



Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

POLARISATION II

2024-2025



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

Table des matières

1	Biréfringence	3
1.1	Matériaux cristallins	3
1.2	Autres matériaux	8
2	Polarisation rotatoire	10
2.1	Étude du quartz	10
2.2	[2P] Polarisation rotatoire magnétique : effet Faraday	12
2.3	[AP] Mesure de pouvoir rotatoire : bi-quartz de Soleil	13
3	Données	14

Bibliographie :

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

- M. Born & E. Wolf *Principles of Optics*, Chapitre XIV (Optics of crystals)
- L. Landau & E. Lifchitz *Électrodynamique des milieux continus*, Chapitre XI (Ondes électromagnétiques dans les milieux anisotropes)
- J.-P. Perez *Optique* 6^{ème} édition (Masson, 2000)
- G. Bruhat *Optique* 6^{ème} édition (Masson, 1965 -- ou 1992, réimpression avec index)
- P. Fleury & J.-P. Mathieu *Images optiques* (Eyrolles, 1956)
- J.-P. Mathieu *Optique (Tome I)* (SEES, 1965)
- M. Françon *Vibrations lumineuses -- optique cohérente* (Dunod, 1970)
- Fascicule de Travaux Pratiques "Polarisation I"
- "Optique" Houard
- Hecht "optics"

Pour tout ce TP, les étudiants sont fortement encouragés à manipuler en suivant également le Sextant, qui donne un très grand nombre d'informations complémentaires.

1 Biréfringence

Lien entre propriétés optiques et symétries du matériau

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 traditionnellement z), l'indice principal est n_e ($D_z = \epsilon_0 n_e^2 E_z$). Dans le plan perpendiculaire à z , les deux indices principaux valent n_o . Le quartz et 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).

1.1 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 :

À défaut d'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 :

- on observe sur l'écran l'image d'un trou large (diamètre de 1 à 2 cm) réalisé avec un diaphragme D ;
- 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.

[1P] Mise en évidence On utilise un cristal de spath d'Islande biréfringent en forme de lame à faces parallèles épaisse de plusieurs centimètres, qui n'est taillé ni perpendiculairement, ni parallèlement, à son 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 faisceaux ordinaire et extraordinaire en faisant tourner la lame sur elle-même.
- À 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 que l'on projette au rétroprojecteur.
- L'expérience peut s'effectuer simplement avec un faisceau laser non polarisé.

[1P] Étude des lames cristallines en lumière parallèle

Introduction et rappels 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. En pratique, seules les lames à faces parallèles présentent des effets de biréfringence quand elles sont éclairées parallèlement à leur face. Les lames à faces perpendiculaires permettent par contre d'étudier des effets de polarisation rotatoire.

Pour rappel (cf. TP Polarisation I), au passage d'une lame taillée parallèlement (voir schéma-ci dessous) il y a un décalage de phase $\Delta\varphi = 2\pi e\Delta n/\lambda$ entre les vibrations alignées avec les axes ordinaire et extraordinaire, où e est l'épaisseur "géométrique" de la lame et $\Delta n = n_e - n_o$ sa biréfringence. On appelle donc épaisseur optique de biréfringence d'une lame, ou simplement épaisseur optique par la suite, la quantité $e\Delta n$. Attention, celle-ci ne doit pas être confondue avec l'épaisseur optique ne d'une lame non biréfringente, le sens dépendant du contexte.

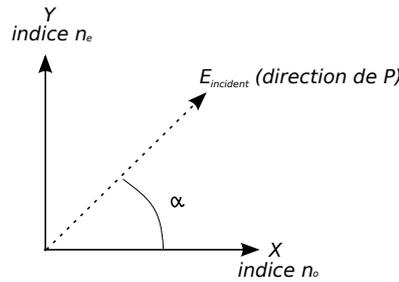


FIGURE 1 – Schéma des directions des lignes neutres de la lame : l'axe optique (Y) et l'autre axe perpendiculaire (X).

