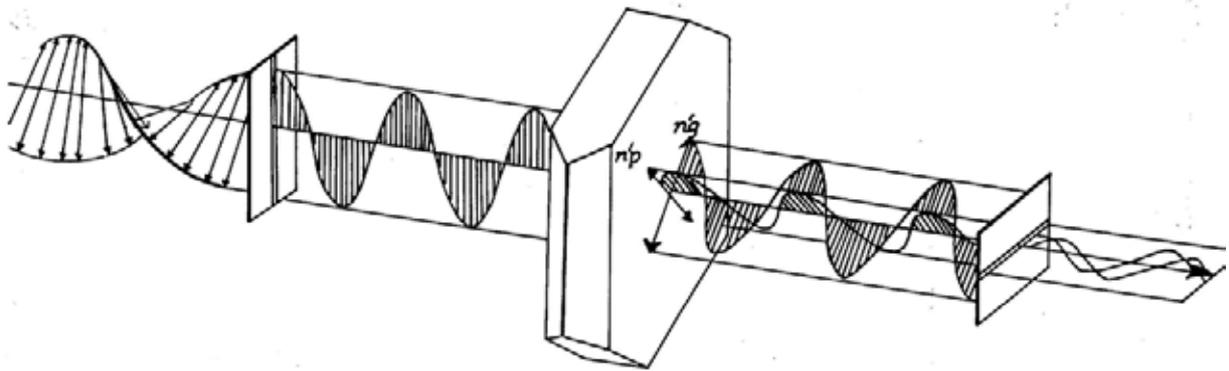


# *THEORIE ET EMPLOI DU MICROSCOPE POLARISANT*



*Jacques Deferne*

## *Table des matières*

<i>Nature de la lumière</i>	4
<i>La lumière polarisée</i>	11
<i>La double réfraction</i>	16
<i>L'ellipsoïde des indices</i>	18
<i>Principe du microscope polarisant</i>	23
<i>Description du microscope polarisant</i>	30
<i>Observation en lumière polarisée parallèle</i>	34
<i>Observation en lumière polarisée convergente</i>	42
<i>Observation en "lumière naturelle"</i>	49
<i>Recherche des sections principales</i>	56
<i>Identification du système cristallin</i>	63
<i>La dispersion des indices</i>	65
<i>Identification des minéraux en lame mince</i>	71
<i>Examen des minéraux en grains</i>	75
<i>Annexe I : le réglage du microscope</i>	78
<i>Abréviations utilisées dans cet ouvrage</i>	80

## Avant-propos

*Cet ouvrage est destiné avant tout aux étudiants en géologie qui abordent l'étude de l'optique cristalline. Dépouillé de toutes considérations théoriques et de formules mathématiques rebutantes, il s'adresse aussi à toute personne qui souhaiterait s'initier à la pratique du microscope polarisant, en particulier aux amateurs de minéraux qui voudraient élargir leurs connaissances scientifiques ainsi qu'aux gemmologistes qui trouveront dans cet opuscule les explications des phénomènes optiques qui leur permettent d'identifier les pierres taillées.*

*L'apprentissage de l'identification des minéraux au moyen du microscope polarisant passe nécessairement par l'emploi de coupes minces, car celles-ci se prêtent particulièrement bien à l'illustration des explications théoriques qui accompagnent inévitablement l'approche de l'optique cristalline.*

*Si, à travers les coupes minces de roche, le microscope polarisant reste l'outil principal des pétrographes et des micro-paléontologues, il est devenu aussi un moyen d'investigation puissant pour les minéralogistes grâce au développement de l'examen direct des minéraux en grains immergés dans des liquides d'indice connu.*

*Cette dernière méthode, qui libère l'utilisateur de la nécessité de faire confectionner des coupes minces, est tout à fait accessible à des amateurs de minéraux, pour peu qu'un minéralogiste professionnel accepte de passer quelques soirées avec eux pour les initier au fonctionnement du microscope et à l'usage des liquides d'indice.*

*Les abréviations<sup>1</sup> utilisées en optique cristalline varient selon les auteurs. Celles qui ont été adoptées dans cet ouvrage ne correspondent pas toujours à celles qu'on trouve dans les tables internationales, mais elles ont été choisies dans un souci de clarté didactique. Ainsi, les indices maximum, moyen et minimum sont désignés par les symboles  $n_g$ ,  $n_m$  et  $n_p$ , ce qui me semblent plus imagés que  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ . De même, pour les uniaxes, si nous avons conservé les symboles  $\varepsilon$  et  $\omega$  pour désigner les rayons ordinaires et extraordinaires lorsqu'on parle de surface d'onde, nous les avons abandonnés au profit de  $n_g$  et  $n_p$ , dès qu'on aborde les ellipsoïdes des indices.*

Jacques Deferne

---

<sup>1</sup> Voir la liste des abréviations en fin d'ouvrage

# 1. Nature de la lumière

Au cours des trois derniers siècles, plusieurs théories ont été successivement proposées pour expliquer les divers phénomènes qui accompagnent la propagation de la lumière.

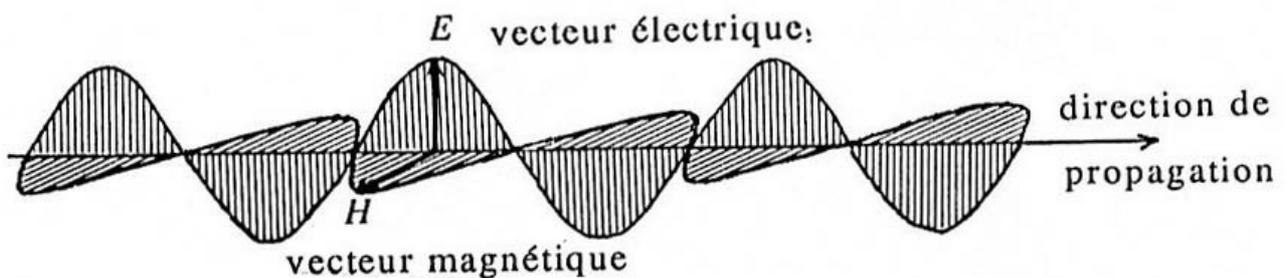
A la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, le Hollandais Huygens<sup>1</sup> proposait une théorie ondulatoire assortie de l'existence d'un "éther" remplissant tout l'espace et dont la vibration transmettait la lumière. Il pouvait expliquer facilement la réflexion et la réfraction des rayons lumineux. Il pensait qu'il s'agissait d'ondes de compression faute d'avoir pu mettre en évidence la transversalité des vibrations.

Au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, Newton<sup>2</sup> assimilait la lumière à un train de particules extrêmement petites se déplaçant en ligne droite, à très grande vitesse. Il reconnaissait la nécessité d'associer à sa théorie un certain aspect ondulatoire, notamment pour expliquer la formation des anneaux colorés qui portent son nom.

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, l'idée que la lumière est constituée d'ondes réapparaît. Une expérience décisive faite en 1803, par le physicien anglais Thomas Young<sup>3</sup>, démontre que la lumière issue de deux trous très fins produit des phénomènes d'interférence semblables à ceux qu'on observe en acoustique ou avec le déplacement apparent des vagues.

A cette même époque les Français Fresnel<sup>4</sup> et Arago<sup>5</sup> démontrent que les deux rayons issus d'un spath de calcite sont polarisés. Ils en déduisent que la lumière ne peut pas être une onde de compression comme le pensait Huygens, mais une onde vibrant perpendiculairement à sa direction de propagation.

L'explication claire de la nature de la lumière fut apporté par James Maxwell<sup>6</sup> en 1873. Il admet que la lumière est une onde électromagnétique consistant en des champs électriques et magnétiques perpendiculaires l'un à l'autre et normaux à la direction de propagation de l'onde. Avec cette définition, la lumière n'est plus considérée comme une entité indépendante, mais elle est rattachée à d'autres formes d'énergie tels les rayons X ou les ondes radio, constituant le grand ensemble des ondes électromagnétiques.



$\lambda$ [mètres]	type de rayonnement	$f$ [hertz]
--------------------	---------------------	-------------

1 Christiaan Huygens, 1629-1695, physicien et astronome néerlandais.

2 Isaac Newton, 1642-1727, physicien, mathématicien et astronome anglais.

3 Thomas Young, 1772-1829, égyptologue et opticien anglais.

4 Augustin Fresnel, 1788-1827, physicien français.

5 François Arago, 1786-1853, physicien et astronome français

6 James Clerk Maxwell, 1831-1879, physicien écossais

$10^{-13}$	-	$10^{21}$
$10^{-11}$	- rayons $\gamma$	$10^{19}$
$10^{-9}$	- rayons X	$10^{17}$
$10^{-7}$	- ultraviolet lumière visible	$10^{15}$
$10^{-5}$	- infrarouge	$10^{13}$
$10^{-3}$	- radar	$10^{11}$
$10^{-1}$	- télévision	$10^9$
10	- radio	$10^7$
$10^3$	-	$10^5$

Domaine d'application des ondes électromagnétiques. On constate que l'oeil est un récepteur qui ne perçoit qu'une très faible partie des ondes électromagnétiques, les ondes dites "visibles".

Les récents développements de la physique, en particulier l'étude du rayonnement d'un corps incandescent et la découverte de l'effet photoélectrique, ont obligé les physiciens à reconsidérer les théories de Maxwell. A la suite des travaux de Max Planck et d'Albert Einstein, on a admis, qu'en plus du caractère ondulatoire de la lumière, il fallait lui superposer un aspect corpusculaire. La lumière transporte donc des photons, particules de masse nulle au repos, dans lesquels toute l'énergie est concentrée. Chaque photon transporte une énergie égale à une constante (constante de Planck) multipliée par l'inverse de la fréquence de l'onde à laquelle il est associé.

$$E = h \times \nu \quad \text{ou encore} \quad E = \frac{h \times c}{\lambda}$$

$h$  (constante de Planck =  $6.624 \times 10^{-34}$  [joules/seconde])

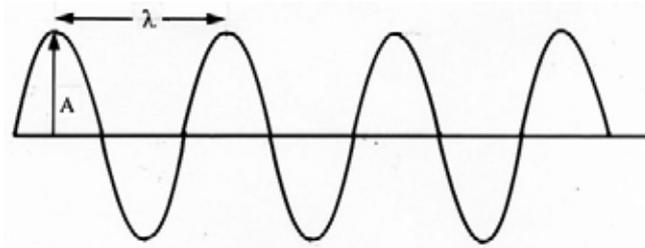
$\nu$  = fréquence,  $c$  = vitesse de la lumière,  $\lambda$  = longueur d'onde

Cette théorie peut être appliquée à toutes les particules élémentaires, en particulier aux électrons dont la longueur d'onde associée est de l'ordre de  $10^{-9}$  m. ce qui explique pourquoi ils peuvent être diffractés par un réseau cristallin.

La théorie électromagnétique de la lumière est amplement suffisante pour expliquer les phénomènes de l'optique cristalline. Nous simplifierons même cette théorie en utilisant l'expression vibration lumineuse sans préciser la nature de la variable qu'on appellera particule. Cette représentation est destinée à rendre plus intuitives certaines définitions, sans préjuger pour autant de la nature de cette particule.

## Nomenclature de la théorie des ondes

On peut considérer la lumière comme une forme d'énergie transmise par un mouvement ondulatoire. On parle d'onde transversale, c'est à dire dont les vibrations ont lieu dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. On a l'habitude de représenter graphiquement une onde par une sinusoïdale. Voici quelques caractéristiques de cette onde :



- **L'amplitude  $A$**  est la distance d'une "particule" au-dessus de son point d'équilibre maximum.
- **La fréquence  $f$**  est le nombre de vibrations effectuées par une particule en une seconde.
- **La période  $T$**  est le temps mis par une particule pour effectuer une vibration complète. C'est l'inverse de la fréquence.
- **La longueur d'onde  $\lambda$**  est la distance qui sépare deux crêtes successives de l'onde.
- **La vitesse de propagation  $v$  de l'onde** est de 299'792'458 m. par seconde dans le vide.

Généralement on se contente de la valeur de 300'000 km/s. Elle est inférieure à cette valeur à l'intérieur de tous les autres corps transparents. Dans l'air elle est très légèrement inférieure à la vitesse atteinte dans le vide.

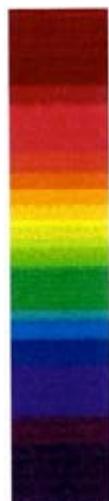
Ces divers termes sont reliés entre eux par les relations suivantes :

$$v = f \times \lambda \quad f = \frac{v}{\lambda} \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

**L'intensité  $I$  d'un rayon lumineux** dépend de l'amplitude de l'onde. La relation est :

$$I = A^2$$

**La couleur d'un rayon lumineux** dépend de la fréquence<sup>1</sup> de l'onde. Voici les fréquences de quelques couleurs usuelles :



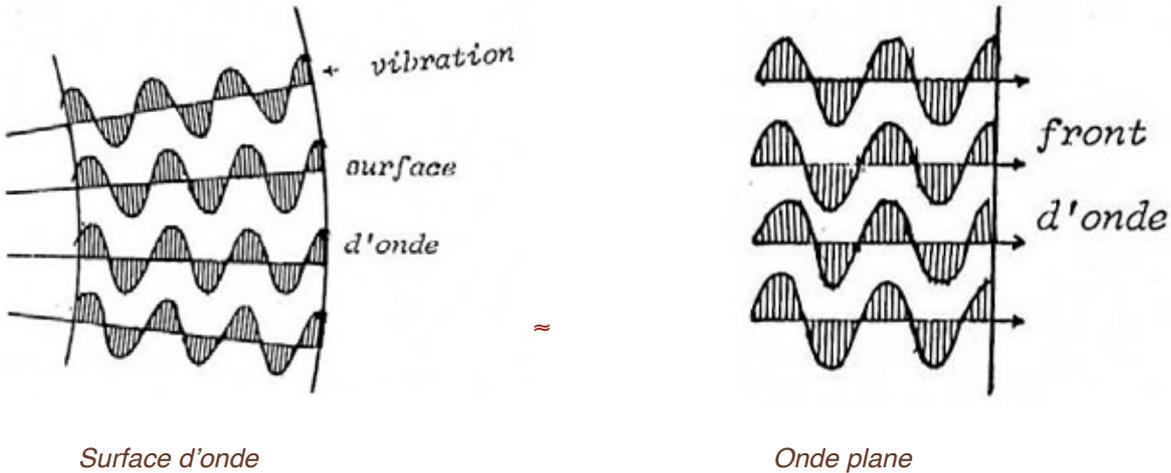
rouge	: $430 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $700 \times 10^{-6}$ mm
orange	: $490 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $620 \times 10^{-6}$ mm
jaune	: $535 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $560 \times 10^{-6}$ mm
vert	: $580 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $515 \times 10^{-6}$ mm
bleu	: $640 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $470 \times 10^{-6}$ mm
indigo	: $680 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $440 \times 10^{-6}$ mm
violet	: $730 \times 10^{12}$	soit $\lambda$ dans l'air = $410 \times 10^{-6}$ mm

<sup>1</sup> Dans la plupart des traités on indique que la couleur dépend de la longueur d'onde. Il est plus juste de dire que la couleur dépend de la fréquence car celle-ci reste constante lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu dans un autre alors que la longueur d'onde change !

Notons, à titre comparatif, que les longueurs d'onde radio sont comprises entre 10 et 3'000 m. environ, celles de la télévision sont de l'ordre du mètre, celles du radar sont de quelques centimètres.

Les ondes lumineuses appartiennent au grand ensemble des ondes électromagnétiques et sont définies comme étant celles qui sont perceptibles par le détecteur limité qu'est l'oeil humain. Juste avant les ondes perceptibles par l'oeil il y a les rayons infrarouges qui sont les ondes du rayonnement thermique. Puis, au-delà du violet, on trouve l'ultraviolet, puis les rayons X et les rayons  $\gamma$ .

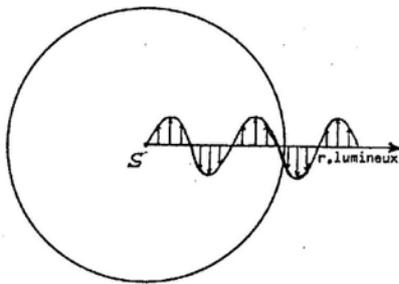
**La surface d'onde** est le lieu des points atteints, après une unité de temps, par les ondes issues d'une source ponctuelle. On considère que la surface d'onde est plane lorsque la source est située à l'infini.



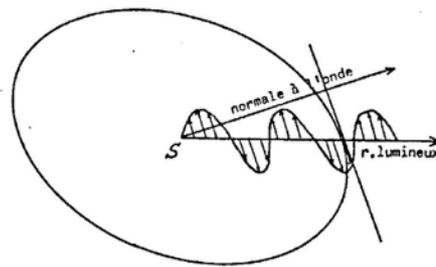
Surface d'onde

Onde plane

Dans les milieux isotropes, la surface d'onde est une sphère. Dans les milieux anisotropes, en particulier dans la plupart des minéraux, la surface d'onde est un ellipsoïde. Dans ce dernier cas, on remarque que la direction de vibration n'est plus tout à fait normale au rayon lumineux, ce qui implique que ce dernier n'est plus tout à fait perpendiculaire à la surface d'onde. Sur les figures suivantes, l'excentricité de la surface d'onde a été fortement exagérée. Dans les minéraux, l'angle entre la normale à l'onde et le rayon lumineux n'excède jamais un ou deux degrés.



Propagation de la lumière dans un milieu isotrope



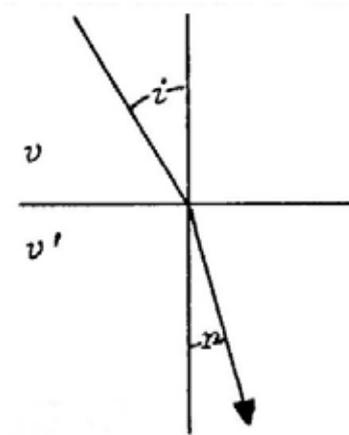
Propagation de la lumière dans un milieu anisotrope

**La lumière blanche** est l'impression que provoque sur la rétine l'ensemble des rayons colorés issus du soleil. On appelle lumière monochromatique une lumière qui est caractérisée par une longueur d'onde unique.

L'indice de réfraction d'un milieu transparent est un nombre sans unité qui est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide sur la vitesse de la lumière dans ce milieu. Ce rapport est toujours supérieur à 1. Rappelons que c'est la variation de vitesse qui est responsable de la brisure

du rayon lumineux lorsque celui-ci passe d'un milieu à un autre. Nous avons alors la relation bien connue :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{v'} = n$$



On attribue à tous les milieux transparents un indice de réfraction comparé à celui du vide ( $n - 1$ ). L'indice de l'air est très faible et vaut 1.00294. L'indice de réfraction d'un corps varie légèrement suivant la fréquence utilisée. Ainsi l'indice mesuré avec une radiation violette est un peu plus élevé que celui mesuré avec le rouge. Cette variabilité de l'indice en fonction de la fréquence s'appelle la **dispersion**.

Pour fixer l'indice de réfraction d'un milieu transparent, on utilise une lumière monochromatique la lumière jaune du sodium ( $= 589 \times 10^{-6}$  mm). Voici quelques exemples d'indices :

Air	1.00029	Blende	2.37
Eau	1.309	Diamant	2.42
Quartz	1.54		

## La réflexion totale

Si on considère un rayon lumineux se déplaçant de l'air vers l'eau, on constate que les angles d'incidence peuvent être compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  et les angles réfractés compris entre  $0^\circ$  et  $48^\circ 31'$ . Ce angle est appelé angle critique  $r_c$ . Il vaut :

$$\frac{\sin i}{\sin r_c} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{pour } i = 90^\circ, \sin i = 1 : \quad \sin r_c = \frac{n_1}{n_2}$$

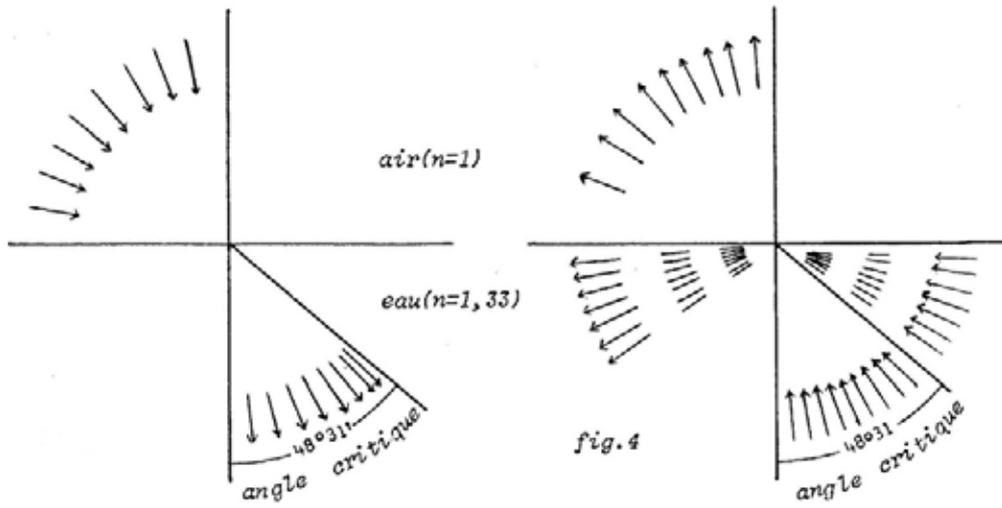
si un des milieux est l'air, nous aurons :

$$\sin r_c = \frac{1}{n}$$

Prenons le cas inverse : pour des rayons d'incidence (dans l'eau) compris entre  $0^\circ$  et  $48^\circ 31'$ , nous avons des rayons réfractés (dans l'air) compris entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ . Les rayons incidents incidents situés au delà de  $48^\circ 31'$  sont **réfléchis totalement** à l'intérieur du premier milieu, sur la surface de séparation des deux milieux.

Plus l'indice de réfraction est élevé, plus l'angle critique est faible. Pour le diamant, par exemple, l'angle critique n'atteint que  $24^\circ 30'$ . Cette particularité est utilisée par les lapidaires qui taillent le diamant de manière à ce que la lumière blanche qui entre dans la pierre subisse plusieurs réflexions totales avant de s'en échapper. Ce surcroît de trajet augmente la dispersion et provoque l'apparition des "feux" colorés qui font la particularité de cette gemme.

*Phénomène de la réfraction totale*



*Rayons lumineux cheminant de l'air vers l'eau.*

*Rayons lumineux cheminant de l'eau vers l'air.*

## Commentaires

*Pour mieux comprendre le mécanisme de la propagation des ondes nous pouvons recourir à l'exemple classique du caillou jeté au milieu d'un étang : autour du point de chute se développent des vaguelettes qui semblent s'éloigner d'une manière concentrique avec une vitesse qu'on peut comparer à la vitesse de l'onde.*

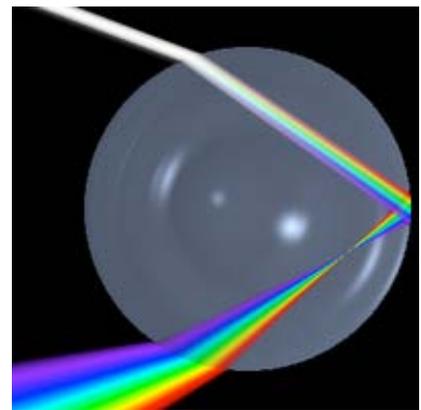


*La hauteur des vaguelettes au-dessus de la surface de l'eau correspond à l'amplitude de l'onde. La distance entre deux vaguelettes successives est comparable à la longueur d'onde. Si nous plaçons un bouchon sur le trajet des vaguelettes, nous le voyons osciller verticalement. La vibration a donc bien lieu perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde. Le bouchon oscille sur place : il n'y a donc pas déplacement de l'eau dans la direction de propagation de l'onde mais seulement une transmission d'énergie.*

*Nous avons vu que la couleur de la lumière dépendait de sa fréquence. La lumière du Soleil qui nous paraît blanche est en réalité constituée d'une multitude de rayonnements monochromatiques. On peut mettre ce fait en évidence en faisant passer un rayon de soleil à travers un prisme dispersif. On obtient alors un spectre lumineux analogue à un arc-en-ciel qui est le produit de la décomposition de la lumière blanche en ses composants élémentaires. Naturellement, les myriades de gouttelettes d'eau de pluie décomposent le spectre solaire ; c'est l'arc-en-ciel.*

*Un rayon lumineux pénètre dans la gouttelette. Il subit une première réfraction qui le conduit au fond de celle-ci. Là, le phénomène de la réflexion totale renvoie le rayon de l'autre côté de la goutte où l'angle d'incidence lui permet de s'en échapper.*

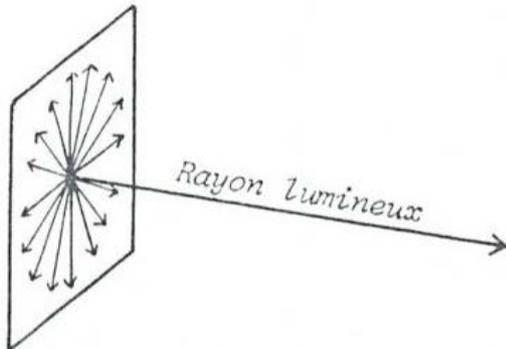
*L'indice de réfraction de l'eau variant légèrement avec la fréquence de la lumière, le rayon solaire qui nous semblait originellement blanc est dispersé et chaque radiation ressort de la goutte sous un angle un peu différent. C'est l'arc-en-ciel. Pour l'observer dans de bonnes conditions, il faut observer une ondée avec le soleil dans le dos.*



*Dispersion de la lumière dans une goutte d'eau et formation d'un arc-en-ciel (Photo Wikipedia)*

## 2. La lumière polarisée

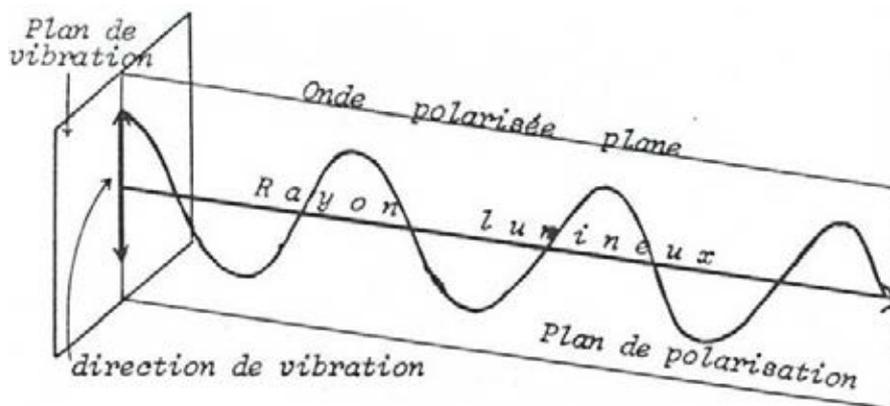
Nous avons vu que la lumière pouvait être considérée comme une onde transversale. Les vibrations ont lieu dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation du rayon lumineux. Mais le plan dans lequel s'effectue la vibration n'est pas défini et varie avec le temps.



Examinons la figure ci-contre : à un instant donné il n'est pas possible de préciser l'orientation de la vibration à l'intérieur du plan de vibration. C'est le cas de la lumière ordinaire. Dans certaines conditions cette représentation peut être modifiée dans le sens qu'on peut obliger la vibration à s'effectuer dans une direction bien précise. Nous aurons alors une lumière polarisée. On appelle **lumière polarisée** une lumière dont la direction de vibration est, au contraire, bien définie. Lorsque la vibration a lieu toujours dans la même direction tout le long du rayon lumineux et qu'on peut placer toutes ces vibrations dans un plan normal au plan de vibration, nous obtenons une lumière polarisée plane. Ce nouveau plan est dit plan de polarisation<sup>1</sup>. Dans le schéma ci-dessous nous avons résumé graphiquement les termes que nous emploierons constamment.

Obtenons une lumière polarisée plane. Ce nouveau plan est dit plan de polarisation<sup>1</sup>. Dans le schéma ci-dessous nous avons résumé graphiquement les termes que nous emploierons constamment.

Représentation schématique de la lumière polarisée



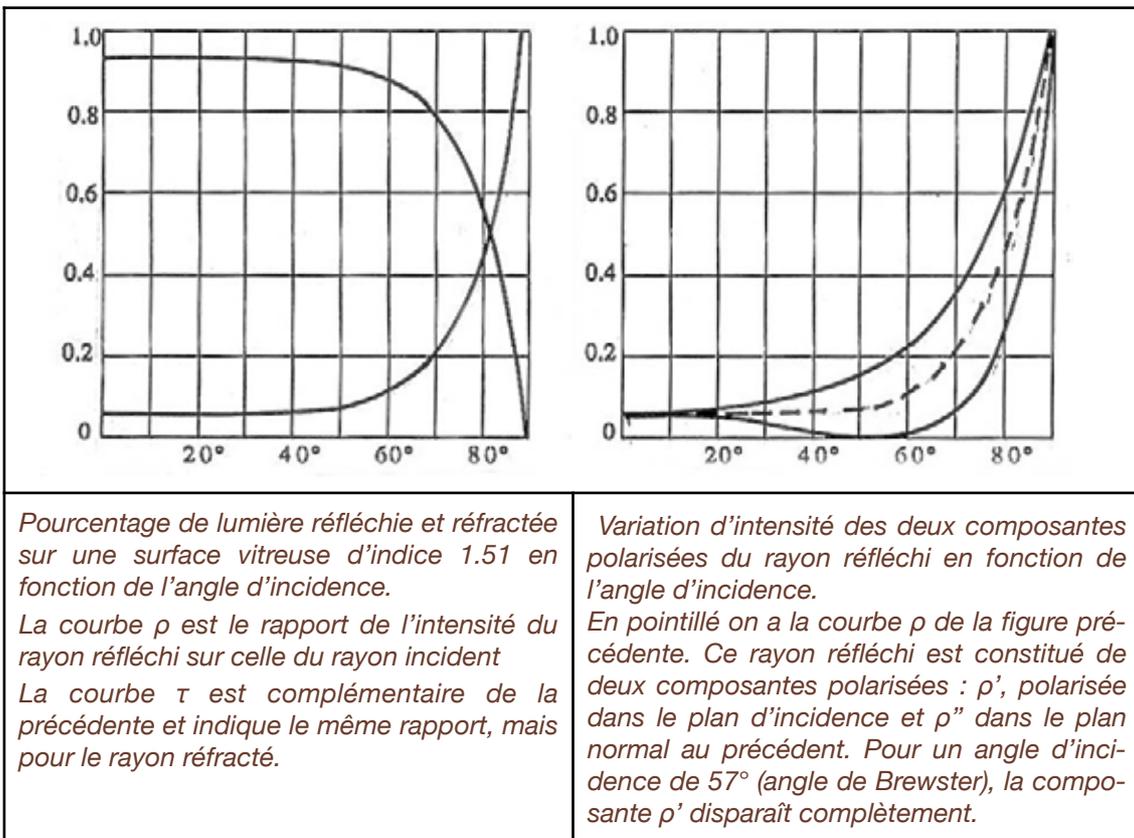
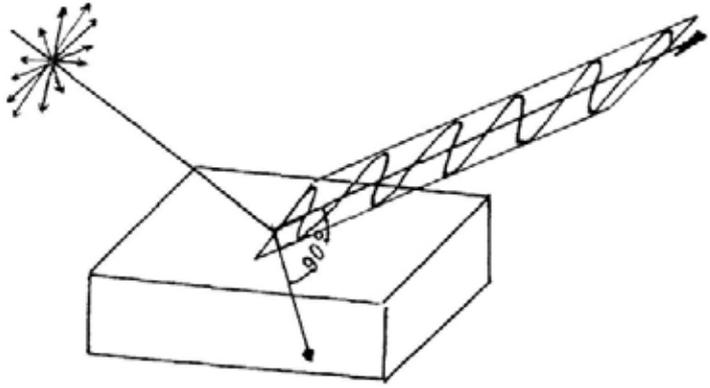
La lumière polarisée peut être produite de diverses façons. Une de celles-ci consiste à envoyer de la lumière sur une surface réfléchissante (par exemple un plan d'eau) selon une certaine incidence. Le rayon réfléchi est alors polarisé et son plan de polarisation est perpendiculaire au rayon réfracté.

Le rayon réfracté est aussi polarisé et son plan de polarisation est contenu dans le plan déterminé par lui-même et le rayon incident.

L'incidence convenable pour qu'il y ait polarisation maximum est que les rayons réfléchi et réfracté fassent entre eux un angle de  $90^\circ$ .

