



Reconnaissance des minéraux

Pétrologie endogène

Cyril Langlois

20 octobre 2007

1 Microscope polarisant et optique minérale

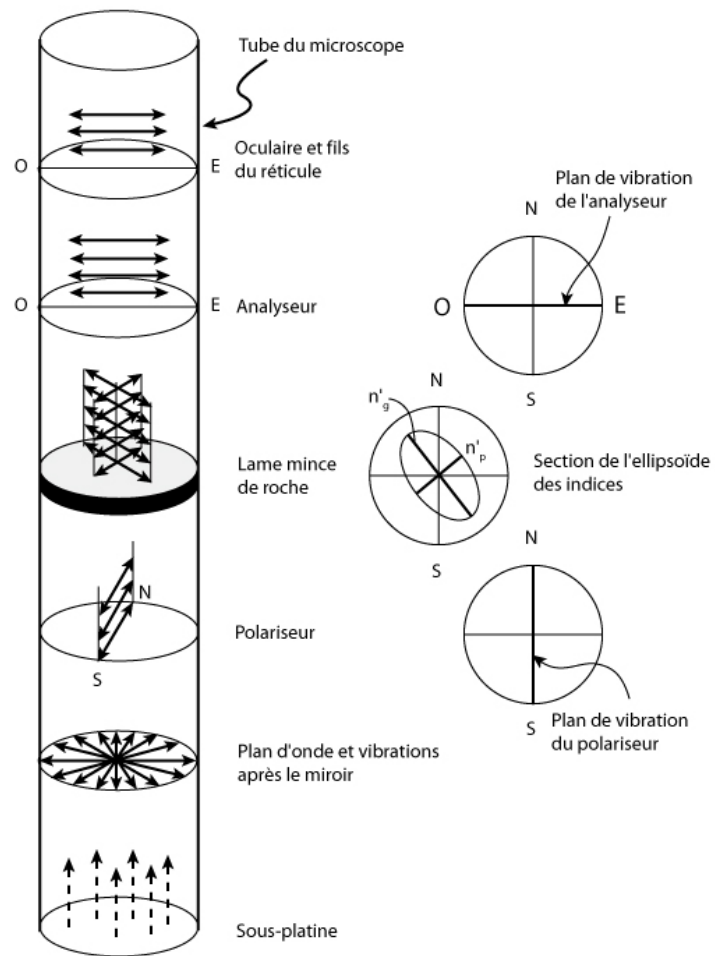
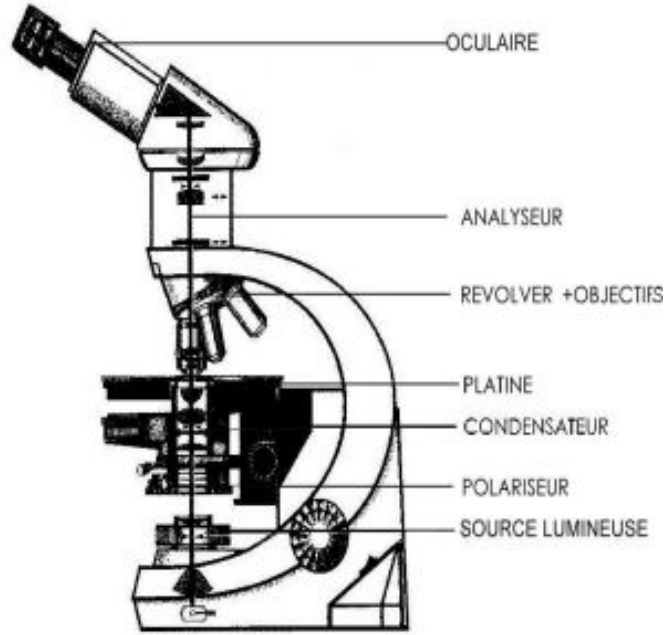
1.1 Le microscope polarisant

Fonctionnement du microscope polarisant

- La lumière réfléchiée par le miroir est polarisée rectilignement par le *polariseur* \Rightarrow **Lumière Polarisée Non Analysée (LPNA)**
- Un rayon lumineux incident sur un minéral s'y propage en se séparant en deux rayons polarisés perpendiculairement, le *rayon ordinaire* et le *rayon extraordinaire*.
- Dans un cristal anisotrope :
 - Les deux rayons progressent dans le cristal à des vitesses différentes, caractérisées par leurs *indices de réfraction* n_i .
 - Le rayon ordinaire se propage à la même vitesse dans toute les directions.
 - Le rayon extraordinaire progresse à des vitesses différentes selon sa direction de propagation.