Si la lumière incidente est rectiligne, la vibration incidente, décomposée sur les lignes neutres :

$$\vec{E}_{\text{incident}} = E_0 \cos \alpha \cos \omega t \vec{e}_X + E_0 \sin \alpha \cos \omega t \vec{e}_Y \quad (1)$$

où E_0 est l'amplitude de $\vec{E}_{\text{incident}}$. Après traversée de la lame, on a :

$$\vec{E}_{\text{emergent}} = E_0 \cos \alpha \cos \omega t \vec{e}_X + E_0 \sin \alpha \cos(\omega t - \Delta\varphi) \vec{e}_Y \quad (2)$$

La vibration résultante est en général polarisée elliptiquement, à moins que le déphasage soit nul (modulo π) ou que l'on éclaire dans la direction des lignes neutres, auquel cas elle est rectiligne. La figure ci-dessous illustre l'évolution de l'état de polarisation de l'onde lorsqu'elle traverse la lame et que $\Delta\varphi = 2\pi e\Delta n/\lambda$ prend différentes valeurs (notez ici que $A_X = E_0 \cos \alpha$ et $A_Y = E_0 \sin \alpha$: si on éclaire les lignes neutres $A_X = 0$ ou $A_Y = 0$).

Les lames à retard utilisées sont en général "d'ordre élevé" : pour une lame quart d'onde par exemple, $e\Delta n = (p + 1/4)\lambda$, où p est un entier qui peut valoir plusieurs dizaines. Elles présentent en effet l'avantage d'être peu coûteuses. Toutefois, une variation faible de λ modifie alors notablement le caractère de la lame. Calculer en fonction de l'ordre p la variation $\delta\lambda$ qui transforme une lame quart d'onde pour λ en une demi-onde.

Pour remédier à ce problème, notamment si l'on cherche à disposer d'une lame quart d'onde avec une source de longueur d'onde variable, on utilise des lames d'ordre zéro, *i.e.* pour lesquelles $p = 0$. Elles sont donc d'épaisseur optique bien plus faibles que celles des lames d'ordre élevé¹. Elles sont aussi plus coûteuses !

Méthodes de mesure d'épaisseurs optiques On propose ici deux dispositifs permettant de réaliser une mesure de l'épaisseur optique :

1. **Méthode dite du spectre cannelé** : adapté à l'étude des lames suffisamment épaisses, *i.e.* telles que $e\Delta n \gg \frac{1}{\lambda_b^{-1} - \lambda_r^{-1}} \sim 10^{-6} \text{ m}$, où λ_b et λ_r sont les limites du visible.

1. Se contenter de réduire l'épaisseur e de la lame à n'est généralement pas une bonne solution, l'ordre zéro correspondant à $e \sim \lambda$. On utilise plutôt l'association de deux lames d'épaisseurs différentes, en alignant l'axe lent de l'une sur l'axe rapide de l'autre. Sinon, les lames à retard sur une grande gamme de longueur d'ondes sont souvent obtenues par

