
Polarisation II

- M. BORN et E. WOLF, *Principles of Optics* Chapitre XIV (Optics of Crystals)
- L. LANDAU et E. LIFCHITZ *Électrodynamique des milieux continus* Chapitre XI (Ondes Électromagnétiques dans les milieux anisotropes)
- J.-Ph. PEREZ, *Optique*, 6^{eme} édition, Masson, 2000
- G. BRUHAT, *Optique*, 6^{eme} édition, Masson, 1965 (ou 1992, réimpression avec index)
- P. FLEURY et J.-P. MATHIEU, *Images optiques*, Eyrolles, 1956
- J.-P. MATHIEU, *Optique (Tome I)*, SEES, 1965
- M. FRANCON, *Vibrations lumineuses – optique cohérente*, Dunod, 1970

Bibliographie

La quasi-totalité des expériences proposées ici figurent dans SEXTANT, *Optique expérimentale*, Hermann, 1997. Pour des exposés théoriques :

- M. BORN et E. WOLF, *Principles of Optics* Chapitre XIV (Optics of Crystals)
 - L. LANDAU et E. LIFCHITZ *Électrodynamique des milieux continus* Chapitre XI (Ondes électromagnétiques dans les milieux anisotropes)
 - J.-Ph. PEREZ, *Optique*, 6^{ème} édition, Masson, 2000
 - G. BRUHAT, *Optique*, 6^{ème} édition, Masson, 1965 (ou 1992, réimpression avec index)
 - P. FLEURY et J.-P. MATHIEU, *Images optiques*, Eyrolles, 1956
 - J.-P. MATHIEU, *Optique (Tome I)*, SEES, 1965
 - M. FRANCON, *Vibrations lumineuses – optique cohérente*, Dunod, 1970
- Fascicule de Travaux Pratiques "Polarisation I"

I) Biréfringence

1) Matériaux cristallins

Nous disposons de trois matériaux cristallins biréfringents : le quartz (SiO_2), le spath ou calcite (CaCO_3) et le mica ($\text{KH}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3$). Le quartz et le spath sont des cristaux uniaxes ; le mica est un cristal biaxe.

Remarques concernant les montages :

Plutôt qu'un faisceau parallèle, on utilisera un faisceau légèrement convergent (condenseur de 12 ou 15 cm). Les montages ont été indiqués pour chaque expérience, mais il est bon de remarquer qu'ils correspondent à deux types :

- *Type A* : on observe sur l'écran l'image d'un trou large (diamètre de 1 à 2 cm) réalisé avec un diaphragme D.
- *Type B* : on observe sur l'écran l'image d'une lame cristalline Q.

Dans tous les schémas, E représente un écran, L une lentille, F un filtre, P un polariseur et A un analyseur.

a) Mise en évidence

On utilise un cristal de spath d'Islande biréfringent en forme de lame à faces parallèles épaisse de plusieurs centimètres, qui est taillé avec un angle inconnu par rapport à l'axe optique.

- Réaliser l'image d'un trou. Intercaler le cristal entre le trou et la lentille (il faut alors rétablir la mise au point). Repérer les rayons ordinaire et extraordinaire en faisant tourner la lame sur elle-même.

- A l'aide d'un polariseur, vérifier que les faisceaux émergents présentent une polarisation rectiligne et que leurs directions de polarisation sont perpendiculaires.

Remarques :

- Pour une interprétation phénoménologique de cette expérience, se reporter à FLEURY-MATHIEU ; pour les calculs, voir PEREZ (6^{ème} édition) p. 444.

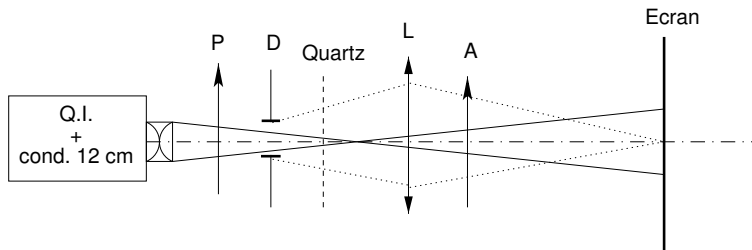
- On peut également observer deux images en posant le cristal sur le texte d'un livre, ou sur celui d'un transparent qu'on projette au rétroprojecteur.

