
MP13 : BIRÉFRINGENCE ET POUVOIR ROTATOIRE

Niveau

Commentaires du jury

- 2013 à 2016 : Le candidat doit être capable d'expliquer le principe physique des protocoles utilisés pour l'étude de la biréfringence d'une lame mince. Le jury attend des mesures quantitatives avec confrontation aux valeurs tabulées. Une connaissance minimale des milieux anisotropes est indispensable. Jusqu'en 2013, le titre était : Milieux optiquement actifs : biréfringence, pouvoir rotatoire.
- 2011, 2012 : Le jury a vu de bons montages sur ce sujet. Cependant, la signification de certains termes comme lame taillée parallèlement ou perpendiculairement à l'axe, ou encore lignes neutres, doit être connue.
- 2010 : Ce sujet a été moins souvent confondu avec le suivant (Production et analyse d'une lumière polarisée) cette année. Le candidat doit toutefois être capable d'expliquer le principe physique des protocoles utilisés pour l'étude de la biréfringence d'une lame mince.
- 2009 : Ce montage est souvent confondu avec le suivant (Production et analyse d'une lumière polarisée). Comme le titre l'indique, il s'agit d'étudier des propriétés de matériaux et non d'ondes lumineuses, même si ces dernières constituent l'outil principal permettant d'effectuer les mesures.
- 2008 : Les notions d'axe optique et de lignes neutres sont trop mal connues.
- 2002 : Il ne suffit pas de connaître tous les gestes à effectuer et le matériel à utiliser. Par exemple, en optique cristalline, de beaux spectres cannelés ont été observés alors que le candidat avait du mal à différencier, au moins qualitativement, milieux uniaxes et milieux biaxes, et à donner un sens à la phrase « tailler dans un quartz parallèlement à l'axe ».

Bibliographie

—

pré-requis

Expériences

- lame parallèle : mesure de Δn avec un spectre canelé
- Compensateur de babinet
- Effet Faraday

Table des matières

1	Caractérisation d'un milieu biréfringent	2
1.1	Biréfringence du quartz	2
1.2	Mesure de la biréfringence d'une lame mince	3
 2	 Pouvoir rotatoire	 5
2.1	Loi de Biot	5
2.2	Effet Faraday	5
2.3	Pouvoir rotatoire du quartz	6

Introduction

On peut utiliser le rhomboèdre de spath et montrer que l'on observe 2 images lorsqu'on l'éclaire (Houard p. 250, Sextant p. 278). Utiliser le prisme P123.1 de spath.

- Faire l'image d'un petit diaphragme avec une lampe QI + AC sur un écran assez loin (pour avoir des rayons pas trop inclinés).
- Placer le prisme de spath après la lentille. Ya plein de taches, mais on peut en repérer sur le côté qui sont polarisées.
- Placer un polariseur avant le diaphragme. On voit que les tâches sont dues à des lumières polarisées orthogonalement.

Les milieux qu'on considère sont toujours linéaires et homogènes, mais anisotropes. On va parler de **biréfringence** : l'indice de réfraction dépend de la direction, et de **pouvoir rotatoire** : capacité d'un milieu à modifier l'angle de polarisation d'un rayon incident. Le pouvoir rotatoire est l'analogue de la biréfringence mais pour les polarisations circulaires : une polarisation rectiligne perçoit 2 indices dans un milieu biréfringent, tandis qu'une polarisation circulaire perçoit 2 indices dans les milieux possédant un pouvoir rotatoire.

Des définitions utiles (d'après le jury) :

- anisotrope : les propriétés du milieu dépendent de la direction.
- axe optique : axe de symétrie de révolution du montage optique. Dans le cas des milieux biréfringents : c'est la direction dans laquelle l'indice est indépendant de la polarisation.
- lame taillée parallèlement, perpendiculairement : c'est par rapport à l'axe optique.
- ligne neutre : directions dans lesquelles la polarisation de l'onde incidente ne change pas lors de la traversée du milieu.
- milieu uniaxe : milieu avec un seul axe optique. 2 directions ont le même indice optique.
- milieu biaxe : Milieu avec 2 axes optiques. Les indices sont tous les 3 différents.

1 Caractérisation d'un milieu biréfringent

1.1 Biréfringence du quartz

On remonte à $e\Delta n$ puis Δn par méthode du spectre cannelé. C'est une lame épaisse donc on mesure e avec un pied à coulisse (mais il faut le faire sur le devant de la scène :) ba doum psssst).

Il faudra penser à faire des éclairages bien parallèles!!!