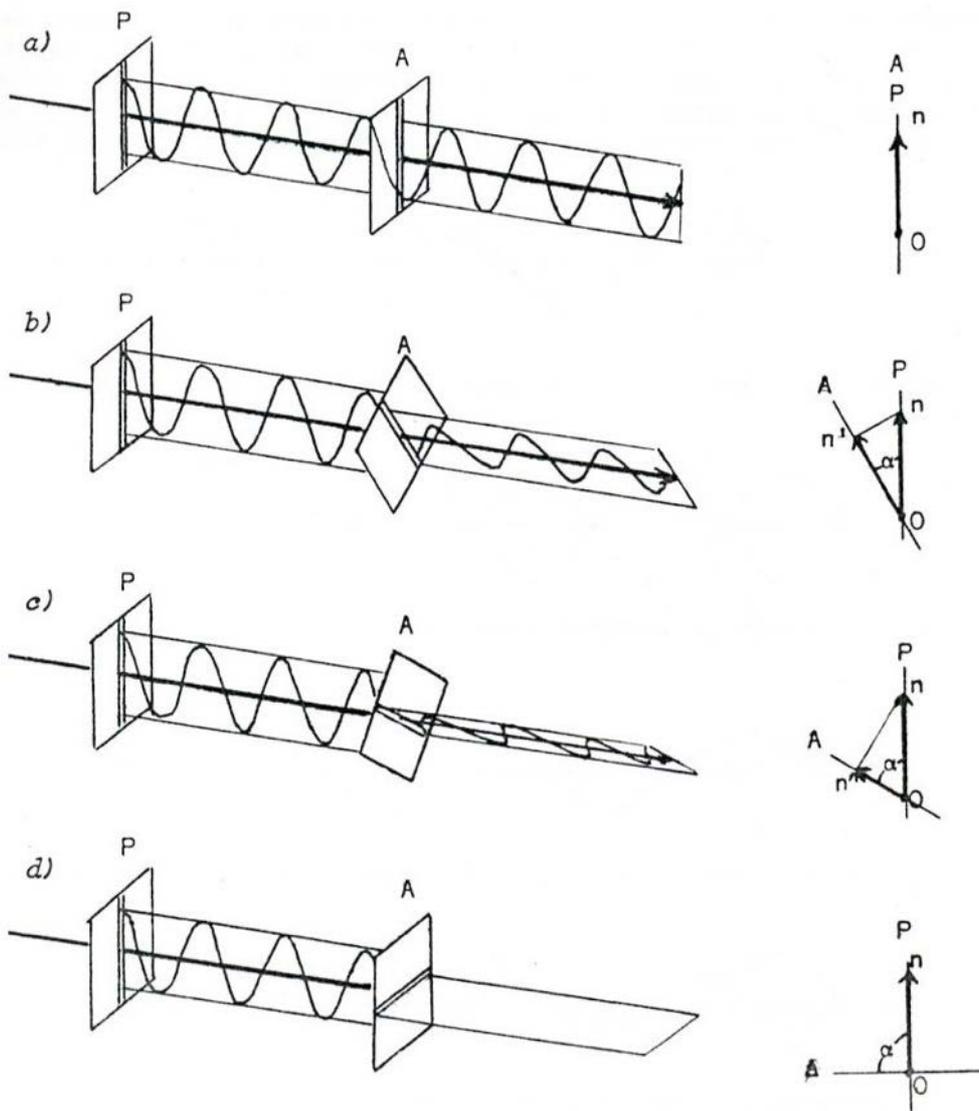
<sup>1</sup> Cette définition du plan de polarisation n'est pas habituelle et n'est que rarement utilisée. Cependant, nous l'emploierons par souci de commodité. En effet, la plupart des auteurs définissent le plan de polarisation comme le plan perpendiculaire à la direction de vibration et contenant le rayon lumineux. Malheureusement ce plan-ci n'est d'aucune utilité lorsqu'on essaye d'expliquer clairement les choses !

Propriétés des rayons réfléchis et réfractés sur une surface vitreuse : les rayons réfléchis sous une certaine incidence sont polarisés.



Nous verrons plus loin d'autres dispositifs susceptibles de produire de la lumière polarisée. Notons déjà qu'on appelle "**polariseur**" tout dispositif susceptible de produire de la lumière polarisée.

Que va-t-il se passer si nous faisons passer de la lumière polarisée à travers un deuxième polariseur ? Nous donnons alors le nom "**d'analyseur**" à ce deuxième dispositif car il va permettre d'analyser les phénomènes que nous voulons mettre en évidence. Considérons les quatre dessins suivants:



Sur le premier dessin (a), le polariseur et l'analyseur ont leur plan de polarisation parallèle l'un à l'autre. L'onde polarisée issue du polariseur ne subit aucune modification en traversant l'analyseur. A la sortie de ce dernier, l'amplitude de l'onde est la même qu'à la sortie du polariseur.

En faisant tourner progressivement l'analyseur, on constate que l'amplitude de l'onde diminue au sortir de ce dernier pour devenir nulle lorsque le plan de polarisation de l'analyseur se trouve tourné de  $90^\circ$  par rapport à celui du polariseur. L'amplitude  $on'$  à la sortie de l'analyseur est égale à :

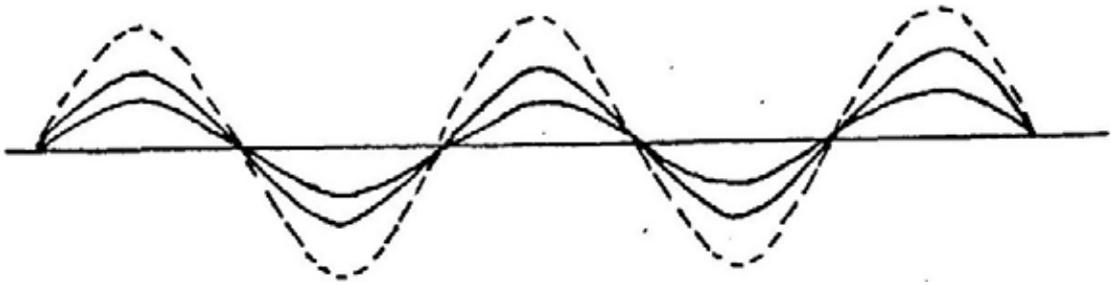
$$on' = on \cos \alpha$$

relation dans laquelle  $on$  est l'amplitude de l'onde avant d'entrer dans le l'analyseur et  $\alpha$  est l'angle entre le plan de polarisation de l'analyseur et celui du polariseur.

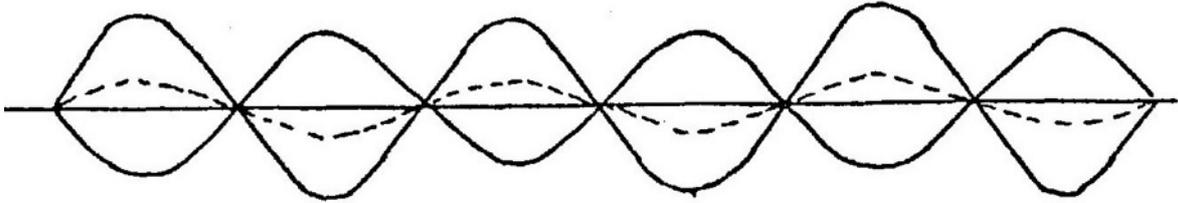
Nous verrons plus loin que ce dispositif polariseur/analyseur constitue la base même de la construction du microscope polarisant.

### Superposition de plusieurs ondes polarisées

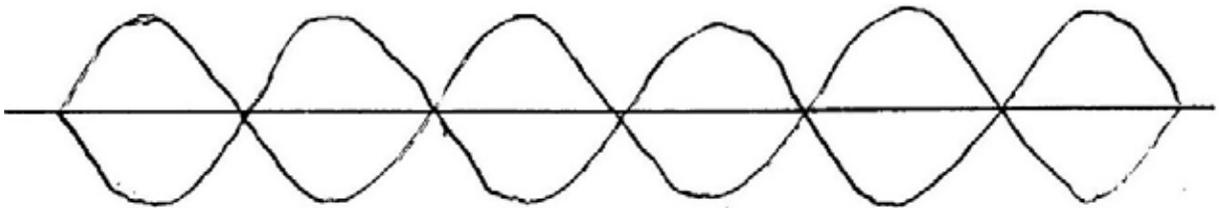
Envisageons ici le cas de plusieurs ondes polarisées dans un même plan. Elles vont se combiner (on dit interférer) pour donner une seule onde résultante. Les ondes peuvent différer en amplitude, en longueur d'onde et en phase. Le principe de l'analyse est simple : il suffit d'additionner, pour chaque point du parcours des ondes, les amplitudes de chaque onde composante. Autrement dit, on fait la somme des vecteurs d'amplitude à chaque instant.



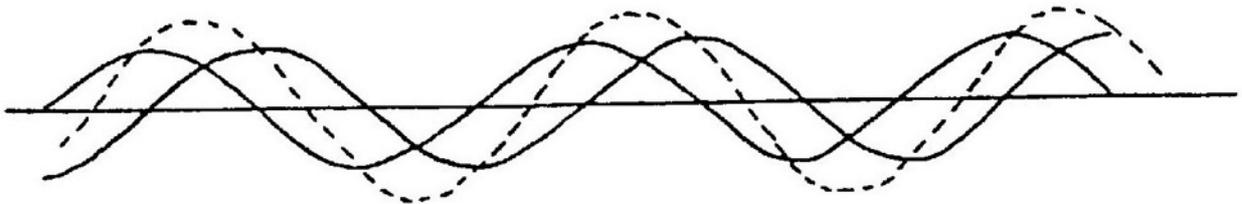
*Longueurs d'onde identiques, décalage de phase nul, amplitudes différentes :  
l'onde résultante ne diffère des ondes composantes que par l'amplitude.*



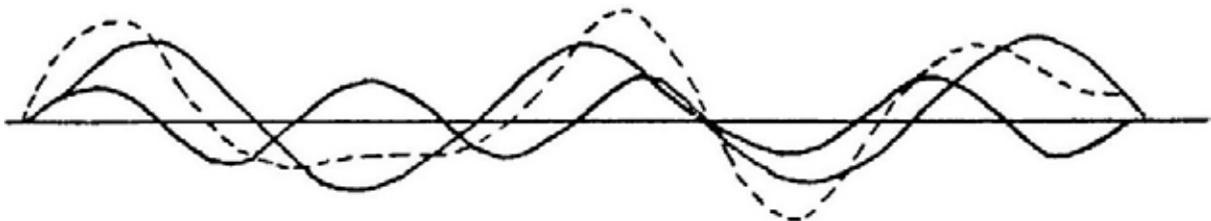
*Longueurs d'onde identiques, amplitudes différentes, décalage de phase de  $\lambda/2$  :  
l'onde résultante ne diffère que des ondes composantes que par son amplitude. Dans le cas particulier, elle est en concordance de phase avec la composante qui avait la plus grande amplitude.*



*Longueurs d'ondes et amplitudes identiques, décalage de phase de  $\lambda/2$ .  
A chaque point les amplitudes sont égales mais de signe opposé. Elles s'annulent réciproquement, aboutissant à la disparition totale de l'onde résultante.*



*Longueurs d'onde et amplitudes identiques, décalage de phase de  $\lambda/4$ .  
L'onde résultante montre une longueur d'onde identique, une amplitude différente et un décalage de phase de  $\lambda/8$  par rapport aux ondes composantes.*



*Longueurs d'onde et amplitudes différentes.  
L'onde résultante n'est plus une sinusoïdale mais une onde de forme complexe dont la longueur d'onde est le plus petit commun dénominateur des longueurs d'onde des ondes composantes.*

## Commentaires au chapitre N°2

Pour bien comprendre la différence entre lumière ordinaire et lumière polarisée faisons l'expérience suivante : prenons une corde souple d'une dizaine de mètres. Tandis qu'un opérateur maintient une extrémité de la corde à une cinquantaine de centimètres au-dessus du sol, un autre communique à l'autre extrémité de la corde un vigoureux mouvement périodique. L'énergie se transmet le long de la corde et lui imprime un mouvement grossièrement sinusoïdal. On observe que chaque point de la corde décrit un mouvement alternatif dans le plan normal à la direction de propagation. On peut lui communiquer un mouvement circulaire, elliptique ou totalement désordonné : c'est la lumière ordinaire.

Si nous imprimons à la corde un mouvement uniquement dans un plan vertical, toute la corde oscille alors dans ce plan. C'est l'image d'une **lumière polarisée**. Nous pouvons même simuler un polariseur : deux bâtons verticaux distants l'un de l'autre d'une épaisseur de corde. En imprimant un mouvement périodique désordonné à la corde (lumière ordinaire), celle-ci n'oscillera plus que dans le plan vertical (lumière polarisée) après son passage à travers ce polariseur improvisé.

On trouve dans le commerce des filtres "Polaroid". Ce sont des supports en matière plastique sur lesquels on a déposé, selon une orientation prédéfinie, des cristaux microscopiques d'hérapatite, une substance synthétique qui a la propriété de polariser la lumière. Les lunettes solaires dites "**Polaroid**" sont en fait des filtres polarisants. Avec deux paires de lunettes, on peut vérifier l'extinction qui s'opère en observant une image à travers les deux filtres et en faisant tourner un des filtres par rapport à l'autre.

On peut vérifier aussi que la lumière réfléchie est polarisée. La lumière réfléchie sur la surface d'une piscine montre l'image du ciel et des nuages qui empêche le spectateur de voir ce qui se passe sous l'eau. Les lunettes Polaroid annulent cette réflexion et permettent de voir ce qui s'y passe !

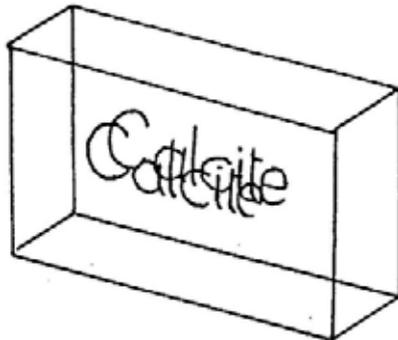
Il existe aussi un système de projection en relief qui utilise les phénomènes de la polarisation. Les deux images nécessaires à la vue stéréoscopique sont projetées sur un écran après avoir traversé chacune un filtre polarisant dont les plans de polarisation sont vertical pour une image, horizontal pour l'autre. Le spectateur porte des lunettes comportant des filtres polarisants dont les plans de polarisation sont vertical pour un oeil, horizontal pour l'autre. Le spectateur perçoit ainsi une image avec un oeil et l'autre image avec l'autre oeil.

---

### 3. La double réfraction

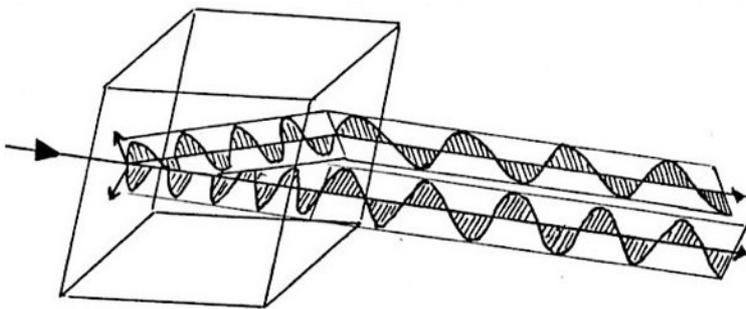
Un milieu homogène est dit **anisotrope** lorsque certaines de ses propriétés vectorielles, la vitesse de la lumière par exemple, varient suivant la direction dans laquelle on la considère. Toutes les substances cristallines sont anisotropes à l'exception de celles qui appartiennent au système cubique.

Dans un milieu **isotrope** la surface d'onde, c'est à dire le lieu des points atteints par l'ensemble des ondes issues d'une source ponctuelle, est une sphère. Dans les corps cristallins anisotropes, la surface d'onde est non seulement complexe, mais elle est également double. Elle est constituée de deux surfaces emboîtées l'une dans l'autre. Elles peuvent être des ellipsoïdes, des sphères voire des surfaces plus complexes.



Double réfraction de la calcite

En effet, lorsqu'on observe le comportement des rayons lumineux dans les substances cristallines, on constate qu'il y a généralement deux rayons réfractés. La calcite est l'un des minéraux qui se prêtent le mieux à une telle observation. Prenons un rhomboèdre de calcite parfaitement transparent (spath d'Islande). Observons une image à travers ce cristal : elle apparaît dédoublée. En observant attentivement on remarque qu'elles ne semblent pas situées dans un même plan et en faisant tourner la calcite sur elle-même, une image reste fixe tandis que l'autre semble tourner autour de la première.



Cheminement des rayons lumineux dans un rhomboèdre de calcite

Intercalons entre le rhomboèdre et l'oeil un disque Polaroid et faisons le tourner sur lui-même. On observe alors que pour une certaine position du disque une des images disparaît. En tournant encore le disque de  $90^\circ$ , l'image réapparaît et c'est qui disparaît à son tour.

Examinons plus en détail le cheminement d'un rayon lumineux à travers la calcite : le rayon lumineux entre dans la

calcite sous une incidence normale. Il se divise en deux rayons :

- un **rayon ordinaire O** qui obéit aux lois ordinaires de l'optique géométrique,
- un **rayon extraordinaire E** qui échappe complètement à ces mêmes lois en divergeant légèrement de la direction du rayon incident.

De plus, ces deux rayons sont polarisés. Le plan de polarisation du rayon **O** passe par la grande diagonale de la face d'entrée alors que celui du rayon **E** est tourné de  $90^\circ$  par rapport au premier.

A la sortie du cristal, les deux rayons redeviennent parallèles tout en restant polarisés dans des plans perpendiculaires l'un à l'autre.

Notons encore qu'à l'intérieur du cristal, les deux rayons cheminent avec des vitesses un peu différentes l'une de l'autre. Ils obéissent donc à deux indices de réfraction différents.

Cette propriété que montrent la plupart des minéraux de présenter deux indices de réfraction porte le nom de **double réfraction**. La différence entre l'indice minimum et l'indice maximum est la **biréfringence**.

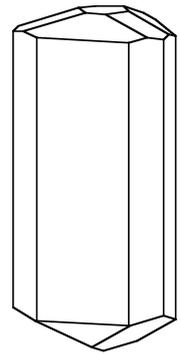
On comprend maintenant que l'ensemble des rayons ordinaires détermine une première surface d'onde qui diffère d'une seconde, celle engendrée par l'ensemble des rayons extraordinaires.

## Polariseurs basés sur le principe de la double réfraction

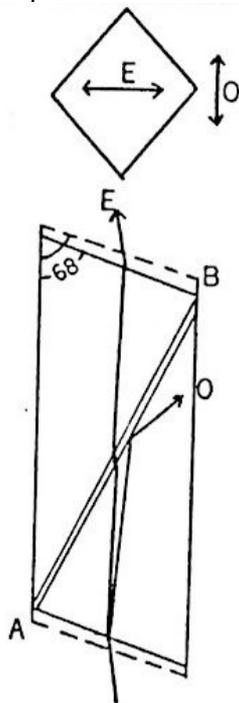
Les substances cristallines anisotropes polarisent donc naturellement la lumière. Mais, comme elles produisent deux rayons polarisés, il faut donc trouver un système qui élimine l'un d'entre eux.

Certains minéraux ont la propriété d'absorber fortement un des rayons et d'être parfaitement transparents pour l'autre. Ainsi, la tourmaline absorbe fortement tous les rayons, exceptés ceux qui sont perpendiculaires à l'axe du prisme et dont le plan de polarisation contient l'axe de ce prisme.

Une autre substance synthétique, l'hépatite (un iodo-sulfate de cinchonidine), réalise l'élimination d'un des rayons avec un rendement très supérieur à celui de la tourmaline. Les disques dits "Polaroid" sont confectionnés en faisant déposer sur un film de matière plastique des cristaux microscopiques d'hépatite, tous orientés parallèlement les uns aux autres.



Prisme de tourmaline

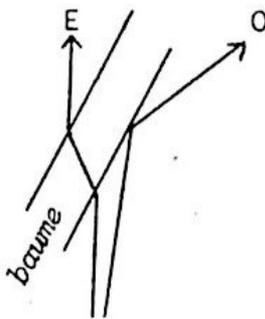


Un autre dispositif classique de polarisation est le prisme de Nicol<sup>1</sup>. Son principe est basé sur l'élimination du rayon ordinaire par réflexion totale.

Il consiste en un prisme de calcite parfaitement limpide, scié en deux parties selon une orientation bien précise ( $68^\circ$ ), puis ces deux parties sont recollées avec du baume de Canada dont l'indice de réfraction est 1.538. Avec ce dispositif, le rayon incident se divise en deux rayons réfractés O et E, obéissant, le premier à l'indice 1.658, le second à l'indice 1.516. Le rayon ordinaire O arrivant sur la surface de séparation avec le baume est réfléchi totalement car il arrive avec un indice inférieur à celui du baume et en dehors de l'angle critique. Il est donc totalement éliminé.

Le rayon extraordinaire E, qui obéit à un indice inférieur à celui du baume, est réfracté à travers la surface de collage. A la sortie du prisme de Nicol ne subsistera alors qu'un seul rayon polarisé, le rayon E.

Les prismes de Nicol sont d'une qualité supérieure aux filtres Polaroid, mais le coût de fabrication très élevé font qu'on ne les utilise pratiquement plus. Dans les microscopes actuels on utilise des filtres Polaroid



Principe du polariseur de William Nicol

1. William Nicol, physicien britannique (1768-1851).

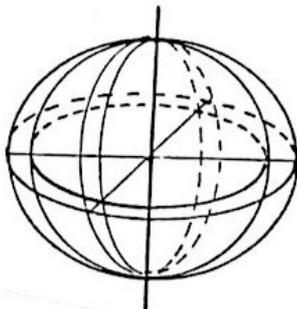
## 4. L'ellipsoïde des indices

### Les surfaces d'onde

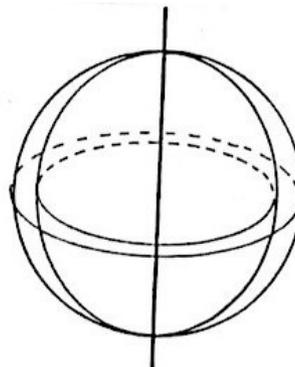
Dans l'exemple de la calcite, chacun des rayons réfractés obéit à un indice de réfraction différent. Si on examine le phénomène plus attentivement, en taillant des lames de calcite dans des orientations différentes, on constate que le rayon ordinaire **O** obéit toujours à l'indice 1.658, quelque soit son orientation, alors que le rayons extraordinaire **E** présente des indices variables compris entre deux valeurs extrêmes 1.486 et 1.658.

On peut construire les surfaces d'onde de chacun des deux rayons :

- celle du rayon ordinaire **O** est une sphère dont le rayon est inversement proportionnel<sup>1</sup> à l'indice 1.658.
- Celle du rayon extraordinaire **E** est un ellipsoïde de révolution aplati dont le grand axe est inversement proportionnel à 1.486 et le petit axe inversement proportionnel à l'indice 1.658. Dans le cas présent, la sphère est inscrite dans l'ellipsoïde et tangente à ce dernier au contact de l'axe de révolution.
- L'axe de révolution est appelé aussi axe optique. Il possède une propriété particulière : tout rayon qui chemine le long de l'axe ne subit pas de double réfraction et il n'est pas polarisé. Il se comporte comme s'il traversait un milieu isotrope.



Surfaces d'onde pour  
un cristal de calcite



Surfaces d'onde pour  
un cristal de quartz

Pour d'autres minéraux, le quartz par exemple, l'ellipsoïde est inscrit dans la sphère. Les minéraux appartenant aux systèmes quadratique, rhomboédrique ou hexagonal, c'est à dire ceux qui possèdent un axe de symétrie principal, montrent des propriétés optiques identiques à celles de la calcite ou du quartz. Ils possèdent tous un axe optique. Aussi, sur le plan de l'optique, les qualifie-t-on de **cristaux uniaxes**.

Les minéraux orthorhombiques, mono- et tricliniques obéissent à des lois plus compliquées. Leurs surfaces d'onde sont extrêmement complexes. Aussi devons nous aborder leur étude avec une toute autre approche.

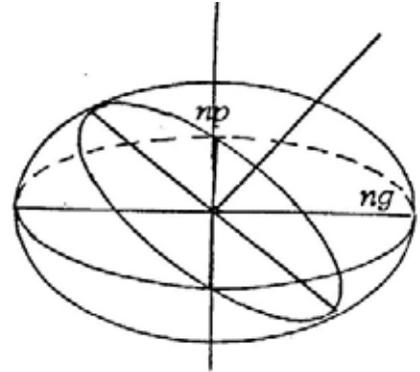
Les minéraux cubiques ne polarisent pas la lumière. Leurs propriétés optiques sont celles des substances isotropes. Leur unique surface d'onde est une sphère.

<sup>1</sup> Rappelons que la surface d'onde est construite à partir du vecteur de la vitesse qui, est proportionnelle à  $1/n$ .

## L'ellipsoïde des indices

Au lieu de construire des surfaces d'onde engendrées par les vecteurs de vitesse de la lumière, construisons un ellipsoïde de révolution dont l'axe est proportionnel à 1,486 et le diamètre de la section cyclique proportionnel à 1.658. On peut démontrer que cet ellipsoïde possède les propriétés suivantes :

- un rayon lumineux qui entre dans le cristal se décompose en deux vibrations polarisées. Le plan de polarisation de chacune d'elles passe respectivement par le grand et le petit axe de l'ellipse découpée dans l'ellipsoïde par le plan normal au rayon incident.
- L'indice auquel obéit chaque rayon est proportionnel à la demi longueur de l'axe de l'ellipse dans son plan de polarisation.
- L'axe de révolution de l'ellipsoïde coïncide avec l'axe optique.



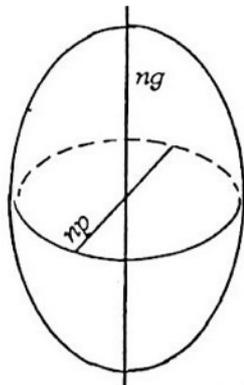
Si on imagine un rayon lumineux qui chemine le long de l'axe optique, on constate que la surface normale à ce rayon découpe dans l'ellipsoïde une section cyclique qui ne possède ni grand axe ni petit axe. Le long de cet axe, l'indice de réfraction est unique et la lumière n'est pas polarisée.

Cet ellipsoïde de révolution, construit à partir des valeurs des indices de réfraction, porte le nom **d'ellipsoïde des indices**.

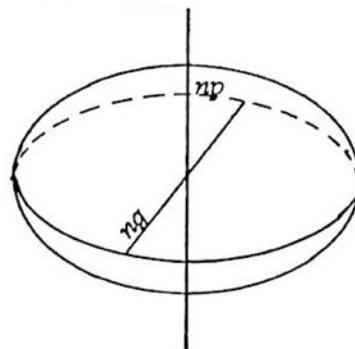
## Uniaxe ou biaxe

Dans le cas particulier de la calcite, on obtient un ellipsoïde aplati dont **l'axe de révolution** est proportionnel au plus petit des indices ( $n_p$ ) et le diamètre de la section cyclique est proportionnel au plus grand des indices ( $n_g$ ).

Si on applique cette construction au quartz, on obtient un ellipsoïde allongé dont l'axe de révolution est proportionnel au plus grand des indices ( $n_g$ ) et le diamètre de la section cyclique est proportionnel au plus petit des indices ( $n_p$ ).



Uniaxe positif  
(cas de la calcite)



Uniaxe négatif  
(cas du quartz)

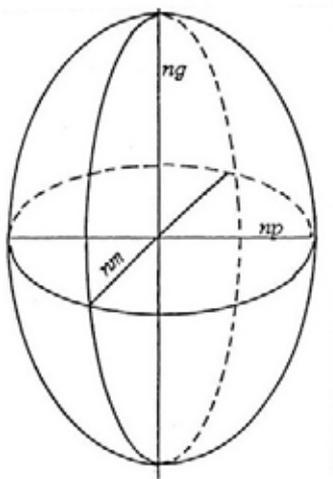
Par convention on donne le nom **d'uniaxe positif** à l'ellipsoïde allongé dans le sens de la hauteur et **uniaxe négatif** à celui qui est aplati. Du point de vue mathématique, les ellipsoïdes sont des surfaces dites «quadratiques» qui obéissent à l'équation suivante :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

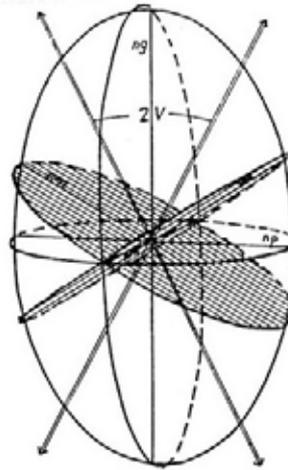
Où  $a$ ,  $b$  et  $c$  prennent les valeurs de  $n_g$ ,  $n_m$  et  $n_p$ .

Les propriétés optiques des minéraux orthorhombiques, mono- et tricliniques sont régies par un ellipsoïde un peu plus compliqué et qui possède deux axes optiques. Pour cette particularité on parle d'**ellipsoïde biaxe**.

Dans le cas des minéraux uniaxes, le rayon lumineux qui chemine le long de l'axe obéit à l'indice  $n_p$  ou  $n_g$  selon que l'ellipsoïde est positif ou négatif. Dans le cas des minéraux dits biaxes, le rayon lumineux qui chemine le long d'un des axes optiques obéit à un indice intermédiaire qu'on appelle  $n_m$ . Cet ellipsoïde est construit sur trois axes orthogonaux respectivement proportionnels à  $n_g$ ,  $n_p$  et  $n_m$ .

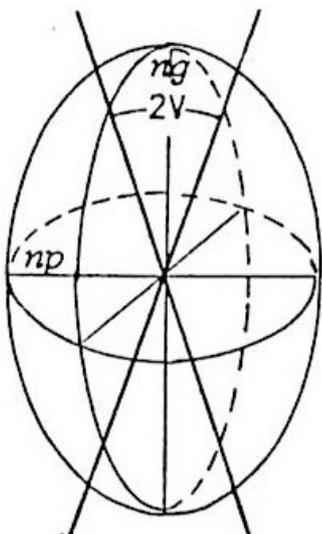


Ellipsoïde construit à partir des indices  $n_g$ ,  $n_p$  et  $n_m$ .

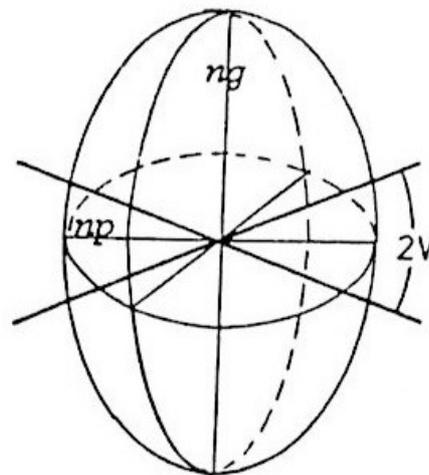


Ellipsoïde avec ses deux axes et ses deux sections cycliques

On peut démontrer mathématiquement qu'un tel ellipsoïde possède deux sections cycliques dont les perpendiculaires constituent les deux axes optiques A et B. L'angle entre les axes optiques est appelé **angle  $2V$** . Cet angle varie d'une espèce minérale à l'autre. On remarque encore que les axes optiques sont contenus dans le plan défini par  $n_g$  et  $n_p$ . Comme pour les uniaxes, on distingue par convention un ellipsoïde **biaxe positif**, caractérisé par le fait que  $n_g$  constitue la bissectrice aiguë de l'angle  $2V$ . Par opposition, nous avons l'ellipsoïde **biaxe négatif** lorsque c'est  $n_p$  qui est la bissectrice aiguë de l'angle  $2V$ .



Biaxe positif



Biaxe négatif

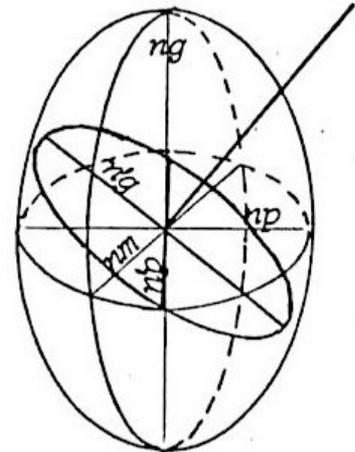
Examinons à nouveau les dessin de la pages précédentes et appliquons ce que nous savons maintenant des ellipsoïdes des indices. On constate :

- un rayon lumineux qui entre dans le cristal en suivant la direction de  $n_g$  se divise en deux vibrations polarisées d'indices  $n_p$  et  $n_m$ ,
- un rayon lumineux qui entre dans le cristal en suivant la direction de  $n_p$  se divise en deux vibrations polarisées d'indices  $n_g$  et  $n_m$ ,
- un rayon lumineux qui entre dans le cristal en suivant la direction de  $n_m$  se divise en deux vibrations polarisées d'indices  $n_p$  et  $n_g$ .
- Que se passe-t-il pour un rayon lumineux entrant dans le cristal avec une orientation quelconque ?

Examinons le dessin ci-contre. La section normale au rayon lumineux découpe dans l'ellipsoïde une ellipse dont le grand axe a une valeur intermédiaire entre  $n_m$  et  $n_g$  et qu'on appelle  $n'_g$ . Le petit axe a une valeur intermédiaire entre  $n_p$  et  $n_m$  qu'on appelle  $n'_p$ .