- L'expérience peut s'effectuer simplement avec un faisceau laser non polarisé.

b) Etude des lames cristallines en lumière parallèle

Nous disposons de deux types de lames à faces parallèles : les lames \parallel , dont l'axe optique est parallèle aux faces de la lame, et les lames \perp , dont l'axe optique est perpendiculaire aux faces de la lame.

Couleurs complémentaires On commence par répéter l'expérience du II.2.a.1 du TP "Polarisation I" avec une lame mince :



- En l'absence de Q, croiser P et A. Introduire Q, lame cristalline choisie en fonction des informations qui précèdent. En tournant Q, montrer qu'on obtient quatre positions pour lesquelles l'extinction est rétablie. On fait ainsi apparaître les lignes neutres de la lame.

- Dans une position de Q où il n'y a pas d'extinction, tourner l'analyseur pour vérifier qu'il n'y a pas d'extinction.

- Observer les couleurs obtenues quand on fait tourner Q dans son propre plan entre P et A croisés, puis entre P et A parallèles. Que se passe-t-il si on fait pivoter la lame autour d'une de ses lignes neutres ?

Remarque : les couleurs obtenues dépendent de l'épaisseur de la lame ; pour illustrer cet effet, réaliser sur une plaque de verre un empilement en dégradé de ruban adhésif transparent.

- Remplacer l'analyseur par un prisme de spath, qui va servir de double analyseur (on peut également utiliser le cristal épais du I.1.a). En l'absence de lame, le placer de manière que les deux images sur l'écran aient une partie commune, puis le tourner dans son plan afin d'éteindre l'une des images.

- Introduire Q entre P et le prisme de spath ; la faire tourner dans son plan jusqu'à obtenir le maximum de netteté des teintes, la partie commune étant blanche. Interpréter.

Remarques :

- Expliquez ce que vous observez si vous remplacez la lame mince Q par une lame épaisse ;

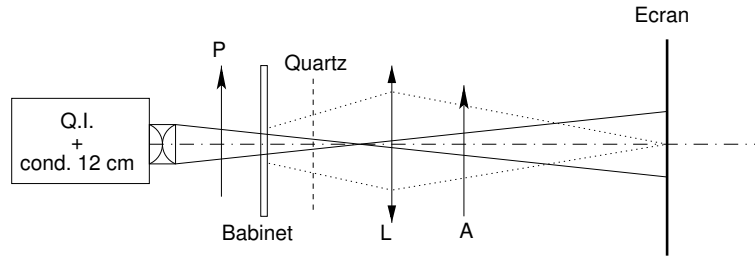
- Le prisme de spath utilisé ici est en fait un prisme à vision directe obtenu par association d'un prisme biréfringent et d'un prisme en verre ordinaire.

Mesure d'une biréfringence On cherche à mesurer la quantité $e\Delta n$ (où $\Delta n = n_e - n_o$), souvent appelée épaisseur optique (à ne pas confondre avec l'épaisseur optique ne d'une lame non biréfringente).

- *Cas d'une lame mince : compensateur de Babinet*

On utilise l'appareil appelé compensateur de Babinet.

Pour le principe de fonctionnement du compensateur, consulter la bibliographie ; pour le réglage, voir la notice.



Babinet : compensateur de Babinet

Quartz : lame de quartz // d'épaisseur 0,242 mm

– Entre polariseurs croisés ou parallèles et en l'absence de la lame Q, régler le compensateur en lumière blanche de façon à obtenir des franges bien contrastées sur l'écran.

– Mesurer l'interfrange en lumière monochromatique (filtre interférentiel). Introduire la lame Q et déterminer le déphasage qu'elle provoque en mesurant le déplacement de la frange centrale de la figure d'interférences ; en déduire la valeur de $\Delta n = n_e - n_o$ que l'on comparera à la valeur tabulée.

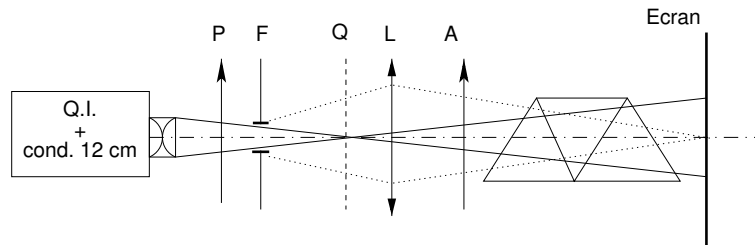
Remarques :

– On n'utilise pas ici la fonction compensatrice du dispositif de Babinet (translation calibrée d'un des prismes).