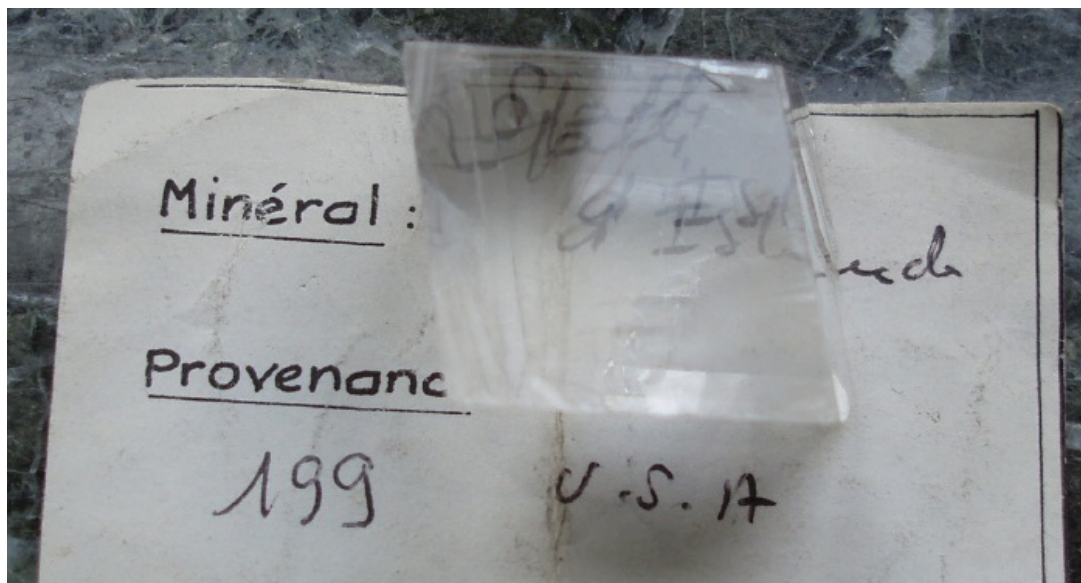
$$n_i = \frac{C}{v_i} \quad \left| \begin{array}{l} C, \text{ vitesse de la lumière dans le vide;} \\ v_i, \text{ vitesse de la lumière dans le cristal selon la direction } i. \end{array} \right.$$

- La **biréfringence** est *l'écart d'indice maximum* des deux rayons. \Rightarrow **biréfringence** = $(n_g - n_p)$.
- La lumière sortant du cristal peut être de nouveau polarisée par *l'analyseur*. Seule la composante parallèle à la direction de l'analyseur arrive à l'observateur. \Rightarrow **Lumière Polarisée Analysée (LPA)**.
- L'observateur se repère sur la lame à l'aide des fils croisés du *réticule*.

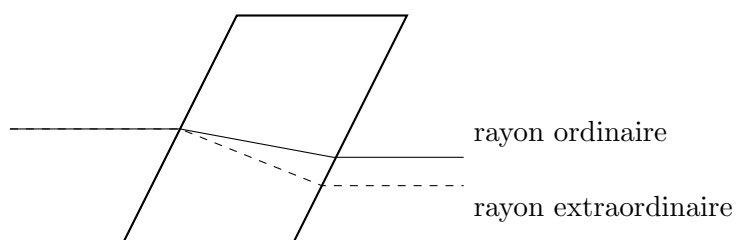


Fonctionnement schématique du microscope polarisant

Propriétés optiques des minéraux

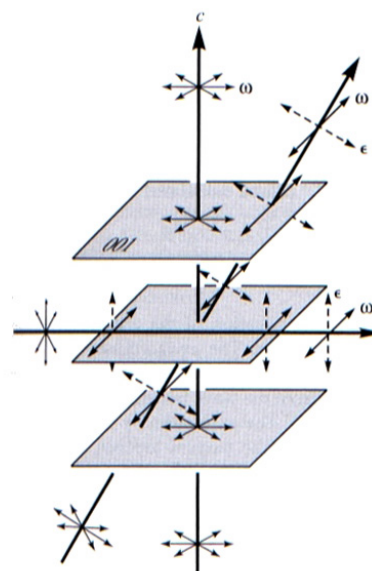


Double réfraction dans un cristal de calcite (« spath » d'Islande)



Comportement de la lumière dans la calcite.

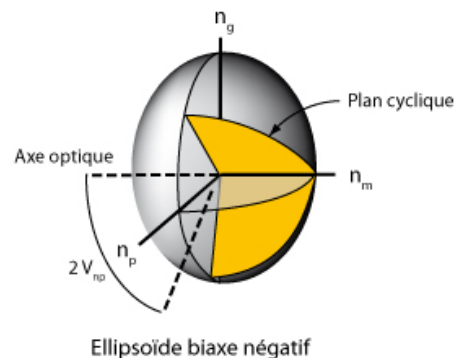
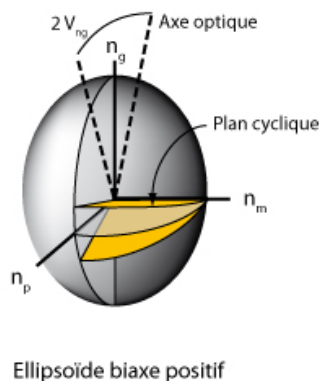
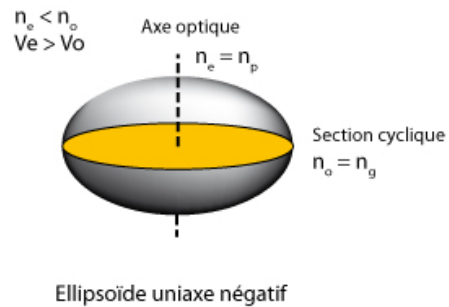
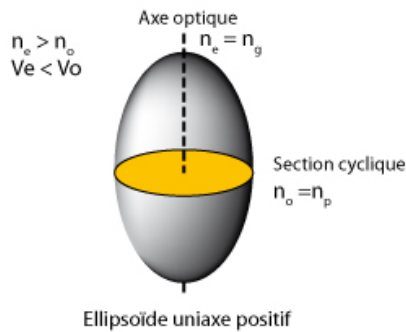
- La lumière que se propage selon l'axe c (axe optique) vibre dans le plan (001) et passe entièrement en rayon ordinaire (ω), car l'environnement électronique est uniforme dans toute les directions dans (001) .
- La lumière entrant à angle droit de c est divisée en un rayon ordinaire, vibrant dans (001) , et un rayon extraordinaire (ϵ) qui vibre parallèlement à l'axe c . La différence d'indice entre les deux rayons est maximale, la biréfringence est donc maximale.
- La lumière qui traverse le cristal selon une direction quelconque est décomposée en un rayon ordinaire, vibrant dans (001) et un rayon extraordinaire vibrant avec un certain angle par rapport à (001) . Ce rayon a un indice intermédiaire n'_ϵ , la biréfringence est donc intermédiaire.