Il existe une relation mathématique entre l'angle  $2V$  et les indices  $n_g$ ,  $n_p$  et  $n_m$ . Elle vaut :

$$\tan^2 V = \frac{n_g^2 (n_m^2 - n_p^2)}{n_p^2 (n_g^2 - n_m^2)}$$



Nous verrons plus loin comment on peut simplifier cette équation.

L'ellipsoïde biaxe est le cas général de tous les minéraux. On peut assimiler les ellipsoïdes uniaxes à des ellipsoïdes biaxes dans lesquels  $n_m$  aurait la même valeur que  $n_g$  (uniaxe négatif) ou que  $n_p$  (uniaxe positif). On peut même considérer les minéraux cubiques comme un cas particulier où  $n_g$ ,  $n_p$  et  $n_m$  aurait la même valeur. L'ellipsoïde se réduit alors à une sphère.

---

## Commentaires au chapitre N° 4

Les ellipsoïdes n'existent pas réellement, bien entendu. C'est un modèle, une vue de l'esprit destinée à concrétiser ce qui se passe. Nous devons donc imaginer qu'il existe dans chaque minéral un ellipsoïde des indices, uniaxe ou biaxe, positif ou négatif. Par rapport aux éléments de symétrie du minéral, l'ellipsoïde n'est pas orienté n'importe comment. Par exemple l'axe optique des uniaxes coïncide avec l'axe de symétrie principal. Pour les biaxes, les directions  $n_g$ ,  $n_p$  et  $n_m$  correspondent à des éléments de symétrie du minéral.

Dans une roche, les minéraux sont généralement orientés d'une manière quelconque. Lorsqu'on taille une lame mince dans une roche, on découpe du même coup les ellipsoïdes de tous les minéraux présents. Dans la coupe mince chaque minéral a été taillé en une lame à faces parallèles. On peut donc dessiner par l'imagination toutes les ellipses découpées dans les ellipsoïdes des minéraux présents

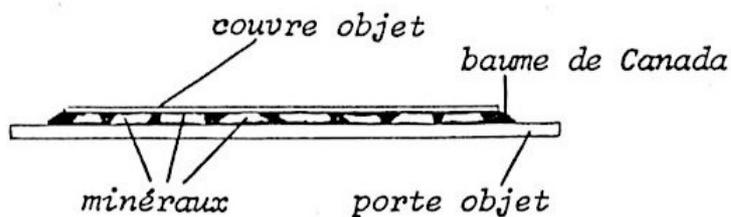
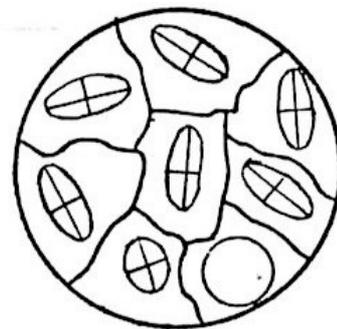


Schéma d'une coupe mince d'une roche (épaisseur = 0.03 mm)



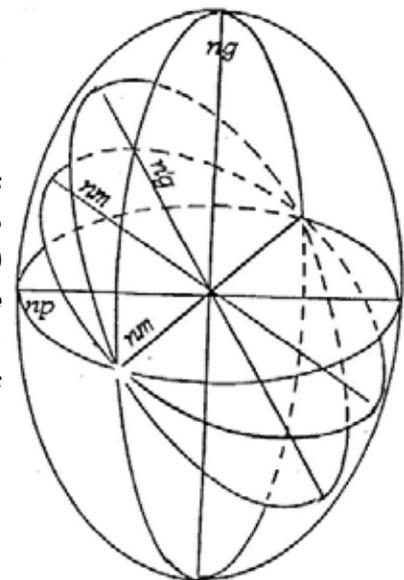
Sections découpées dans les ellipsoïdes des indices de chaque grain.

Les rayons lumineux issus de l'illuminateur d'un microscope traversent la coupe mince avec une incidence normale. À l'intérieur de chaque minéral ils se divisent en deux vibrations polarisées. Les plans de polarisation passent par les traces des axes de chaque ellipse que nous avons mentalement dessinées sur chaque section de cristal. Les indices de réfraction auxquels ces rayons obéissent sont proportionnels aux axes  $n_g$  et  $n_p$ .

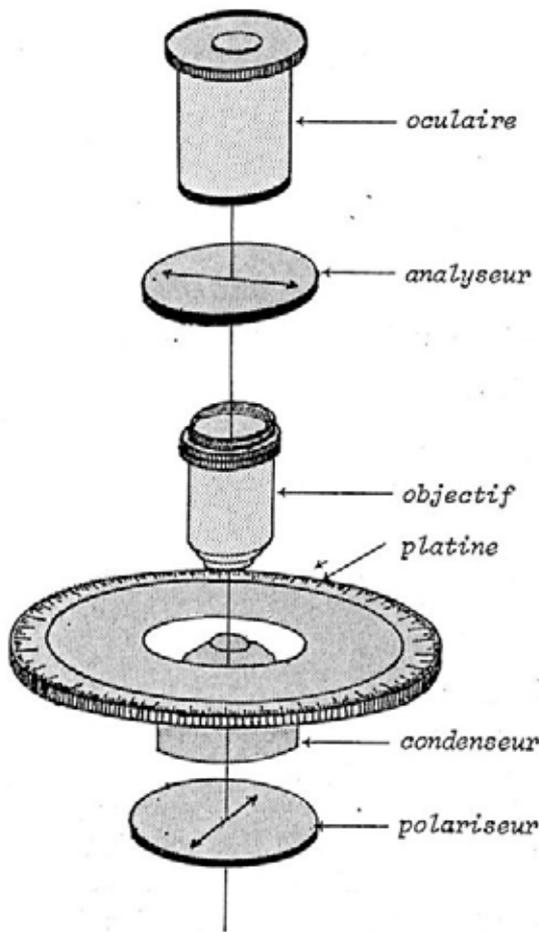
On peut essayer de comprendre intuitivement qu'il existe vraiment deux sections cycliques dans un ellipsoïde biaxe.

Considérons le dessin ci-contre et imaginons une section orientable pouvant pivoter autour de  $n_m$ .

Nous avons d'une part la section horizontale d'indices  $n_m$  et  $n_p$ , et, d'autre part, la section verticale d'indices  $n_m$  et  $n_g$ . Si nous considérons toutes les sections intermédiaires, on remarque qu'elles ont toutes un indice  $n_m$  (puisque c'est l'axe de pivotement) alors que l'autre indice passe progressivement et d'une manière continue de  $n_p$  à  $n_g$ . Il est facile d'imaginer alors que pour une certaine position cet indice sera aussi égal à  $n_m$ . Nous avons donc une ellipse dont les deux axes sont égaux : c'est un cercle !



## Principe et description du microscope polarisant



Nous n'allons pas décrire la partie optique du microscope mais seulement le dispositif de polarisation et la manière dont les rayons lumineux se divisent en diverses ondes polarisées à travers le système microscope/lame biréfringente.

Le dessin ci-contre montre schématiquement les principaux organes d'un microscope polarisant. Du bas vers le haut, la lumière issue d'un **illuminateur** traverse successivement le **polariseur**, le **condenseur** qui concentre la lumière sur la préparation, la **platine** porte-objet sur laquelle prendra place la coupe mince, puis l'**objectif**, l'**analyseur** et enfin l'**oculaire**.

Le polariseur polarise la lumière dans le plan vertical de l'oeil de l'observateur, l'analyseur dans le plan horizontal.

Ces deux plans de polarisation sont symbolisés par deux **réticules**<sup>1</sup> gravés dans l'oculaire, l'un vertical, l'autre horizontal.

La platine porte-objet tourne sur elle-même. Un cercle gradué et un repère fixe permettent d'effectuer des mesures d'angle.

Tous les microscopes polarisants qu'on trouve dans le commerce fonctionnent sur ce principe. Le schéma de la page suivante est essentiel pour comprendre le fonctionnement du microscope polarisant et le cheminement des rayons lumineux à travers le système microscope polarisant/lame cristalline.

cheminement des rayons lumineux à travers le système microscope polarisant/lame cristalline.

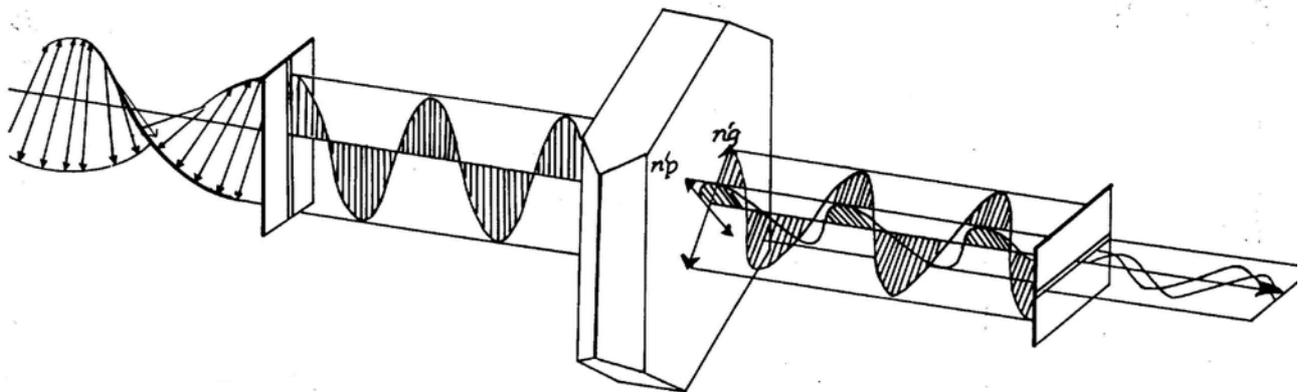


Schéma du cheminement de la lumière à travers le système microscope polarisant/lame cristalline

<sup>1</sup> Les réticules des anciens microscopes étaient équipés de fils tendus. Aussi a-t-on conservé l'habitude de parler des "fils du réticule".

Sur le minéral on a tracé les axes de l'ellipse définie dans l'ellipsoïde par la section. On imagine qu'il s'agit d'une section d'orientation quelconque qui définit les indices  $n'_g$  et  $n'_p$ .

Le cheminement de la lumière peut être représenté de la manière suivante :

- Avant de pénétrer dans le polariseur, la lumière n'est pas polarisée. Sur le dessin on a symbolisé la lumière ordinaire par une sorte de spirale.
- Après avoir traversé le polariseur, la lumière vibre dans le plan vertical, symbolisé dans l'oculaire du microscope par le fil vertical du réticule.
- A l'intérieur du minéral, la lumière se divise en deux composantes polarisées, chacune vibrant dans un plan perpendiculaire l'un à l'autre, plans définis par les traces de  $n'_g$  et  $n'_p$ . De plus, chacune des vibrations obéit à un indice différent de celui de l'autre; ce sont  $n'_g$  et  $n'_p$ . Autrement dit, cela signifie que ces deux composantes se déplacent avec des vitesses différentes, inversement proportionnelles aux indices  $n'_g$  et  $n'_p$ . Une onde prend donc un certain **retard** sur l'autre. A la sortie du minéral, les deux composantes reprennent leur marche avec la même vitesse ( $n_{air} = 1$ ). Elles vibrent toujours dans des plans perpendiculaires l'un à l'autre et le retard d'une onde sur l'autre reste constant. Ce retard, ou décalage, correspond donc à une différence de phase des deux ondes.
- Le passage à travers l'analyseur "aplati" en quelques sortes ces ondes en ne laissant passer que la composant horizontale de chacune d'elles.

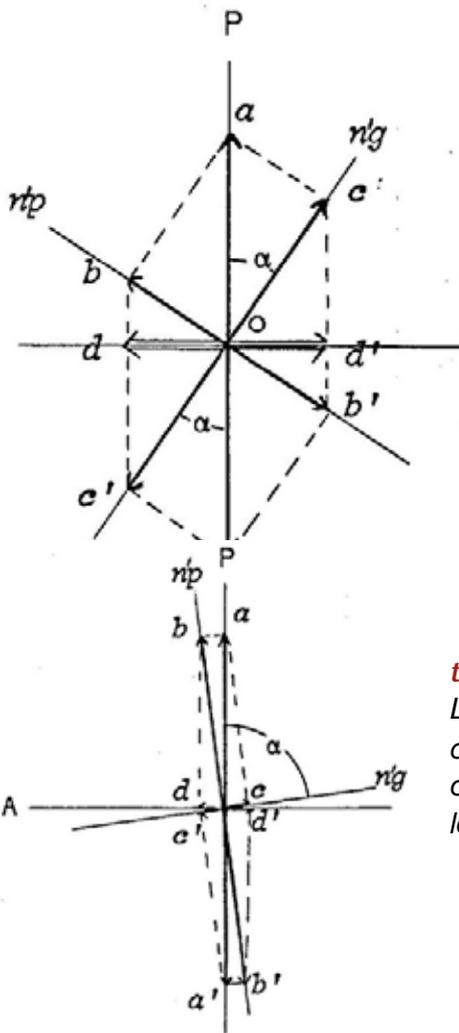
### Le retard

Si nous ne considérons que la lumière monochromatique, nous nous trouvons alors dans la situation déjà analysée précédemment de l'interférence de deux ondes polarisées dans un même plan, de même longueur d'onde, de même amplitude et qui ne diffèrent que par leur différence de phase. En effet, le retard pris par une onde sur l'autre à l'intérieur de la lame cristalline subsiste. Le temps mis par chacune des ondes pour traverser cette lame est le suivant :

$$t_1 = \frac{e}{v_1} = \frac{e(n'_g)}{c} \quad \text{et} \quad t_2 = \frac{e}{v_2} = \frac{e(n'_p)}{c}$$

$$\text{d'où} \quad R = c \frac{e(n'_g - n'_p)}{c} = e(n'_g - n'_p)$$

où  $c$  = vitesse de la lumière dans le vide,  $e$  = épaisseur de la lame mince



Nous pouvons aussi calculer sans difficulté l'amplitude de l'onde résultante qui subsiste dans le plan de l'analyseur. Examinons les schémas suivants. Après son passage à travers le polariseur l'onde vibre selon  $aa'$ . A l'intérieur du minéral elle se décompose en deux vibrations  $bb'$  et  $cc'$ , d'amplitude  $oa$  et  $ob$ . En passant dans l'analyseur, ces deux vibrations se transforment en deux nouvelles ondes  $dd'$ , chacune d'amplitude  $od$ . On voit immédiatement que :

$$od = oa \sin \alpha \times \cos \alpha$$

$$od' = oa \cos \alpha \times \sin \alpha$$

On remarque immédiatement que lorsque  $\alpha = 0^\circ$  ou  $90^\circ$ , l'amplitude est nulle. La lumière n'est alors plus transmise au-delà de l'analyseur. On dit que le minéral est en **position d'extinction**. Au cours d'une rotation, il y a extinction tous les  $90^\circ$ . La position intermédiaire ( $\alpha = 45^\circ$ ) correspond à la position d'illumination maximum. C'est dans cette position qu'on peut observer les effets du retard relatif des deux ondes situées dans le plan de l'analyseur.

## Interférences en lumière monochromatique

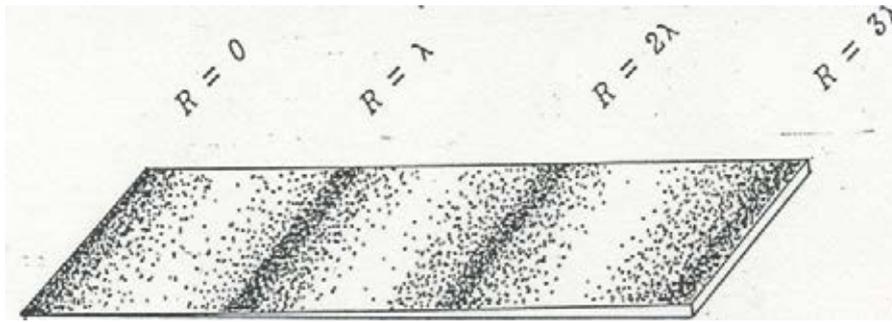
Les interférences se traduisent par un renforcement ou la disparition de la luminosité selon que les deux ondes sont en concordance ou en opposition de phase. Dans une course d'athlétisme, nous pouvons exprimer le retard d'un concurrent sur l'autre, soit en temps, soit en distance. Il en est de même pour les ondes lumineuses. Choisissons d'exprimer le retard d'une onde sur l'autre en fractions de longueur d'onde.

Il faut noter au préalable que le microscope, de par la conception de son système de polarisation, apporte un retard fixe d'une demi longueur d'onde. En effet, si nous reprenons le schéma de la page 24, nous constatons que l'onde issue du polariseur a été subdivisée - comme si elle avait été "écartelée" - en deux vibrations dans des plans orientés à  $90^\circ$  l'un de l'autre ( $n'g$  et  $n'p$ ) qui sont ensuite "écartelées" à leur tour par l'analyseur. Cela correspond à une rotation de  $180^\circ$  d'un vecteur par rapport à l'autre et se traduit par un retard d'une demi longueur d'onde. Il faut donc toujours additionner mentalement ce retard à celui introduit par le minéral.

Après la traversée de l'analyseur, nous aurons une intensité maximum ou minimum suivant le retard apporté par la lame cristalline sera :

$$\text{si } R = \frac{(2n-1)\lambda}{2} \text{ il y a intensité maximum} \quad \text{si } R = \frac{(2n)\lambda}{2} \text{ il y a extinction}$$

On peut mettre ce phénomène en évidence en observant une lame de quartz taillés en biseau, plus connue sous le nom de **biseau de quartz**.



*interférences observées sur un biseau de quartz  
placé entre un polariseur et un analyseur*

Placé entre le polariseur et l'analyseur, ce biseau introduit un retard progressif puisque son épaisseur l'est aussi. Le retard passe d'une valeur nulle à une valeur maximum. Les zones qui correspondent à un retard d'un nombre entier<sup>1</sup> de longueurs d'onde sont obscures, alors que celles qui correspondent à un nombre impair de demi-longueurs d'onde présentent une luminosité maximum.

Pratiquement, entre polariseur et analyseur, le biseau présente alternativement des bandes obscures et lumineuses.

### **Interférences en lumière polychromatique**

Si nous reprenons l'expérience précédente avec une lumière comportant deux longueurs d'onde, le bleu ( $\lambda_{\text{air}} = 470 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ) et le rouge ( $\lambda_{\text{air}} = 700 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ), nous observons une extinction pour le bleu lorsque le retard atteint  $470 \times 10^{-6} \text{ mm}$ , alors que le rouge n'est pas encore éteint. Réciproquement, pour un retard de  $700 \times 10^{-6} \text{ mm}$ , le rouge s'éteint alors qu'il y a intensité maximum pour le bleu, car  $3\lambda/2$  de bleu =  $700 \times 10^{-6} \text{ mm}$ . Le biseau de quartz montre alors des bandes alternativement rouges et bleues avec une teinte intermédiaire violette. Nous avons obtenu les couleurs qui résultent de la superposition des couleurs obtenues séparément par un biseau observé en lumière rouge et un autre observé en lumière bleue.

Pour saisir ce qui va se passer si nous observons maintenant notre biseau avec de la lumière "blanche", il suffit d'imaginer une série de biseaux, chacun observé dans les couleurs fondamentales du spectre solaire, puis de superposer toutes les intensités de couleur observées.

Le tableau ci-dessous représente les bandes alternées lumineuses et obscures produites par six biseaux imaginaires. Le retard exprimé en millièmes de mm figure sur la règle supérieure. Chaque fois que le retard atteint une valeur égale à un nombre entier de demi-longueurs d'onde pour la couleur considérée, il y a extinction.

Les couleurs qu'on observe sur un biseau de quartz examiné en lumière blanche correspondent à la superposition des couleurs de ces six biseaux imaginaires. On a indiqué sur la règle du bas les couleurs résultantes.

Les minéralogistes utilisent un abaque sur lequel ces couleurs sont reproduites et qu'on désigne habituellement comme le tableau des teintes de Newton. Il est connu aussi sous le nom de tableau de Michel Lévy.

<sup>1</sup>

N'oublions pas qu'il faut tenir compte du retard de  $\lambda/2$  apporté par le microscope !

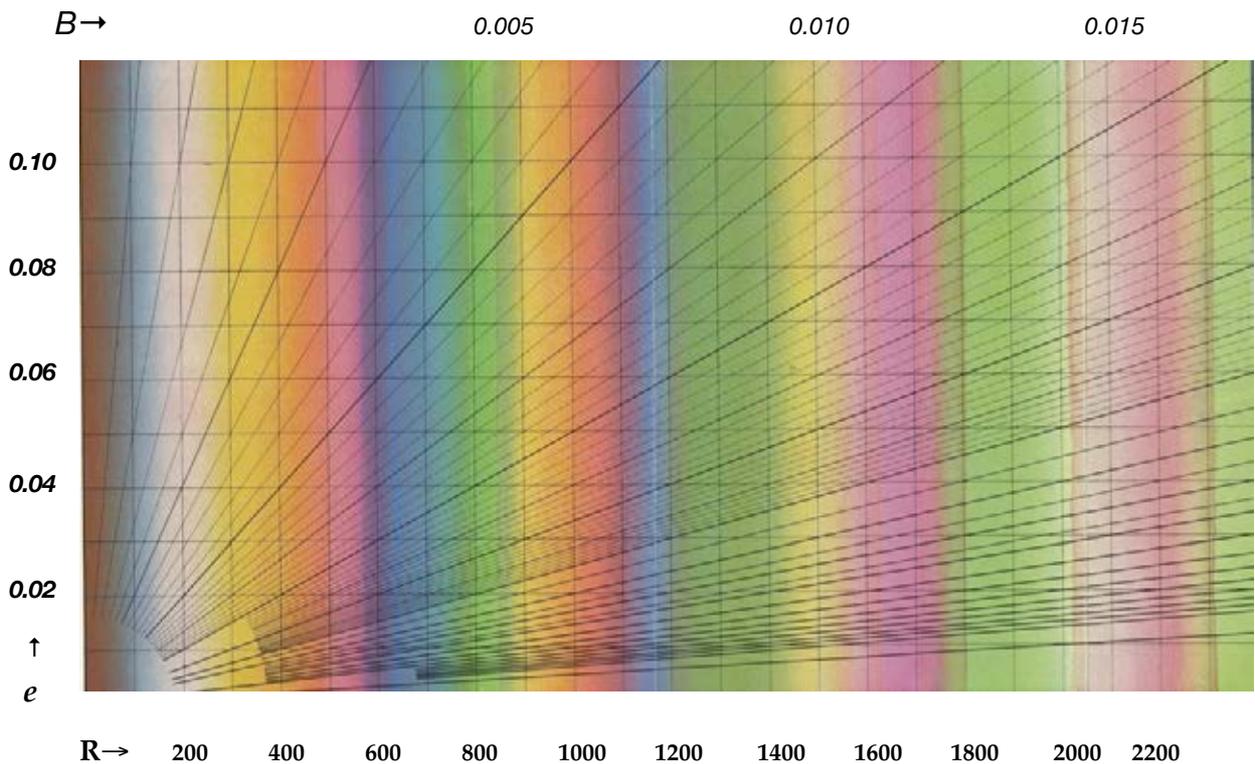
R (10 <sup>-10</sup> mm)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1'000	1'100	1'200	1'300	1'400	1'500	1'600	1'700	1'800	1'900	2'000			
violet																							
	$\lambda$					$2\lambda$					$3\lambda$					$4\lambda$							
bleu																							
	$\lambda$					$2\lambda$					$3\lambda$					$4\lambda$							
vert																							
	$\lambda$					$2\lambda$					$3\lambda$												
jaune																							
	$\lambda$					$2\lambda$					$3\lambda$												
orange																							
	$\lambda$					$2\lambda$					$3\lambda$												
rouge																							
	$\lambda$					$2\lambda$																	
Teinte résultante	gris foncé	gris-bleu	blanc	jaune	orange	rouge	violet	bleu	vert	jaune	orange	rouge	violet	bleu	bleu-vert	vert	jaune-vert	orange	carmin	violet-gris	bleu-gris	vert-gris	vert-pâle
Ordre	1er ordre							2e ordre							3e ordre								

En général, les observations effectuées au microscope se font avec une source lumineuse "blanche". Entre polariseur et analyseur, les minéraux apparaissent colorés. Ces teintes correspondent à des retards dont on peut évaluer la grandeur en les comparant à celles du tableau de Newton. Par ailleurs, si, par un moyen quelconque, on parvient à mesurer l'épaisseur de la lame mince, on peut calculer aisément la biréfringence, c'est à dire la différence des deux indices de réfraction auxquels ont été assujetties les vibrations lumineuses à l'intérieur de la lame mince. Rappelons que la relation entre le retard R, l'épaisseur e et la biréfringence B est :

$$R = B \times e \quad \text{où} \quad B = (n'_g - n'_p)$$

Le tableau des teintes de Newton, appelé aussi tableau de Michel-Lévy, comporte un abaque en surimpression qui indique la valeur de la biréfringence lorsqu'on connaît le retard et l'épaisseur de la préparation.

Tableau des teintes de Newton ou tableau de Michel-Lévy

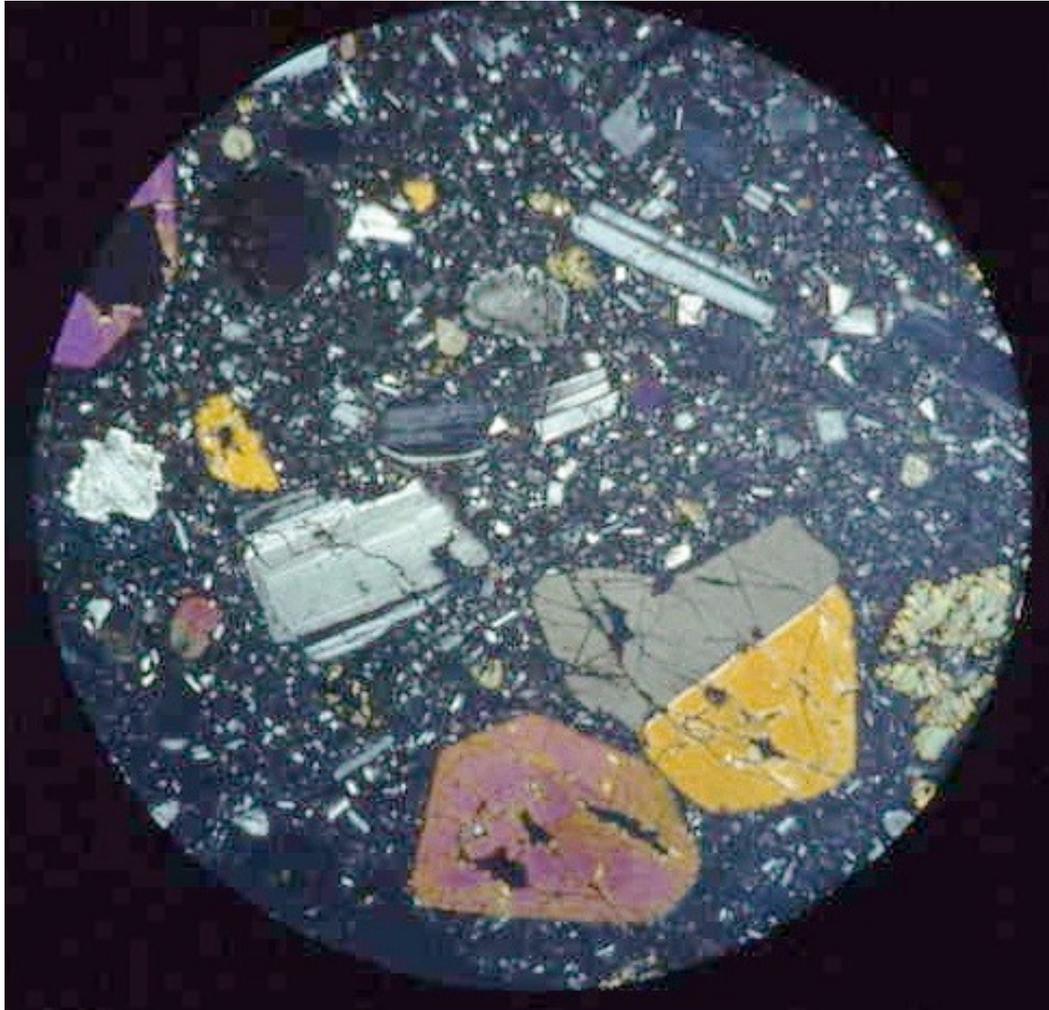


En abscisse, au bas du tableau, figure le retard  $R$  exprimé en millièmes de mm. En ordonnée on a l'épaisseur  $e$  de la préparation exprimée en millimètres. Le tableau comporte des lignes obliques correspondant à des valeurs de biréfringence. On l'utilise de la manière suivante :

1. on estime le retard du minéral étudié en comparant sa teinte de polarisation avec la teinte identique sur le tableau;
2. on mesure l'épaisseur de la lame (on verra plus loin comment),
3. on cherche sur le tableau le point de rencontre de la ligne verticale (retard) et de la ligne horizontale (épaisseur),
4. à partir de ce point, on suit la ligne oblique la plus proche jusqu'à son extrémité supérieure où on lit la biréfringence.

Sur le tableau de Newton, on remarque une périodicité dans la succession des couleurs : violet, bleu, vert, jaune, orange, rouge... Cette succession de couleur se répète mais en devenant de plus en plus pâle. On a subdivisé ce tableau en plusieurs parties, chacune étant appelée "ordre". En exprimant le retard, il faudra préciser si le jaune qu'on observe se situe dans le premier ordre, le deuxième ordre, etc..

## *Beauté du monde intime des roches vues au microscope polarisant*



*Basalte : cristaux d'augite dont les teintes de polarisation font ressortir la présence d'une macle simple. Cristaux de plagioclase polarisant dans gris avec macles polysynthétiques. Pâte de fond constituée de très petits cristaux mélangé à un fond plus ou moins vitreux. Les gros cristaux se sont formés en premier dans le magma encore fluide. Ils ont pu se développer librement et prendre des formes cristallines identifiables. Au cours de l'éruption, le magma s'est consolidé rapidement, laissant un fond plus ou moins vitreux et mal cristallisé.*

## 6. Description du microscope polarisant

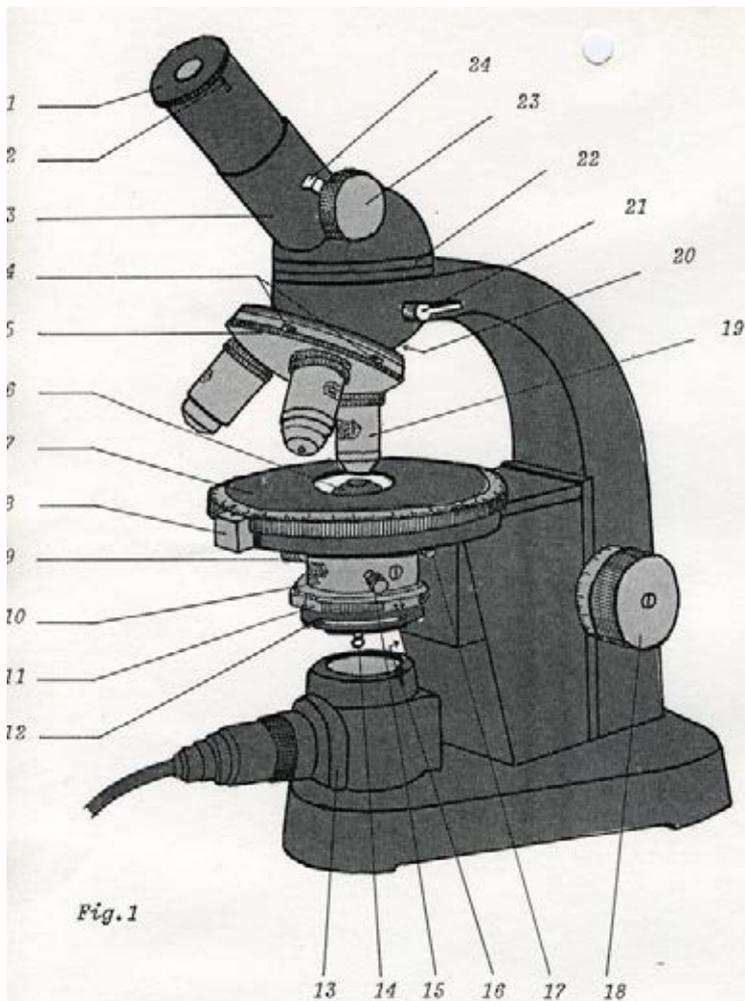
Le microscope polarisant se distingue de celui du biologiste par l'adjonction d'un polariseur, d'un analyseur, d'une platine porte-objet tournante ainsi que par quelques accessoires supplémentaires, tels la lentille de Bertrand, une crémaillère micrométrique, un dispositif précis de centrage des objectifs.