– Si la lame Q est une lame $\lambda/4$, elle produit de la *lumière circulaire*, droite ou gauche suivant que P est aligné avec la première ou la seconde bissectrice de ses axes neutres (pour une orientation de P n'étant ni parallèle aux axes neutres, ni suivant les bissectrices, la polarisation de sortie sera bien évidemment elliptique). Remarquer qu'une telle lame n'est rigoureusement quart d'onde que pour une radiation monochromatique que l'on précisera.

• *Cas d'une lame épaisse : spectre cannelé*

On étudie, par exemple, une lame de quartz taillée parallèlement à l'axe optique.



– Réaliser le spectre d'une lampe quartz-iode à l'aide d'une fente F et d'un prisme à vision directe. Ajouter deux polariseurs croisés. Placer la lame Q entre P et A. Faire tourner Q dans son plan de manière à obtenir l'image la plus éclairée. Observer le spectre cannelé. On vérifiera que la rotation de Q modifie l'éclairement mais ne modifie ni le contraste ni la position des cannelures.

ATTENTION : ni la lentille ni le prisme ni la lame Q ne doivent diaphragmer le faisceau.

– Interposer successivement deux filtres étalonnés ayant une largeur à mi-hauteur d'environ 10 nm, pour repérer la position de deux cannelures. En admettant que la dispersion du quartz est négligeable sur le spectre visible, en déduire la valeur de $\Delta n = n_e - n_o$ que l'on comparera à la valeur tabulée.

– Tourner l'analyseur de 90° ; expliquer qu'on observe le spectre complémentaire.

c) Étude des lames cristallines en lumière convergente

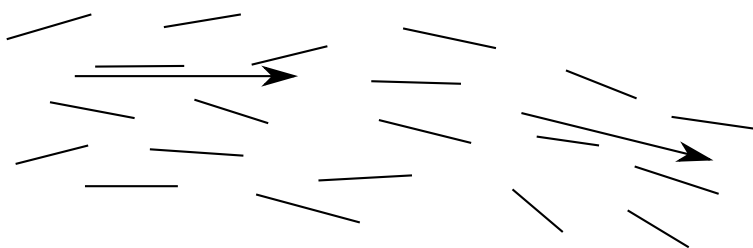
On propose deux expériences facultatives dans l'Annexe III.3.

2) Autres matériaux

a) Cristal liquide

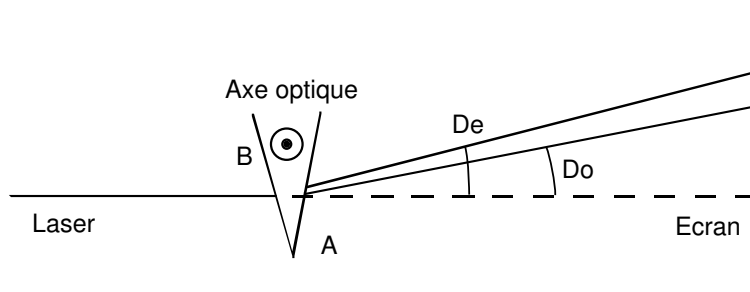
Cette manipulation illustre le comportement anisotrope d'un corps qui, dans un certain domaine de température, se trouve dans une phase présentant des propriétés intermédiaires entre la phase solide et la phase liquide. Pour simplifier, on peut dire que la position des molécules est isotrope, mais leur orientation est anisotrope. Ce type de phase est qualifiée de mésomorphe. Ces corps sont connus sous le nom de cristaux liquides.

Il existe plusieurs catégories de phases mésomorphes. La substance étudiée ici, la MBBA (p-méthoxybenzylidène p-butyraniline), fait partie de la catégorie des *nématiques*. Elle se trouve dans cette phase entre 20 et 45° C. Les molécules sont alors localement orientées selon une direction privilégiée, ce qui rend le milieu optiquement anisotrope.