Dans une lame mince, la direction de la lumière incidente est fixée, c'est l'orientation de la section du minéral qui est aléatoire.

Ellipsoïde des indices

- Au bout d'un même temps t , les rayons lumineux *ordinaire* et *extraordinaire* qui traversent le minéral atteignent des points qui dessinent un *ellipsoïde* (ellipsoïde des vitesses ou des indices).
- Si les deux indices de réfraction sont identiques, l'ellipsoïde est une *sphère*.
- On appelle *section cyclique* un plan du minéral ne contenant qu'un **seul indice**. La normale à ce plan est un *axe optique* du cristal.
- Un ellipsoïde des indices ne contenant qu'un plan cyclique est dit *uniaxe*. S'il en contient deux, c'est un ellipsoïde *biaxe*.
- Un *ellipsoïde uniaxe* présente :
 - Un axe optique, également axe de révolution de l'ellipsoïde.
 - Un plan cyclique.
 - deux axes principaux, n_p (petit indice, grande vitesse) et n_g (grand indice, faible vitesse).
 - Les deux axes n_p et n_g (grand indice, faible vitesse) correspondent aux indices extraordinaires, n_e , et ordinaire, n_o .
 - Si $n_e < n_o$, l'ellipsoïde est dit *uniaxe positif*
 - Si $n_e > n_o$, l'ellipsoïde est dit *uniaxe négatif*
- Un *ellipsoïde biaxe* présente :
 - trois axes principaux, n_g , n_m et n_p .
 - deux sections cycliques (deux axes optiques).
 - Si la bissectrice des axes optiques est l'axe n_g , l'ellipsoïde est *biaxe positif (+)*
 - Si la bissectrice des axes optiques est l'axe n_p , l'ellipsoïde est *biaxe négatif (-)*



Les propriétés optiques des minéraux sont liées à leur système cristallin :

- Les minéraux du système cubique sont *isotropes* et leur ellipsoïde des indices est donc une *sphère*.

- Les minéraux possédant un axe de symétrie d'ordre ≥ 2 présentent un ellipsoïde uniaxe.
- Les minéraux possédant un axe de symétrie d'ordre ≤ 2 présentent un ellipsoïde biaxe.
- On note n' (n'_g, n'_p) les projections des axes de l'ellipsoïde des indices sur le plan de section du minéral.

1.2 Critères d'identification des minéraux

Forme et *habitus* des minéraux

Les sections d'un minéral (« plages » de minéral) en lame mince présentent des formes qui constituent le premier critère de reconnaissance et qui donnent des indications sur l'ordre de cristallisation et/ou la vitesse de cristallisation des différents minéraux d'une roche.

On distingue des cristaux :

- *Automorphes*, à section géométrique et régulière.
- *Subautomorphes*, à section géométrique partiellement régulière ;
- *Xénomorphes*, de section irrégulière ;
- *Pæcilitiques*, contenant de nombreuses inclusions d'autres minéraux.

Définition 1. *Un minéral peut se présenter en cristaux de formes différentes. On appelle habitus la forme majoritairement présentée par les cristaux d'un minéral dans un échantillon.*

- L'habitus est décrit en référence à des formes géométriques simples : globuleux, carré, en lattes, en plaquettes, etc.
- L'habitus des minéraux peut être un critère de reconnaissance.
- Les amphiboles présentent souvent un habitus en baguette allongée, les pyroxènes en pavé trapu, la sillimanite en fibres, etc.
- Des minéraux appartenant au même système cristallin peuvent avoir des habitus différents : le diamant (syst. cubique) a un habitus en octaèdre, la pyrite (syst. cubique) en cube.

Pléochroïsme

En lumière polarisée non analysée (**LPNA**) :

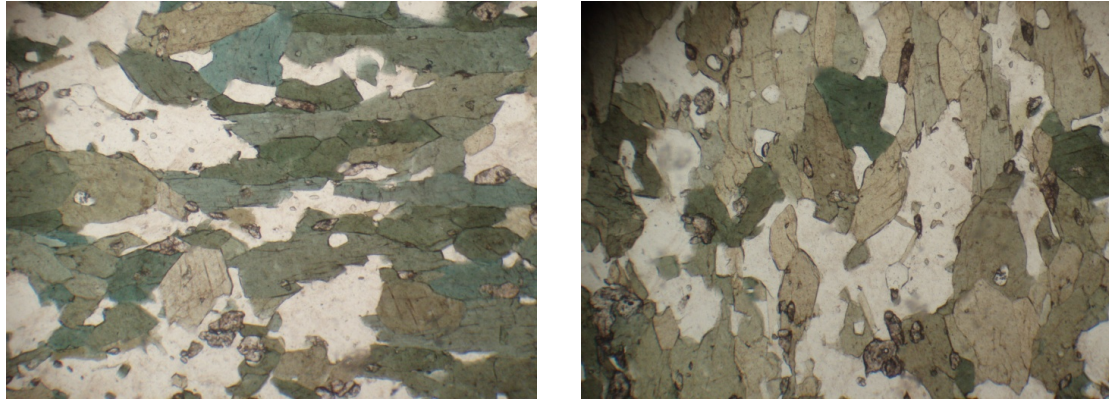
- Certains minéraux absorbent l'intégralité du spectre visible \Rightarrow Minéraux **opaques**.
- D'autres n'absorbent aucune longueur d'onde \Rightarrow Minéraux **incolors**.
- Certains minéraux absorbent différentes longueurs d'onde selon l'orientation de leurs axes optiques par rapport au plan de polarisation de la lumière et la section de leur ellipsoïde des indices.
 - Seules arrivent à l'œil les longueurs d'ondes complémentaires du spectre.
 - La couleur du minéral va donc changer lorsque l'on tourne la platine du microscope.
- Le minéral est **pléochroïque**.
- La couleur maximum (absorption maximum) s'observe quand n_g est aligné avec le polariseur.