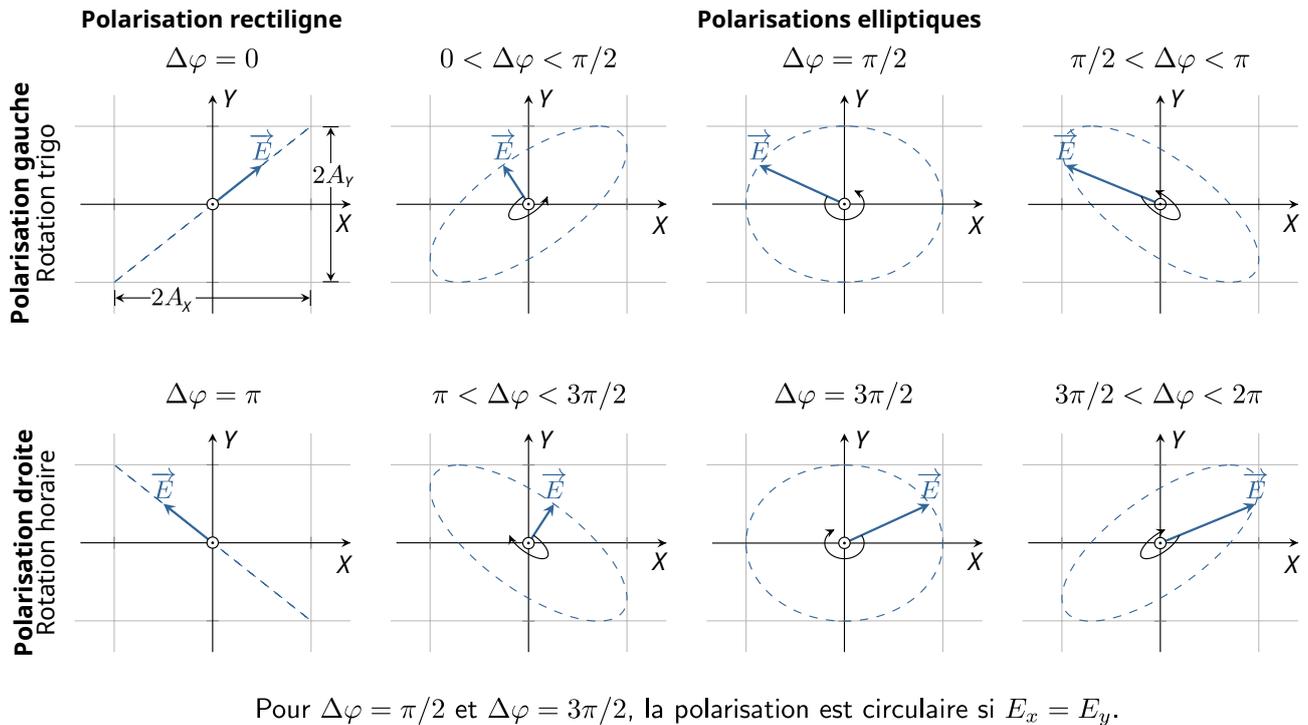


FIGURE 2 – États de polarisation des OEM pour différents déphasages $\Delta\varphi$ entre les axes X et Y . Figure adaptée de Femto Physique.

2. **le compensateur de Babinet** : adapté à l'étude des lames suffisamment minces, *i.e.* de faible épaisseur optique : $e\Delta n$ doit être plus petit que l'épaisseur optique maximum du compensateur de Babinet, soit $e_B\Delta n_B$, où e_B est l'épaisseur du compensateur et Δn_B la biréfringence du matériau utilisé.

Remarques :

- Aucun de ces deux dispositifs ne permet de distinguer l'axe rapide de l'axe lent de la lame. Pour ce faire, il faut pouvoir mesurer l'épaisseur optique ne d'une lame, non nécessairement biréfringente. Cela peut être effectué avec une méthode interférentielle, par exemple à l'aide d'un interféromètre de Michelson.
- En lumière monochromatique, la valeur de l'ordre p de la lame est indifférente. Pour mesurer l'épaisseur optique d'une lame, il faut donc nécessairement travailler en lumière polychromatique, comme c'est le cas pour les deux dispositifs décrits ci-dessous.
- Pour la bibliographie, la plupart des expériences qui suivent sont décrites dans le Sextant, Optique expérimentale.

Cas d'une lame épaisse -- spectre cannelé On étudie, par exemple, une lame de quartz taillée parallèlement à l'axe optique.

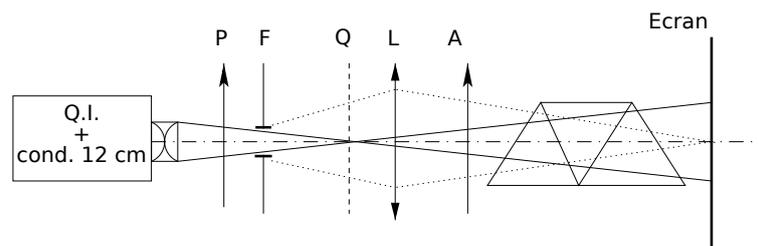


FIGURE 3 –

Visualisation du spectre cannelé :

- Réaliser le spectre d'une lampe quartz-iode à l'aide d'une fente F et d'un prisme à vision directe (on fera l'image de la fente sur l'écran à l'aide d'une lentille, et on ajoutera ensuite le prisme à vision directe).
- Ajouter deux polariseurs croisés P et A, puis 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, qui est éventuellement nul quand les axes de la lame sont alignés avec les polariseurs, mais ne modifie ni le contraste ni la position des cannelures².
- Tourner l'analyseur de 90°. Expliquer que l'on observe le spectre complémentaire. On le mettra en évidence par la suite dans le cas d'une lame mince.