L'onde en sortie du polariseur s'écrit :

$$E = E_0 \vec{e}_P \exp\left(i\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right)$$

Il faut changer de base pour se mettre dans la base des axes neutre de la lame de quartz ($\vec{e}_o, \vec{e}_e$) pour savoir ce qu'il se passe pour l'onde :

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \vec{e}_e \exp\left(i\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right) + \frac{E_0}{\sqrt{2}} \vec{e}_o \exp\left(i\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)\right)$$

les ondes polarisé selon les différents axes neutres ne ressentent pas le même indice optique. On a donc en sortie de lame :

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \vec{e}_o \exp\left(i\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \frac{2\pi}{\lambda}n_o e\right)\right) + \frac{E_0}{\sqrt{2}} \vec{e}_e \exp\left(i\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \frac{2\pi}{\lambda}n_e e\right)\right)$$

On peut réécrire cette polarisation comme :

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp\left(i\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \frac{2\pi}{\lambda}n_o e\right)\right) \left(\vec{e}_o + \vec{e}_e \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}e\Delta n\right)\right)$$

Il y a un déphasage entre les deux ondes mais elle ont pour l'instant des polarisations orthogonales. Il faut l'analyser pour tout projeter sur la même polarisation. Finalement on a une différence de marche de $e\Delta n$, donc avec la formule de Frenet, on a :

$$I = 2I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}e\Delta n\right)\right)$$

On va avoir des interférences destructives si :

$$\frac{2\pi}{\lambda} e \Delta n = (2p + 1)\pi$$

. En comparant deux ordre on trouve

$$e \Delta n = (p_2 - p_1) \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

Mesure de Δn (Duffait 152, Sextant 290) :

- Utiliser une lumière blanche (QI), polariseur et analyseurs sont croisés. Ne pas coller les polariseurs : il faut de la place car ils fonctionnent mieux avec un éclairage parallèle.
- Placer la lame avec ses axes neutres à 45° du polariseur d'entrée. En faisant tourner la lame, on observe des min et des max d'intensité. Se placer vers un max d'intensité : les axes neutres sont bien à 45° . Utiliser une lame d'au moins 1 mm d'épaisseur pour voir suffisamment de cannelures.
- On remplace le prisme à vision directe par un spectromètre. On peut vérifier qu'on est à un max d'intensité plus facilement avec le spectro.
- On repère deux longueurs d'ondes λ_1 et λ_2 et on compte le nombre de cannelure ($p_1 - p_2$) entre ses longueurs d'ondes. On a alors :

$$e \Delta n = (p_2 - p_1) \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

. Le moyennage permet de rendre le spectre plus joli.

- Il est à noter que trouver $e \Delta n$ c'est à priori ce qui nous intéresse le plus, puisque c'est ce qui décrit comment ma lame se comporte avec la lumière. Cependant, avec des valeurs constructeur ou un pied à coulisse on peut remonter à e et donc déterminer Δn (on attend Δn de l'ordre de 10^{-2}).

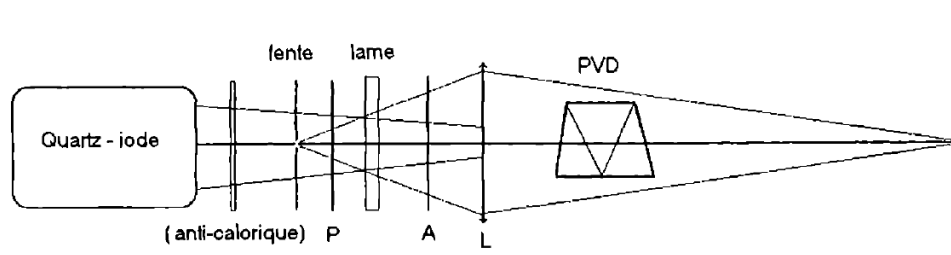


fig. 14

FIGURE 1 – Spectre cannelé (Duffait Page 152)

1.2 Mesure de la biréfringence d'une lame mince

Avec le compensateur de Babinet-Soleil (Jolidon I p. 254)

On fait dans l'autre sens : on suppose Δn connu pour mesurer e . Il faut étalonner le compensateur pour que ça marche, avec un filtre interférentiel.

Un compensateur de Babinet est constitué de 2 prismes triangulaires biréfringents aux axes optiques orthogonaux.

Il induit le déphasage entre 2 polarisations orthogonales entre elles et parallèles aux axes optiques de chaque prisme :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e)(d_2 - d_1)$$

L'idée est de compenser le déphasage induit par une lame placée avant ou après le compensateur.