En LPNA :

- Les minéraux du *système cubique* (un seul indice) n'ont qu'**une seule couleur** \Rightarrow pas de pléochroïsme ;
- Les minéraux *uniaxes vus en section cyclique* (1 indice) ont **une seule couleur** \Rightarrow pas de pléochroïsme ;
- Les minéraux *uniaxes vus en section non-cyclique* (2 indices) ont **deux couleurs** \Rightarrow minéraux *dichroïques* ;
- Les minéraux *biaxes* (3 indices) ont **trois couleurs** \Rightarrow minéraux *trichroïques*.

Pléochroïsme normal/inverse

- n_g peut être aligné avec la direction d'allongement du cristal ou la direction de clivage, ou oblique par rapport à ces directions ;
- Si la coloration maximum apparaît lorsque l'allongement du cristal est voisin de la direction du polariseur (N-S), le pléochroïsme est dit *normal* ;
- Si la coloration maximum apparaît lorsque l'allongement du cristal est proche de la perpendiculaire à la direction du polariseur (E-W), le pléochroïsme est dit *inverse* ;



Pléochroïsme jaune-vert de l'amphibole hornblende verte.

(Cristaux verts : hornblende verte ; petits cristaux beige à fort relief : sphène ; cristaux blancs : plagioclases.)

Relief

- Les minéraux d'une lame mince ont un ou des indices de réfraction plus ou moins proches de celui du milieu de montage (résine).
- Plus la différence d'indice est faible, plus les limites du minéral sont difficiles à distinguer.
- Inversement, plus la différence est importante, plus le minéral apparaît « en relief » sur la lame. Ce relief est lié à des phénomènes de réflexion totale de la lumière à l'interface des deux milieux d'indices différents.
- Le relief d'un minéral en LPNA est un critère de reconnaissance.
- Puisque le relief dépend des indices de réfraction, il varie selon la section du minéral et la position de la platine.

Mesure du relief

Par définition, le quartz ($n=1,54$) et la résine de montage ont un *relief nul*. Un minéral d'indice $< 1,54$ a un relief *négatif*. Un minéral d'indice $> 1,54$ a un relief *positif*.

Qualification du relief

Indice	Relief	Exemples
1,52 - 1,54	Faible ou nul	Quartz, feldspath
1,60 - 1,65	Moyen	Muscovite, biotite
1,80	Fort	Grenat, pyroxène
$> 1,80$	Très fort	Sphène, zircon

La technique de la « *frange de Becke* » permet de comparer les reliefs de deux minéraux ou le relief d'un minéral à celui de la résine de montage.

Méthode de la frange de Becke

- À fort grossissement en LPNA, on se place à l'interface de deux minéraux de relief différents (ou d'un minéral et du milieu de support).
- Le minéral de plus fort relief présente un liseré brillant.
- Lorsqu'on diminue la distance de l'objectif à la lame, le liseré se déplace vers le milieu le plus réfringent (= de plus grand indice, de plus fort relief), et inversement.

Clivages

- Certains minéraux peuvent se fendre (se *cliver*) selon des familles de plans cristallographiques particuliers où les liaisons atomiques sont plus faibles (*plan de clivage*).
- La présence ou l'absence de clivage, l'orientation des plans de clivage par rapport aux faces cristallines et les uns par rapport aux autres sont des critères de reconnaissance des minéraux.

Exemples

Pyroxène : deux séries de plans de clivages à $\sim 90^\circ$

Amphibole : deux séries de plans de clivages à $\sim 120^\circ$

- La détermination précise des angles de clivage ne peut se faire que sur une section perpendiculaire aux plans de clivage.

Macles

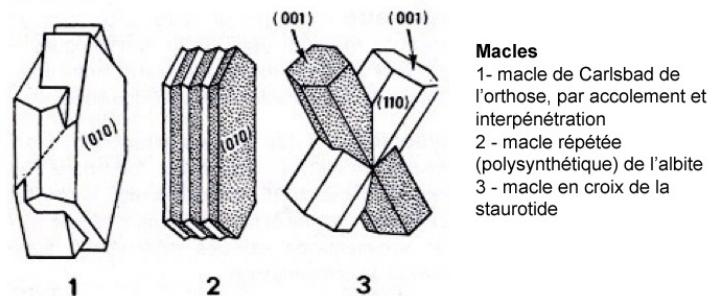
- Certains minéraux forment lors de leur croissance des *macles*. Ce sont deux ou plusieurs cristaux du même minéral (*individus*), accolés mais orientés différemment.
- Les cristaux sont liés par une rotation autour d'un axe cristallographique, une réflexion sur un plan du cristal, etc.