Le microscope polarisant est un instrument coûteux à cause de l'extrême précision qu'il faut lui apporter pour assurer une coïncidence parfaite entre l'axe de rotation de la platine et l'axe de symétrie de l'ensemble du dispositif optique. Toutes les lentilles sont sélectionnées avec soin pour s'assurer qu'elle ne comportent aucune anisotropie parasite due à des tensions dans le verre.

### Description du microscope

Commençons par la partie inférieure de l'instrument en suivant le trajet des rayons lumineux :

- **L'illuminateur** est un dispositif d'éclairage à incandescence fourni généralement par une ampoule à basse tension. Un filtre bleu-clair assure une lumière qui se rapproche le plus possible de la lumière du jour.
- **Le diaphragme-iris** permet de diminuer l'ouverture du cône de lumière, réduisant la luminosité de l'objet observé mais ce qui a comme avantage d'en augmenter le relief.
- **Le polariseur**, autrefois constitué d'un prisme de Nicol, est le plus souvent constitué d'une plaquette de Polaroid. Il est généralement assemblé avec le condenseur. Il est orientable dans n'importe quel azimut. Classiquement, on règle son orientation de manière que son plan de polarisation coïncide avec le plan de symétrie du microscope, symbolisé par le fil vertical du réticule gravé à l'intérieur de l'oculaire. Un repère fixe gravé sur la monture du condenseur facilite ce réglage. Une vis de blocage assure le maintien du polariseur dans l'orientation choisie.
- **Le condenseur** assure un éclairage uniforme du champ de vision. La partie fixe du condenseur est suffisante pour un grossissement faible à moyen, Pour un grossissement plus important, on lui superpose une lentille amovible qui a pour effet de diminuer la distance focale de l'ensemble et d'assurer un éclairage plus intense de la partie observée.
- **La molette de réglage** en hauteur du système condenseur/polariseur (non visible sur le dessin) permet de faire varier le contraste lumineux de l'objet observé par rapport au milieu dans lequel il se trouve. Il permet aussi de faire coïncider le foyer du condenseur avec le plan de la préparation lors des observations dites "en lumière convergente".
- **La platine porte-objet** est circulaire et peut tourner sur elle-même autour d'un axe à centrage fixe. La circonférence est divisée en 360° et un repère fixe permet d'effectuer des mesures angulaires.
- **La molette de réglage** de la mise au point de l'image agit en modifiant la hauteur de la platine porte-objet. Elle assure deux fonctions :
  - un déplacement rapide de la platine porte-objet,
  - un déplacement micrométrique permettant de mesurer des différences de hauteur de 0.001 mm.
- Cette double fonction est rendue possible grâce à deux butées entre lesquelles le déplacement est micrométrique et au-delà desquelles le déplacement est rapide. La molette est graduée et un repère fixe assure des lectures précises de la position en hauteur de la platine.
- **Le revolver porte-objectifs** permet de passer rapidement d'un grossissement à l'autre par simple rotation du dispositif. Deux vis de centrage situées de part et d'autre de chaque objectif permettent d'assurer une parfaite coïncidence entre l'axe du système optique et l'axe de rotation de la platine.



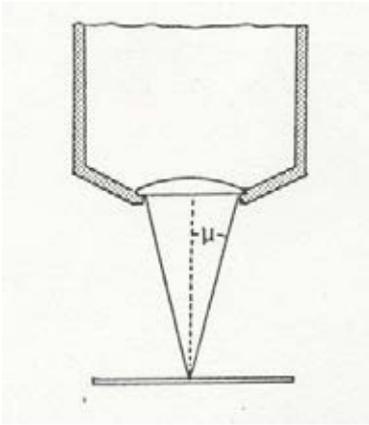
1. Oculaire équipé d'un réticule.
2. Fente bloquant la came d'orientation de l'oculaire.
3. Tube interchangeable.
4. Vis de centrage de chaque objectif.
5. Revolver porte-objectif.
6. Partie escamotable du condenseur
7. Platine porte-objet tournante avec division en 360°.
8. Repère fixe de lecture.
9. Bouton de commande du condenseur escamotable.
10. Partie fixe du condenseur.
11. Polariseur avec repère d'orientation.
12. Tige de commande du diaphragme-iris d'ouverture.
13. Illuminateur
14. Bague de support des filtres.
15. Vis de blocage du polariseur.
16. Molette de réglage de la hauteur du système condenseur/polariseur
17. Vis de blocage de l'ensemble condenseur/polariseur.
18. Molette de mise au point de l'image.
19. Objectif.
20. Fente de logement des lames auxiliaires
21. Analyseur escamotable.
22. Fixation à baïonnette du tube sur le statif.
23. Lentille de Bertrand escamotable.
24. Diaphragme de champ escamotable.

**Les objectifs** font partie du système grossissant du microscope. Ils sont caractérisés par un facteur de grossissement  $G$  et un numéro focal  $n$ . Le grossissement vaut :

$$G = \frac{\text{longueur du tube}}{\text{distance focale}} \quad \text{numéro focal } n = \sin \mu$$

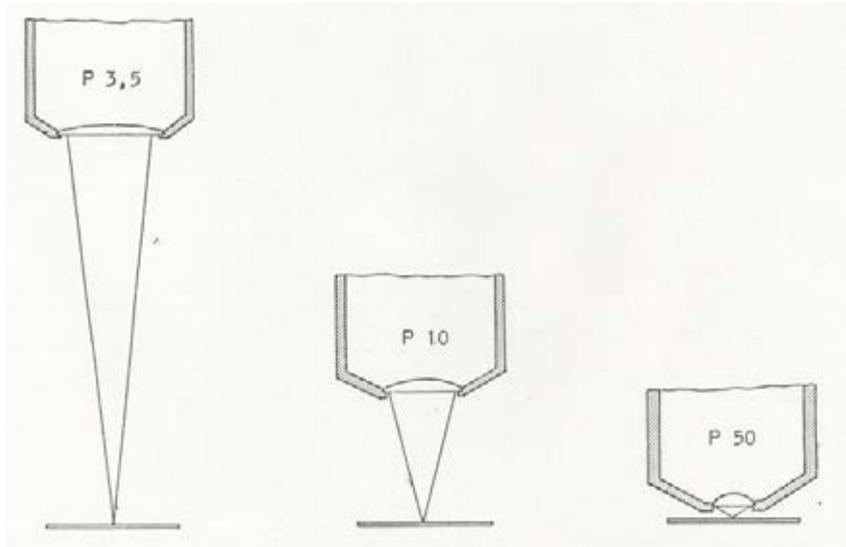
où  $\mu$  est la demi ouverture angulaire du champ de vision de l'objectif. L'ouverture angulaire est définie par le cône formé des rayons les plus divergents qui peuvent entrer dans l'objectif à partir du point sur lequel l'objectif est focalisé. L'image nette se fait au point de rencontre de ces rayons.

Si nous examinons les représentations schématiques des trois objectifs qui équipent habituellement ce microscope, nous constatons que la lentille frontale de l'objectif est d'autant plus proche de la préparation que le grossissement est plus important.



Pour les plus forts grossissements, l'objectif est très proche de la préparation et il faut être attentif à n'endommager ni la préparation, ni la lentille frontale de l'objectif. Dans les microscopes plus récents, la lentille frontale est montée dans un tube télescopique coulissant dans la partie principale de l'objectif et maintenue par un ressort. Si on touche par mégarde la préparation l'objectif se replie sur lui-même.

Angle d'ouverture  
d'un objectif



Désignation	G	num. focal $\mu$	ouv. ang.	dist. focale
P 3.5	3.5	0.10	11° 30'	49 mm
P 10	10	0.25	29°	17 mm
P 50	50	0.85	116° 30'	3.4 mm

Caractéristiques des objectifs équipant habituellement les microscope LEITZ, modèle SM-Pol.

L'image est nette lorsque la préparation se trouve exactement à la pointe du cône d'ouverture. Un faible déplacement en hauteur de l'objectif P50 éloigne immédiatement la préparation de la pointe du cône. Au contraire, un petit déplacement en hauteur de l'objectif P3.5 laisse la préparation dans une zone effilée du cône d'ouverture.

Ces deux remarques nous font percevoir la notion de profondeur de champ qu'on peut définir comme étant la distance verticale comprise entre deux limites entre lesquelles on peut déplacer l'objectif tout en conservant une image relativement nette. On voit que la profondeur de champs diminue avec l'augmentation du grossissement.

**L'analyseur escamotable** est constitué lui aussi d'un filtre Polaroid. Son orientation est fixe. Son plan de polarisation est tourné de 90° par rapport à celui du polariseur. Il est matérialisé dans l'oculaire par le fil horizontal du réticule.

**Le tube porte-oculaire** est fixé sur le statif du microscope par un système à baïonnette. On peut changer son orientation de  $180^\circ$  selon la préférence de l'observateur. Il est équipé d'une lentille additionnelle, la lentille de Bertrand ainsi qu'un diaphragme de champ. Nous verrons plus loin l'usage de ces deux accessoires.

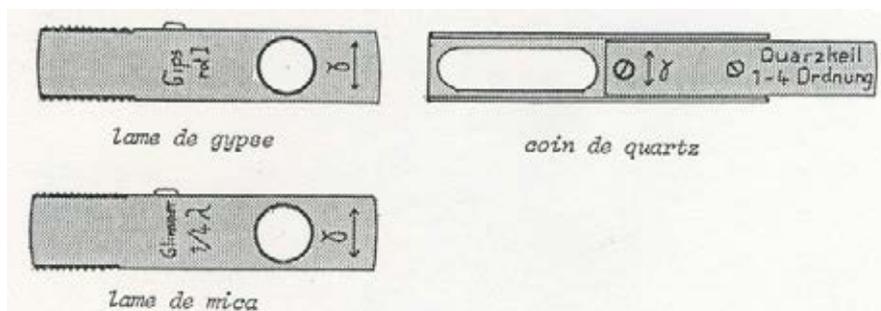
**L'oculaire** constitue, combiné avec l'objectif, le système grossissant du microscope. Il est caractérisé par son grossissement propre qui, multiplié par celui de l'objectif, constitue le grossissement du microscope. Entre les diverses lentilles qui le constituent se trouve une plaquette de verre sur laquelle sont gravés les deux réticules qui matérialisent les plans de polarisation du polariseur et de l'analyseur. un système de réglage permet de régler la netteté des réticules à la vue de l'observateur.

## Les principaux accessoires

Divers accessoires indispensables complètent l'équipement du microscope. Citons les principaux d'entre eux :

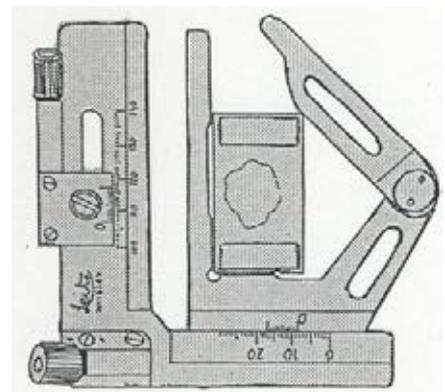
**Les lames compensatrices** sont constituées de petites plaquettes biréfringentes serties dans une monture métallique. La lame de gypse introduit un retard de  $575 \times 10^{-8}$  mm. La lame de mica, dite aussi lame quart d'onde, introduit un retard de  $150 \times 10^{-8}$  mm. La direction du plus grand des deux indices  $n_g$  ( $\gamma$  sur la lame) est gravée sur la monture. Ces deux lames dont nous verrons plus loin l'usage s'introduisent dans une fente située au dessus du revolver porte-objectif. Par rapport à l'observateur, cette fente est orientée NW-SE.

**Le biseau de quartz**, ou coin de quartz, est taillé parallèlement à une des facettes d'un cristal de quartz. Il est serti dans une monture métallique sur laquelle la direction de l'indice  $n_g$  ( $\gamma$ ) est gravée. En introduisant plus ou moins en avant cette lame dans la fente précitée on impose un retard supplémentaire plus ou moins grand à l'une des ondes polarisées par rapport à l'autre.



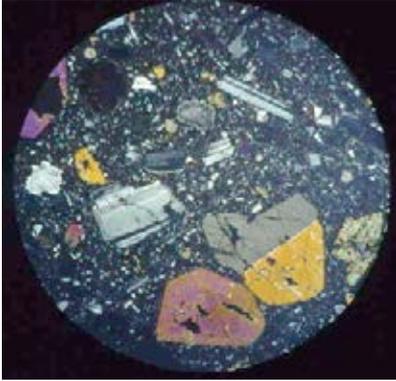
Lames compensatrices et biseau de quartz

**La surplatine** se fixe sur la platine porte-objet. Elle permet de localiser avec précision un point de la préparation, Deux crémaillères normales l'une à l'autre facilitent le déplacement de la coupe mince. Chaque bras de la surplatine est gradué et un vernier assure des lectures à 0.1 mm près.



## 7. Observations en lumière polarisée<sup>1</sup> parallèle

Le profane qui observe pour la première fois une lame mince de roche au microscope polarisant, découvre un assemblage fascinant de formes variées aux couleurs vives, que bien des peintres non figuratifs aimeraient pouvoir imiter. Ce sont les sections de tous les minéraux constitutifs de la roche, chacune reproduisant une teinte<sup>2</sup> de polarisation différente.



Basalte vu en lumière polarisée

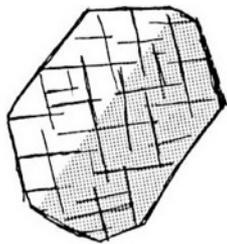
Les observations en lumière polarisée nécessitent la mise en service de l'analyseur. On utilise le plus souvent un grossissement faible à moyen. Avec le grossissement moyen, on peut ajouter la partie amovible du condenseur. Cela augmente la luminosité, mais diminue le relief et délave parfois les teintes de polarisation.

En faisant tourner la platine, nous découvrons des sections anisotropes qui, toutes, présentent alternativement une certaine teinte suivie d'une extinction. Ces teintes sont dues aux interférences provoquées par le déphasage d'une onde sur l'autre au cours de la traversée de chaque section.

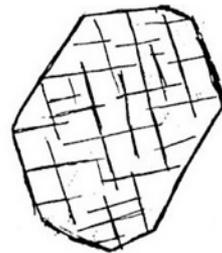
Quelques rares sections restent toujours obscures malgré la rotation de la platine. Il s'agit soit de minéraux cubiques qui sont isotropes, soit encore d'une section perpendiculaire à un axe optique, soit encore d'un minéral opaque. On reconnaît aisément ce dernier cas par le fait qu'il conserve son caractère opaque lorsqu'on ôte l'analyseur. Pour distinguer un minéral isotrope (cubique) d'une section perpendiculaire à un axe optique, il faut recourir à l'observation en lumière polarisée convergente. Nous verrons ceci plus loin.

### Macles et clivages

Parmi les sections anisotropes, il y en a parfois qui semblent partagées en deux parties par une ligne droite, chaque moitié du minéral ayant sa propre teinte de polarisation et sa position d'extinction particulière. Si on ôte l'analyseur, cette différence disparaît et le minéral semble parfaitement uniforme.



Minéral maclé vu en L.P.



Le même minéral vu en L.N.

Parfois la macle est multiple. Au lieu de deux individus, le minéral semble constitué d'une série de lamelles parallèles se rapportant alternativement à deux orientations optiques différentes.

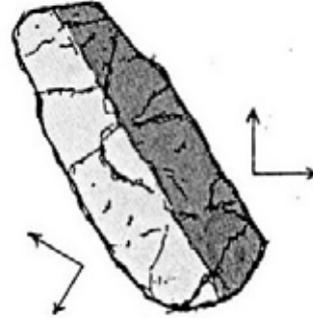
<sup>1</sup> C'est le premier d'une série de trois chapitres consacrés aux différentes possibilités d'observation qu'offre le microscope polarisant : lumière polarisée parallèle, lumière polarisée convergente, lumière naturelle.

<sup>2</sup> Nous réserverons dès maintenant le mot "teinte" pour les phénomènes colorés provoqués par la polarisation et nous n'utiliserons le mot "couleur" que lorsqu'il s'agira de la couleur propre d'un minéral qu'on observe en lumière naturelle.

Les macles n'apparaissent là aussi qu'en lumière polarisée, car les orientations de l'ellipsoïde des indices de chacune des parties du minéral sont différentes l'une de l'autre. Lorsqu'une des parties a ses indices principaux parallèles aux fils du réticule, elle est éteinte. Pour la même position, l'autre partie dont les indices ne sont pas parallèles aux traits du réticule, reste éclairée.



Macles multiples vues en L.P.



Orientation optique des deux parties d'une macle.



Macles invisibles en L.N.



Même section vue en L.P.

Les lignes de clivage sont des réseaux de fissures non ouvertes dont les intersections avec le plan de la coupe mince forment des lignes parallèles visibles aussi bien en lumière parallèle qu'en lumière polarisée.

#### Abréviations utilisées dès à présent

section parallèle	:	section parallèle à l'axe optique
Section perpendiculaire	:	section perpendiculaire à l'axe optique
L.P.	:	lumière polarisée
L.N	:	lumière parallèle

### Recherche de la section parallèle à l'axe optique

La recherche de la section parallèle aux axes optiques (à l'axe optique dans le cas des minéraux uniaxes) est une opération importante qui doit toujours être effectuée dans une routine d'identification d'un minéral. Cette section découpe dans l'ellipsoïde un ellipse dont les axes sont  $n_g$  et  $n_p$ ,

$$B = \frac{R}{e} \text{ et l'épaisseur } e = \frac{R}{B}$$

correspondant aux indices maximum et minimum du minéral étudié. Comment la trouver ? Parmi les nombreuses sections présentes dans la coupe mince, la section parallèle est celle qui présente

le retard le plus élevé, c'est-à-dire qu'elle présente la teinte de polarisation la plus à droite sur le tableau de Newton.

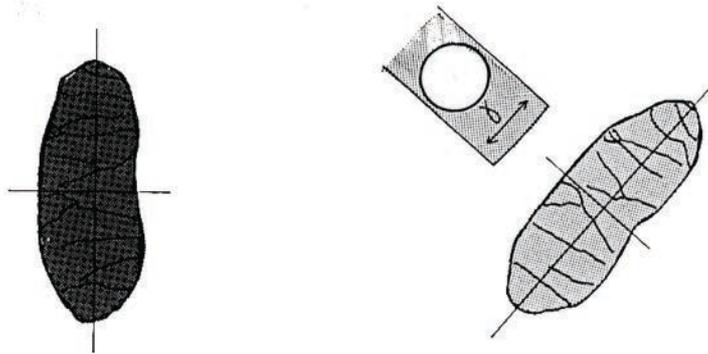
Après avoir identifié la section parallèle, on note sa position exacte à l'aide des coordonnées de la surplatine, puis on la dessine dans l'orientation d'une de ses positions d'extinction. On sait alors que ses indices  $n_g$  et  $n_p$  sont parallèles aux traits du réticule.

$$e = \frac{R}{0.009}$$

### Détermination de la position des indices $n_g$ et $n_p$ .

On sait déjà qu'en position d'extinction, les indices  $n_g$  et  $n_p$  sont parallèles aux traits du réticule. Mais on ne sait pas encore lequel est  $n_g$ , lequel est  $n_p$ . Pour lever cette incertitude, nous devons utiliser une des lames auxiliaires décrites plus haut. On procède de la manière suivante :

1. Sur le dessin du minéral en position d'extinction, dessinons les traces des traits du réticules. Ils matérialisent  $n_g$  et  $n_p$ .
2. Faisons tourner la platine de  $45^\circ$  (peu importe le sens) : la section se trouve alors en position d'illumination maximum. Mentalement faisons tourner le dessin dans le même sens, entraînant du même coup la rotation des indices.
3. Superposons au minéral une lame auxiliaire, le mica quart-d'onde par exemple :



Deux cas de figure peuvent alors se présenter :

1. Le grand indice de la lame auxiliaire ( $n_g$ ) est parallèle à celui du minéral.

A l'intérieur du minéral, l'onde qui obéit à  $n_p$  prend un certain retard sur celle qui est soumise à  $n_g$ . Dans la lame auxiliaire, l'onde en retard obéit encore à  $n_g$  et, par conséquent, son retard augmente encore, On peut donc écrire :

$$R_{total} = R_{minéral} + R_{lame}$$

Cette addition des retard se traduit par un changement de la teinte de polarisation dans le sens d'un déplacement vers la droite dans l'échelle des teintes de Newton. Ce déplacement correspond au retard apporté par la lame. Il est égal (pour la lame de mica) à  $150 \times 10^{-6}$  mm.

## 2. Le grand indice de la lame est perpendiculaire à celui du minéral.

Par un raisonnement analogue à celui développé ci-dessus, on voit que, cette fois-ci, le retard de la lame auxiliaire est soustraite du retard du minéral observé. On peut donc écrire :

$$R_{\text{total}} = R_{\text{minéral}} - R_{\text{lame}}$$

Cette soustraction des retards se traduit encore par un changement de la teinte de polarisation dans le sens d'un déplacement vers la gauche sur l'échelle des teintes de Newton.

Avec un peu d'expérience, il n'est pas difficile d'identifier ces deux situations et on peut donc déterminer l'orientation des indices du minéral examiné en comparant leur position à celle du grand indice de la lame auxiliaire qui est connue et gravée sur la monture. On utilise habituellement le mica quart-d'onde. On réserve l'emploi de la lame de gypse aux minéraux de faible biréfringence.

## Estimation de la valeur du retard

L'estimation de la valeur du retard de la section parallèle se fait en principe en comparant sa teinte de polarisation avec celles du tableau de Newton. En réalité, cette comparaison n'est pas si aisée car, d'une part, les teintes du tableau de Newton ne sont que rarement reproduites d'une manière fidèle à la réalité et, d'autre part, l'estimation de la teinte de polarisation du minéral peut être faussée par la couleur propre de celui-ci. Par ailleurs, la difficulté de distinguer des teintes identiques dans des ordres différents du tableau apporte une confusion supplémentaire.

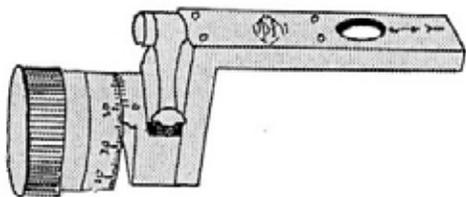
Aussi on peut recourir à un compensateur, accessoire qui permet de mesurer le retard avec une certaine précision.

## Emploi d'un compensateur

Le compensateur le plus simple est le biseau de quartz. En l'engageant progressivement dans l'ouverture réservée aux lames auxiliaire, il permet de faire varier le retard de zéro jusqu'à une valeur correspondant aux teintes du troisième ou quatrième ordre de l'échelle de Newton.

Le principe consiste à orienter le minéral de telle manière que son plus grand indice soit normal à celui du biseau de quartz (position de compensation). On introduit alors progressivement le biseau de quartz tout en observant le changement des teintes de polarisation. Le retard apparent décroît au fur et à mesure qu'on enfonce plus avant le biseau de quartz. Lorsque la compensation est totale, on observe une teinte gris-foncé correspondant au tout début du tableau de Newton.

En retirant lentement le biseau de quartz, on voit défiler dans l'ordre toutes les teintes de Newton jusqu'à celle qui est propre au minéral observé. C'est le moyen le plus simple d'estimer le retard.



Compensateur dit "de Berek"

Si on exige une plus grande précision, il faut recourir à un compensateur plus précis. Le plus connu est le compensateur dit "de Berek". Il est constitué d'une lame de calcite taillée perpendiculairement à l'axe optique, placée dans une monture métallique. Un molette commande son inclinaison autour d'un axe horizontal. Un limbe gradué permet de mesurer son inclinaison. Ce compensateur prend place dans le logement prévu pour les lames auxiliaires. Lorsque la plaquette est horizontale, elle n'introduit aucun retard puisque la lumière chemine le long

de l'axe optique de la calcite. Dès qu'on l'incline, son orientation change et elle commence à introduire un retard qui augmente avec son inclinaison. Cet angle peut être lu avec précision grâce à la graduation du bouton moleté.

Il suffit donc d'orienter le minéral de telle manière que son grand indice soit perpendiculaire à celui du compensateur et de tourner la molette jusqu'à l'obtention complète de la compensation.

Une table de conversion indique le retard en fonction de l'angle mesuré. Toutefois il faut être attentif au fait que, contrairement aux autres lames auxiliaires, le grand indice du compensateur est parallèle à l'allongement de l'appareil. Cela est dû au fait que la calcite est un uniaxe négatif et que l'axe de rotation dans ce compensateur est obligatoirement  $n_g$ .

## La biréfringence

La biréfringence est une des propriétés optiques caractéristiques de chaque espèce minérale transparente. Sa valeur est donnée par la relation :

$$B = \frac{R}{e} \quad \text{et l'épaisseur} \quad e = \frac{R}{B}$$

dans laquelle  $R$  est le retard et  $e$  l'épaisseur de la préparation. Les coupes minces ont une épaisseur approximative de 0.03 mm. Il faut toutefois vérifier cette épaisseur. C'est facile si la coupe mince renferme un minéral connu dont la biréfringence est parfaitement constante, Le quartz, qu'on rencontre heureusement dans beaucoup de roches, convient tout particulièrement. Sa biréfringence vaut 0.009. Si on porte cette relation dans la relation ci-dessus, on obtient :

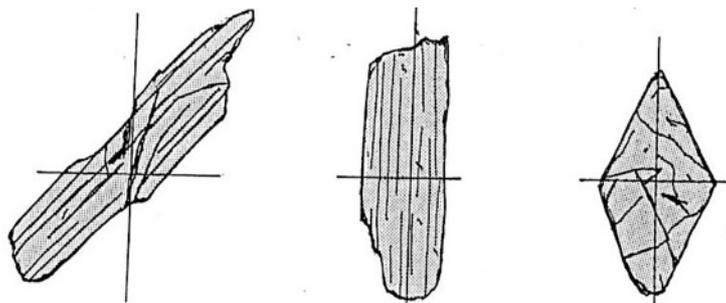
En contrôlant le retard d'une section parallèle de quartz, on peut donc vérifier l'épaisseur de la lame mince. Nous verrons au chapitre suivant une autre méthode de vérification de l'épaisseur.

## Biréfringence des minéraux dispersifs

Quelques minéraux, assez rares heureusement, présentent une curieuse anomalie : on n'arrive jamais à les éteindre complètement en tournant la platine. Aux alentours de la position d'extinction, ils changent rapidement de teinte et on ne parvient pas à déterminer une position d'extinction précise. Ce sont des minéraux qui présentent une forte dispersion de la valeur des indices suivant la longueur d'onde de la lumière qui les traverse. Cette dispersion implique des orientations légèrement différentes des ellipsoïdes suivant la couleur. Par exemple, lorsqu'on atteint l'extinction pour le bleu, cette couleur disparaît au profit d'un renforcement des autres couleurs dont la position d'extinction n'est pas encore atteinte. Pour ces minéraux, la position d'extinction reste imprécise, Pour les mêmes raisons, la teinte de polarisation est perturbée et change suivant l'orientation de la platine.

## L'angle d'extinction

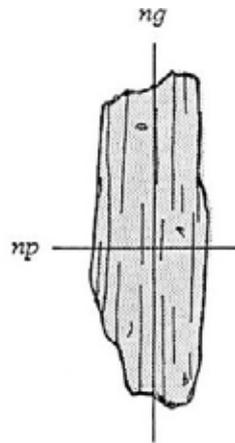
Lorsqu'une section présente des caractères cristallographiques apparents (lignes de clivage, trace de face, plan de macle), on mesure l'angle que ces directions font avec une des directions optiques,  $n_g$  ou  $n_p$ . La mesure est simple : il suffit d'amener la direction cristallographique en coïncidence avec un des traits du réticule, puis de mesurer l'angle dont il faut faire tourner la platine pour amener  $n_g$  ou  $n_p$  en coïncidence avec le même trait du réticule (position d'extinction). On peut attribuer à l'extinction divers qualificatifs : extinction droite, extinction oblique, extinction symétrique. L'angle d'extinction exprime la relation géométrique entre les éléments cristallographiques du minéral et l'orientation des ellipsoïdes des indices.



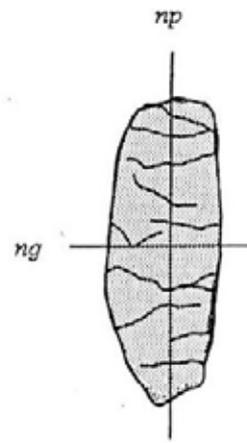
Extinction oblique ou inclinée    Extinction droite ou parallèle    Extinction symétrique

## Signe de l'allongement

Si une section est allongée et que son extinction est parallèle ou faiblement inclinée, on détermine le signe de l'allongement. Par convention, on dit que l'allongement est positif lorsque la trace du plus grand des indices est parallèle à la direction de l'allongement. Dans le cas contraire, on parle d'allongement négatif.



*allongement positif*



*allongement négatif*

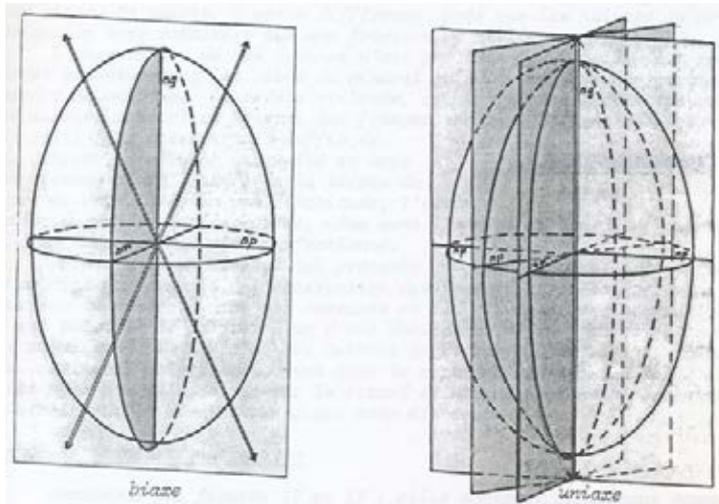


## Commentaires au chapitre N° 7

Parmi toutes les sections d'une même espèce minérale qui se trouve dans une coupe mince de roche, la plupart ont une orientation quelconque. L'ellipse que le plan de la coupe mince découpe dans l'ellipsoïde de chacune d'elles, a généralement des axes quelconques qui ne sont ni  $n_g$  ni  $n_p$ , mais des valeurs moins extrêmes  $n'_g$  et  $n'_p$ .

Statistiquement, nous devons trouver parmi elles une section dont les axes de l'ellipsoïdes sont  $n_g$  et  $n_p$ , les indices maximum et minimum de l'ellipsoïde. Cette section est aisément identifiable : on la reconnaît par sa biréfringence qui est la plus élevée de toutes les sections (du même minéral, bien sûr) présentes dans la coupe mince.

On l'appelle habituellement "section parallèle", sous-entendu parallèle à un ou aux deux axes optiques, suivant qu'il s'agit d'un uniaxe ou un biaxe.



Examinons les figures ci-contre. L'une est un ellipsoïde uniaxe (positif), l'autre un biaxe. Pour l'ellipsoïde biaxe, la section qui contient  $n_g$  et  $n_p$  contient aussi les axes optiques. Il n'existe donc qu'une seule et unique section parallèle.

Dans l'ellipsoïde uniaxe, au contraire, il y a une infinité de sections parallèles à l'axe optique (confondu à  $n_g$  dans le cas précis) : toutes les section verticales. Nous en avons dessiné trois dans l'illustration.

Dans la pratique, la probabilité de trouver une section parallèle est beaucoup plus grande chez les minéraux uniaxes que chez les biaxes.

Par contre, il n'y a qu'une section perpendiculaire pour les uniaxes contre deux pour les biaxes!

La biréfringence représente la différence entre deux indices de réfraction. Avec un peu de soin, il est possible de la mesurer à 0.001 près. Comme beaucoup de mesures en physique, il est plus facile de mesurer la différence de deux valeurs que ces valeurs elles-mêmes.

### Estimation du retard.

On ne dispose pas toujours d'un compensateur et il le plus souvent il faut se débrouiller pour identifier la teinte de polarisation d'une section. Il est surtout délicat de déterminer l'ordre auquel appartient la teinte que nous observons. Heureusement pour nous, les bords des minéraux contenus dans une coupe mince ne sont pas taillés à angle droit de la préparation, mais constituent fréquemment des dégradés de hauteur qui reproduisent en tout petit des sortes de biseaux, analogue à notre biseau de quartz, à cette différence près que les teintes de polarisation sont ramassées sur quelques centièmes de mm.



