le système orthorhombique

Lumière polarisée

- Sections automorphes, sections pseudo-hexagonales (cercueil) ou rectangulaires
- Minéral jaune
- Léger pléochroïsme.
- Pas de clivage mais cassures abondantes.
- Relief élevé.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence faible gris blanc à blanc du 1^{er} ordre
- Extinction droite
- Macles fréquentes par pénétration combinant deux individus se croisant soit à 90° (macle de la croixette) soit à 60° (macle croix de Saint André)

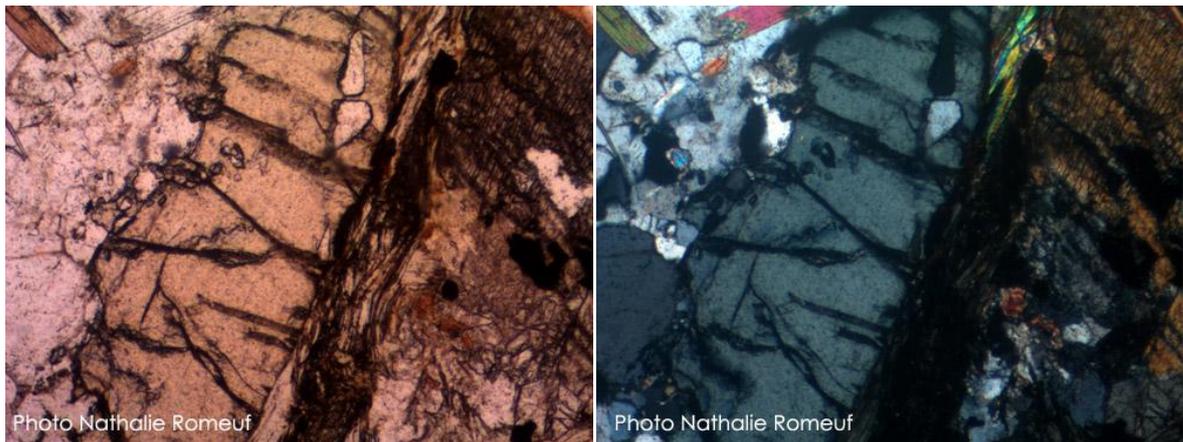


Figure 14 - Cristal de staurotide. Micaschiste du Massif des Maures

IV. La cordiérite

Appartient à la famille des cyclosilicates (silicates à charpente en anneaux). La formule chimique $Mg_2Al_3[AlSi_5O_{18}]$ montre qu'il s'agit d'un silicate d'alumine magnésien.

Cristallise dans le système orthorhombique.

Apparaît dans le métamorphisme de contact avec l'andalousite et dans le métamorphisme régional de moyenne à haute température et basse pression

Elle s'altère facilement et c'est surtout grâce à ses produits d'altération que l'on peut la reconnaître. Elle est progressivement envahie, depuis la périphérie et les craquelures, par de la pinnite (variété de mica blanc microscopique riche en eau). Au début de son altération, la cordiérite est entourée par une auréole jaune clair pléochroïque et isotrope en LPA.

Lumière polarisée

- Sections rarement automorphes, plages globuleuses pœcilitiques
- Incolore mais l'altération lui confère une coloration jaunâtre
- Inclusions de zircons fréquentes.
- Clivages invisibles, craquelures irrégulières
- Relief faible identique à celui du quartz.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence faibles blanc à jaune du 1^{er} ordre
- Extinction droite indéterminable
- Macles polysynthétiques fréquentes