Avvertissements :

- Ni la lentille ni le prisme ni la lame Q ne doivent diaphragmer le faisceau.
- Le prisme à vision directe permet une visualisation rapide du spectre, mais ne permet en aucun cas de faire des mesures précises avec des longueurs d'ondes, car on ne connaît pas la relation entre l'angle de dispersion et la longueur d'onde, qui n'est pas linéaire. Pour cela il faut utiliser soit des filtres interférentiels de longueur d'onde étalonnée, soit un spectromètre numérique.

Méthode avec des filtres interférentiels :

- Interposer successivement deux filtres étalonnés ayant une largeur à mi-hauteur d'environ 10 nm, pour repérer la position de deux cannelures. En déduire³ la valeur de $\Delta n = n_e - n_o$, que l'on comparera aux valeurs tabulées en fin de TP.

Méthode avec le spectromètre numérique :

- Remplacer le prisme à vision directe par une fibre reliée à un spectromètre USB. Faire l'acquisition du spectre, en veillant bien à avoir la fréquence en abscisse. En déduire la valeur de $\Delta n = n_e - n_o$, que l'on comparera aux valeurs tabulées en fin de TP.

Et avec une lame mince ? :

- Intercaler à présent une lame mince au lieu de la lame épaisse. Commenter la figure obtenue. Il est alors difficile d'utiliser la méthode du spectre cannelé, et on utilise plutôt un compensateur de Babinet.

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. Se convaincre notamment que le dispositif est analogue à un interféromètre de Michelson réglé en coin d'air. Où les franges d'interférence sont-elles par conséquent localisées ?

- Choisir une lame suffisamment mince pour le compensateur.
- 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 lumière blanche. En déduire la valeur de $\Delta n = n_e - n_o$, que l'on comparera aux valeurs tabulées en fin de TP.

2. Ce n'est plus le cas quand P et A ne sont pas croisés.

3. Lorsque ce type de calculs est effectué, il faut réfléchir à l'effet de la dispersion : Δn peut dépendre de la longueur d'onde. Cela est négligeable ici car n_o et n_e varient sensiblement de la même manière en fonction de la longueur d'onde (cf. remarque dans le paragraphe Données en fin de TP).

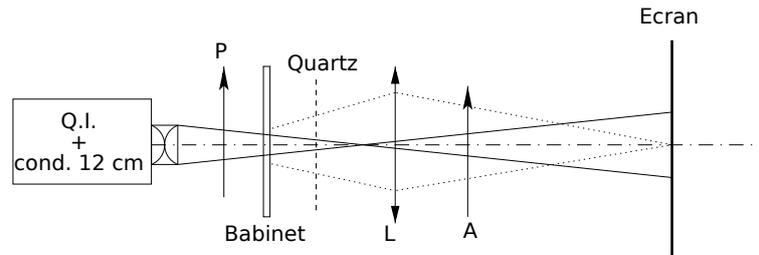


FIGURE 4 – *Babinet* : compensateur de Babinet ; *Quartz* : lame de quartz parallèle d'épaisseur 0,242 mm

Remarque :

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

Couleurs complémentaires On répète ici l'expérience du spectre cannelé avec une lame **mince** et sans prisme à vision directe (voir figure). On pourra faire l'image d'un trou plutôt que d'une fente.

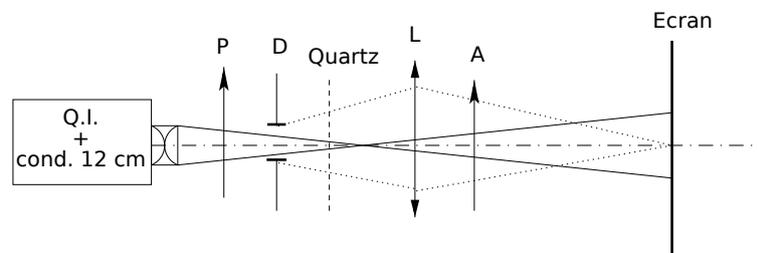


FIGURE 5 –

- En l'absence de Q, croiser P et A. Introduire Q, lame cristalline choisie en fonction des informations qui précèdent. En tournant Q, montrer que l'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 que cela ne produit pas d'extinction. Orienter dorénavant la lame Q de façon que ses axes neutres soient à 45° du polariseur.
- Remarquer également que l'image du trou est colorée⁴. Que se passe-t-il si l'on fait tourner A ? Comparer notamment les couleurs obtenues quand P et A sont croisés et quand P et A sont parallèles.