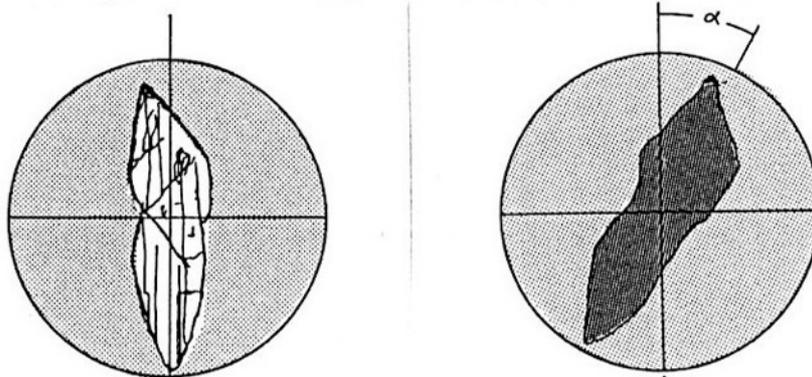
Minéral dans une coupe mince montrant une bordure en biseau

L'observations de ces teintes n'est pas toujours aisée. Il faut observer attentivement les bords du minéral. On peut apercevoir alors toutes les teintes de Newton, les zones violettes qui séparent les différents ordres, apparaissant comme des franges noires. Ce sont ces franges qu'il faut observer. Il suffit alors de les compter et d'ajouter une unité pour savoir dans quel ordre se situe la teinte de polarisation du minéral. Avec un peu d'habitude, l'estimation du retard devient aisée, même sans l'emploi du biseau de quartz ou d'un compensateur.

Lorsqu'un minéral présente une très forte biréfringence, la calcite, par exemple, l'observation des franges colorées sur le pourtour du minéral ou dans les cassures, est remarquable. Il est possible de compter plus d'une demi-douzaine de franges sombres, franges qui correspondent, comme nous l'avons déjà dit, au violet des teintes de Newton qui sépare les ordres les uns des autres. Nous savons donc que le minéral polarise au moins dans le septième ordre ou au-delà. Il n'est plus possible de mesurer la biréfringence et nous devons nous contenter de savoir que celle-ci est très élevée.

## Mesure de l'angle d'extinction

Les figures ci-dessous montrent clairement comment il faut procéder. on place la direction des lignes de clivage parallèlement à un des fils du réticule, puis on tourne la platine jusqu'à la plus proche extinction. L'angle  $\alpha$  dont il a fallu faire tourner la platine est l'angle d'extinction.



## 8. Observation en lumière polarisée convergente

Nous n'observons plus ici des images réelles de la préparation, mais des phénomènes d'interférence qui se forment au voisinage de la partie postérieure de l'objectif. Ces figures sont produites par le passage d'un faisceau de lumière convergente à travers la lame observée.

### Dispositif d'observation

Il faut mettre en place la partie amovible du condenseur et l'amener le plus près possible de la préparation. On utilise l'objectif dont le grossissement est le plus élevé et on règle soigneusement la mise au point. On vérifie que l'analyseur est bien en place. On observe les figures soit en ôtant l'oculaire, soit en ajoutant la lentille additionnelle de Bertrand. Dans ce dernier cas, l'image observée est plus grande, mais parfois moins nette. On peut ajouter aussi le diaphragme de champ qui lui est associé. Il élimine les interférences parasites provoquées par des minéraux voisins. Ce dispositif d'observation est appelé observation **conoscopique** ou observation **en lumière convergente**. Nous utiliserons parfois l'abréviation L.C.

### Figures observées

Ce sont des figures qui n'ont aucune ressemblance avec les objets qu'on observe, mais des figures d'interférences qui sont de deux types :

1. des lignes noires de formes diverses suivant l'orientation de sections sélectionnées, On les appelle les **isogyres**;
2. des courbes colorées qui reproduisent les teintes du tableau de Newton et qu'on nomme **courbes isochromatiques**.

L'observation de ces figures nous renseigne sur les caractéristiques de l'ellipsoïde des indices : ellipsoïde uniaxe, biaxe, positif, négatif, estimation de l'angle  $2V$ , et nous donne encore des informations sur l'ordre de grandeur de la biréfringence. Elles nous permettent aussi de vérifier l'orientation de certaines sections.

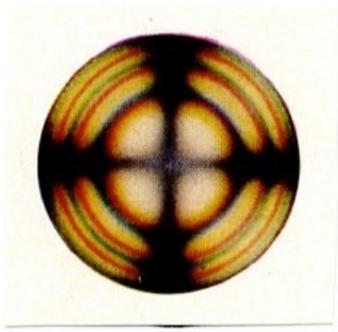
### Formation des figures en L.C.<sup>1</sup>

Nous savons que la section perpendiculaire à un axe optique est toujours obscure en L.P.<sup>2</sup> Examinons sur cette section comment se forment l'isogyre et les courbes isochromatiques. Prenons comme exemple le cas d'un minéral uniaxe positif.

---

<sup>1</sup> abréviation pour lumière polarisée convergente.

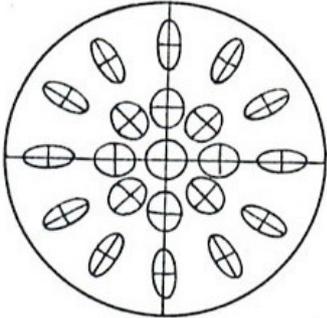
<sup>2</sup> abréviation pour lumière polarisée parallèle.



Examinons les figures ci-contre : la figure c) nous fait découvrir une **isogyre** qui a la forme d'une croix un peu floue, plus étalée vers les bords qu'en son centre.

Les courbes isochromatiques sont concentriques et reproduisent exactement, du centre vers l'extérieur, la suite des teintes de Newton. La rotation de la platine n'entraîne pas celle de l'isogyre.

Sur la figure a on voit comment les rayons lumineux issus du condenseur convergent dans la préparation puis divergent vers la lentille frontale de l'objectif. A l'intérieur de la préparation on a dessiné l'ellipsoïde des indices. Que peut-on constater ?



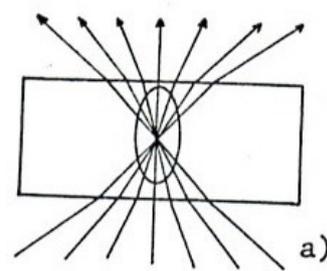
Le rayon central chemine le long de l'axe optique et la section normale qui lui correspond est bien cyclique (fig. b).

Les autres rayons s'écartent d'autant plus de l'axe optique qu'ils divergent davantage. La section normale à chacun d'eux est une ellipse peu excentrique pour ceux qui sont proches du centre, un peu plus excentrique pour ceux qui sont à l'extérieur. Les grands axes de toutes les ellipses sont rayonnants à partir du centre du champ de vision.

On peut donc assimiler la préparation à une multitude des petites sections dont les ellipses figures sur le dessin b.

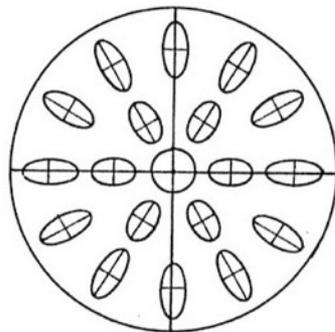
On remarque que le retard augmente du centre vers les bords puisqu'on rencontre des ellipses de plus en plus excentriques. Nous avons donc des courbes concentriques d'égal retard. Elles constituent les **courbes isochromatiques**.

Par ailleurs, toutes les sections dont les axes sont parallèles aux traits du réticules sont en position d'extinction. Ce sont elles qui dessinent la croix noire de l'**isogyre**.

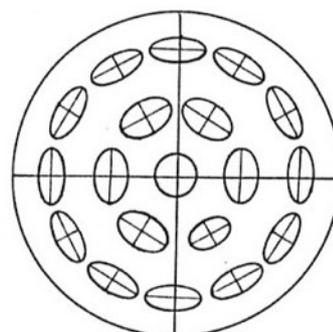


## Le signe optique

Le raisonnement que nous venons d'établir pour un minéral uniaxe positif est identique en ce qui concerne un uniaxe négatif. La seule différence réside dans l'orientation des petites ellipses de la fig. b. Ce sont les petits axes de l'ellipses qui sont rayonnants.

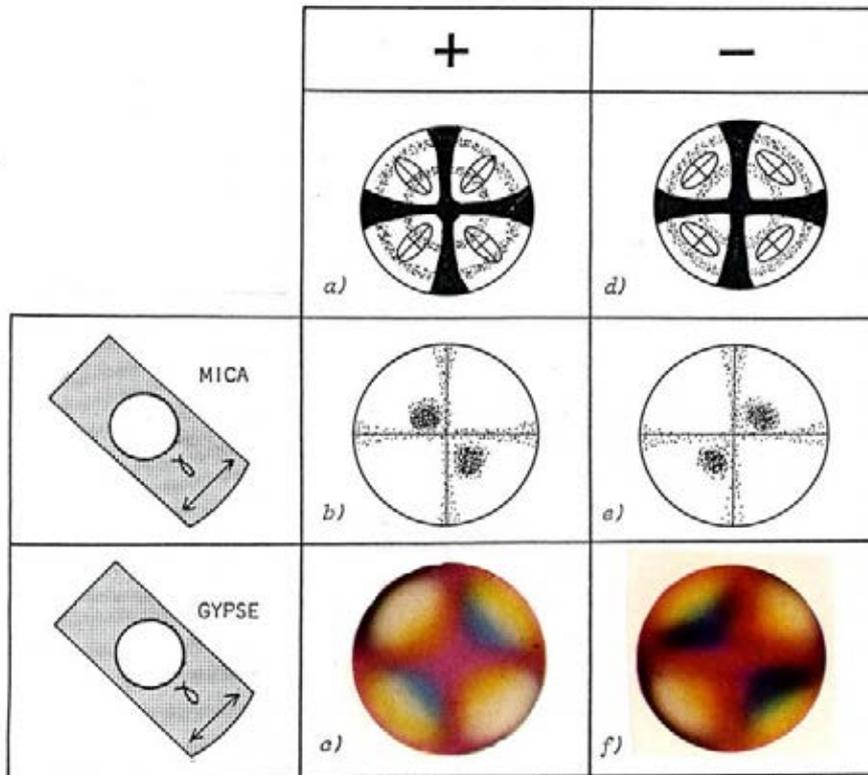


uniaxe positif



uniaxe négatif

Pour identifier le signe de l'ellipsoïde, nous allons encore une fois nous servir des lames auxiliaires. Examinons le schéma ci-dessous :



Les fig. a et d montrent l'orientation des ellipsoïde dans les parties non éteintes pour un uniaxe positif (a) et uniaxe négatif (d). On voit l'isogyre et les courbes isochromatiques.

En introduisant la lame quart-d'onde, l'isogyre disparaît, remplacée par une teinte de polarisation située dans les gris, celle de la lame ( $R=150 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ).

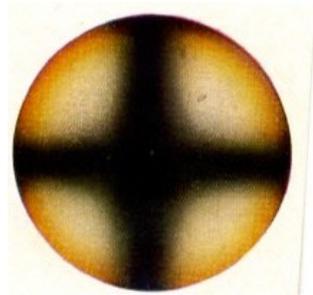
Pour les courbes isochromatiques, dans le cas d'un uniaxe (a), le retard introduit par la lame auxiliaire va s'additionner dans les quadrants SW et NE et se soustraire dans les quadrants NW et SE et on pourra observer une zone de compensation complète sous forme d'une tache noire un peu floue dans les quadrants NW et SE.

Dans le cas d'un minéral négatif, c'est le contraire qui se produit et la tache noire apparaît dans les quadrants SW et NE.

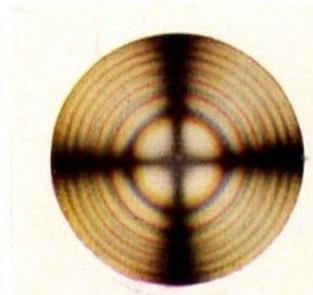
La lame de gypse introduit un retard de  $575 \times 10^{-6} \text{ mm}$ , correspondant au violet qui sépare le premier ordre du deuxième ordre sur le tableau de Newton. On appelle parfois cette lame "teinte sensible" car elle vire d'une manière très sensible au bleu ou au rouge suivant qu'on lui ajoute ou retranche un très faible retard. L'introduction de cette lame colore donc en rouge les quadrants pour lesquels il y a compensation et en bleu ceux pour lesquels il y a addition. (fig. c et f).

### Influence de la biréfringence

A épaisseur de coupe mince égale, l'aspect de l'isogyre et des courbes isochromatiques n'est pas le même suivant la biréfringence du minéral étudié. L'isogyre peut être plus ou moins fine, les courbes isochromatiques plus ou moins nombreuses. Un minéral fortement biréfringent voit son retard augmenter plus rapidement du centre vers l'extérieur du champ et montre, pour cette raison, des isochromatiques plus nombreuses.



Quartz: biréfringence faible ( $B = 0.009$ )

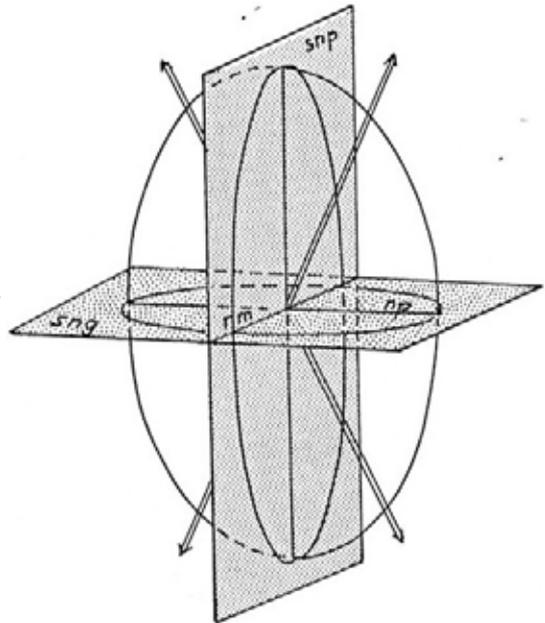


Calcite: biréfringence très élevée ( $B = 0.172$ )

Toujours pour les mêmes raisons, l'isogyre devient plus fine car les retards augmentent plus rapidement de part et d'autre des traits du réticule. La figure ci-contre illustre ce phénomène. Elle montre l'isogyre et les courbes isochromatiques pour le quartz qui a une biréfringence faible et pour la calcite qui a une biréfringence très élevée. Dans le cas du quartz dont la biréfringence est faible (0.009), l'isogyre est très étalée et on n'aperçoit aucune courbe isochromatique. Pour la calcite dont la biréfringence est énorme (0.172), la croix est très fine et on aperçoit de nombreuses courbes isochromatiques.

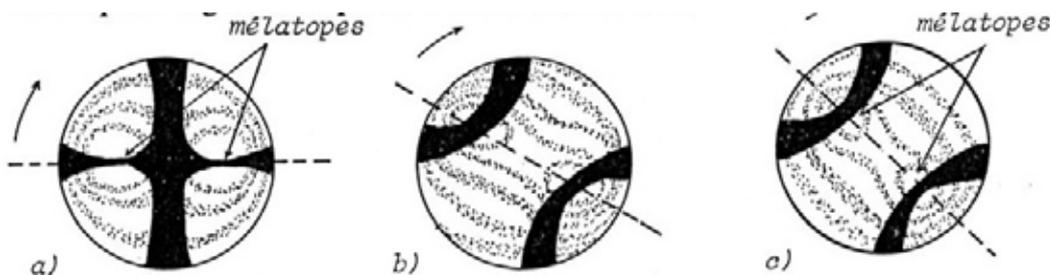
### Le cas des minéraux biaxes

L'ellipsoïde biaxe est un peu plus complexe que l'ellipsoïde uniaxe. Si nous examinons la figure ci-contre qui montre un ellipsoïde biaxe, on remarque qu'il possède deux plans importants qui n'existaient pas chez les uniaxes. Ce sont les sections perpendiculaires aux bissectrices de l'angle  $2V$ . On les nomme  $sn_g$  (section normale à  $n_g$ ) et  $sn_p$  (section normale à  $n_p$ ). On peut les qualifier aussi de section normale à la bissectrice aiguë ( $B_a$ ) et section normale à la bissectrice obtuse ( $B_o$ ).



Examinons en lumière convergente la section normale à la bissectrice aiguë : nous observons une sorte d'hyperbole noire, l'isogyre, dont les deux branches se déforment lorsqu'on fait tourner la platine. Alternativement elles s'éloignent puis se rapprochent l'une de l'autre,

Lorsque le plan des axes optiques passe par un des traits du réticule, elles sont très rapprochées, formant une sorte de croix floue. La branche qui passe par le plan des axes optiques montre deux resserrements, **les mélatopes**, qui correspondent aux points d'émergence des axes optiques. Les mélatopes ne sont pas toujours visibles, car ils sont situés en dehors du champ de vision du microscope si l'angle  $2V$  est trop grand. L'écartement maximum des deux branches de l'hyperbole a lieu à  $45^\circ$  de la position précédente.



Déformation des isogyres d'une section normale à la bissectrice aiguë, au cours de la rotation de la platine.

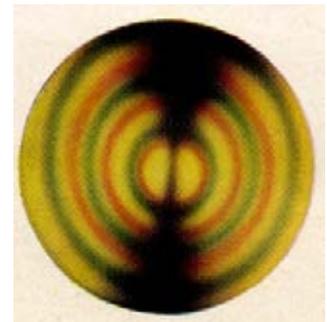
Comme pour les uniaxes, les isogyres sont d'autant plus fines que la biréfringence est plus élevée. Notons encore que la vitesse d'éloignement des branches de l'hyperbole est proportionnelle à l'angle  $2V$ . Elles sortent du champ de vision dès que l'angle  $2V$  dépasse une certaine valeur. Si l'angle  $2V$  est très petit, les branches de l'hyperbole ne s'éloignent que très peu l'une de l'autre et, lorsque  $2V$  tend vers zéro, les branches de l'hyperbole deviennent alors les bras de la croix des uniaxes ! Le schéma ci-dessus montre les déformations de l'isogyre lorsqu'on tourne la platine. La ligne pointillée représente la trace du plan des axes optiques. L'exemple choisi correspond à une section normale à une bissectrice aiguë avec un faible angle  $2V$ .

Les courbes isochromatiques sont concentriques autour des points d'émergence des axes optiques. Le retard augmente lorsqu'on s'éloigne des mélatopes. Tout comme les uniaxes, à épaisseur constante, le nombre des courbes isochromatiques augmente avec la biréfringence.

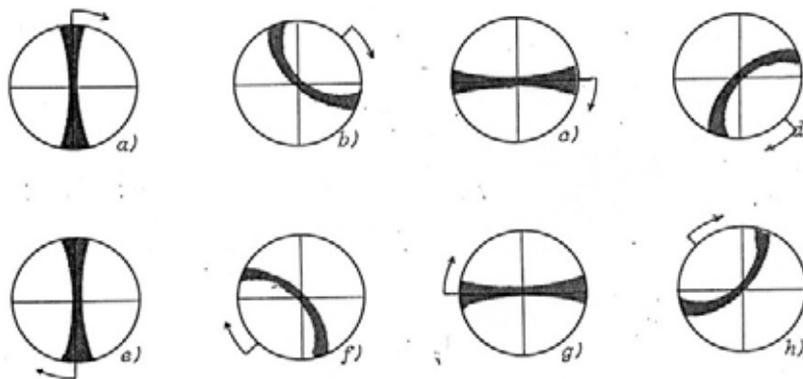
### Section perpendiculaire à un des axes optiques

L'isogyre est une branche d'hyperbole (l'autre se trouve loin hors du champ de vision). Elle se déforme avec la rotation de la platine, passant alternativement de la forme de l'hyperbole à une droite. L'isogyre prend l'aspect d'une droite chaque fois qu'elle est parallèle à un des traits du réticule. L'hyperbole atteint sa courbure maximum à  $45^\circ$  de la position précédente. Lorsqu'on fait tourner la platine, l'hyperbole tourne en sens inverse.

Les schémas ci-dessous montrent l'allure des déformations de l'isogyre au cours d'une rotation complète de la platine. Comme pour les cas précédents, la finesse de l'isogyre et le nombre de courbes isochromatiques dépendent de la valeur de la biréfringence du minéral.



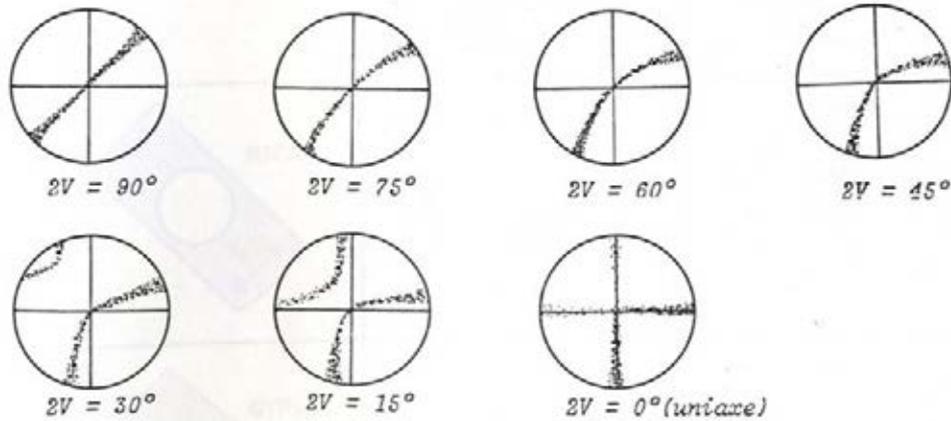
Section perpendiculaire à un axe optique: isogyre et courbes isochromatiques.



Déformation de l'isogyre d'une section perpendiculaire à un des axes optiques lorsqu'on tourne la platine.

### Estimation de l'angle $2V$

Il est intéressant de relever que l'importance de la déformation de l'isogyre au cours de sa rotation dépend de la valeur de l'angle  $2V$ . La convexité maximum de l'isogyre est une bonne indication de l'angle  $2V$ . Plus la courbure est prononcée, plus l'angle  $2V$  est petit. A l'inverse, lorsque  $2V$  atteint  $90^\circ$ , l'isogyre est une droite qui tourne en sens inverse de la platine sans se déformer. Avec un peu d'expérience, il est possible d'estimer la valeur de  $2V$  à une dizaine de degrés près. Les dessins ci-dessous reflètent la relation entre la courbure et  $2V$ .



Variation de la courbure de l'isogyre en fonction de l'angle  $2V$ .

## Le signe optique

Rappelons que la définition du signe optique est basé sur l'identité de la bissectrice aiguë : si elle correspond à  $n_g$ , l'ellipsoïde est dit positif. Dans le cas contraire, il est négatif. Le tableau ci-dessous résume cette convention :

Signe optique des biaxes en fonction de l'identité de la bissectrice aiguë

Signe optique	identité de la bissectrice aiguë	identité de la bissectrice obtuse
Positif	$n_g$	$n_p$
Négatif	$n_p$	$n_g$

On a l'habitude d'abréger en  $sn_g$  et  $sn_p$  les sections normales à  $n_g$  ou  $n_p$ . On dit même  $Ba$  et  $Bo$  pour les sections normales à la bissectrice aiguë ou obtuse. Nous savons que la bissectrice aiguë se trouve du côté de la convexité de l'isogyre. Sur les dessins ci-contre, on a figuré les points d'émergence des indices  $n_g$  et  $n_p$  (en dehors du champ de vision). Ils correspondent aussi à la  $Ba$  ou à la  $Bo$  suivant le signe optique.

On constate que, de part et d'autre de l'isogyre, l'ellipsoïde des indices est orienté différemment. En effectuant le même raisonnement que celui que nous avons développés avec les uniaxes, nous pouvons établir le tableau ci-dessus.

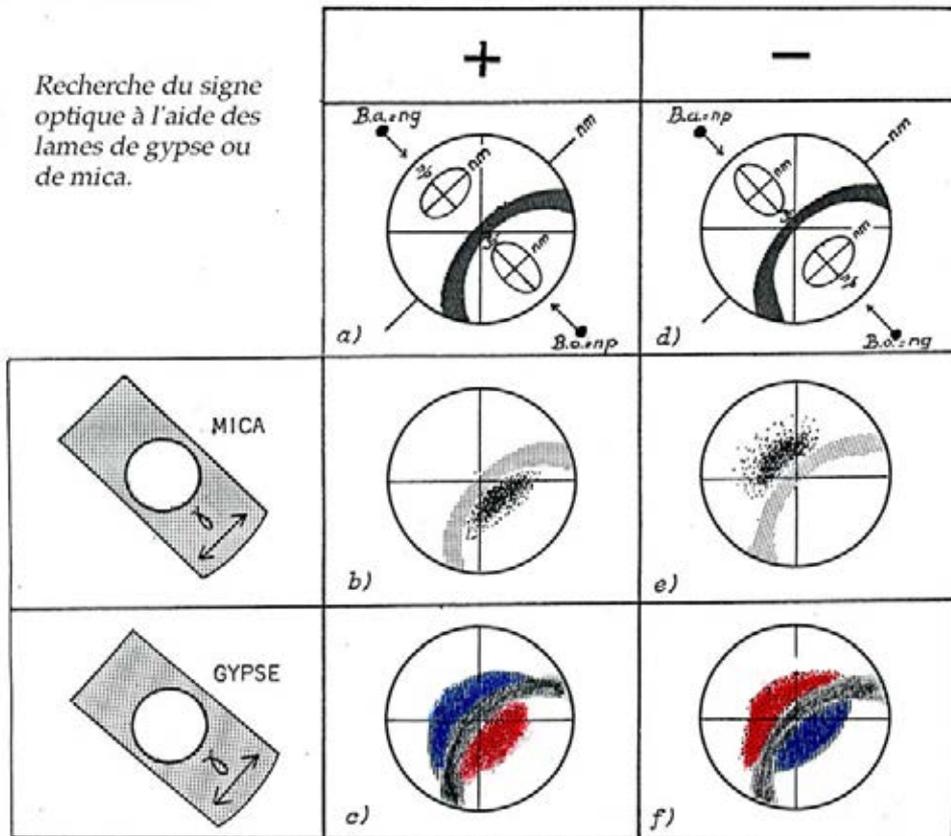
On voit que l'introduction de la lame quart d'onde (mica) fait disparaître l'isogyre et qu'une tache sombre prend sa place dans la concavité si le minéral est positif, du côté de la convexité s'il est négatif.

De même, l'introduction de la lame de gypse fait apparaître un secteur bleuâtre et un autre rougeâtre. Le rouge se trouve du côté de la concavité si le minéral est positif, du côté de la convexité s'il est négatif.

Ce tableau n'est valable qu'à condition d'orienter l'isogyre de telle manière que la trace du plan des axes (plan qui contient aussi  $n_g$  et  $n_p$ ) soit normal à l'indice  $n_g$  de la lame auxiliaire. Il faut donc orienter la concavité de l'isogyre soit vers le quadrant SE, soit vers le quadrant NW.

Lorsque nous sommes en présence d'un angle  $2V$  égal à  $90^\circ$ , il n'y a évidemment ni concavité ni convexité de l'isogyre. Elle se résout à droite qui ne se déforme pas. La définition du caractère positif ou négatif de l'ellipsoïde n'a alors plus de sens !

Recherche du signe optique à l'aide des lames de gypse ou de mica.



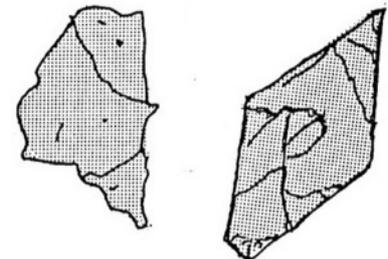
Nous verrons, dans un chapitre ultérieur, le cas des sections perpendiculaires aux bissectrices.

## 9. Observation en “lumière naturelle”<sup>1</sup>

Les observations dites “*en lumière naturelle*” s’effectuent sans analyseur, mais en conservant tout de même le polariseur. Pour être plus exacte, il faudrait dire observations en *lumière polarisée non analysée*. Avec ce dispositif, nous pouvons examiner le contour des minéraux, les directions de clivages, les cassures et les inclusions. Nous pouvons aussi mesurer l’épaisseur de la préparation, estimer l’indice de réfraction du minéral à partir de son relief apparent, observer sa couleur propre ainsi que son éventuel pléochroïsme, c’est à dire la variation de sa couleur en fonction de son orientation.

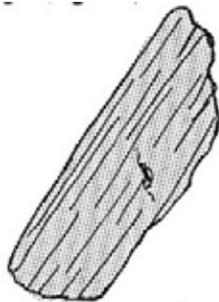
### Formes, clivages, cassures

La première observation concerne l’aspect géométrique des diverses sections. Certaines présentent un contour tout à fait quelconque. Elles sont dites “*xénomorphes*”. D’autres, au contraire, montrent des formes géométriques reconnaissables. Elles sont dites “*idiomorphes*”. Les lignes droites qui marquent parfois le contour d’un minéral sont déterminées par l’intersection de ses faces avec le plan de la coupe mince. Parfois ces formes sont caractéristiques d’un minéral ou d’une famille de minéraux. Aussi la mesure des angles que font ces faces entre elles est souvent intéressante. Les plans de clivages sont matérialisés par des lignes qui sont les intersections des plans de clivage avec le plan de la coupe mince. Ces lignes sont plus ou moins accentuées suivant que le clivage est “facile” ou “difficile”. Il y a parfois plusieurs directions de clivage .

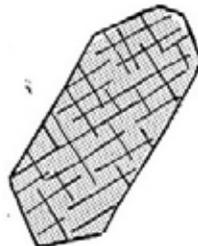


xénomorphe

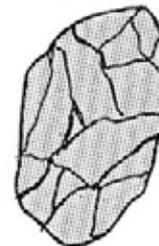
idiomorphe



Une direction de clivage



Deux directions de clivage



Cassures

La mesure de l’angle que font entre eux les plans de clivage est aussi un renseignement intéressant. Ainsi pour la famille des pyroxènes l’angle entre les deux directions de clivage est d’environ 90°. Ce même angle est de 120° pour la familles des amphiboles. Toutefois la mesure de cet angle n’est valable que si les plans de clivages sont perpendiculaires au plan de la coupe mince. Une méthode simple permet de vérifier cette orientation. Pour cela, il faut utiliser le plus fort grossissement, ôter la partie mobile du condenseur et régler exactement la mise au point sur une ligne de clivage. En éloignant légèrement l’objectif de la préparation, on distingue deux très fines franges lumineuses qui s’éloignent de part et d’autre de la ligne de clivage. Si elles s’éloignent symétriquement de la ligne avec la même vitesse, cela signifie que le plan de clivage est bien perpendiculaire au plan de la coupe mince.

<sup>1</sup> L’appellation “lumière naturelle”, en abrégé L.N., n’est pas rigoureusement correcte puisqu’on utilise toujours le polariseur !

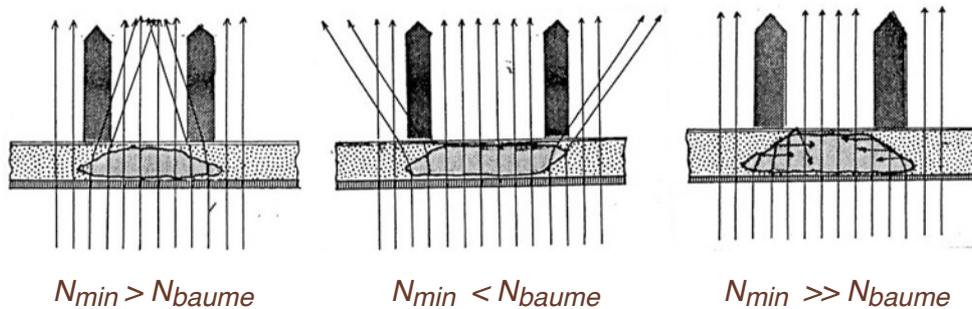
**Les cassures** sont des fissures irrégulières non rectilignes. Certaines espèces minérales sont reconnaissables au genre de cassures qu'elles présentent. C'est le cas de l'olivine et de la tourmaline.

## Relief et indices de réfraction

Lorsqu'on examine une coupe mince renfermant plusieurs espèces minérales, ces divers minéraux apparaissent avec des contours plus ou moins bien accusés. Certains ont un contour à peine marqué, des lignes de clivages et des fractures à peine visible. D'autres ont, au contraire, un contour bien marqué, souligné par une ligne foncée. On dit que leur relief est bien marqué.

Les premiers, au relief faible, ont un indice de réfraction moyen très voisin de celui du baume de Canada<sup>1</sup> qui constitue le fond de la lame mince. Les seconds, au relief bien marqué, ont un indice moyen éloigné de celui du baume. Le "relief" se manifeste par des lignes sombres qui bordent les contours et toutes les imperfections du minéral. Plus cette ligne sombre est épaisse, plus le relief est marqué.

Le relief est dû à la perturbation des rayons lumineux provoquée par la différence d'indice de réfraction entre le minéral et le milieu dans lequel il est plongé. Les figures ci-dessous illustrent ce phénomène.



Les rayons sont déviés sur les bords du minéral, créant une zone sombre qui marque son pourtour. Cette zone sombre est d'autant plus prononcée que la différence des indices est plus grande. Si la différence des indices est très élevée, il se produit même des phénomènes de réflexion totale qui accentuent encore le phénomène. Si le minéral a le même indice que celui du baume, les rayons ne sont pas perturbés et le minéral semble invisible.