Cependant, cette orientation peut changer suivant la position (voir figure, les flèches indiquent l'orientation moyenne de deux régions voisines; ceci ne coûte qu'une faible énergie élastique). Le retour à une orientation homogène d'un échantillon peut prendre très longtemps. Pour forcer une orientation homogène selon une direction connue, on a recours à un ancrage contrôlé sur les parois de la cellule contenant l'échantillon. Il s'agit ici d'un prisme traité de manière à orienter l'axe optique du liquide parallèlement à son arête; on veillera à travailler près de cette arête, où les parois sont plus proches et donnent à l'axe la direction la plus homogène.

Étude expérimentale :



– Envoyer le faisceau laser sur le prisme perpendiculairement à l'arête. On obtient deux faisceaux émergents. En repérant la trace du faisceau avant de placer le prisme, on peut mesurer

- Polariser le laser horizontalement puis tourner le barreau de façon à éteindre la lumière diffusée à 90° (vers l'auditoire) ; en déduire la direction des lignes neutres.
- Polariser le laser verticalement et montrer que le faisceau réapparaît (analyser la lumière ainsi diffusée à l'aide d'un polariseur que l'on retirera ensuite).
- Tourner le barreau de $\pi/4$; quelle est l'allure de la diffusion le long du barreau ? En quels lieux du barreau la polarisation du faisceau est-elle horizontale ? verticale ? Comment est la polarisation aux points intermédiaires ? Déduire de la période spatiale des *nœuds de diffusion* la valeur de la biréfringence $\Delta n = n_e - n_o$; la comparer à celle du quartz.
- Quelle serait l'épaisseur d'une lame *demi-onde* (pour la longueur d'onde utilisée) réalisée dans ce matériau ? et d'une lame quart d'onde ?

c) Biréfringence induite par une action extérieure (expériences qualitatives)

Effet photo-élastique On peut observer une plaque d'Altuglas soumise à une compression élevée. De la figure observée on peut en principe remonter aux lignes d'égale contrainte. La variation d'indice est proportionnelle à la force par unité de surface.

Application industrielle : photoélasticimétrie

Effet Kerr Certains liquides, comme le nitrobenzène, deviennent uniaxes sous l'action d'un champ électrique, la direction de l'axe optique étant celle du champ, et l'on a :

$$n_e - n_o \propto E^2$$

L'effet est petit et nécessite des tensions élevées.

Application : obturateurs, commutateurs et modulateurs de lumière ultra-rapides.

Le nitrobenzène étant toxique, on propose de réaliser une expérience avec une céramique à effet Kerr (PLZT) ; consulter sa notice.

La courbe fournie dans la notice montre que, pour ce composant, la biréfringence s'écarte fortement d'une loi quadratique. Par ailleurs, l'alimentation haute tension utilisée dans cette expérience ne peut pas être modulée à plus de 10 Hz. On se limitera donc à une expérience qualitative de modulation à très basse fréquence.

II) Polarisation rotatoire

1) Étude du quartz

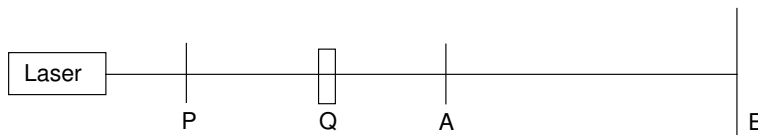
Le seul cristal dont nous disposons pour observer la polarisation rotatoire est le quartz. Il faut choisir des lames taillées perpendiculairement à l'axe optique pour que cet effet soit visible (il est 100 fois plus faible que la biréfringence).

Il est indispensable d'utiliser de la lumière assez bien *parallèle* cheminant suivant l'axe optique des lames, sinon il y aura toujours superposition des phénomènes de biréfringence et de polarisation rotatoire.

Des corps non cristallins ont aussi un pouvoir rotatoire (*cf.* Chimie). On peut faire l'expérience avec une solution de sucre.

a) En lumière monochromatique

Mise en évidence Montage :



- En l'absence de Q (quartz \perp), croiser P et A.
- Introduire Q, et rechercher l'extinction en tournant A d'un angle α .