Pour rendre l'effet plus notable, on remplace l'analyseur par un prisme de spath⁵, qui va servir de double analyseur (on peut également utiliser le cristal épais du I.1.a). Les deux polarisations émergentes sont alors simultanément observables.

- En l'absence de lame, placer le prisme de spath 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.
- Expliquer ce que l'on observe si l'on remplace la lame mince Q par une lame épaisse.

[AP] Étude des lames cristallines en lumière convergente Ces expériences sont spectaculaires, mais facultatives et délicates à interpréter (voir BRUHAT pour les explications).

4. Les couleurs obtenues dépendent de l'épaisseur de la lame. Pour illustrer cet effet, on peut remplacer la lame par un empilement en dégradé de ruban adhésif transparent sur une plaque de verre.

5. 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.

Étude d'une lame de spath perpendiculaire 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.

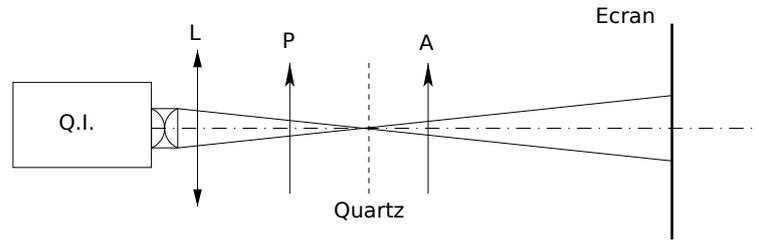


FIGURE 6 –

P, A, et Q doivent être très serrés et ne pas diaphragmer 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 l'on est entre polariseurs parallèles.

Effets conjoints de la biréfringence et de la polarisation rotatoire 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 : leur polarisation émerge en ayant tourné, ils ne sont donc plus arrêtés par l'analyseur. On observe les couleurs de polarisation rotatoire dans la région centrale, réparties de manière concentrique (même épaisseur optique pour une même incidence). En s'écartant du centre, le phénomène de biréfringence reprend de l'importance : les anneaux de biréfringence et la croix réapparaissent.

1.2 Autres matériaux

[1P] Barreau d'Altuglas Nous disposons d'un barreau en PMMA⁶ de la marque Altuglas offrant les propriétés suivantes :

- il est biréfringent, uniaxe, d'axe optique perpendiculaire à l'axe du barreau ;
- il est diffusant, ce qui permet de visualiser la trace d'un faisceau laser.

Pour comprendre la manipulation, il est essentiel de se souvenir que la lumière diffusée par un dipôle linéaire est nulle dans sa direction d'oscillation et d'intensité maximale orthogonalement, la polarisation étant alors alignée avec le dipôle (cf. TP Polarisation I et Sextant).

6. Poly(Méthacrylate de Méthyle, un polymère thermoplastique transparent plus connu sous le nom commercial de Plexiglas.

- Réaliser le montage suivant à l'aide d'un laser non polarisé :

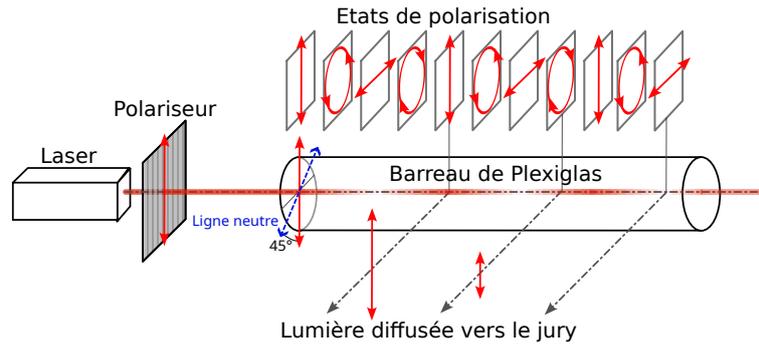


FIGURE 7 – Propagation d'une onde électromagnétique polarisée à travers un barreau biréfringent. L'onde, polarisée à 45° des axes neutres du barreau, est successivement dans les états de polarisation rectiligne \rightarrow elliptique* G \rightarrow circulaire G \rightarrow elliptique* D \rightarrow rectiligne \rightarrow elliptique* D \rightarrow circulaire D \rightarrow elliptique* D \rightarrow ... (* non représenté)

- 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 $\pi/4$.
- Observer l'allure de la lumière diffusée le long du barreau, selon si on regarde de face ou au-dessus.
- Analyser la polarisation de cette lumière avec un analyseur. 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* ?