Exemples

Feldspath orthose : macle de Carlsbad

Feldspaths plagioclases : macle polysynthétique

- Lorsque la macle est répétée à plusieurs reprises, elle est dite *polysynthétique*.



Macles utiles à l'identification des minéraux

- *Carlsbad* : deux individus accolés dans le plan d'allongement du minéral. Dans les *feldspaths alcalins*.
- *Péricline* : deux individus accolés perpendiculairement au plan d'allongement du minéral. Certains *feldspaths alcalins*.
- *Microcline* : Carlsbad + péricline \Rightarrow « quadrillage ». Typique du feldspath *microcline*.
- *En sablier* : quatre cristaux associés deux à deux en triangle opposés par les sommets. Fréquente dans les *pyroxènes*.
- *Vicinale* : macle polysynthétique sans trace nette du plan de macle. Dans *l'olivine*.

Extinction

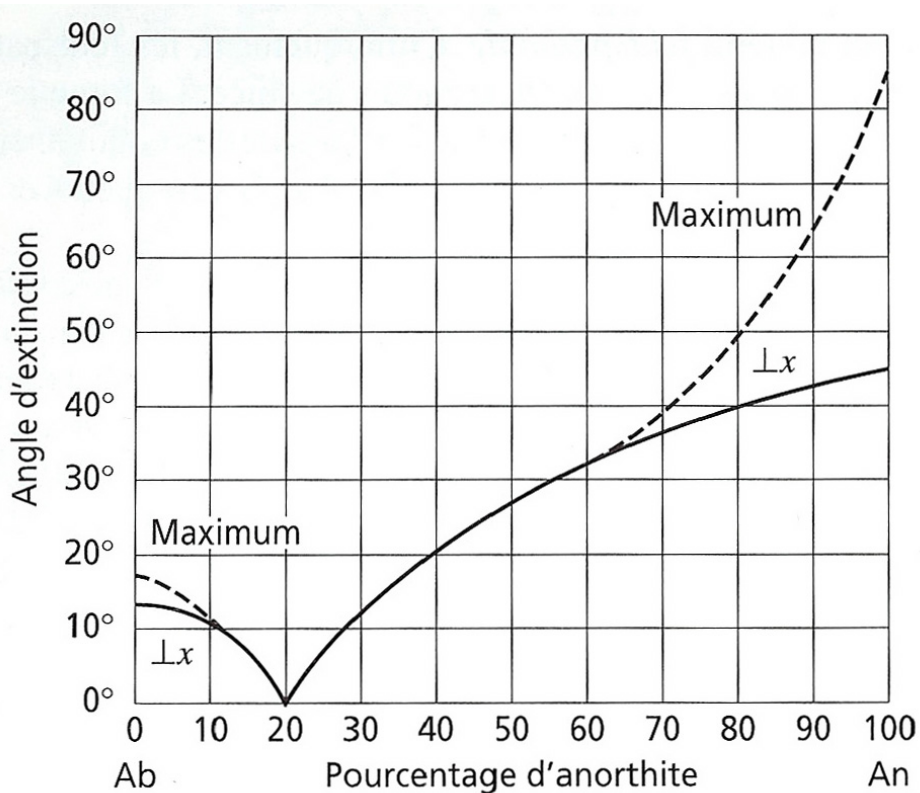
- Les plans de vibration du polariseur et de l'analyseur sont orientés perpendiculairement.
- *En l'absence de minéral*, la lumière, polarisée dans le plan de vibration du polariseur, est donc *arrêtée* par l'analyseur. Aucune lumière n'arrive à l'oculaire.
- La lumière traversant le minéral est à nouveau polarisée selon deux plans, différents de celui du polariseur.
- *En présence d'un minéral*, la lumière est arrêtée pour un nouvel angle entre polariseur et analyseur, et tous les 90° au cours de la rotation du polariseur.
- L'angle entre une direction cristallographique du minéral (direction d'allongement ou clivage, p.ex.) et sa position d'extinction est ***l'angle d'extinction*** du minéral.
- L'angle d'extinction d'un minéral est toujours inférieur à 45° . S'il est nul, on parle d'*extinction droite*. Dans le cas contraire, l'extinction est *oblique*.

Mesure de l'angle d'extinction des plagioclases

L'angle d'extinction, déterminé selon la *méthode de Michel-Lévy*, est un critère d'attribution du plagioclase observé à l'un des termes de la série des plagioclases (Ab – An).

Méthode de Michel-Lévy (LPA)

- Placer l'axe cristallographique du plagioclase dans la direction N-S. Le cristal doit être gris, avec la trace des plans de macle encore visible (position *d'égal éclairement*)
- Tourner la platine de 45° en sens horaire. Le cristal devient uniformément gris (position *d'éclairement commun*). Au cours de la rotation, une macle sur deux passent en position d'extinction. *Mesurer l'angle correspondant*.
- Recommencer l'opération dans le sens antihoraire. Les autres macles passent à l'extinction pour un angle symétrique du précédent.
- Répéter la mesure au moins 5 fois sur plusieurs sections. *Conserver la plus grande valeur obtenue*.



Relation entre la composition chimique et l'angle d'extinction dans la série des plagioclases. La ligne continue correspond aux sections perpendiculaires aux deux clivages, celle en tiretés aux sections taillées perpendiculairement à un seul clivage, le plan par rapport auquel les macles de l'albite sont des images miroirs.