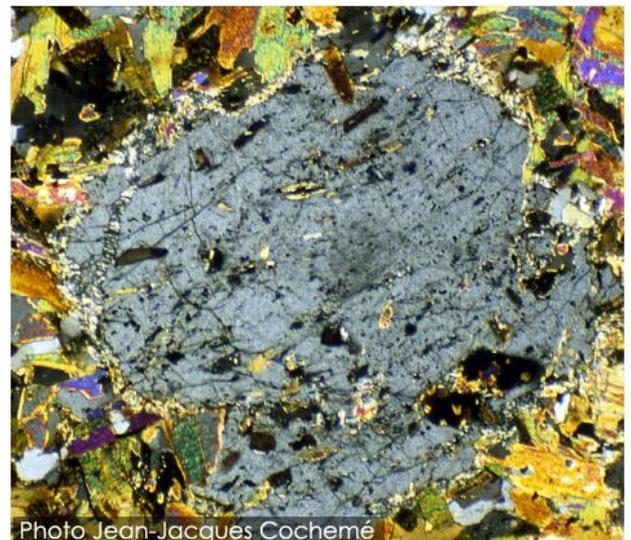


Figure 15 Cristal de cordiérite (LPA)

V. Les épidotes

Il s'agit d'une vaste famille de minéraux cristallisant dans le système orthorhombique ou monoclinique. Elles appartiennent à la famille des sorosilicates, caractérisés par la présence de

tétraèdres silicatés associés deux par deux ($[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$), d'oxygènes non liés au silicium, d'ions OH^- et enfin de tétraèdres isolés (SiO_4). Suivant les cations présents dans la structure, on distingue :

- la zoïsite $[\text{Si}_2\text{O}_7 | \text{SiO}_4 | \text{O} | \text{OH}]\text{Ca}_2\text{Al}_3$
- la clinozoïsite même composition que la zoïsite mais cristallisant dans le système monoclinique
- la pistchite $[\text{Si}_2\text{O}_7 | \text{SiO}_4 | \text{O} | \text{OH}]\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{Fe}^{3+},\text{Al})$
- la piedmontite $[\text{Si}_2\text{O}_7 | \text{SiO}_4 | \text{O} | \text{OH}](\text{Ca},\text{Mn})_2\text{Al}_2(\text{Fe}^{3+},\text{Al})$
- l'allanite, épidote riche en terres rares.

Les épidotes cristallisent le plus souvent sous forme de petits grains imbriqués, rarement automorphes, présentant une ou deux directions de clivage. Le relief est toujours fort.

La pistachite est la variété la plus commune. Zoïsite, clinozoïsite et pistachite sont des minéraux qui se développent aux dépens des plagioclases et des amphiboles calciques lors de l'altération hydrothermale des roches magmatiques? Ce sont aussi des minéraux communs dans les roches du métamorphisme régional de bas degré (jusqu'au faciès schistes verts).

Lumière polarisée

- Sections rarement automorphes, cristaux prismatiques allongés striés, rarement tabulaires, parfois en agrégats ou masses fibreuses
- Jaunes à verdâtres
- Clivage facile
- Pléochroïsme marqué allant du jaune pâle au vert jaune.
- Relief fort.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence fin du 1^{er} ordre -début du 2^{ème} ordre. La teinte varie à l'intérieur d'une même section ce qui donne le "manteau d'arlequin" caractéristique de ce minéral.
- Extinction oblique (30°) indéterminable le plus souvent
- Macles polysynthétiques fréquentes