Biréfringence induite par une action extérieure

[2P] 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.

[AP] 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

$$n_e - n_o \propto E^2. \quad (3)$$

L'effet est petit et nécessite des tensions élevées.

Applications : 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, quoique l'effet Kerr soit un effet "rapide", 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.

2 Polarisation rotatoire

Lien entre propriétés optiques et symétries du matériau

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.

2.1 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.* molécules chirales en chimie). On peut par exemple faire l'expérience avec une solution de sucre. Toutes les molécules chirales ont un pouvoir rotatoire. En chimie, les valeurs tabulées sont les pouvoirs rotatoires spécifiques, et on calcule l'angle de déviation *via* la loi de Biot $\alpha = [\alpha]lc$ où l est la longueur traversée et c la concentration.

On pourra regarder à cet effet les valeurs tabulées en fin de TP.

[1P] En lumière monochromatique



FIGURE 8 –

Mise en évidence

- 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 l'on utilise de la lumière polarisée circulairement, 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, $n \in \mathbf{N}$; les ambiguïtés éventuelles seront levées dans les expériences suivantes.

Influence de la longueur d'onde L'angle de rotation de la polarisation linéaire 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.

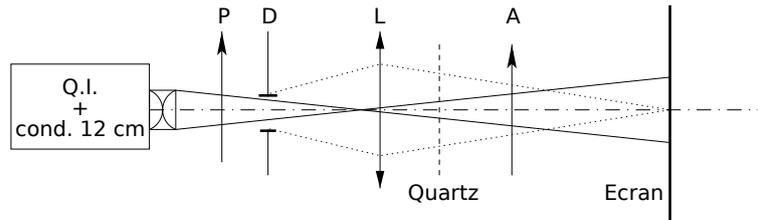


FIGURE 9 –

Tracer pour un quartz d'épaisseur 1 mm, par exemple, la courbe α en fonction de $1/\lambda^2$ pour différents filtres interférentiels.

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

[2P] 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.

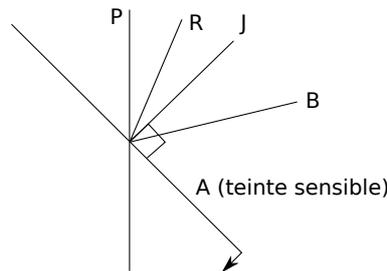


FIGURE 10 –

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.b), 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 Reprendre le montage du § I.1.b 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 l'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 ($\alpha \propto e/\lambda^2$).

2.2 [2P] 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, isolateur optique (voir notice de l'isolateur).

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 linéaire d'un faisceau lumineux traversant le dispositif tourne d'un angle α proportionnel au champ magnétique produit par la bobine, donc proportionnel à V .

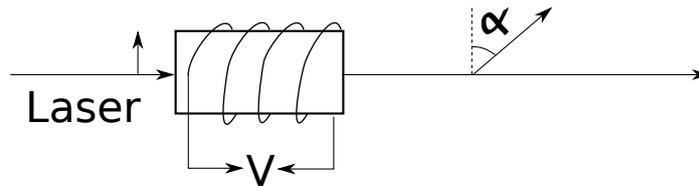


FIGURE 11 –

Utilisation :

La notice indique le branchement du modulateur et décrit une expérience possible. La consulter. Étant donné 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.

L'angle que fait la polarisation avec l'analyseur est, sous l'effet du champ de fréquence ω ,

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cos \omega t \equiv \alpha_0 + \alpha_1(t). \quad (4)$$

L'angle α_0 peut être modifié en changeant l'orientation de l'analyseur. L'intensité après l'analyseur est

$$I = I_0 \cos^2(\alpha_0 + \alpha_1(t)) = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(2\alpha_0 + 2\alpha_1(t))]. \quad (5)$$

La variation d'intensité avec $\alpha_1(t)$, et donc l'amplitude du signal enregistré, est alors la plus grande pour $\alpha_0 = \pi/4$, *i.e.* là où le cosinus s'annule : c'est en ce point que la pente de la sinusoïde est maximale, soit que $dI/d\alpha$ est maximal. On ne cherchera donc pas à annuler l'intensité à tension nulle ! (On réglera l'analyseur pour observer la moitié de l'intensité maximale.)