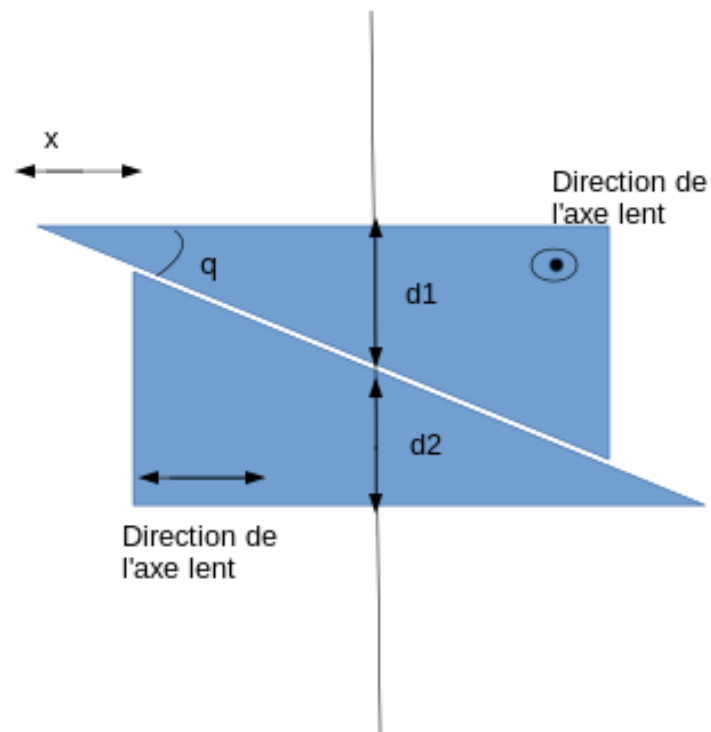


FIGURE 2 – Schéma du compensateur de Babinet-Soleil (wikipedia)

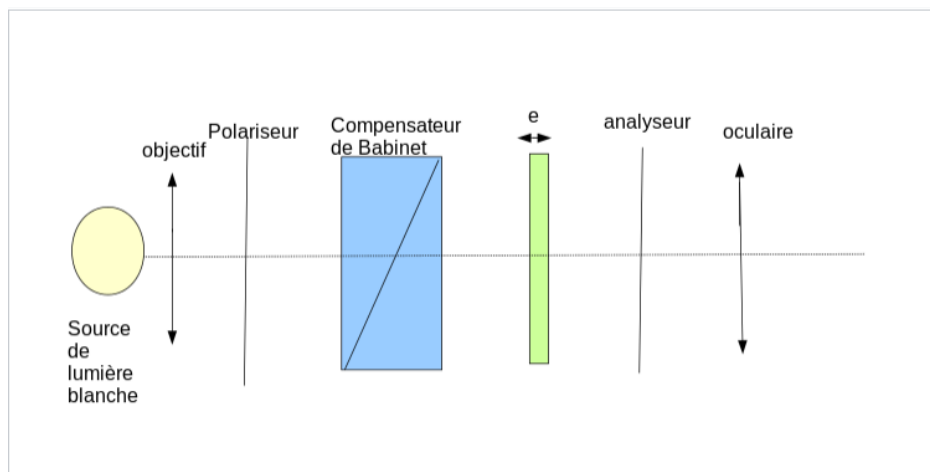


FIGURE 3 – 1,2,3... Soleil (wikipedia)

Compensateur de Babinet Soleil Fruchard page 253.

- On place le compensateur de Babiner à 45° des polariseur et analyseur croisé. On observe des franges irisées et on centre, une frange noire (on relève sa position au vernier).
- Étalonnage : on place un filtre interférentiel de longueur d'onde λ . On relève la différence sur le vernier (X_0) pour se déplacer d'une raie noire. (Prendre plusieurs extinction pour être plus précis). Pour obtenir la différence de marche induite par une lame, on utilise la relation

$$\delta(X) = \frac{\lambda_0}{X_0} X$$

Avec X le déplacement sur le vernier qu'il faut effectuer pour placer une frange noire (entre des franges irisées) au centre des réticules.

- mesure

Transition :

Nous avons vu que certains matériaux (birefringents) ont un indice optique qui dépend de la polarisation rectiligne de l'onde. Il existe la même chose pour les polarisation circulaire. Cela se traduit par un pouvoir rotatoire : une onde polarisée rectilignement qui passe par un milieu ayant un pouvoir rotatoire non nul ressortira polarisée rectilignement mais avec un angle différent. Ceci s'explique par le fait que l'on peut décomposer une polarisation rectiligne en deux polarisations circulaire gauche et droite.

2 Pouvoir rotatoire

2.1 Loi de Biot

La loi de Biot relie l'angle α de rotation du plan de polarisation de la lumière et sa concentration.

$$\alpha = [\alpha_0]_{\lambda,T} l c$$

$[\alpha_0]_{\lambda,T}$ est appelé pouvoir rotatoire spécifique (d'une espèce, dépend de la température, du solvant et de la longueur d'onde) et s'exprime souvent en $\text{deg dm}^{-1} \text{L mol}^{-1}$ ou en $\text{deg dm}^{-1} \text{mL g}^{-1}$.