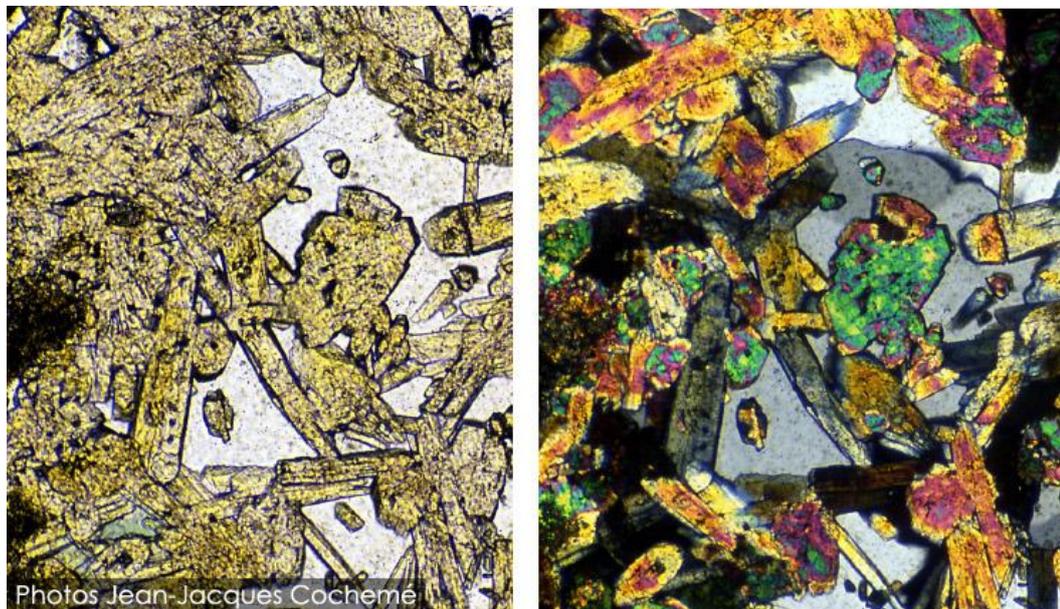


Figure 16 : Cristaux d'épidote (LP à droite et LPA à gauche) Noter le manteau d'arlequin caractéristique de ce minéral.

VI. Les amphiboles des roches métamorphiques

VI. L'actinote

L'actinote est une amphibole présente dans de nombreuses roches métamorphiques. Il s'agit d'une amphibole calcique que l'on observe fréquemment en auréole réactionnelle autour de pyroxènes magmatiques ayant subi un phénomène d'hydratation. On la trouve dans les schistes et cornéennes.

Lumière polarisée

- Souvent automorphes en prismes ou en baguettes allongées sous forme d'aiguilles ou parfois de fibres.
- Clivages identiques à ceux de toutes les amphiboles
- Relief moyen à fort
- Généralement de couleur verte mais plus pâles que les hornblendes
- Pléochroïsme net du vert jaune au vert bleuté.

Lumière polarisée et analysée

- Biréfringence forte,
- Teintes de polarisation vives du second ordre
- Extinction oblique 11- 17°
- Macle fréquente

VI.2. Le glaucophane

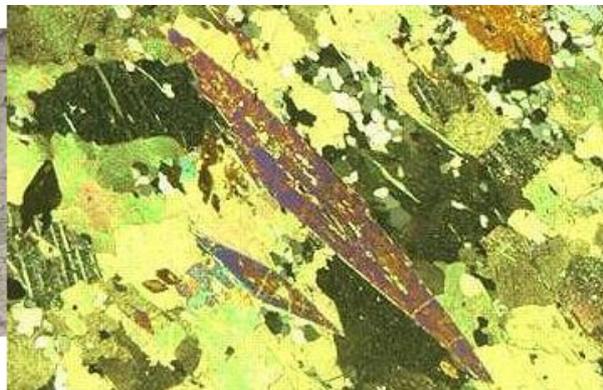
Le glaucophane est le pôle magnésien de la solution solide glaucophane-riebeckite. C'est une amphibole sodique (inosilicates à double chaîne) qui apparaît exclusivement dans les roches métamorphiques de haute pression (faciès schistes bleus). Elle présente les caractères optiques de toutes les amphiboles.

Lumière polarisée

- Sections automorphes, losangiques à aciculaires.
- Coloration bleue lavande
- Pléochroïsme net direct.
- 1 clivage en section longitudinale et deux clivages à 60° en section basale

Lumière polarisée et analysée

- Teintes de biréfringence basses fin du 1^{er} ordre
- Extinction oblique avec un angle faible 2 à 8°
- Macles fréquentes



Photos : Philippe Münch

Figure 17 - Cristaux de glaucophane dans un marbre (le fond de la roche est granoblastique et composé de cristaux de calcite)

VII. La chlorite

La chlorite est un phyllosilicate hydraté (environ 10% d'eau) de composition ferro-magnésienne et pauvre en Potassium. Il existe de nombreuses solutions solides mais les caractéristiques optiques sont assez semblables.