On peut, avec une certaine habitude, estimer l'indice de réfraction d'un minéral au vu de son relief, en se souvenant de la règle :

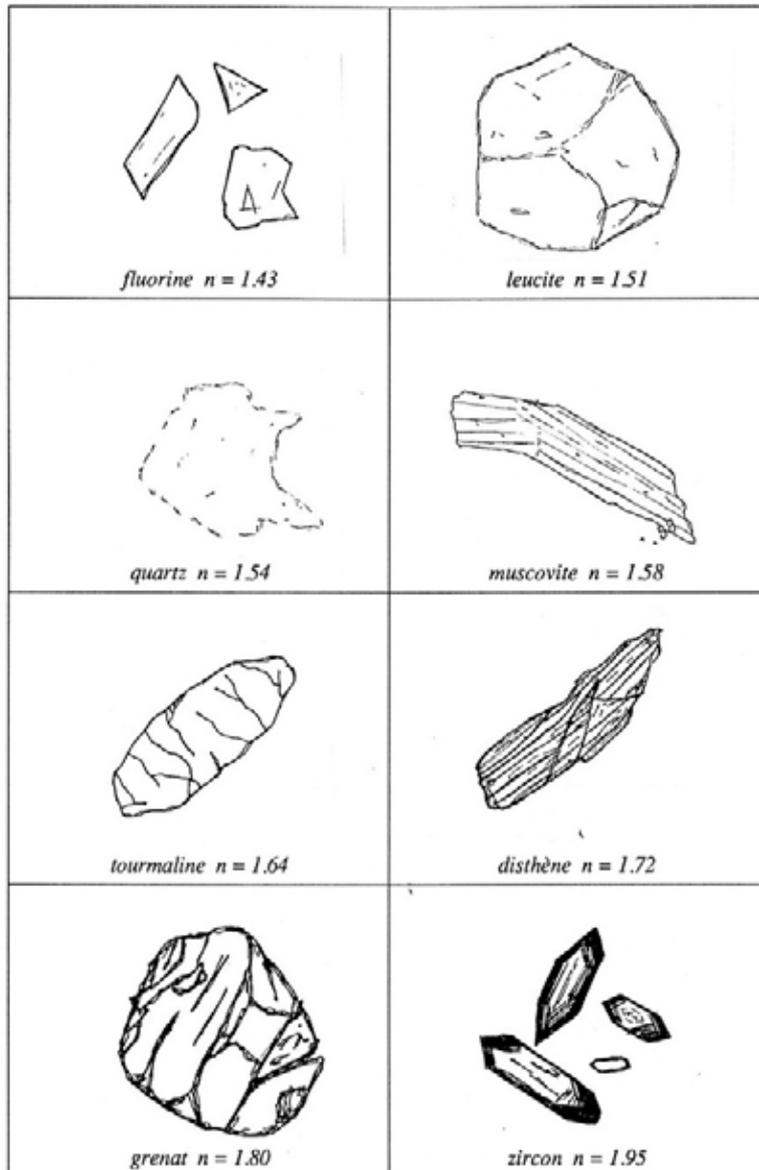
*Le relief d'un minéral est d'autant plus marqué que son indice de réfraction est plus éloigné de celui du milieu dans lequel il se trouve.*

Dans une coupe mince, le minéral est entouré de baume de Canada dont l'indice de réfraction est 1.538. Les dessins de la page suivante montrent les reliefs d'une série de minéraux différents. On voit que le quartz, dont l'indice moyen est extrêmement proche de celui du baume, est presque invisible. Il est intéressant de comparer les reliefs semblables de la leucite et de la muscovite. Ces deux minéraux présentent des différences d'indice similaires entre leur propre indice et celui du baume, celui de la leucite étant inférieur, celui de la muscovite supérieur à celui du baume.

<sup>1</sup> Indice du baume de Canada = 1.538

Estimation de la différence d'indice d'un minéral avec celui du baume en fonction du relief apparent.

indice	relief	aspect visuel
2.0	énorme	le minéral semble "sortir" de la préparation; il est presque opaque au voisinage des arêtes et des sommets.
1.95		
1.90	très fort	les cassures paraissent profondes, tous les détails sont fortement soulignés par des lignes sombres
1.85		
1.80		
1.75	très marqué	le minéral paraît plus "élevé" que ceux qui l'entourent
1.70		
1.65	marqué	contours, clivages bien visibles; le minéral paraît "rugueux".
1.60	faible	contours peu marqués, le minéral paraît "plat"
1.55	nul	relief nul, le minéral est presque invisible
1.50	faible	contours peu marqués, le minéral paraît "plat"
1.45	marqué	contours et clivages bien visibles; le minéral paraît "rugueux".
1.40		

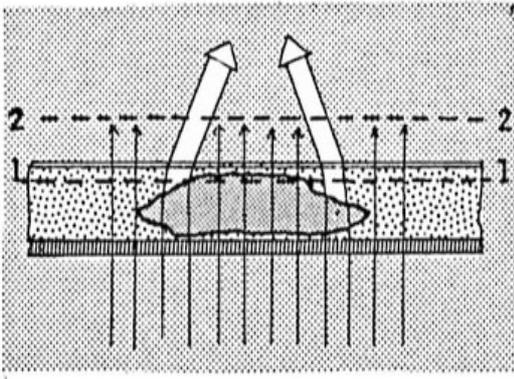


Relief apparent de minéraux enrobés de baume de Canada ( $n = 1.538$ )

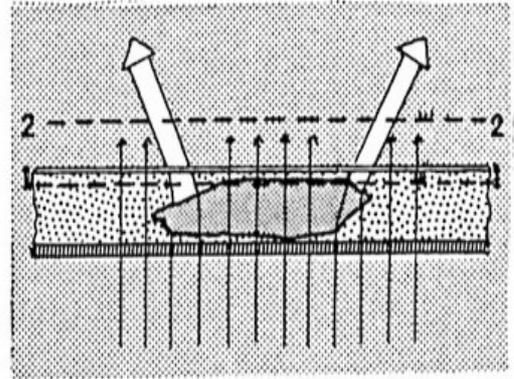
## La frange de Becke

Nous savons estimer la différence d'indice d'un minéral avec celui du baume, mais nous ne savons pas encore si cet indice est inférieur ou supérieur à celui du baume. Une technique va nous permettre de résoudre cette incertitude : l'observation de la "frange de Becke"

Examinons les figures ci-dessous. Elles représentent deux minéraux, un dont l'indice est supérieur à celui du baume, l'autre dont l'indice est inférieur.



$N_{\text{minéral}} > N_{\text{baume}}$



$N_{\text{minéral}} < N_{\text{baume}}$

L'effet de prisme produit sur les rayons lumineux par les bords irréguliers des grains, dévie une partie des rayons lumineux vers l'intérieur du champ de vision si l'indice du minéral est supérieur à celui du baume, vers l'extérieur dans le cas contraire. Ce phénomène se traduit par une frange lumineuse qui entoure toute les sections du minéral. Elle porte le nom de Frange de Becke. Elle correspond en réalité à un cône de lumière qui converge ou qui diverge au-dessus du minéral suivant que son indice est supérieur ou inférieur à celui du baume. Si nous réglons la mise au point du microscope sur la surface supérieure du minéral, nous apercevons la frange lumineuse qui entoure le minéral. Si nous éloignons doucement l'objectif de la préparation la zone de vision nette se déplace au-dessus du minéral et la frange lumineuse semble se déplacer vers l'intérieur ou l'extérieur du minéral, suivant que son indice est plus grand ou plus petit que celui du baume. Ce phénomène peut se résumer comme suit :

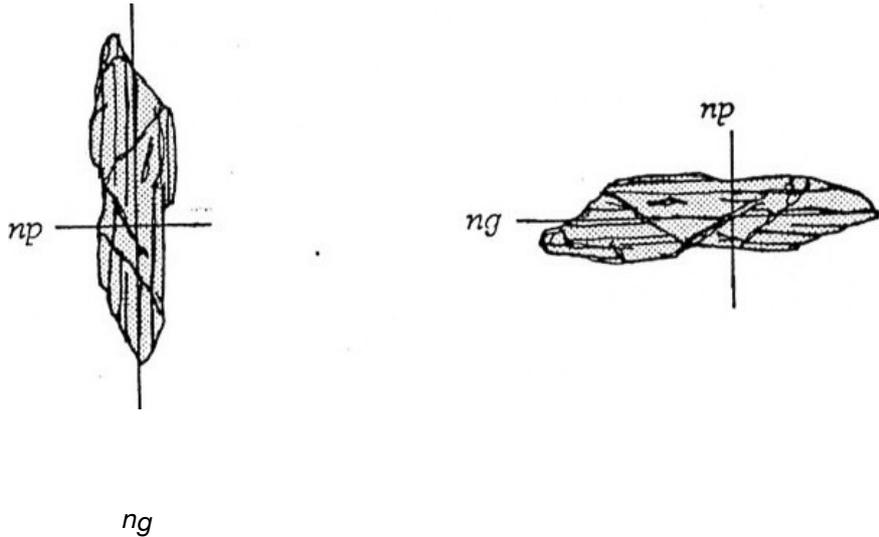
Lorsqu'on éloigne l'objectif de la préparation, la frange de Becke se déplace vers le milieu le plus réfringent.

Ce procédé est important et nous exposerons, à la fin de cet ouvrage, une méthode d'identification des minéraux en grains qui permettent la mesure des indices d'un minéral à 0.002 près, en les immergeant successivement dans des liquides d'indice connu.

Il ne faut pas perdre de vue que les minéraux sont généralement biréfringents et que chaque section est soumise à deux indices de réfraction qui sont  $n_g$  et  $n_p$  pour une section parallèle à un axe optique,  $n'_g$  et  $n'_p$  pour une section d'orientation quelconque. Il faut donc vérifier chaque fois les deux indices de la section étudiée en orientant successivement son grand indice parallèlement au fil vertical du réticule, puis parallèlement au fil horizontal.

Pour cela, orientons, en lumière polarisée, la section (une section parallèle, par exemple) de telle manière que son indice  $n_g$  soit parallèle au trait vertical du réticule.

En "lumière naturelle", la lumière issue de l'illuminateur traverse le polariseur dont le plan de polarisation est symbolisé par le trait vertical du réticule. Examinons donc la figure suivante :



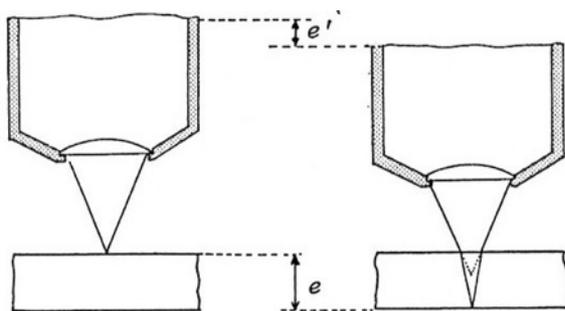
Sur le premier dessin, les rayons lumineux obéissent donc à l'indice  $n_g$  et il n'y a aucune composante dans le plan défini par  $n_p$ . C'est donc  $n_g$  dont on va estimer l'indice. Pour estimer ensuite  $n_p$ , il suffira de tourner la préparation de  $90^\circ$ .

Quelques minéraux montrent un grand indice supérieur à celui du baume, un petit indice inférieur à celui-ci. Cette particularité est facilement décelable avec la frange de Becke.

### Mesure de l'épaisseur de la coupe mince

Les coupes minces sont confectionnées en essayant de leur donner une épaisseur de 0.03 mm. Cette épaisseur est approximative. Pour pouvoir calculer la valeur de la biréfringence, il faut connaître l'épaisseur de la lame mince avec une plus grande précision. Les microscopes sont équipés d'un vis micrométrique qui permet d'apprécier les déplacements en hauteur de 0.001 mm.

Au moyen du plus fort grossissement disponible, on règle soigneusement la mise au point sur la surface inférieure de la préparation, puis sur la surface supérieure. Ces surfaces sont souvent marquées par des poussières qui s'y sont déposées lors de la confection de la coupe mince.



On règle donc successivement la mise au point sur les poussières inférieures puis sur les poussières supérieures. La différence de hauteur mesurée à l'aide de notre molette micrométrique nous indique l'épaisseur apparente  $e'$  de notre préparation. L'épaisseur réelle est :

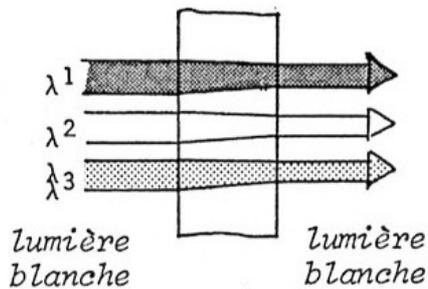
$$e = e' \times n$$

où  $e$  = épaisseur vraie,  $n'$  = épaisseur apparente,  $n$  = indice moyen du minéral

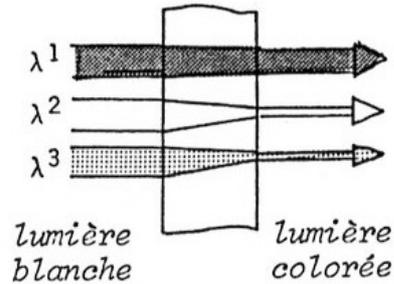
## Couleur et pléochroïsme

La plupart des minéraux sont transparents en coupe mince. Lorsqu'une lumière **polychromatique** (lumière blanche) traverse une lame transparente, elle est plus ou moins absorbée selon que la substance est plus ou moins transparente. Si l'absorption est sensiblement la même pour toutes les longueurs d'onde, la lumière transmise conserve son caractère de "lumière blanche" et le minéral paraît incolore. Si, au contraire, certaines radiations sont plus fortement absorbées que d'autres, ces dernières prédomineront dans le spectre de la lumière transmise et le minéral paraîtra coloré.

L'absorption croît avec l'épaisseur de la préparation. Ainsi, un minéral qui semble faiblement coloré en lame mince, présentera une coloration beaucoup plus vive sous une forte épaisseur.



Absorption égale des radiations de toutes les longueurs d'onde.



Absorption différente des radiations suivant leur longueur d'onde.

Le schéma ci-dessus montre le cheminement de la lumière blanche (symbolisée par les trois radiations  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  et  $\lambda_3$ ) à travers une lame transparente. Elles sont légèrement absorbées par la lame, mais dans des proportions semblables. A la sortie, on retrouve une lumière blanche un peu moins intense. Dans la deuxième partie du dessin, les radiations sont absorbées différemment. Les ondes  $\lambda_2$  et  $\lambda_3$  sont fortement absorbées tandis que la radiation  $\lambda_1$  ne l'est pratiquement pas. A la sortie, la lame est colorée dans une dominante de la couleur correspondant à  $\lambda_1$ .

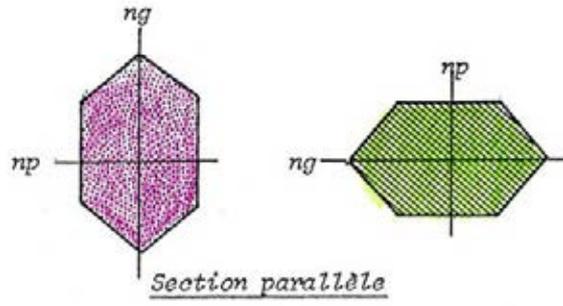
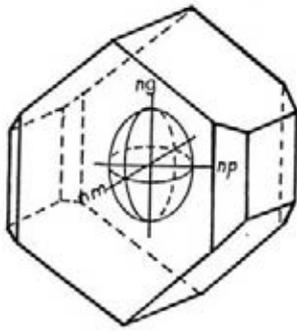
Les minéraux colorés sont souvent **pléochroïques**, ce qui signifie que leur coloration varie suivant l'orientation de la lame. Cette variation de couleur correspond à une variation différentielle de l'absorption suivant l'orientation du minéral.

On décrit le pléochroïsme d'un minéral en indiquant sa couleur lorsque la lumière blanche traverse successivement les principaux plans de l'ellipsoïde.

On oriente la section parallèle de manière à définir les couleurs de  $n_g$  et  $n_p$ . Puis on cherche la couleur de  $n_m$ , sur une section perpendiculaire à une des bissectrices ( $sn_g$  ou  $sn_p$ ) ou bien encore sur la section perpendiculaire à un axe optique.

Les minéraux uniaxes ne présentent que deux couleurs de pléochroïsme, l'une selon  $n_g$ , l'autre selon  $n_p$ . Quant à la section perpendiculaire à l'axe optique, elle présente la couleur de  $n_p$  pour les uniaxes positifs et  $n_g$  pour les uniaxes négatifs et  $n_m$  pour les biaxes.

Appréciation du pléochroïsme

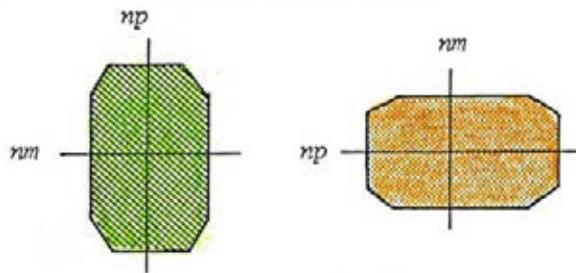
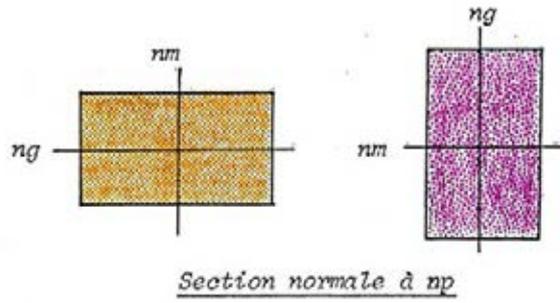


Pléochroïsme :

$ng$  : 

$np$  : 

$nm$  : 



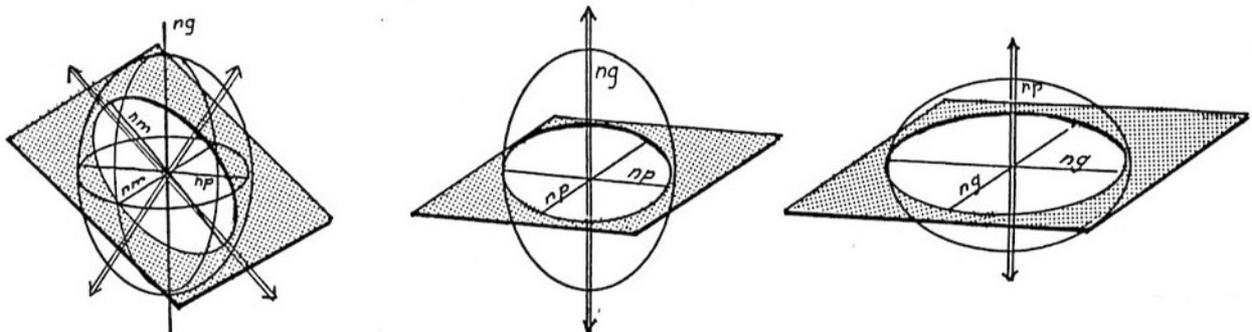
## 10. Recherche des sections principales

Il n'y a que deux sections vraiment indispensables à la détermination d'un minéral. Ce sont la section perpendiculaire et la section parallèle.

Pour les minéraux biaxes, il faut encore chercher une, voire les deux sections normales aux bissectrices.

### Section perpendiculaire

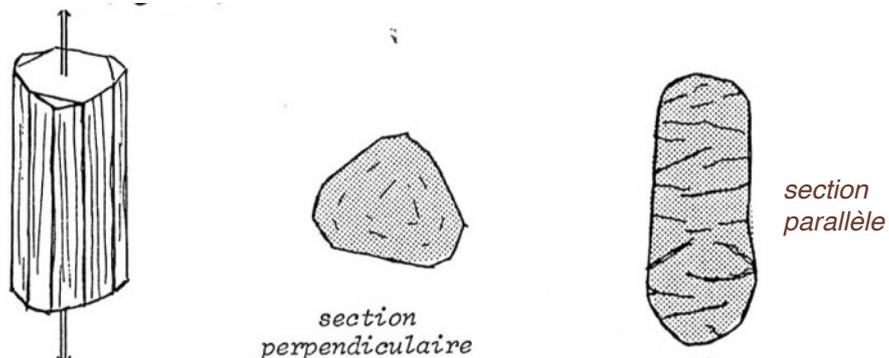
En lumière polarisée, elle est reconnaissable à son retard nul. Il faut donc la chercher parmi les sections qui restent constamment éteintes lorsqu'on tourne la platine. Vu à travers sa section perpendiculaire, le minéral se comporte comme une substance isotrope. Les minéraux pléochroïques présentent alors un préochroïsme nul et montrent une couleur invariable, celle attribuée à  $n_p$  pour les uniaxes positifs, à  $n_g$  pour les uniaxe négatifs et  $n_m$  pour les biaxes.



Sections perpendiculaires à un axe optique dans les divers ellipsoïdes

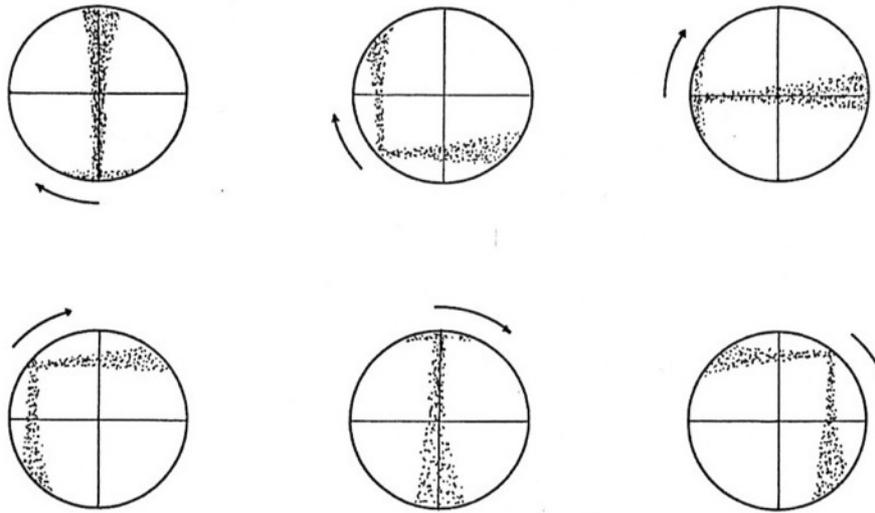
En lumière convergentes, la section perpendiculaire montre les figures d'interférences qui permettent d'identifier le type d'ellipsoïde, le signe optique ainsi que l'ordre de grandeur de l'angle  $2V$ .

De retour en lumière naturelle, on note la couleur éventuelle et la forme de la section. Cette forme est intéressante dans le cas des minéraux prismatiques uniaxes, car elle est en même temps la section perpendiculaire au prisme et elle peut nous renseigner sur le système cristallin du minéral.



Section à travers un cristal de tourmaline : la section perpendiculaire nous indique une symétrie trigonale (ou rhomboédrique).

Il n'est pas toujours possible de trouver une section rigoureusement perpendiculaire à l'axe optique et il faut parfois se contenter d'une section approximativement perpendiculaire. En lumière polarisée, la section ne présente pas un retard rigoureusement nul. Elle reste cependant dans les gris foncé. En lumière convergente, les isogyres sont un peu décentrées., mais leur déplacement n'est pas suffisamment important pour empêcher la détermination du signe optique. Pour les uni-axes, par exemple, nous avons une croix dont le centre décrit un mouvement circulaire mais dont les bras restent toujours parallèles aux traits du réticule. Il n'y a pas de difficulté pour identifier les quadrants de la croix et à observer dans lesquels de ceux-ci apparaissent les taches noires ou les colorations rougeâtres induites par les lames auxiliaires.



*Aspect de l'isogyre sur une section non parfaitement perpendiculaire, au cours de la rotation de la platine.*

## **Section parallèle**

Parmi toutes les sections d'une même espèce minérale, c'est celle qui présente, en lumière polarisée, le retard le plus élevé. Si le minéral est pléochroïque, c'est la section qui montre aussi le pléochroïsme le plus marqué. En lumière convergente, elle ne présente pas de figures caractéristiques. Nous avons déjà décrit en détail les propriétés de cette section.

## **Sections normales aux bissectrices de l'angle $2V$**

Ces sections ne concernent bien évidemment que les minéraux biaxes. Elles sont difficiles à trouver et on ne les recherche que dans le cas d'une détermination complète de tous les caractères optiques d'un minéral ou bien dans le cas où on n'aurait pas trouvé de section perpendiculaire. Les sections normales aux bissectrices permettent des estimations plus précises de la valeur de l'angle  $2V$  et, surtout, elles concourent à trouver la relation entre l'ellipsoïde et les éléments cristallographiques du minéral. En particulier, conjointement aux observations faites sur la section parallèle, elles permettent d'identifier le système cristallin auquel appartient le minéral.

Observons la figure ci-contre:

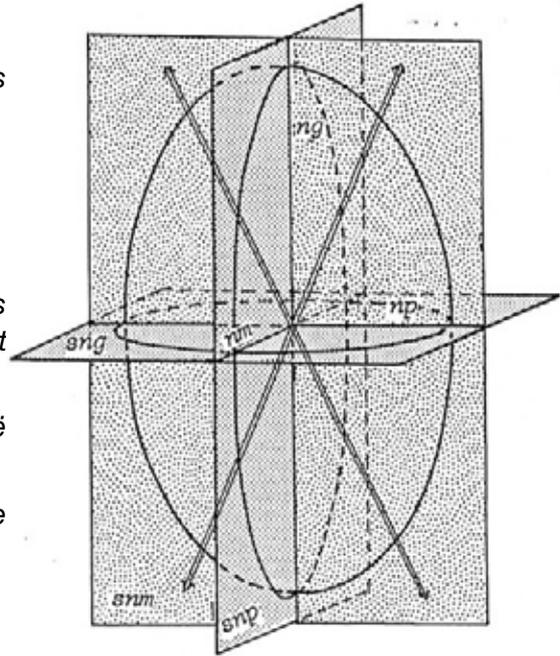
il s'agit d'un ellipsoïde biaxe positif. Les trois plans orthogonaux représentent respectivement :

- la section parallèle, ou section normale à  $n_m$  ( $sn_m$ );
- la section normale à  $n_g$  ( $sn_g$ );
- la section normale à  $n_p$  ( $sn_p$ ).

On sait que les indices auxquels obéissent les rayons lumineux cheminant normalement à la  $sn_g$  sont  $n_m$  et  $n_p$ . Pour la  $sn_p$ , nous aurons  $n_m$  et  $n_g$ .

Dans le cas présent,  $n_g$  est aussi la bissectrice aiguë de l'angle  $2V$  et  $n_p$  la bissectrice obtuse.

Les relations mathématiques entre la valeur de l'angle  $2V$  et celle des indices sont les suivantes :



$$\operatorname{tg}^2 V = \frac{n_g^2 (n_m^2 - n_p^2)}{n_p^2 (n_g^2 - n_m^2)} \quad \cos^2 V = \frac{n_p^2 (n_g^2 - n_m^2)}{n_m^2 (n_g^2 - n_p^2)} \quad \sin^2 V = \frac{n_g^2 (n_m^2 - n_p^2)}{n_m^2 (n_g^2 - n_p^2)}$$

En développant la première de ces équations nous obtenons :

$$\operatorname{tg}^2 V = \frac{n_g^2 (n_m - n_p) (n_m + n_p)}{n_p^2 (n_g - n_m) (n_g + n_m)} \quad \text{ou} \quad \operatorname{tg}^2 V = \frac{n_p^2 (n_g - n_m)}{n_m^2 (n_g - n_p)} \times \frac{(n_m - n_p)}{(n_g - n_m)}$$

Nous pouvons constater que la première partie de la dernière équation renferme les valeurs absolues des indices alors que le second terme ne contient que des différences d'indice, c'est à dire les retards mesurables sur la  $sn_g$  et la  $sn_p$ . Par ailleurs, nous pouvons simplifier cette équation en supprimant la première partie dont la valeur est toujours extrêmement proche de 1. L'erreur que nous faisons en simplifiant de la sorte reste très inférieure à celle qui entache la précision des mesures que nous pouvons faire. Nous pouvons donc écrire :

$$\operatorname{tg} V = \frac{n_m - n_p}{n_g - n_m} \quad \text{ou} \quad \operatorname{tg} V = \frac{\operatorname{Bir.} sn_g}{\operatorname{Bir.} sn_p}$$

Remarquons que si le retard de la  $sn_g$  est plus grand que le retard de la  $sn_p$ , la valeur  $\operatorname{tg} 2V > 1$ , cela implique que  $2V > 90^\circ$ . L'indice  $n_g$  est alors confondu avec la bissectrice aiguë (B.o.) et le minéral est négatif. Si on souhaite que  $2V$  reste toujours inférieur à  $90^\circ$ , il suffit de remplacer  $sn_g$  et  $sn_p$  par B.a. et B.o., ce qui donne :

$$\operatorname{tg} V = \frac{\operatorname{Bir.} B_a}{\operatorname{Bir.} B_o}$$

Le même raisonnement avec les autres équations, permet d'écrire:

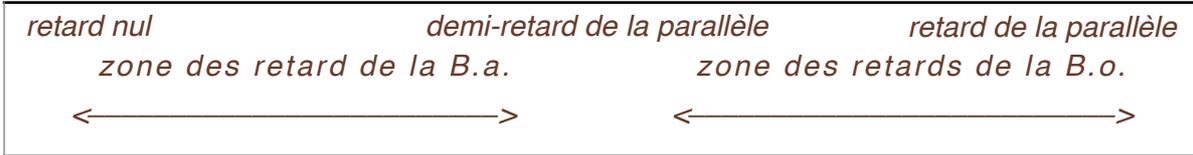
$$\sin V = \frac{\operatorname{Bir.} B_a}{\operatorname{Bir.} sn_m} \quad \cos V = \frac{\operatorname{Bir.} B_o}{\operatorname{Bir.} sn_m} \quad \operatorname{tg} V = \frac{\operatorname{Bir.} B_a}{\operatorname{Bir.} B_o}$$

Et, si on admet une épaisseur identique pour toutes les sections dans la même coupe mince, on peut remplacer la biréfringence par le retard :

$$\sin V = \frac{\operatorname{Retard} B_a}{\operatorname{Retard} sn_m} \quad \cos V = \frac{\operatorname{Retard} B_o}{\operatorname{Retard} sn_m} \quad \operatorname{tg} V = \frac{\operatorname{Retard} B_a}{\operatorname{Retard} B_o}$$

Ces relations sont intéressantes et permettent de constater que le retard (ou la biréfringence) de la section normale à la bissectrice aiguë (B.a.) est compris entre 0 et la moitié du retard de la section parallèle ( $s_{nm}$ ). Celui de la bissectrice obtuse est compris entre la moitié et la totalité du retard de la section parallèle.

### Zones de retard des bissectrices



### Bissectrice aiguë ou obtuse ?

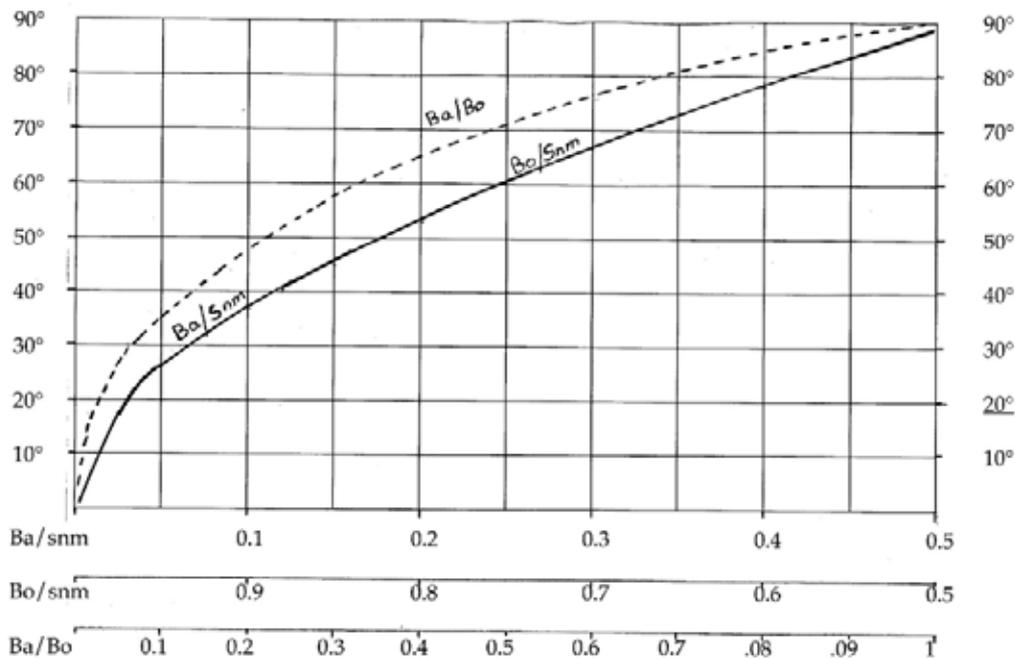
Avec ce tableau, il devient possible d'identifier la section normale à la bissectrice aiguë ou à la bissectrice obtuse, en mesurant leur retard et en le comparant à celui de la section parallèle.