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

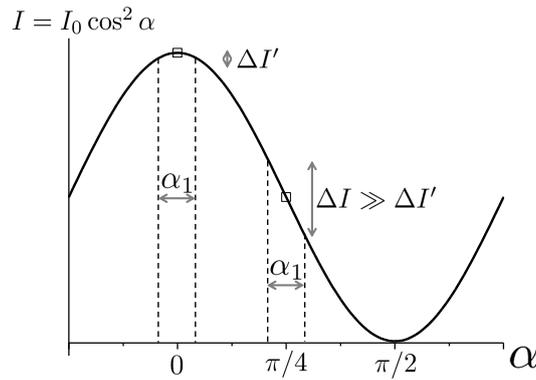


FIGURE 12 –

Remarque importante :

Lors d'un montage, l'expérience peut aussi être menée en utilisant un matériau avec une polarisation rotatoire induite (du flint) placé dans un électroaimant (*cf.* Sextant). On choisit des pièces tronc-coniques creuses pour pouvoir faire passer le faisceau laser dans l'électro-aimant, qui va traverser le milieu de pouvoir rotatoire variable, et on croise entre deux polariseurs. Les deux polariseurs sont croisés en champ nul et on a extinction. Lorsque l'on applique un champ magnétique, il faut tourner l'analyseur pour retrouver l'extinction. Cet angle permet de remonter au pouvoir rotatoire induit du matériau, et donc à sa constante de Verdet ($\beta = \mathcal{V} e B$). On peut aussi étudier la variation de la constante de Verdet avec la longueur d'onde en changeant de laser.

2.3 [AP] 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 $\alpha_{\text{jaune}} = \pm 180^\circ$.

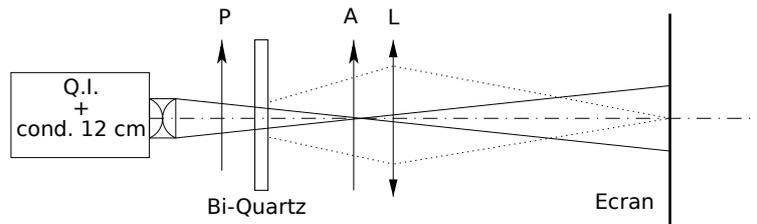
Montage :

FIGURE 13 –

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 bi-quartz.)

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 Données

Matériaux uniaxe positifs		Maille	n_o	n_e	Δn
	Quartz (SiO_2)	Trigonale	1,544	1,553	+0,009
	Glace (H_2O)	Hexagonale	1,309	1,313	+0,014
	Zircon (ZrSiO_4)	Tétraogonale	1,960	2,015	+0,055
Matériaux uniaxe négatifs		Maille	n_o	n_e	Δn
	Calcite (ou spath, CaCO_3)	Trigonale	1,658	1,486	-0,172
	Béryl (émeraude)	Hexagonale	1,602	1,557	-0,045
	PMMA (Plexiglas, Altuglas)	Polymère linéaire		$\simeq 1,5$	$-2 \cdot 10^{-5}$
Matériaux biaxe		Maille	n_1	n_2	n_3
	Mica	Monoclinique	1,595	1,640	1,640
	Gypse	Monoclinique	1,520	1,523	1,529
	Olivine	Orthorombique	1,640	1,660	1,680
	Ulexite	Triclinique	1,490	1,510	1,520
Cristaux chiraux		Maille	Pouvoir rotatoire (deg/mm)		
	Quartz (SiO_2)	Trigonale	$\pm 21,7$		
	Chlorate de sodium (ClO_3Na)	Cubique	$\pm 3,14$		
Solutions aqueuses chirales			Pouvoir rotatoire (deg/mm cm^3/g)		
	D-Glucose		+52.7		
	D-Saccharose		+66.4		
	D-Fructose		-92.0		
	Acide tartrique		± 12.0		

Les données sont pour $\lambda = 589 \text{ nm}$ (raie D du sodium) à 20°C

FIGURE 14 –

Remarque : Les indices dans chaque axe principal varient sensiblement de la même manière en fonction de la longueur d'onde, si bien que les Δn dépendent peu de λ : de l'ordre de 10% d'une extrémité à l'autre du spectre visible pour le quartz et le spath.