La chlorite cristallise dans le système monoclinique, mais elle est pseudo-hexagonale. Elle est donc très proche de la biotite mais se différencie principalement par sa richesse en eau et sa pauvreté en potassium par rapport à la biotite.

La chlorite étant stable dans un assez vaste domaine de Pression et de Température, elle peut apparaître dans les conditions de surface. Il ne s'agit alors pas de phénomène de Métamorphisme mais altération. C'est ce qui explique sa présence dans certaines roches magmatiques où elle remplace plus ou moins complètement tous les silicates ferro-magnésiens (biotite surtout, amphiboles, pyroxènes...). Les Chlorites d'altération présentent souvent des inclusions d'oxydes de fer disposées suivant les plans de clivage). Elle est présente dans les roches du métamorphisme régional de bas degré (faciès schistes verts).

Lumière polarisée

- Forme subautomorphe à automorphe : sections longitudinales rectangulaires et sections basales subhexagonales. Couleur verte plus ou moins foncée. Parfois presque incolore. Prend fréquemment la forme du minéral qu'elle remplace
- Pléochroïsme direct et variable en fonction de l'intensité de la couleur. Sections basales non pléochroïques.
- 1 Clivage plus ou moins facile, uniquement visible sur les sections allongées.
- Cassures rares voire absentes.
- Relief positif moyen.

Lumière polarisée et analysée

- Teintes anormales, masquées par la couleur du minéral. Elles peuvent être bleu-nuit (teinte la plus caractéristique), bleu-violacé, brun.
- Extinction droite pour les sections avec le clivage visible. Sections basales toujours éteintes.
- Pas de macle.

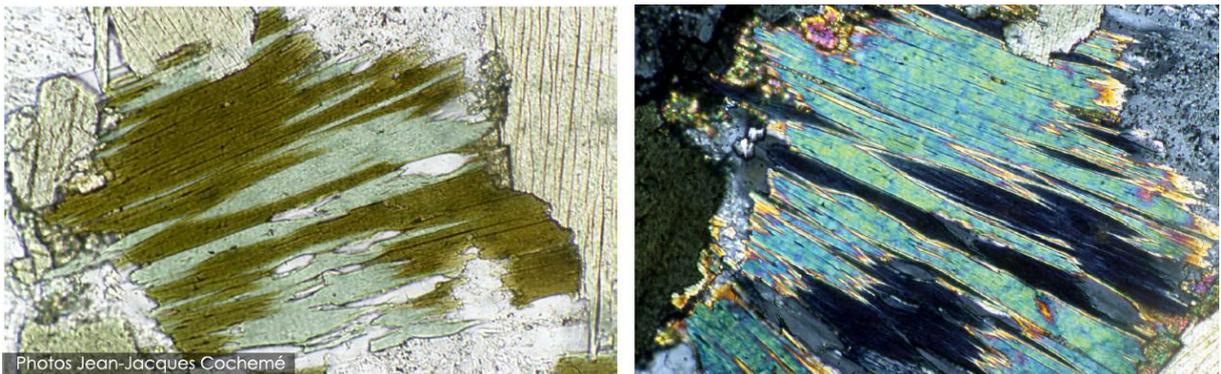


Figure 18 - Chlorite (vert pâle en LP, bleu nuit en LPA) remplaçant une biotite (brune en LP, teinte de biréfringence du 2^{ème}-3^{ème} ordre en LPA)

VIII. Le chloritoïde

Le chloritoïde est un minéral qui se rapproche des micas et des chlorites. Sa formule chimique est assez complexe ; $(\text{Fe},\text{Mg})\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_2$. Ce minéral contient des oxygènes non liés à de la silice et la présence d'ion OH-. Il s'agit donc d'un minéral hydraté.

Le chloritoïde est un minéral caractéristique des schistes peu métamorphiques (faciès schistes verts) correspondant à un métamorphisme de faible pression et faible température.