L'observation des isogyres est un moyen supplémentaire de confirmer l'identité de la bissectrice. Nous savons déjà que, sur la section normale à une bissectrice, les deux branches de l'hyperbole s'éloignent d'autant plus rapidement que l'angle  $2V$  est plus grand. Sur la section normale à la bissectrice aiguë elles restent même parfois dans le champ de vision si l'angle  $2V$  n'est pas trop grand.

Dans le cas de la bissectrice obtuse, les deux branches de l'hyperbole sont floues et plus étagées. Elles disparaissent très vite du champ de vision lorsqu'on tourne la platine.

Le tableau ci-dessous montre les courbes des rapports B.a./ $s_{nm}$ , B.o./ $s_{nm}$  et B.a./B.o. en fonction de l'angle  $2V$ . Si on connaît approximativement la valeur de  $2V$ , on a tout de suite une idée de la valeur du retard des bissectrices par rapport à celui de la parallèle ( $s_{nm}$ ). Réciproquement, connaissant les retards de deux des trois sections principales, on peut calculer l'angle  $2V$ .

Au vu de ce tableau, on constate que plus l'angle  $2V$  est grand, plus la biréfringence (ou le retard) des bissectrices se rapprochent de la demi-biréfringence (ou demi-retard) de la section parallèle.



Valeurs relatives des biréfringences des diverses sections entre elles, en fonction de l'angle  $2V$ .

## Recherche des sections normales aux bissectrices

La section perpendiculaire permet de se faire une idée approximative de la valeur de l'angle  $2V$ . En se référant aux courbes du tableau ci-dessus, on sait à peu près quel retard (quelle teinte de polarisation) doit montrer la section correspondant à la bissectrice aiguë ou à la bissectrice obtuse. Dans la coupe mince, pour chaque section répondant à ces conditions, on vérifie, en lumière convergente, l'allure des isogyres jusqu'à ce qu'on observe les figures caractéristiques d'une bissectrice. Il est conseillé de commencer par chercher la bissectrice aiguë qui est plus facile à identifier et qui est plus utile que la bissectrice obtuse pour la mesure de l'angle  $2V$ .

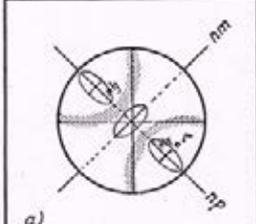
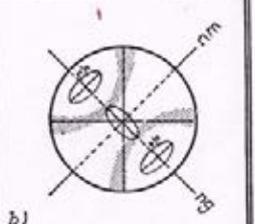
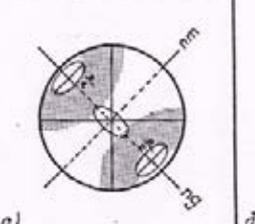
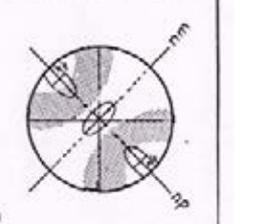
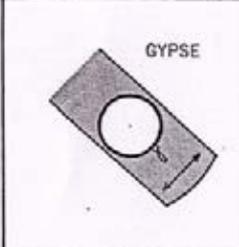
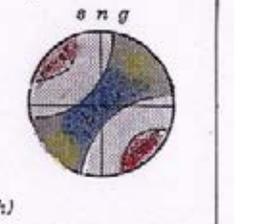
Si le minéral est pléochroïque, la recherche des bissectrices en est facilitée. En effet, par la section parallèle, nous connaissons les couleurs engendrées par les directions  $n_g$  et  $n_p$  et celle de  $n_m$  observée sur la section perpendiculaire. La  $sng$  doit donc montrer les couleurs de  $n_m$  et  $n_p$  et la  $np$ , celles de  $n_m$  et  $n_g$ .

### Section normale à $n_g$ ou à $n_p$ ?

De même qu'il est nécessaire de savoir si la bissectrice trouvée est aiguë ou obtuse, de même il faut découvrir si on est en présence d'une section normale à  $n_g$  ou à  $n_p$ .

Cette recherche s'effectue en lumière convergente, de préférence sur la bissectrice aiguë qui s'y prête plus facilement. Examinons le tableau de la page précédente. Il ressemble à ceux que nous avons déjà établis pour identifier le signe optique. On y retrouve les isogyres, les traces de  $n_p$ ,  $n_g$  et  $n_m$ , ainsi que l'orientation des ellipses de part et d'autre des bras de l'isogyre. C'est la lame de gypses qui convient le mieux pour la détermination de l'orientation des indices. La position du rouge ou du bleu nous permet de savoir si la section observée est normale à  $n_g$  ( $sng$ ) ou à  $n_p$  ( $snp$ ).

Aspect des sections normales aux bissectrices vues en lumière convergente

	BISSECTRICE AIGUE		BISSECTRICE OBTUSE	
	Positif	Négatif	Positif	Négatif
				
				

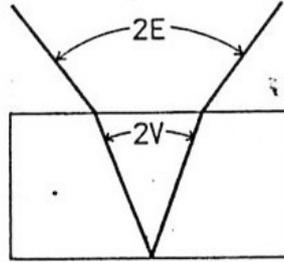
## Autres observations sur les bissectrices

Après avoir identifié une section normale à une bissectrice, on vérifie en lumière convergente, s'il s'agit bien d'une bissectrice aiguë ou obtuse et s'il s'agit d'une section normale à  $n_g$  ou  $n_p$ .

On procède ensuite comme une section parallèle : on la dessine en position d'extinction, on identifie la position des indices, on note le retard, on vérifie l'épaisseur et on calcule la biréfringence. On estime ensuite l'angle  $2V$  et on note les couleurs du pléochroïsme s'il y a lieu.

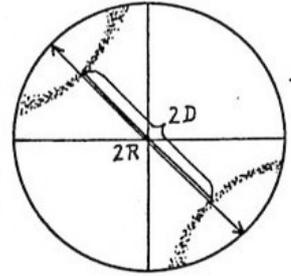
## Une autre méthode de mesure de l'angle $2V$ .

En lumière convergente, sur la section normale à la bissectrice aiguë, l'écartement maximum des deux branches de l'hyperbole dépend de la valeur de  $2V$ . Pour être plus précis, l'écartement apparent correspond à  $2V$  apparent que nous appellerons  $2E$ . La relation entre l'angle  $2V$  et son prolongement apparent  $2E$ .



$2E$  apparent et  $2V$

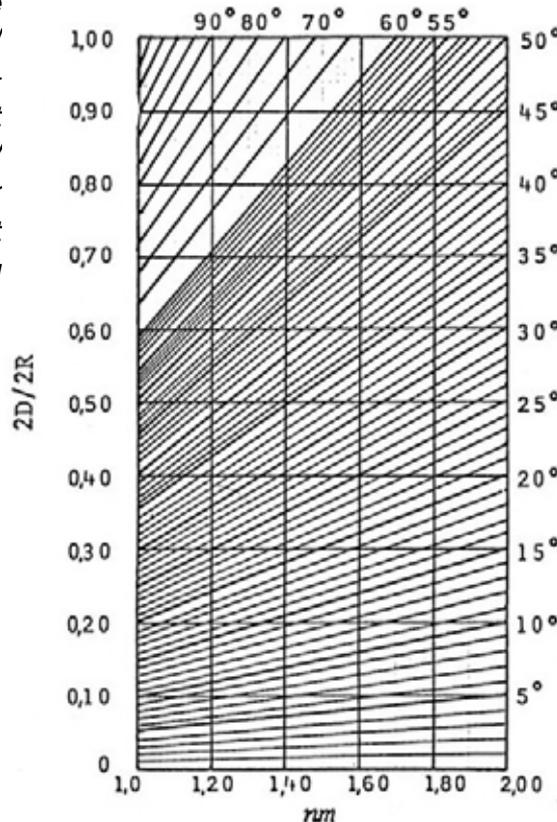
$$\sin E = n_m \times \sin V$$



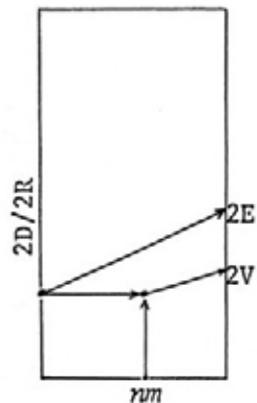
Ecartement des bras de l'hyperbole en relation avec  $2V$ .

Il existe une méthode de mesure de l'angle  $2V$  basée sur l'écartement des isogyres. C'est la méthode dite de Tobi (1956). On détermine le rapport  $2D/2R$  de l'écartement des isogyres sur le diamètre du champ de vision du microscope.

Un abaque indique les valeurs de  $2E$  ou  $2V$  en fonction de ce rapport. l'abaque ci-dessous a été construite pour un objectif d'ouverture 0.85. Si on utilise un autre objectif d'ouverture  $A'$ , il faut multiplier préalablement le rapport  $2D/2R$  par  $A'/0.85$ . Cette méthode est intéressante mais elle ne peut plus être utilisée si l'angle  $2V$  dépasse une certaine valeur car les isogyres s'échappent alors du champ de vision du microscope.



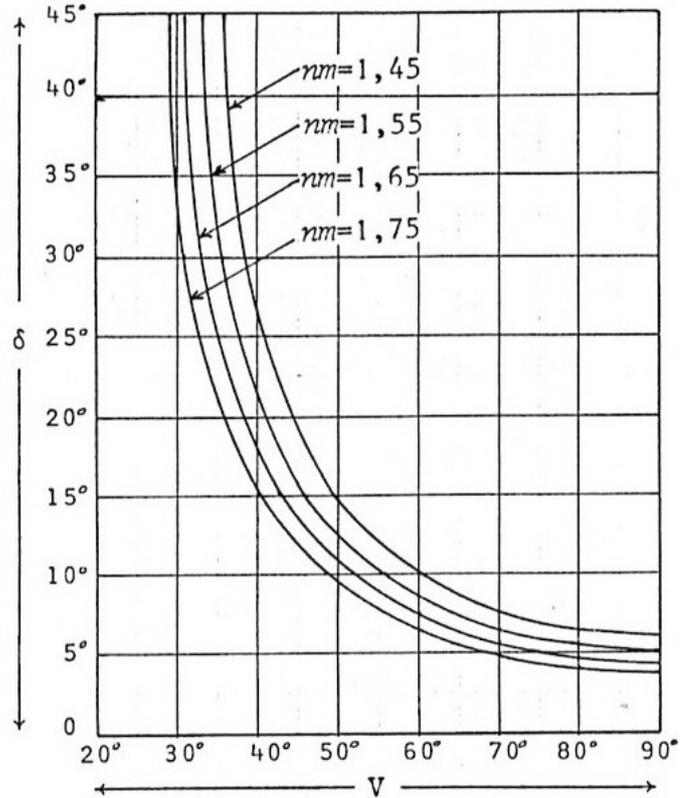
Abaque donnant l'angle  $2V$  en fonction de l'angle  $2E$  ou  $2V$  pour un objectif de 0.85 d'ouverture.



Une méthode voisine a été développée par Kamb (1958) qui propose un abaque qui donne l'angle  $2V$  en fonction de la vitesse d'éloignement des isogyres, lorsque celles-ci sortent du champ de vision du microscope. La procédure est simple. Sur une section perpendiculaire à une bissectrice (aiguë de préférence), on mesure l'angle  $\delta$  dont il faut faire tourner la platine à partir de la position d'extinction pour qu'une des branches d'hyperbole devienne tangente à la limite du champs de vision.

Cet angle  $\delta$  doit être identique pour les deux branches d'hyperbole, peu importe qu'on tourne la platine vers la gauche ou vers la droite. Si la section n'est pas parfaitement orientée, on trouve des valeurs un peu différentes pour les quatre angles. On peut faire la moyenne de ces quatre mesures. L'abaque ci-contre n'est valable que pour un objectif d'ouverture 0.85.

Abaque donnant l'angle  $2V$  en fonction de l'angle  $\delta$  dont il faut faire tourner la platine pour voir disparaître l'isogyre.



## 11. Identification du système cristallin

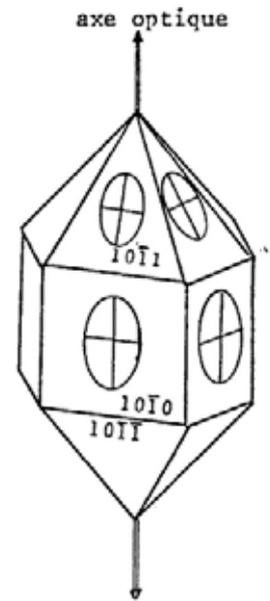
L'orientation des ellipsoïdes par rapport aux éléments géométriques d'un minéral doit satisfaire aux lois de symétrie qui régissent toutes les propriétés de celui-ci. En particulier, les axes de l'ellipsoïde ( $n_g$ ,  $n_p$  et  $n_m$ ) doivent coïncider avec des éléments de symétrie du minéral.

On peut reconstituer l'orientation de l'ellipsoïde par la mesure des angles d'extinctions entre les éléments géométriques du minéral et les directions des indices, non seulement sur la section parallèle, mais aussi sur les sections normales aux bissectrices.

### Minéraux uniaxes

L'ellipsoïde est caractérisé par un seul axe optique qui en même temps son axe de révolution. Ce sont les minéraux qui appartiennent aux systèmes rhomboédrique, hexagonal et quadratique qui sont uniaxes. Ces systèmes sont caractérisés par un axe de symétrie principal d'ordre 3, 4 ou 6. Cet axe principal coïncide obligatoirement avec l'axe optique de l'ellipsoïde.

*Sections dans l'ellipsoïde d'un minéral qui possède un axe principal de symétrie*

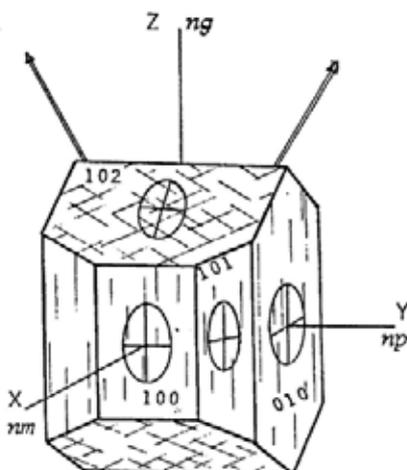


Cela entraîne un parallélisme entre les éléments de symétrie géométrique du minéral et ses éléments optiques. Les extinctions sont toujours parallèles (ou droites) ou symétriques. Très souvent ces minéraux ont un habitus prismatique et la section perpendiculaire est en même temps la section du prisme. Suivant son contour, on peut parfois identifier le système auquel le minéral appartient.

### Minéraux biaxes

Les propriétés optiques des minéraux orthorhombiques, monocliniques et tricliniques sont régies par un ellipsoïde biaxe. Ce dernier possède trois axes de symétrie orthogonaux ( $n_g$ ,  $n_p$ ,  $n_m$ ) et trois plans de symétrie ( $sn_m$ ,  $sn_g$ ,  $sn_p$ ). Cela correspond à l'holoédrie du système orthorhombique.

### Système orthorhombique



Les directions principales coïncident avec les éléments de symétrie du minéral. Les extinctions sont donc parallèles ou symétriques sur toutes les sections du minéral.

*Orientation de l'ellipsoïde des indices dans un cristal orthorhombique*

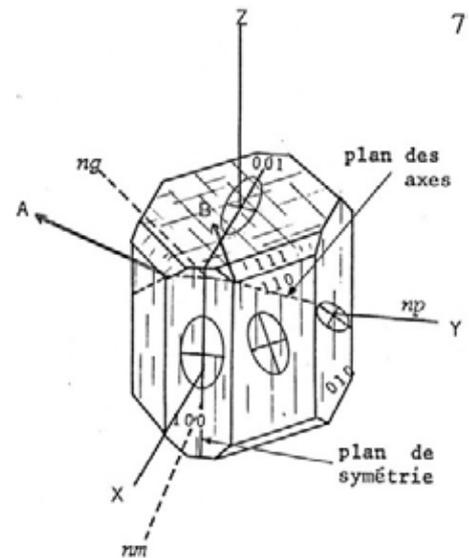
## Système monoclinique

Le système monoclinique est caractérisée par un seul axe de symétrie binaire associé à un plan normal. Dans les formes les moins symétriques ne subsistent plus qu'un seul de ces éléments, l'axe ou le plan.

Le cas le plus fréquent est la coïncidence de  $n_m$  avec l'axe de symétrie, les axes optiques étant alors contenus dans le plan de symétrie. L'ellipsoïde possède un degré de liberté qui lui permet de tourner autour de  $n_m$ . L'extinction est donc oblique sur la section parallèle, droite ou symétrique sur les sections normales aux bissectrices.

Bien que le cas le plus fréquent soit la coïncidence entre le plan des axes optiques (section parallèle) et le plan de symétrie du minéral, on trouve quelques exceptions pour lesquels ce sont  $n_g$  ou  $n_p$  qui coïncident avec l'unique axe de symétrie du minéral.

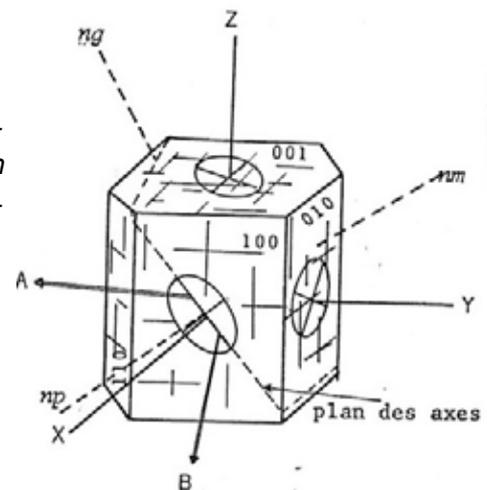
Dans ces cas de figures, l'extinction sera droite sur la section parallèle et une des bissectrices, oblique sur l'autre bissectrice. Le système monoclinique est donc caractérisé par des extinctions droites ou symétriques sur deux des sections principales, oblique sur la troisième.



Autre orientation de l'ellipsoïde:  
 $n_p$  coïncide avec l'axe Y

## Système triclinique

D'une manière générale, à moins d'une coïncidence fortuite, les axes principaux de l'ellipsoïde n'ont aucune relation géométrique avec les lignes directrices du minéral. Les extinctions sont obliques sur toutes les sections principales.



Résumé des relations entre les orientations des indices principaux optiques et les directions cristallographiques dans les divers systèmes cristallins.

Système	ellipsoïde	ext. $snm$	ext. $sng$	ext. $snp$	Forme sect. $\perp$
cubique	Sphère				
quadratique	Uniaxe	droite			parfois carrée
hexagonal		droite			parfois hexagonale
rhomboédrique		droite			parfois trigonale
orthorhombique	Biaxe	droite	droite	droite	
monoclinique		extinction oblique sur une section, droite ou symétrique sur les autres			
triclinique		oblique	oblique	oblique	

## 12. La dispersion des indices

On peut définir la dispersion comme étant la variation des constantes optiques d'un corps transparent en fonction de la longueur d'onde utilisée.

Dans un corps isotrope, une seule constante varie : son unique indice de réfraction. L'indice augmente lorsque la longueur d'onde diminue. Cependant la variation n'est pas linéaire et il n'est pas possible de l'exprimer par une équation. On se contente d'exprimer l'importance de la dispersion par un coefficient qui est égal à la différence de deux indices mesurés avec des radiations situées aux deux extrémités du spectre visible, le violet et le rouge<sup>1</sup>.

$$\text{coefficient de dispersion} = n_F - n_C$$

Parfois on préfère indiquer la valeur de ce coefficient relativement à l'indice du minéral. C'est le **pouvoir dispersif**.

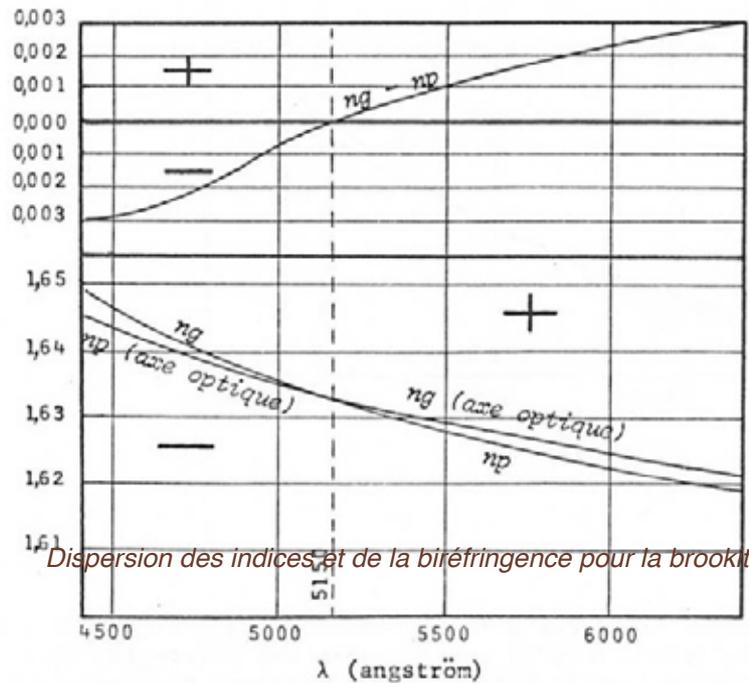
$$\text{pouvoir dispersif} = \frac{n_F - n_C}{n_D}$$

### Dispersion de la biréfringence

Dans les corps anisotropes, la variation de chacun des indices entraîne la dispersion de la biréfringence.

Le tableau ci-contre illustre parfaitement ce phénomène. Il s'agit de la métatorbernite, un minéral particulièrement dispersif. On constate qu'un des indices varie plus rapidement que l'autre et qu'il prennent une même valeur pour une longueur d'onde de 5150 Å.

Pour cette longueur d'onde particulière, la biréfringence est nulle et le minéral paraît isotrope. Pour une longueur d'onde  $\lambda$  plus petite, le minéral est uniaxe négatif, pour une longueur d'onde supérieure il est uniaxe positif !



Dispersion des indices et de la biréfringence pour la brookite

Dispersion des indices et de la biréfringence pour la métatorbernite

<sup>1</sup> C, D et F sont des symboles de longueurs d'onde définies par Fraunhofer :  $\lambda_C = 6563 \text{ \AA}$  (rouge),  $\lambda_D = 5893 \text{ \AA}$  (jaune du sodium),  $\lambda_F = 4861 \text{ \AA}$  (violet).

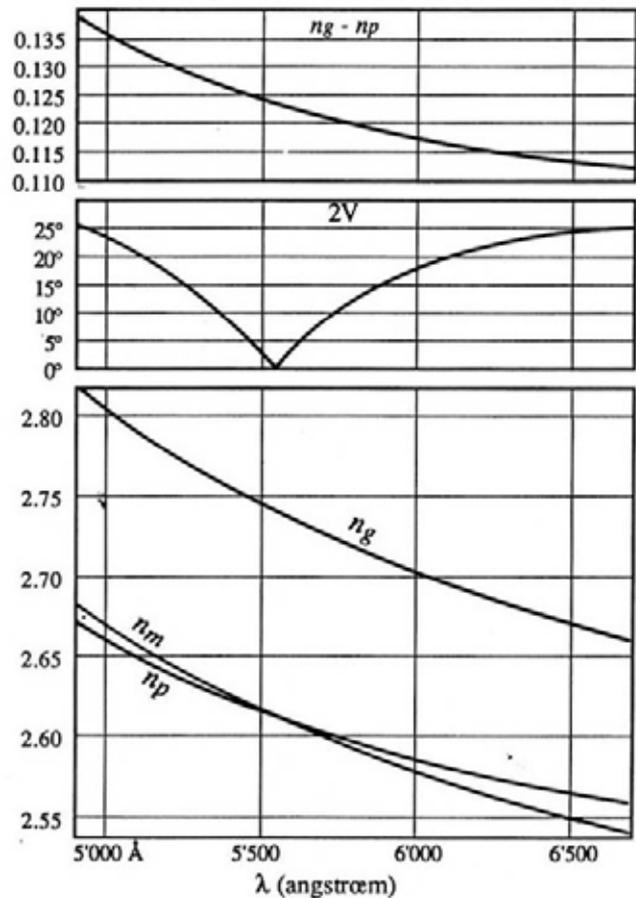
## Dispersion de l'angle $2V$

Chez les minéraux biaxes, la dispersion des indices principaux entraîne non seulement celle de la biréfringence, mais aussi celle des axes optiques.

Le nouveau graphique montre le cas curieux de la brookite: on voit que la dispersion des indices principaux, celle de la biréfringence et aussi celle des axes optiques.

Aux alentours de  $5500 \text{ \AA}$ ,  $n_g$  et  $n_m$  prennent une valeur identique, ce qui implique un angle  $2V$  nul. Le minéral se comporte donc comme un uniaxe pour cette radiation particulière.

*Dispersion des axes optiques dans le cas de la brookite*



## Dispersion des ellipsoïdes

En réalité, on observe une dispersion des ellipsoïdes eux-mêmes, chaque radiation engendrant un ellipsoïde particulier. Heureusement, la plupart des minéraux ne sont que très faiblement dispersifs et ce phénomène ne perturbe les observations que dans quelques cas extrêmes.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, les ellipsoïdes sont liés aux éléments de symétrie du minéral. La dispersion est donc liée à la symétrie propre à chaque système.

Dans le système orthorhombique, les ellipsoïdes engendrés par des radiations différentes peuvent se déformer, mais ils restent emboîtés les uns dans les autres et leurs plans principaux restent confondus.

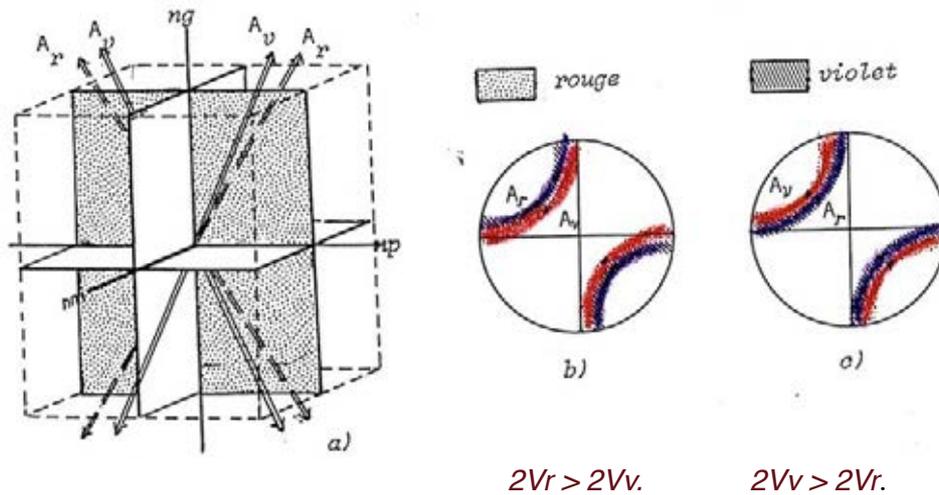
Dans le système monoclinique, il n'y a qu'un seul plan commun entre les plans principaux des divers ellipsoïdes. Les différents ellipsoïdes acquièrent un degré de liberté et présentent des orientations différentes tout en gardant en commun un indice (généralement  $n_m$ ) autour duquel ils peuvent pivoter.

Dans le système triclinique, plus aucun lien de symétrie ne lie les ellipsoïdes entre eux et ils peuvent tous prendre des orientations quelconques.

## Minéraux orthorhombiques

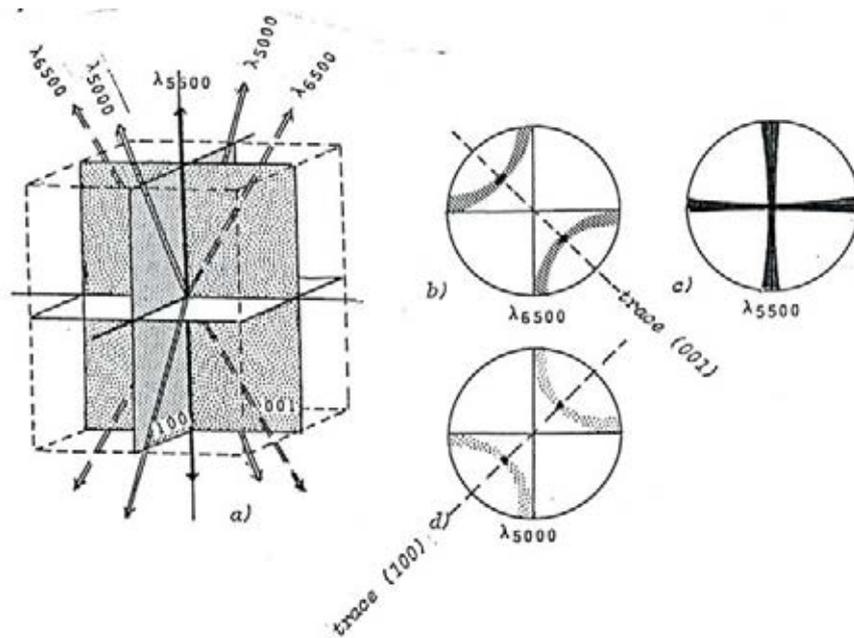
Les indices principaux coïncident avec les trois axes de symétrie. La dispersion des axes optiques ne peut donc avoir lieu que dans son propre plan. Si  $A_r$  et  $A_v$  figurent les axes optiques pour le rouge et pour le violet, nous verrons sur la section normale à la bissectrice aiguë, en lumière convergente, deux isogyres colorées, l'une rouge du côté de la convexité, correspondant à l'axe  $A_v$ , l'autre violette du côté de la concavité, correspondant à l'axe  $A_r$ .

Dans l'exemple choisi, nous avons supposé que  $2V_r > 2V_v$ . Le cas contraire existe aussi. Les couleurs sont alors inversées.



Dispersion des axes optiques dans le cas d'un minéral orthorhombique

Si nous reprenons le curieux cas de la brookite, ce minéral orthorhombique fortement dispersif, nous voyons que pour une radiation inférieure à 5500 Å, les axes optiques sont situés dans le plan (100). Pour des longueurs d'onde. Ils se referment progressivement avec l'augmentation de la longueur d'onde pour se transformer en uniaxe vers 5500 Å, puis s'ouvrent à nouveau, mais cette fois-ci dans le plan (001), pour des longueurs d'onde supérieures à 5500 Å.

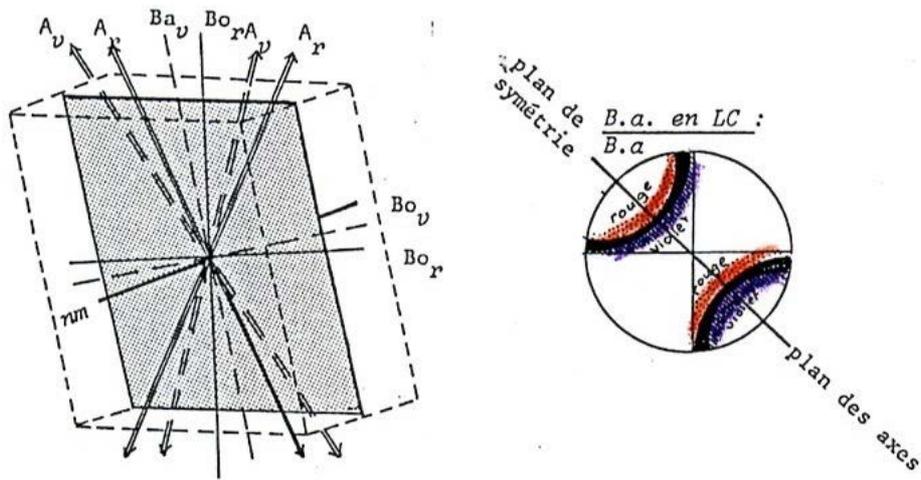


Dispersion des axes optiques dans le cas de la brookite

## Minéraux monocliniques

Les minéraux monocliniques ne possèdent plus qu'un seul axe de symétrie associé à un plan normal à cet axe. Un des indices principaux (le plus souvent  $n_m$ ) est confondu avec l'axe de symétrie, les deux autres indices ainsi que les axes optiques sont contenus dans le plan de symétrie.

Lorsque  $n_m$  coïncide avec l'axe de symétrie, on parle de **dispersion inclinée**. La figure ci-dessus illustre ce cas. On voit les axes optiques dans le plan de symétrie. Ils peuvent différer non seulement par la valeur de l'angle  $2V$  mais aussi par une orientation différente de la bissectrice suivant la longueur d'onde.