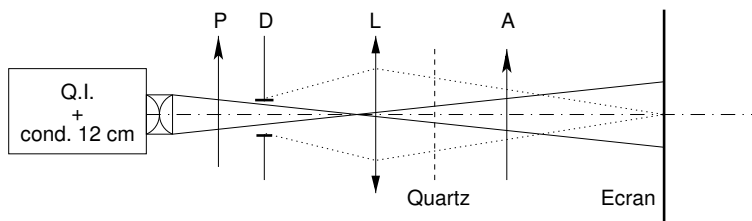
Remarque : si on utilise de la lumière circulaire, le phénomène rotatoire est inopérant ; ne pas faire l'expérience, mais retrouver le résultat sans calcul.

Influence de l'épaisseur Refaire la même expérience en remplaçant Q par une autre lame de même nature, mais d'épaisseur différente, puis par une lame de même épaisseur, mais de sens opposé. Vérifier que l'angle de rotation α est proportionnel à l'épaisseur (on rappelle que le pouvoir rotatoire est donné par le rapport α/e , où e est l'épaisseur du matériau traversé).

Attention à la détermination de l'angle de rotation si la lame n'est pas très mince : il n'est mesuré qu'à $n\pi$ près, $n \in \mathbb{N}$; les ambiguïtés éventuelles seront levées dans les expériences suivantes.

Influence de la longueur d'onde L'angle de rotation varie avec la longueur d'onde. Pour le quartz, on donne la loi approchée suivante (e = épaisseur) : $\alpha \propto e/\lambda^2$.

Remarque : il s'agit de la formule de Biot, qui suffit pour nos expériences.



En l'absence de Q, croiser P et A. Introduire Q.

Tracer pour un quartz d'épaisseur 1 mm, par exemple, la courbe α en fonction de $1/\lambda^2$ pour différents filtres interférentiels ($\alpha(0,72 \mu\text{m}) = 15^\circ$; $\alpha(0,59 \mu\text{m}) = 22^\circ$; $\alpha(0,42 \mu\text{m}) = 44^\circ$).

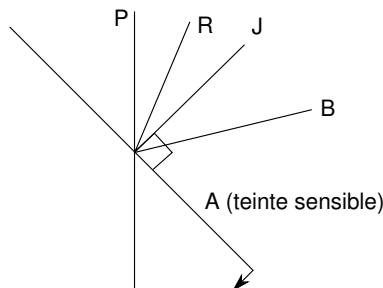
Pour lever l'ambiguïté sur le sens de α pour une lame épaisse, voir paragraphe suivant.

b) En lumière blanche

Expérience qualitative Compte tenu de la dispersion rotatoire que l'on vient d'observer, interpréter les couleurs que l'on obtient en lumière blanche pour des lames peu épaisses. Observer ce qui se passe si :

- P et A étant fixés, on fait tourner Q dans son plan ;
- P et Q étant fixés, on fait tourner A.

On appelle teinte sensible (lie de vin) la teinte obtenue par extinction du jaune moyen.



Application : trouver le « signe » d'une lame active peu épaisse. Placer polariseur et analyseur de façon à éteindre le jaune (teinte sensible), la lame étant en place. Tourner alors légèrement A dans le sens horaire, l'observateur regardant la source :

- virage au rouge \rightarrow D (dextrogyre) : lame qui fait tourner la direction de polarisation dans le sens horaire ;
- virage au bleu \rightarrow G (lévogyre) : sens inverse.

Couleurs complémentaires Même montage que pour la biréfringence (cf. I.1.2), mais la lame Q est une lame de quartz taillée normalement à l'axe optique. Observer l'évolution des couleurs quand on tourne le prisme de spath analyseur.

Spectre cannelé (facultatif) Reprendre le montage du I.1.2 en remplaçant la lame biréfringente par un canon de quartz. Régler l'orientation du canon de quartz de façon à avoir des franges bien rectilignes.

Observations :

- Montrer qu'une rotation du canon dans son plan ne perturbe pas le phénomène.
- Qu'observe-t-on si on tourne l'analyseur ? En déduire le sens du pouvoir rotatoire.
- Noter les différences qualitatives avec le spectre cannelé observé en biréfringence.

Mesure :

- Repérer la position de deux longueurs d'onde en utilisant des filtres interférentiels. Déterminer de quel angle il faut tourner l'analyseur pour faire passer une cannelure noire de λ_1 à λ_2 . En déduire la constante de proportionnalité de la loi de Biot ($\alpha \propto e/\lambda^2$).