Lumière polarisée

- Automorphes : rectangulaire
- Cassures fréquentes perpendiculaires à l'axe d'allongement
- 1 clivage bon
- Verdâtre,
- Pléochroïsme : vert olive ou gris verdâtre à incolore
- Relief fort

Lumière polarisée et analysée

- Biréfringence : faible à moyenne
- Teintes de biréfringence : Gris à orangé du 1er ordre, souvent anormales avec des teintes lie de vin à verdâtre.
- Extinction oblique 3 à 30°

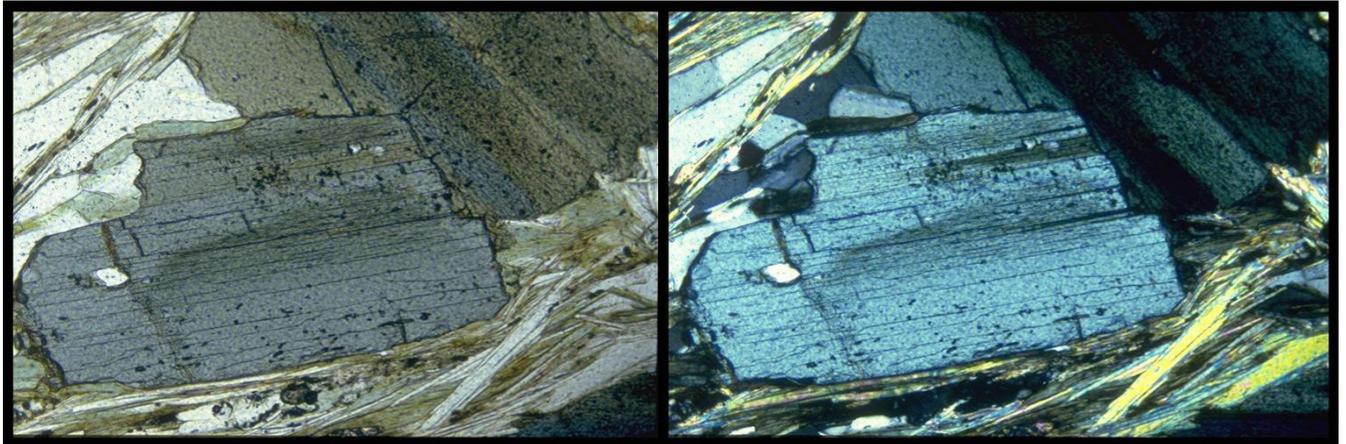


Figure 19 - Chloritoïde <http://www.zpag.net/Mineraux/C/Chloritoide.htm>

BIBLIOGRAPHIE

MACKENZIE W.S. et ADAMS A.E. Initiation à la pétrographie. - 2005 Dunod ed. Paris.

BEAUX J.-F., FOGELGESANG J.-F, AGARD Ph., BOUTIN V., 2011. - Atlas de géologie - Pétrologie BCPST 1ère et 2ème année. Dunod ed., Paris.

PONS J.-C., La pétro sans peine volume 1 Minéraux et roches magmatiques, volume 2 Minéraux et roches métamorphiques. 2000 Focus CDP de l'Académie de Grenoble.

BEAUX J.-F., PLATEVOET B., FOGELGESANG J.-F., 2012 Atlas de pétrologie, Dunod ed., 144 p.,

YARDLEY B.W.D., MACKENZIE W.S. et GUILFORD C., 1995, Atlas des roches métamorphiques, Masson ed, 120 p.

DEMANGE M. Les textures des roches cristallines. Aspects microscopiques. 2011 - Mines ParisTech, Coll. Sciences de la Terre et de l'Environnement.

NICOLLET C. Métamorphisme et géodynamique. - 2010 - Dunod editeurs, Coll. Sciences sup., Paris.

MÜNCH P. 2000, Site internet de pétrologie magmatique. Université de Provence (site n'existant plus aujourd'hui)

Illustrations tirées aussi de :

DEMANT A., COCHEME J.-J. et AGUIRRE L. Travaux pratiques de pétrographie. 2ème partie Les minéraux des roches magmatiques et métamorphiques. 1988. Université des Sciences Saint Jérôme, Aix-Marseille III.