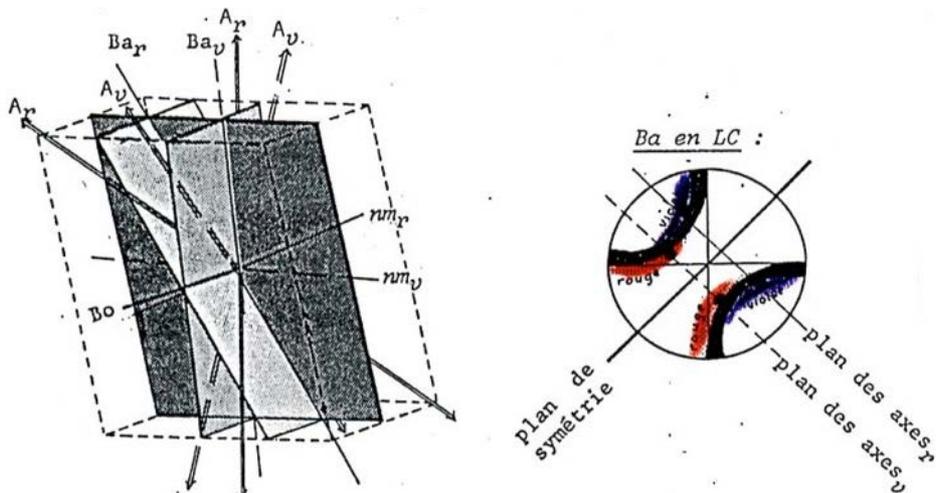


Système monoclinique : dispersion inclinée

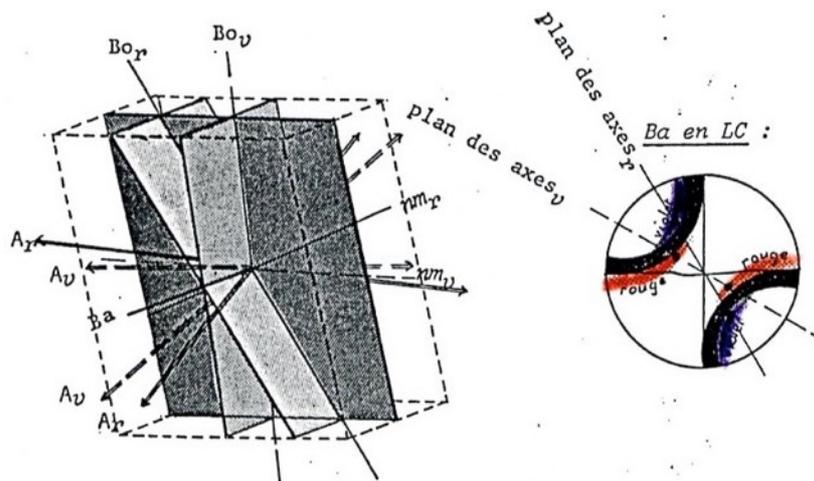
L'observation de la section perpendiculaire à la bissectrice aiguë en lumière convergente montre les isogyres bordées de rouge du côté de l'axe optique correspondant au violet, bordée de violet du côté de l'axe optique correspondant rouge. Ces colorations sont symétriques par rapport au plan des axes qui est aussi, rappelons le, le plan de symétrie du minéral. Beaucoup plus rarement heureusement, c'est une des bissectrices qui coïncide avec l'axe de symétrie du minéral.

Lorsque c'est la bissectrice obtuse qui est confondue avec l'axe de symétrie, nous avons une **dispersion horizontale** (ou parallèle), Les axes optiques sont dispersés dans des plans différents, perpendiculairement au plan de symétrie du minéral. L'observation de la dispersion sur la bissectrice aiguë montre des colorations symétriques par rapport au plan de symétrie.

Lorsque c'est la bissectrice aiguë qui est confondue avec l'axe de symétrie on observe une dispersion croisée. La bissectrice obtuse et l'indice  $n_m$  sont dispersés dans le plan de symétrie. L'aspect de la bissectrice aiguë en lumière convergente n'est plus symétrique par rapport à un plan, mais par rapport à l'axe de symétrie, confondu ici avec l'axe du microscope.



Système monoclinique : dispersion horizontale



Système monoclinique : dispersion croisée

## Minéraux tricliniques

La dispersion n'est liée à aucun élément de symétrie. Pour chaque couleur, l'ellipsoïde peut occuper une position quelconque. On peut trouver des ellipsoïdes indépendants les uns des autres, chacun d'entre eux correspondant à une certaine longueur d'onde. Les observations en lumière convergente ne révèlent plus aucune symétrie.

## Influence de la dispersion sur la section parallèle

En ce qui concerne les uniaxes et les biaxes appartenant au système orthorhombique, la dispersion ne s'exerce que sur la biréfringence. Si le minéral est peu dispersif, la mesure de la biréfringence s'effectue normalement. Lorsque la dispersion est forte, les teintes de Newton sont plus ou moins modifiées et il est parfois impossible de mesurer la biréfringence. La position d'extinction demeure toutefois bien franche. Avec le compensateur de Berek, on n'arrive plus à reconnaître la suite normale des teintes de Newton. La frange gris sombre qui marque normalement la compensation complète est, au mieux, bordée d'une teinte rouge d'un côté, violette de l'autre. Souvent même la frange grise disparaît au profit de franges colorées. Il faut avoir recours à une source lumineuse monochromatique pour fixer le point de compensation (pour cette radiation précise).

Les minéraux mono- et tricliniques montrent les mêmes phénomènes. Mais, en plus, la dispersion des indices ne permet plus de fixer clairement la position d'extinction. La position d'extinction du rouge laisse apparaître une teinte violette pour laquelle la position d'extinction n'est pas encore atteinte. L'utilisation de filtres colorés<sup>1</sup> permet alors de fixer la position d'extinction pour ces diverses couleurs.

## Influence de la dispersion sur la section perpendiculaire

Les minéraux uniaxes présentent une section perpendiculaire normalement éteinte. En lumière convergente, l'isogyre ne subit aucune modification. Les courbes isochromatiques sont un peu perturbées si la dispersion est importante. La mesure du signe ne présente aucune difficulté majeure. Exceptionnellement, pour des cas extrêmes, comme celui de la métatorbernite qui est positive pour le rouge et négative pour le violet, il faut alors avoir recours à des filtres colorés pour identifier le signe en fonction de la longueur d'onde choisie.

<sup>1</sup> On peut se servir d'un filtre interférentiel qui se place au-dessus de l'illuminateur. Par déplacement latéral, il permet de choisir n'importe quelle longueur d'onde du spectre visible. On peut alors vérifier les propriétés optiques d'un minéral dans toutes les parties du spectre.

*Les minéraux biaxes sont sujets à la dispersion des axes optiques. En lumière polarisée, la section perpendiculaire n'est jamais vraiment atteinte et montre une teinte rougeâtre ou violacée suivant que la section est perpendiculaire à l'axe de l'ellipsoïde violet ou rouge.*

*En lumière convergente, l'isogyre est bordée de franges colorées. La détermination du signe optique est parfois difficile et il faut alors avoir recours à une source lumineuse monochromatique. L'estimation de l'angle  $2V$  est souvent impossible. Là aussi, il faut utiliser une source de lumière monochromatique.*

---

## 12. Identification des minéraux en lame mince

Une coupe mince taillée dans un échantillon de roche renferme presque toujours plusieurs espèces minérales. Ce sont les minéraux constitutifs de la roche, accompagnés en petite quantité, de quelques minéraux accessoires.

Le premier examen consiste à distinguer ces diverses espèces minérales entre elles. Les minéraux ont des caractères suffisamment différents pour permettre à un observateur attentif de faire la distinction. Les critères immédiats de différenciation sont le relief, la couleur, le pléochroïsme, le degré de transparence, la présence ou l'absence de clivages ou de cassures. Ces divers minéraux, à priori inconnus, peuvent être désignés par des lettres ou tout autre signe distinctif. Par exemple :

1. Minéral incolore à faible relief, présentant des clivages très fins. Polarise dans les gris blanc du premier ordre. Macles lamellaires nettes toujours présentes.
2. Minéral à relief bien marqué, légèrement rose mais non pléochroïque. Clivage bien marqué. Polarise dans des teintes vives. Formes losangiques fréquentes.
3. Minéral incolore à fort relief avec beaucoup de cassures mais pas de clivages. teintes de polarisations vives.

Cette première reconnaissance est importante. Elle évite l'erreur grossière qui consisterait à choisir la section perpendiculaire d'une espèce et la section parallèle d'une autre !

Si la coupe renferme du quartz, minéral très souvent présent, on peut tout de suite vérifier l'épaisseur de la lame en appliquant la relation :

$$e = R/0.009 \quad (0.009 = \text{bir. du quartz}).$$

### Principe de l'identification d'un minéral

Chaque minéral possède un certain nombre de propriétés optiques et géométriques qu'il s'agit de déterminer. Ce sont principalement : le type d'ellipsoïde, la biréfringence, la couleur, le pléochroïsme, la présence ou l'absence de clivages, de cassures, de macle. Puis, à partir des mesures d'extinction, on identifie le système cristallin.

Pour les minéraux uniaxes, ces mesures s'effectuent sur la section parallèle et la section perpendiculaire.

Pour les minéraux biaxes, il faut rechercher en plus de celles-ci une section normale à une bissectrice, la bissectrice aiguë de préférence. Parfois même il faudra rechercher aussi la section normale à la bissectrice obtuse.

### Schéma de la détermination d'un minéral

Un premier examen général du minéral dans la coupe mince permet de noter les caractères immédiatement visibles. Sur le pourtour de la coupe mince, on choisit une section dont le retard soit le plus élevé possible (le plus proche possible de la section parallèle), au contact avec le baume, afin de comparer les deux indices avec celui du baume, à l'aide de la frange de Becke, et estimer grossièrement son indice de réfraction moyen.

### Section perpendiculaire

On la reconnaît à son retard nul en lumière polarisée. Si le minéral est pléochroïque, cette section montre aussi un pléochroïsme nul.

Après avoir soigneusement relevé sa position en notant la valeur des coordonnées de la surplatine, on dessine la section, on note sa couleur, puis, L.C., on relève les caractéristiques de l'isogyre, des courbes isochromatique, on détermine le signe optique et on estime la valeur de l'angle 2V. Si le minéral est dispersif, on observe les effets de la dispersion.

## Section parallèle (snm,)

Parmi toutes les sections, on sélectionne celle qui présente le retard le plus élevé. Si le minéral est pléochroïque, c'est la section qui présente le pléochroïsme le plus marqué.

Il est important, après avoir noté la position de la section, de dessiner le minéral en position d'extinction et de faire figurer sur le dessin les directions de  $n_g$  et de  $n_p$ . On estime le retard par comparaison avec les teintes de Newton ou on le mesure à l'aide d'un compensateur.

En L.N., avec le grossissement le plus fort à disposition, on vérifie l'épaisseur apparente en réglant successivement la mise au point sur la surface inférieure puis sur la surface supérieure du minéral. La mesure apparente obtenue permet de calculer la mesure vraie en la multipliant par l'indice moyen estimé:  $e = e' \times n_m$ .

On peut alors calculer la biréfringence :  $B = R/e$ .

On recherche la présence éventuelle de clivages; on note l'angle d'extinction entre un des indices et un élément géométrique du minéral (trace d'une face, trace de clivage, plan de macle). S'il y a plusieurs directions de clivage, on note l'angle que ces directions font entre elles.

On note encore la qualité de la transparence et la couleur. Si le minéral est pléochroïque, on note successivement les couleurs apparentes lorsque  $n_g$ , puis  $n_p$  coïncident avec le trait vertical du réticule. On note encore tout caractère qui pourrait ultérieurement servir à la détermination du minéral : dispersion, zonage des couleurs, inclusions, extinctions onduleuses, altération, etc...

## Section normale à la bissectrice aiguë (Ba)

Connaissant approximativement la valeur de  $2V$  ainsi que le retard de la parallèle, on détermine à peu près le retard que doit présenter la normale à la bissectrice aiguë. On sélectionne les sections qui présentent la teinte de polarisation correspondant à ce retard et on vérifie pour chacune d'elle l'allure des figures en lumière convergente jusqu'à ce qu'on obtienne les figures caractéristiques de la Ba.

Si le minéral est pléochroïque, les couleurs que doit présenter notre section sont celles de  $n_m$  et  $n_p$  si le minéral est positif,  $n_m$  et  $n_g$  s'il est négatif.

On effectue ensuite les mêmes mesures que celles qu'on a déjà faites sur la section parallèle. Si le minéral est pléochroïque, on notera la couleur de  $n_m$  (les couleurs de  $n_g$  et de  $n_p$  sont connues par les observations faites sur la section parallèle ( $n_m$ )). On peut préciser la valeur de  $2V$  en utilisant une des formules suivantes :

$$\sin V = \frac{\text{Retard } Ba}{\text{Retard } snm} \quad \text{ou} \quad \sin V = \frac{Bir. Ba}{Bir. snm}$$

On peut encore contrôler la valeur de  $2V$  par la mesure de l'écartement des isogyres à l'aide des abaques de Tobi ou de Kamb.

## Section perpendiculaire à la bissectrice obtuse

On ne cherche cette section que si l'on n'a pas trouvé de Ba ou si on veut vérifier un angle d'extinction. Sa recherche se fait de la même manière que dans le cas de la bissectrice aiguë.

Le tableau ci-dessous résume les observations qu'il faut effectuer pour identifier les propriétés optiques et géométriques d'un minéral.

## Schéma de la détermination d'un minéral en coupe mince

	Lumière "naturelle"	Lumière polarisée	Lumière convergente
<i>Observations générales de la coupe mince</i>	<i>Inventaire et différenciation des espèces minérales présentes dans la coupe. Discriminations par la forme, relief, transparence, couleur, pléochroïsme, présence de clivages, de cassures, de macles. Importance de la biréfringence.</i>		
<i>Observations générales du minéral à étudier</i>	<i>Forme, relief, indices de réfractions, clivages, cassures, inclusions.</i>	<i>Ordre de grandeur de la biréfringence, présence éventuelle de macles.</i>	
<i>Section perpendiculaire</i>	<i>Forme, couleur, clivages.</i>		<i>Type et signe de l'ellipsoïde, estimation de 2V, aspect des courbes isochromatiques</i>
<i>Section parallèle</i>	<i>Forme, couleur, pléochroïsme, angles entre clivages, cassures, inclusions, épaisseur apparente.</i>	<i>Dessin en position d'extinction, position des indices, mesure du retard et de la biréfringence, angle d'extinction</i>	
<i>Bissectrice aiguë</i>	<i>Forme, couleur et pléochroïsme, clivages, angle entre les clivages.</i>	<i>Dessin en position d'extinction, position des indices, mesure de R, B et de l'angle d'extinction.</i>	<i>Identification du type de bissectrice (sng ou snp). Estimation et mesure de 2V.</i>
<i>Bissectrice obtuse</i>	<i>Forme et clivages.</i>	<i>Vérification de l'angle d'extinction.</i>	
<i>Récapitulation</i>	<i>Indice moyen, forme, couleur, pléochroïsme. Clivages et angle entre ceux-ci, cassures, inclusions.</i>	<i>Biréfringence, allongement, système cristallin, macles, calcul de 2V. Dispersion.</i>	<i>Type d'ellipsoïde, signe optique, angle 2V, type de dispersion.</i>

## Exemple d'un protocole de détermination d'un minéral en lame mince

Coupe R 16.

minéral pléochroïque (vert-bleu à jaune clair). Relief modéré, indice supérieur à celui du baume.  $n_m \approx 1,65$ .  
présence de clivages (deux directions sur certaines sections).

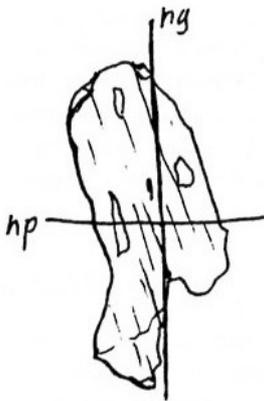
Section perpendiculaire (13,8 - 115,2)

section vert-jaune clair, sans contour caractéristique.

pas de clivages visibles.

L.C.: biaxe négatif.  $2V$  très grand  $\approx 80^\circ$ .

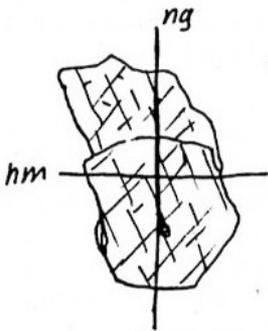
pas de courbes isochromatiques visibles.

Section parallèle (12,8 - 114,6)

L.P.: - allongement positif  
- extinction:  $14^\circ$  (clivage  $\wedge$  ng)  
-  $R = 705 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$  (Berek)

$$-B = \frac{705 \cdot 10^{-6}}{27 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{0,026}}$$

L.N.: pléochroïsme  $\left\{ \begin{array}{l} \text{ng : vert-bleuâtre} \\ \text{np : jaune pâle} \end{array} \right.$

Bissectrice aigüe (9,3 - 110,5)

L.P.: - extinction symétrique  
-  $R = 327 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$  (Berek)  
- angle des clivages:  $124^\circ$

L.N.: - pléochroïsme  $\left\{ \begin{array}{l} \text{ng : vert-bleuâtre} \\ \text{nm : vert-jaune-clair} \end{array} \right.$

L.C.: - la section est une  $snp$ .  
- pas de dispersion notable.

$$\sin V = \sqrt{\frac{325}{705}} = 0,662$$

$2V = 83^\circ$ . système monoclinique

diagnose: hornblende commune.

## 13. Examen des minéraux en grains

Jusqu'à présent, tout le contenu de cet ouvrage a été basé sur l'examen des minéraux des roches étudiés dans des coupes minces classiques. Ce genre d'étude est important, car il permet non seulement d'identifier les minéraux constitutifs d'une roche, mais aussi de comprendre les relations des minéraux entre eux. Ce sont les pétrographes qui sont les plus intéressés à cette démarche.

Le minéralogiste qui souhaite n'étudier qu'un seul minéral, prélevé dans une micro-fissures ou sur un échantillon, utilise une autre voie, celle des "**minéraux en grains**".

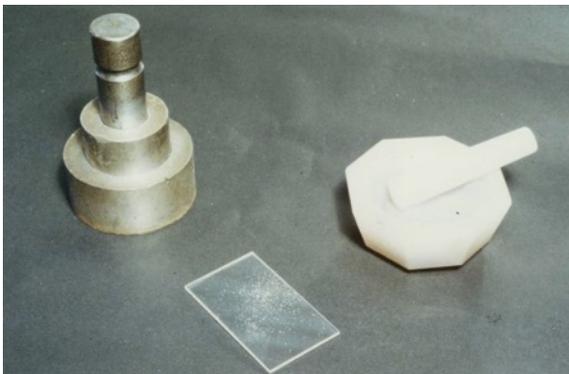
### Matériel nécessaire

Cette méthode est basée principalement sur la comparaison des indices principaux du minéral avec les indices de liquides soigneusement étalonnés. Il faut donc disposer d'une collection de liquides d'indice.

Le laboratoire Cargile, aux U.S.A., conditionne des collections complètes de liquides dont les indices sont compris entre 1.400 et 2. La différence entre deux liquides successifs est de 0.003 ou 0.004 suivant la série jusqu'à 1.780.



Exemple de flacons de liquides d'indice de la firme Cargile



Au-delà, les liqueurs sont plus instables, plus toxiques et leur emploi reste délicat. Il faut avoir à portée de main des lames porte-objet parfaitement propres et des couvre-objets, si possible circulaires et de très petit diamètre. Un mortier métallique à piston, un mortier d'agate, un grattoir et quelques aiguilles fines compléteront ce petit matériel.

Mortiers et lame porte-objet

### Principe de la méthode

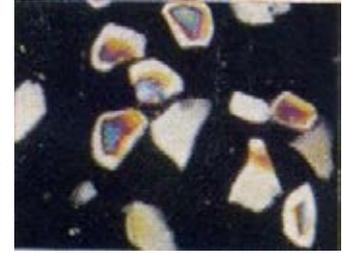
La méthode est basée avant tout sur la recherche des valeurs absolues des indices principaux du minéral. On les compare avec les indices connus des liquides au moyen de la méthode de la frange de Becke.

La différence entre l'indice maximum mesuré et l'indice minimum mesuré sur le même minéral nous donne une bonne valeur de la biréfringence.

Il n'y a pas de méthode fiable pour trouver une section parallèle. En effet, comme la plupart des grains ont leur épaisseur propre, le retard ne dépend plus uniquement de l'orientation de la section comme dans une coupe mince d'épaisseur constante.

## Schéma de la détermination

Il s'agit donc d'identifier un minéral à partir d'un très petit fragment. Si la quantité du minéral est suffisante ( $1 \text{ mm}^3$ , par exemple), le fragment est écrasé dans le mortier métallique ou broyé dans le mortier d'agate. La poudre ne doit être ni trop fine, ni trop grossière. Pour une observation confortable le diamètre des grains devrait être compris entre 0.2 et 0.05 mm.



## Les indices de réfraction

On répartit un peu de poudre sur le porte-objet et, en l'absence de toute idée préconçue, on dépose une très petite goutte d'un liquide d'indice moyen, 1.60 par exemple.

A l'aide d'un objectif de puissance moyenne, on observe la frange de Becke sur plusieurs grains, chaque fois dans les deux positions d'extinction afin de comparer les indices  $n'_g$  et  $n'_p$  de chaque grain avec celui du liquide. Pour améliorer la perception de la frange de Becke, il faut ôter la partie amovible du condenseur et jouer un peu avec le diaphragme. On effectue ces premières observations sans couvre-objet, la distance entre la lentille frontale de l'objectif et la préparation étant suffisamment importante. On réserve le couvre-objet pour les objectifs à fort grossissement afin de protéger ce dernier de tout contact avec la liqueur (certaines sont assez corrosives).

L'examen avec un premier liquide permet de connaître si les indices du minéral sont proches ou éloignés de celui de la liqueur. Avec un peu d'expérience, l'estimation du "relief" permet de savoir si l'indice moyen du minéral est très proche, proche, éloigné ou très éloigné de celui du liquide. Sur la base de cette appréciation, on choisit un deuxième liquide. Les mêmes observations permettent petit à petit de trouver finalement un liquide dont l'indice est extrêmement proche ou quasi identique à l'indice moyen du minéral.

Lorsque l'indice du liquide et l'un des indices du minéral sont identiques, le relief devient inexistant et le minéral semble avoir disparu.

Le tableau ci-dessous résume le processus d'approche de chacun des deux indices : pour chaque liquide, on observe le relief de plusieurs grains dans les deux positions d'extinctions ( $n'_g$  et  $n'_p$ ). Le fait de répéter la mesure sur plusieurs grains augmente la probabilité d'atteindre  $n_g$  et  $n_p$ .

$n_{\text{liqueur}}$	$n_{\text{max}}$	$n_{\text{min}}$	
1.540	>>	>>	>> beaucoup plus grand
1.560	>>	>	> plus grand
1.564	>>	≥	< plus petit
1.658	>>	≤	<< beaucoup plus petit
1.572	>Y	<	
1.574	>	<	$B = 0.012$
1.578	≈	<<	$n_{\text{max}} = 1.578$

Si le minéral est dispersif, la frange de Becke pour le violet et celle pour le rouge se comportent de manière différente et il devient possible d'estimer l'ordre de grandeur de la dispersion. Lorsque l'indice moyen du minéral correspond à celui du liquide, on voit la frange de Becke se partager en deux franges colorées, l'une se dirigeant vers l'extérieur, l'autre vers l'intérieur du minéral. Sur l'exemple choisi sur la tableau le plus petit indice mesuré est compris entre 1.564 et 1.568. On lui attribue l'indice intermédiaire 1.566. Dans le liquide 1.578, on constate que le minéral "disparaît" complètement lorsque son grand indice correspond au fil vertical du réticule. On lui attribue donc la valeur 1.578.

*En principe la différence des deux indices correspond à la valeur de la Biréfringence. Il faut tout de même être prudent, car l'opération de broyage qu'on a fait subir au minéral favorise l'apparition de plaquettes ou de parallélépipèdes de clivage, provoquant certaines orientations privilégiées du minéral.*

### **Observations en lumière convergente**

*Après avoir mesuré les indices de réfraction, on peut placer un couvre-objet sur la préparation et rechercher une section perpendiculaire. Comme dans une coupe mince, elle est reconnaissable à son retard nul. Les observations en L.C. sont ensuite tout à fait identiques à celles décrites plus haut. Il en est de même pour les sections normales à une bissectrice.*

### **Observations en lumière polarisée**

*On peut éventuellement mesurer des angles d'extinction par rapport aux directions de clivage ou à l'allongement. On peut mettre en évidence la présence éventuelle de macles et de phénomènes de dispersion. Par contre, il n'est pas possible d'estimer un retard afin de calculer la biréfringence car on n'a aucun moyen précis de mesurer l'épaisseur d'un grain.*

### **Observations en lumière naturelle**

*Il n'est guère possible d'observer des formes cristallines puisque les grains ont été obtenus par broyage. Par contre cette opération peut mettre en évidence des plans de clivages éventuels. La couleur, le pléochroïsme, les cassures et les inclusions sont facilement observables.*

---

## Annexe I : Réglage du microscope

Avant toute détermination, il est recommandé de vérifier le réglage de quelques organes du microscope.

### Perpendicularité des polariseurs

Toutes les opérations et mesures décrites dans les chapitres précédents sont basées sur un dispositif d'observation où les plans de polarisation du polariseur et de l'analyseur sont rigoureusement perpendiculaires l'un à l'autre.

L'analyseur est monté d'une manière fixe. La vérification porte donc sur le polariseur qui peut tourner sur lui-même à l'intérieur d'une bague fixe. Un repère gravé sur le polariseur doit être mis en coïncidence avec l'un des quatre repères gravés à  $90^\circ$  les uns des autres sur la bague dans laquelle il est inséré. Ces derniers repères gradués,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ . Le repère du polariseur doit être en coïncidence avec les repères  $90^\circ$  ou  $180^\circ$ . En l'absence de préparation on doit avoir une obscurité maximum dans le champs du microscope.

Si on néglige cette vérification et que le réglage n'est pas parfait, le baume de Canada paraîtra gris-clair, les teintes de Newton seront altérées et les mesures qu'on effectuerait dans ces conditions n'auraient plus de sens.

On peut affiner le réglage en utilisant une lame dite "biquartz de Soleil". On utilise le phénomène de la polarisation rotatoire du quartz. Il s'agit de deux sections de quartz taillées perpendiculairement à l'axe du prisme (l'axe optique), l'une dans un quartz gauche, l'autre dans un quartz droit. Les lames ont exactement la même épaisseur et sont montées côte à côte. Chacune des sections provoque une rotation du plan de polarisation du rayon lumineux de quelques degrés, à gauche pour l'une, à droite pour l'autre. Par conséquent ces section ne sont plus obscures et présentent une certaine teinte de polarisation. Pour ramener l'extinction, il faut faire tourner la préparation dans un sens pour le quartz droit, dans l'autre sens pour le quartz gauche.

La parfaite perpendicularité des polariseurs est vérifiée lorsque les retards des deux lames sont identiques. En effet, l'œil perçoit plus facilement l'identité de deux teintes de polarisation que l'exacte position d'obscurité totale.

### Les fils du réticule

Ils doivent coïncider avec les plans de polarisation du polariseur et de l'analyseur. La vérification s'effectue en contrôlant l'extinction d'un minéral aciculaire qu'on sait être toujours droite. On utilise une coupe mince préparée à cette usage qui renferme des aiguilles de natrolite.

### Centrage des objectifs

Le centrage de l'axe de symétrie du système optique des objectifs sur l'axe de rotation de la platine est indispensable si on ne veut pas que les sections observées sortent du champs de vision lorsqu'on fait tourner la platine.

Sur le revolver porte-objectifs on remarque, de part et d'autre de chaque objectif, deux petites tiges de section carrée sur lesquelles viennent se fixer les deux vis de centrage qui font partie des accessoires du microscope.

Les objectifs sont maintenus à l'intérieur d'une bague entre une butée à ressort et les extrémités des deux vis de centrage.

Lorsque le centrage n'est pas correct, tous les objets visibles dans le champ du microscope tournent autour d'un centre de rotation qui ne coïncide pas avec la croisée des réticules (Fig. 2a). Au moyen des vis de centrage, il faut ramener ce centre de rotation en coïncidence avec la croisée des réticules (Fig. 2b).

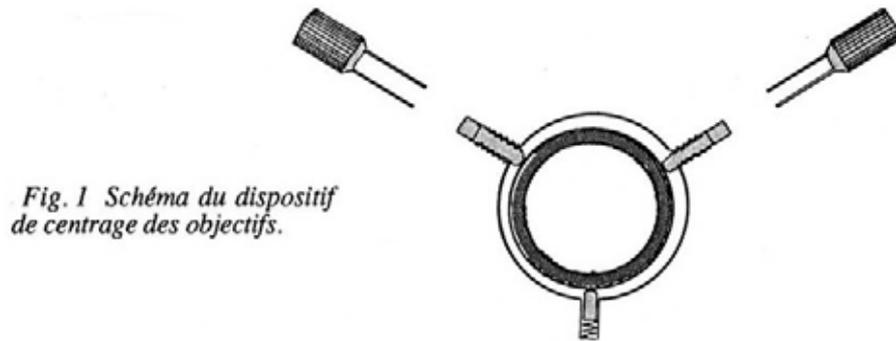


Fig. 1 Schéma du dispositif de centrage des objectifs.

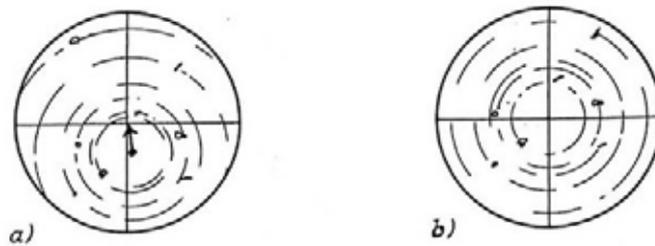


Fig. 2 Coïncidence entre l'axe de rotation de la platine et la croisée des réticules

Cette opération doit être effectuée pour chaque objectif. Il faut surtout apporter un soin particulier au centrage de l'objectif le plus puissant.

### Centrage du condenseur

Certains modèles de microscope comportent un système de centrage du condenseur. On effectue ce réglage avec le plus faible grossissement en mettant en service la partie amovible du condenseur. On aperçoit alors dans le champs de vision un cercle clair dont on peut modifier la position au moyen de deux vis situées de part et d'autre du condenseur.

### Propreté des lentilles

Il faut éviter de toucher les lentilles de l'objectif et de l'oculaire avec les doigts. En particulier, la lentille supérieure de l'oculaire est souvent souillée au contact de l'œil. Il faut la nettoyer avec un pinceau doux très propre. On peut la dégraisser aussi avec un chiffon doux très propre imbibé légèrement de xylol.

Il faut éviter que les liqueurs d'indice entrent en contact avec la lentille frontale des objectifs.

## Abréviations utilisées dans cet ouvrage

a, b, c	directions des arêtes de la maille élémentaire (correspondant aux axes X, Y, et Z).
A, B	axes optiques.
Å	angstrœm = $10^{-7}$ mm.
B	biréfringence.
$B_a$	bissectrice aigue (ou section normale à la bissectrice aigue de l'angle 2V).
$B_o$	bissectrice obtuse (ou section normale à la bissectrice obtuse de l'angle 2V).
2E	angle apparent, dans l'air, des axes optiques.
2V	angle réel des axes optiques, à l'intérieur du minéral.
G	grossissement de l'objectif.
LC	lumière polarisée convergente.
LN	lumière "naturelle" (observation avec le polariseur, mais sans l'analyseur).
LP	lumière polarisée (observation avec le polariseur et l'analyseur).
$\lambda$	longueur d'onde caractérisant une lumière monochromatique.
n	indice de réfraction en général.
$n_C$	indice de réfraction pour la radiation rouge ( $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ ).
$n_D$	indice de réfraction pour la radiation jaune du sodium ( $\lambda = 5893 \text{ \AA}$ ).
$n_F$	indice de réfraction pour la radiation violette ( $\lambda = 4861 \text{ \AA}$ ).
$n_g$	direction et valeur de l'indice maximum d'un minéral biréfringent.
$n_p$	direction et valeur de l'indice minimum d'un minéral biréfringent.
$n_m$	direction et valeur de l'indice intermédiaire d'un minéral biréfringent.
$n'_g$	direction et valeur de l'indice maximum d'une section quelconque.
$n'_p$	direction et valeur de l'indice minimum d'une section quelconque.
R	retard mesuré sur une section biréfringente.
$sn_g$	section normale à l'indice $n_g$ .
$sn_p$	section normale à l'indice $n_p$ .
$sn_m$	section normale à l'indice $n_m$ (section parallèle aux axes optiques).
X	axe de coordonnées horizontal dirigé vers l'observateur.
Y	axe de coordonnées horizontal qui va de gauche à droite, pour l'observateur.
Z	axe de coordonnées vertical.

### Abréviations en usages dans les livres anglo-saxons:

Pour les indices :

$$N_x \text{ ou } X \text{ ou } \alpha = n_p$$

$$N_y \text{ ou } Y \text{ ou } \beta = n_m$$

$$N_z \text{ ou } Z \text{ ou } \gamma = n_g$$

Pour les axes de coordonnées :

$$a = X$$

$$b = Y$$

$$c = Z$$