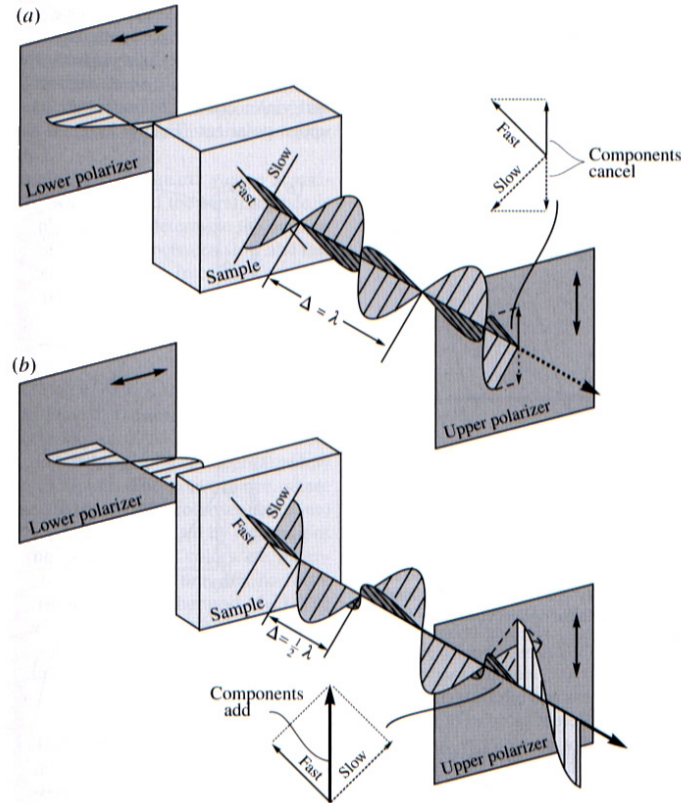
Au pôle sodique, deux compositions sont possibles pour un même angle d'extinction. La distinction peut se faire par la mesure de l'indice de réfraction : seuls les plagioclases An > 20% ont un indice > 1,54 (relief > 0)

Teintes de biréfringence

En lumière polarisée analysée (**LPA**) :

- À la sortie du minéral, l'un des rayons lumineux est *en retard* sur l'autre.
- Ce retard de phase entraîne l'interférence des deux ondes.
- L'interférence est destructive quand le retard est un *multiple entier de la longueur d'onde*.
- Les couleurs du minéral en LPA sont donc les *couleurs complémentaires* des longueurs d'ondes λ pour lesquelles :

$$\text{Retard} = k \times \lambda, k = 1, 2, \dots, n$$



Interférences après l'analyseur.

(a) – Le retard (Δ) égale une longueur d'onde. Les composantes des rayons lent et rapide selon la direction de l'analyseur sont de sens opposés et s'annulent. Aucune lumière ne passe l'analyseur. (b) – Le retard vaut une demi-longueur d'onde. Les composantes des rayons lent et rapide dans la direction de l'analyseur sont de même sens et interfèrent de façon constructive. La lumière passe l'analyseur et donne une couleur au minéral.

- Le retard de phase, et donc la teinte d'interférence du minéral, dépend de :
 - la biréfringence du minéral ;
 - l'épaisseur de la section ;
 - l'orientation de la coupe.

$$\text{Retard} = e \times (n'_g - n'_p) \quad \left| \begin{array}{l} e, \text{ épaisseur de la lame mince} \\ n'_g, n'_p \text{ projections des axes de l'ellipsoïde des} \\ \text{indices sur le plan de section} \end{array} \right.$$

- Les lames minces sont taillées à une épaisseur constante de $30 \mu\text{m}$.
- Un même minéral, se rencontrant sous plusieurs sections dans une lame, montre en LPA une gamme de couleurs différentes.

« Teintes » et « couleur » d'un minéral

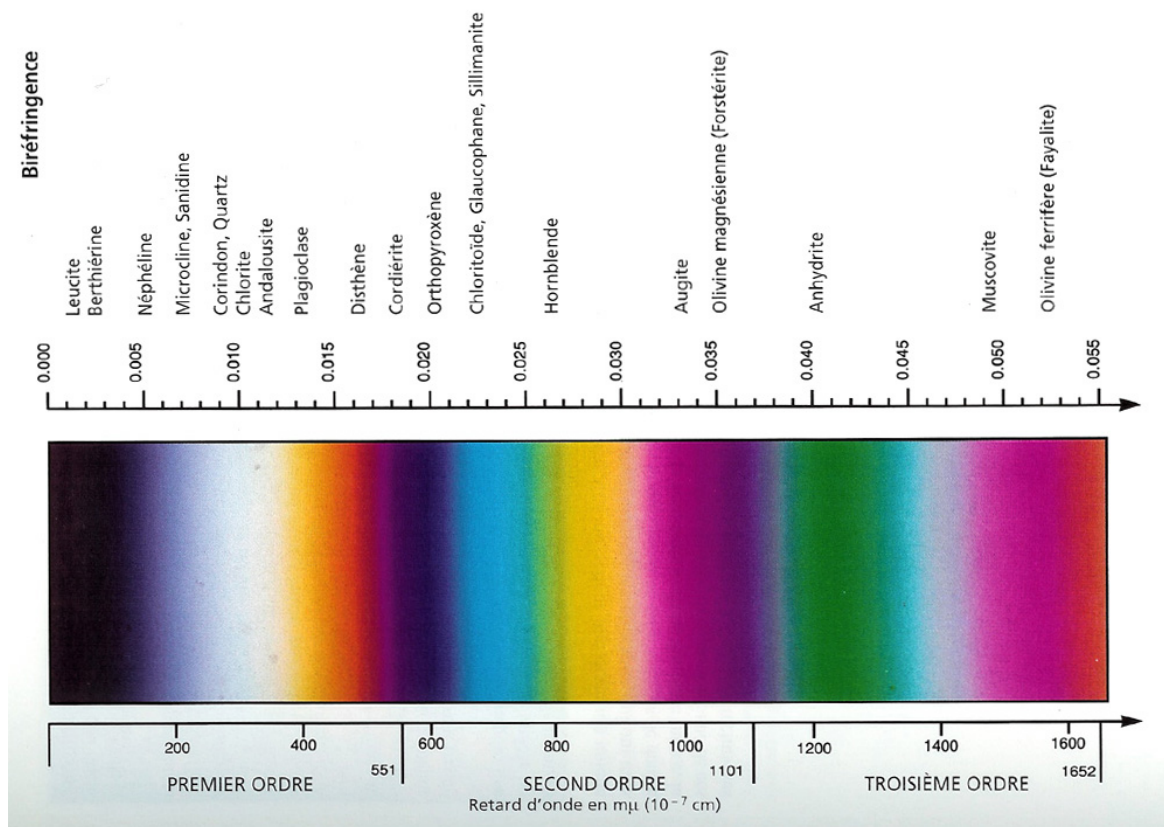
On parle donc en LPA de **teinte** d'interférence ou de polarisation plutôt que de couleur d'interférence du minéral. Le terme « couleur » est réservé au minéral examiné en LPNA.