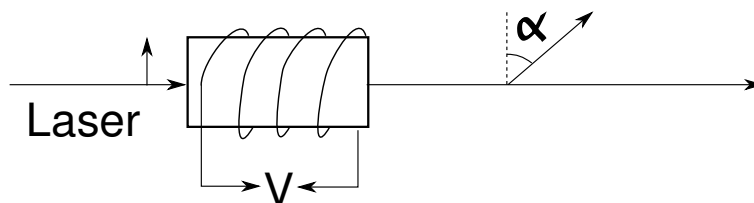
2) Polarisation rotatoire magnétique : effet Faraday

Certaines substances acquièrent un pouvoir rotatoire lorsqu'elles sont soumises à un champ magnétique B parallèle à la direction de la lumière qui les traverse. L'angle de rotation α est proportionnel à B .

Application : modulateur de Faraday

Principe :

Une bobine entoure un barreau de verre à fort effet Faraday. Sous l'action du courant résultant d'une tension V appliquée à la bobine, il se produit un phénomène de polarisation rotatoire magnétique, c'est-à-dire que la polarisation d'un faisceau lumineux traversant le dispositif tourne d'un angle α proportionnel au champ magnétique produit par la bobine, donc proportionnel à V .



Utilisation :

La notice indique le branchement du modulateur et décrit une expérience possible. La consulter. Étant donnée la faible ouverture du dispositif, ne l'utiliser que pour de la lumière laser. Le modulateur doit être éclairé par de la lumière polarisée linéairement ; mettre un polariseur à son entrée si le laser n'est pas polarisé.

L'effet de rotation est faible ($\alpha \approx 1^\circ$ pour quelques volts). Appliquer une tension alternative (GBF + ampli de puissance) $1 < V < 10$ V.

Remarque : la résistance de la bobine est faible, son impédance est uniquement selfique, il est donc DANGEREUX pour l'appareil de lui appliquer une tension continue qui le ferait chauffer excessivement. Le modulateur est donc uniquement adapté à la modulation de la polarisation d'un faisceau lumineux par une tension alternative.

Application : Isolateur optique à effet Faraday (Voir notice de l'isolateur).

III) ANNEXES

1) Lien entre propriétés optiques et symétries du matériau

a) Biréfringence

Les liquides (hors cristaux liquides) et les cristaux du système cubique sont optiquement isotropes (trois indices principaux égaux).

Les cristaux appartenant aux systèmes hexagonal, tétragonal et trigonal possèdent une direction privilégiée, l'axe optique. Suivant cette direction (notée ici z), l'indice principal est n_e ($D_z = \varepsilon_0 n_e^2 E_z$). Dans le plan perpendiculaire, les deux indices principaux valent n_o . Le quartz, le spath d'Islande entrent dans cette catégorie (milieux uniaxes).

Pour les cristaux de symétrie encore plus basse (systèmes orthorhombique, monoclinique et triclinique), les trois indices principaux sont différents deux à deux (milieux biaxes).

b) Activité optique ou pouvoir rotatoire

La chiralité d'une substance, c'est-à-dire le fait qu'elle ne soit pas superposable à son image dans un miroir, est à l'origine de son activité optique (aptitude à faire tourner le plan de polarisation d'une onde polarisée rectilignement).

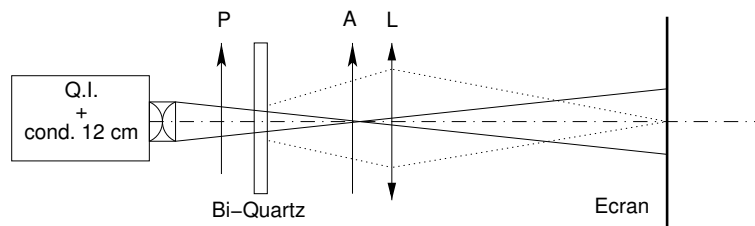
Ainsi, une solution de molécules organiques chirales est optiquement active.

La chiralité peut également se trouver au niveau de l'agencement cristallin. C'est le cas du quartz, qui possède deux configurations énantiomères : les chaînes de groupements SiO_2 se développent en hélices, droite ou gauche. D'où deux variétés de quartz, dextrogyre et lévogyre.