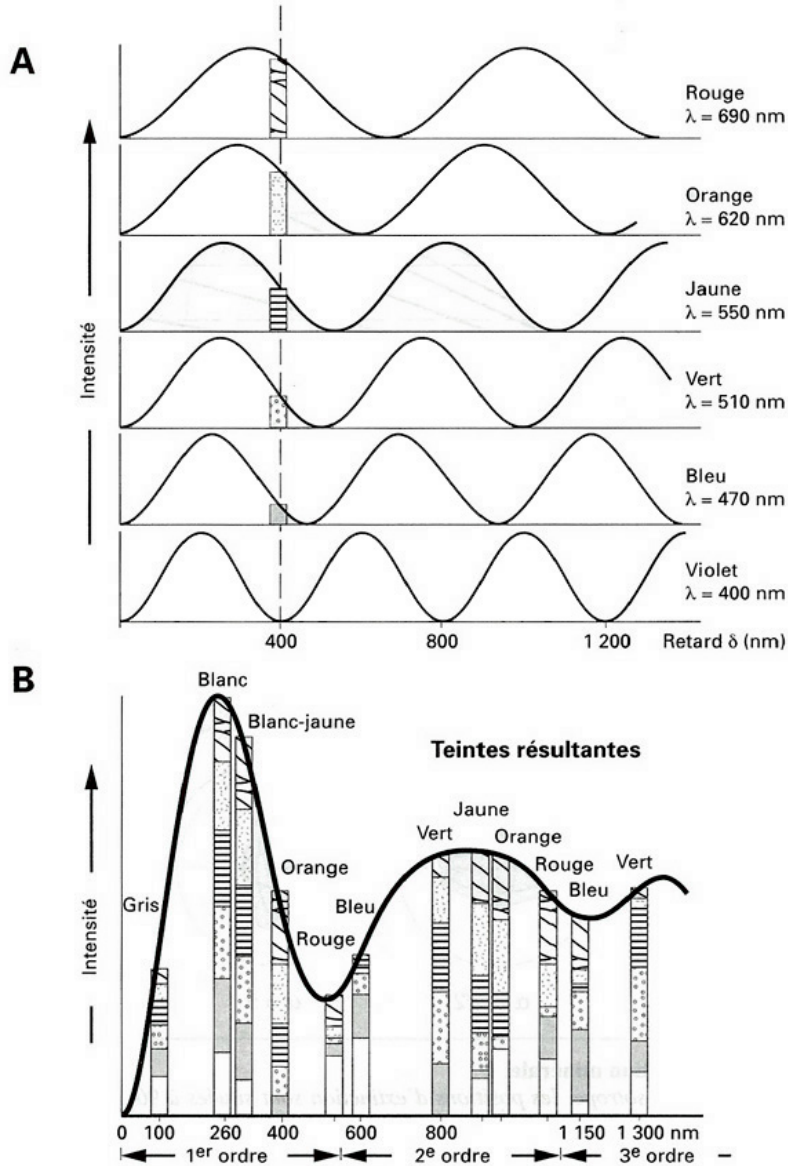
Échelle de biréfringence

- Chaque minéral se caractérise par une différence de vitesses *maximum*, $V_g - V_p$ (ou $n_g - n_p$), donc un retard maximum (une certaine valeur de *biréfringence*).

- Les *teintes de biréfringence* sont les complémentaires de longueurs d'ondes λ pour lesquelles *retard maximum* = $k \times \lambda$.
- Le minéral a ainsi un spectre de « teintes d'interférence maximum » correspondant à un multiple k d'un spectre de base.
- k est *l'ordre* du spectre de teintes du minéral.
- La teinte du minéral en LPA sera donc définie comme sa teinte de biréfringence maximum, positionnée sur une *échelle de biréfringence*. \Rightarrow Un minéral « polarise » dans les teintes du premier, second ou troisième ordre.
- Les minéraux du système cubique sont toujours éteints en LPA. ($n_g - n_p = 0$)
- La teinte effective d'un minéral dans une lame (fonction de $n'_g - n'_p$) sera comprise, selon sa section, entre le noir et sa teinte de biréfringence maximum.

Échelle des teintes de biréfringence des minéraux (échelle de Newton)





Les teintes de polarisation.

A : Intensités des longueurs d'onde de six couleurs du spectre du visible (violet, bleu, vert, jaune, orange et rouge) en fonction du retard δ . **B :** Teinte de polarisation en fonction du retard. La teinte observée pour un retard donné est la somme des intensités le long d'une ligne verticale (d'après R.E. Stoiber, 1994, modifiée).

1.3 Techniques d'identification avancées

Utilisation des lames auxiliaires

Définitions

Les lames auxiliaires sont des lames minces de cristal (gypse, mica), qui introduisent une différence de marche supplémentaire entre les rayons ordinaire et extraordinaire, donc un retard complémentaire à celui induit par la lame mince de roche observée.

Le déphasage des deux rayons est donc modifié, leur interférence à la sortie de l'analyseur également.

On emploie généralement des lames auxiliaires onde, demi-onde et quart d'onde.

- Lame *onde* (dite gypse *teinte sensible*) : le déphasage introduit vaut une longueur d'onde (teinte violette du 1^{er} ordre avec les lampes de microscope). Le retard total est donc augmenté d'une longueur d'onde.
- Lame *demi-onde* (mica) : le déphasage introduit vaut une moitié de longueur d'onde. La lumière produite par interférence au sortir de la lame auxiliaire est polarisée à 180° de la lumière sortant de la lame mince de roche.
- Lame *quart d'onde* (mica) : le déphasage introduit vaut un quart de longueur d'onde. La lumière produite par interférence au sortir de la lame auxiliaire est tournée de 90° par rapport à celle obtenue en l'absence de lame auxiliaire.

Détermination du signe d'allongement

Objectif : On veut déterminer lequel des deux indices de réfraction (n'_g ou n'_p) est le plus proche de la direction d'allongement ou de clivage du minéral.

On utilise :

- la lame de gypse teinte sensible pour les minéraux peu réfringents ;
- la lame quart d'onde pour les minéraux très réfringents.

Méthode

- Amener le minéral à l'extinction : allongement proche de (extinction oblique) ou parallèle à (extinction droite) la direction N-S ;
- Tourner la platine de 45° pour obtenir la position d'éclairement maximum ;
- Ajouter la lame auxiliaire ;
- Si la teinte de polarisation *augmente* dans l'échelle de Newton, (n'_g de la lame auxiliaire superposé à n'_g du minéral), *l'allongement est positif*.
- Si la teinte de polarisation *diminue* dans l'échelle de Newton (n'_g de la lame auxiliaire superposé à n'_p du minéral), *l'allongement est négatif*.

Détermination de l'ellipsoïde des indices

- L'ellipsoïde des indices d'un minéral peut être obtenu, *en LPA* à fort grossissement, en se plaçant sur une section du minéral considéré, à l'extinction, en *lumière convergente* et en utilisant la *lentille de Bertrand*.
- Dans cette configuration, tous les rayons lumineux passant à travers la section convergent vers l'objectif : on observe la *somme de toutes les propriétés optiques du minéral à travers toute l'épaisseur de la section, donc toutes les teintes de polarisation et toutes les extinctions*.
- Les points de même teinte de polarisation (même retard) se regroupent selon des *courbes isochromatiques*.
- Les points à l'extinction dessinent des *lignes neutres*.
- La géométrie de ces courbes permettent de différencier les minéraux uniaxes et biaxes.

Minéraux uniaxes en lumière convergente

- *Si la section du minéral est perpendiculaire à l'axe optique* (= section toujours éteinte) :
 - Les *lignes neutres* dessinent une **croix noire** ;
 - Les *courbes isochromatiques* s'organisent en **cercles concentriques** de retard croissant du centre vers l'extérieur.
- *Si la section du minéral est quelconque* :
 - La croix noire apparaît décentrée ;
 - Le *centre* de la croix décrit un cercle lorsque l'on tourne la platine ;

- Les branches de la croix se décalent avec le centre, en restant parallèles à elles-mêmes.

Minéraux biaxes en lumière convergente

- *Si l'on a une section cyclique* (éteinte, perpendiculaire à un axe optique) :
 - Les *lignes neutres* dessinent **une branche d'hyperbole** dont le sommet est la projection de l'axe optique ;
 - Lorsque l'on tourne la platine, cette figure tourne mais reste centrée.
- *Si la section est perpendiculaire à l'angle aigu des axes optiques* :
 - Les *lignes neutres* dessinent **deux branches d'hyperboles**, dont les sommets sont les axes optiques ;
 - Lorsque l'on tourne la platine, ces hyperboles s'éloignent ou se rapprochent l'une de l'autre.

Conclusion et bibliographie

Références

- [1] Hébert R., *Guide de pétrologie descriptive*. Collection Cahiers 128, Nathan Université, 1998.
- [2] MacKenzie W.S. et Adams A.E., *Initiation à la pétrographie*. **Dunod**, 1996.
- [3] Pons J.-C., *La pétro sans peine 2 - minéraux et roches métamorphiques*. Editions du CRDP, académie de Grenoble, Collection Focus, 2001.
- [4] [Webmineral](#), Atlas de minéralogie en ligne développé par le BRGM.