2) Expérience FACULTATIVE de mesure de pouvoir rotatoire : Bi-quartz de Soleil

Il est constitué de deux demi-lames, D et G, de même épaisseur. Pour que l'expérience soit précise, il faut projeter l'image du bi-quartz sur l'écran. L'œil étant le plus sensible à l'extinction du jaune, pour travailler entre polariseur et analyseur croisés, il faut que l'épaisseur des lames soit telle que $\alpha_{jaune} = \pm 180^\circ$.

Montage :



En lumière blanche, P et A étant croisés, on obtient la même teinte « lie de vin » sur les deux plages (application : méthode précise pour croiser des polariseurs). Comme précédemment, repérer le signe de chaque demi-lame. (Attention : la partie gauche de l'image à travers la lentille correspond à la partie droite du biquartz.)

En lumière monochromatique (introduire un filtre interférentiel) les deux plages doivent avoir le même éclairement.

Utilisation :

On introduit maintenant la lame Q dont on veut déterminer le pouvoir rotatoire à la longueur d'onde λ . C'est l'angle α dont il faut tourner A (dans le sens D ou G suivant le signe de Q) pour rétablir l'égalité des éclaircissements.

Attention, la mesure de α donne le pouvoir rotatoire à $\pm k\pi$ près.

Remarque : l'avantage de cette méthode sur l'analyseur à pénombre (cf. TP "Polarisation I") est le choix possible de la longueur d'onde pour le pointé d'une vibration.

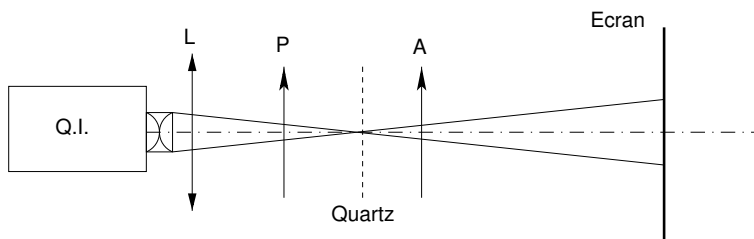
3) Étude des lames cristallines en lumière convergente (FACULTATIF)

Ces expériences sont spectaculaires, mais facultatives et délicates à interpréter (voir BRUHAT pour les explications).

a) Étude d'une lame de spath perpendiculaire

Cette expérience est facultative. On pourra se reporter à BRUHAT, § 305.

Pour obtenir un faisceau très convergent, utiliser un condenseur de 8 ou 10 cm suivi d'une lentille convergente. Observer les anneaux d'égale inclinaison produits par une lame de spath taillée perpendiculairement à l'axe optique.



P, A, Q très serrés et ne diaphragmant pas le faisceau.

Les anneaux étant visibles à l'infini, on se contentera d'observer sur un écran placé à 1 ou 2 m de la lame, sans aucune projection.

Pour des incidences faibles, l'indice propre extraordinaire reste peu différent de l'indice ordinaire, la différence de marche entre les faisceaux ordinaire et extraordinaire est donc faible et les anneaux sont visibles en lumière blanche.

Les anneaux constituent donc les lignes isochromatiques, puisqu'à chaque incidence i correspond une valeur de la différence de marche δ , qui impose les couleurs intenses ou éteintes. Ces teintes observées sont complémentaires suivant que l'observation a lieu entre polariseurs croisés ou parallèles.

Entre polariseurs croisés, on observe également une croix noire qui est la projection des directions des polariseurs sur l'écran. Interpréter. La croix est blanche si on est entre polariseurs parallèles.

b) Effets conjoints de la biréfringence et de la polarisation rotatoire

Cette expérience est facultative. On pourra se reporter à BRUHAT, § 336.

On reprend l'expérience précédente et on remplace le spath par une lame de quartz perpendiculaire. On observe des anneaux concentriques traversés d'une croix noire (entre polariseurs croisés) ou blanche (polariseurs parallèles), mais cette croix s'estompe totalement dans la partie centrale qui correspond à des rayons lumineux parallèles à l'axe optique ou très peu inclinés sur cet axe.

Pour ces rayons, le phénomène de polarisation rotatoire est prépondérant : les vibrations tournant toutes d'un même angle ne sont plus arrêtées par l'analyseur ; on observe donc les couleurs de polarisation rotatoire dans la région centrale, réparties de manière concentrique (même épaisseur optique pour une même incidence). Plus on s'écarte du centre, plus le phénomène de biréfringence prend de l'importance : les anneaux de biréfringence et la croix réapparaissent.