Solution de saccharose : diluer 100 g de sucre alimentaire dans 100 mL d'eau, dans un erlenmeyer. Pour aider à dissoudre, chauffer + agiter.

On va prendre des mesures à 1000, 750, 500, 250 et 200 g L^{-1} , parce que c'est facile à faire comme dilution. On fait le mélange à l'éprouvette, en mesurant la qté d'eau + la qté d'eau sucrée séparément, puis en les mélangeant dans un bécher (il est difficile de mélanger dans une éprouvette). Il faut penser à rincer toute la verrerie à chaque fois.

Mesure du pouvoir rotatoire de la solution : Laser + polariseur + cuve + analyseur gradué + écran. Il faut faire le zéro avec la cuve vide. On remplit la cuve, on mesure l'angle. Bien rincer la cuve à chaque fois.

+ bonus : déterminer une concentration inconnue...

Interprétation : Pouvoir rotatoire spécifique du saccharose : $20^\circ \cdot \text{L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{dm}^{-1}$. Pour le saccharose hydrolysé : $20^\circ \cdot \text{L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{dm}^{-1}$; on obtient une valeur intermédiaire : c'est lié au fait que l'hydrolyse du saccharose est lente.

Attention ! Le pouvoir rotatoire spécifique est mesuré pour la longueur d'onde du doublet jaune du sodium (589.0 et 589.6 nm). Soit on prend une lumière blanche avec un filtre interférentiel, soit une lampe à vapeur de sodium, soit un laser (vert de préférence) mais on sait qu'on n'est pas à la bonne longueur d'onde. L'écart à la valeur n'est pas très grave...

2.2 Effet Faraday

Sextant p. 320

C'est la rotation du plan de polarisation lors de l'application d'un champ magnétique. À cause du champ appliqué, les polarisations circulaires ne se propagent pas à la même vitesse. La lumière est un champ électrique qui fait bouger localement les particules constituant le milieu : une onde polarisée circulairement met en mouvement de rotation ces particules. La rotation de particules chargées induit un champ magnétique : la rotation peut donc être favorisée ou facilitée selon son sens par le champ déjà existant.

Si β est l'angle de rotation de la polarisation après la traversée d'un milieu de longueur d soumis à un champ uniforme $\mathbf{B}$ parallèle à l'axe de propagation, la constante de Verdet $\mathcal{V}$ est définie comme :

$$\beta = \mathcal{V}dB$$

On peut en quantifier la dépendance en longueur d'onde ($\propto \lambda^2$ d'après wikipedia?).

Mesure de la constante de Verdet

On croise polariseur et analyseur de part et d'autre des bobines percées. On applique un champ B (Attention au cycle d'hystérésis, toujours faire dans le même sens, mais on s'en fiche si on mesure B par effet hall). On mesure par effet hall le champ et l'angle duquel il faut tourner l'analyseur pour retrouver l'extinction. En inversant B , on inverse l'angle, aussi il est plus précis de mesurer 2α en éteignant pour B et en mesurant 2 pour $-B$.

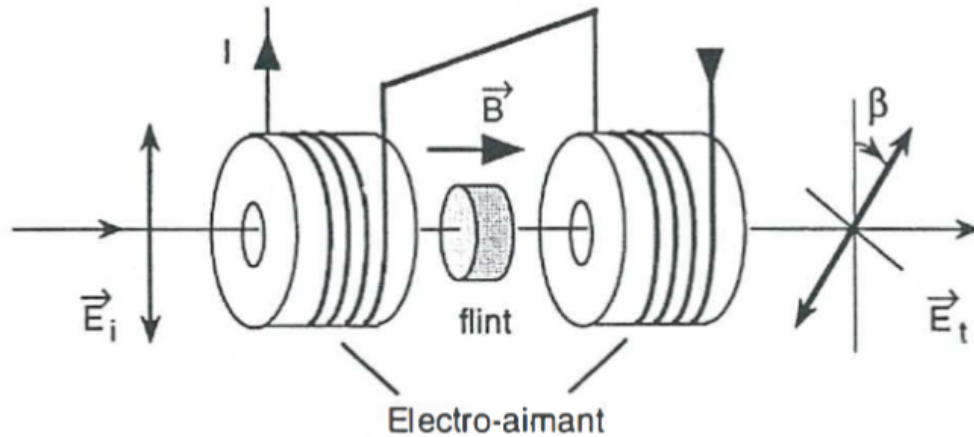


FIGURE 4 – Faraday (Sextant Page 320)

Sert à faire des polarimètres ou des mesures de champs magnétiques...

2.3 Pouvoir rotatoire du quartz

Je vois pas trop ce que c'est... Sextant P.318 Si on fait l'effet Faraday ça peut passer à la trappe.

Conclusion

On a vu 2 aspects de la biréfringence linéaire. Les phénomènes sont analogues mais selon l'état de polarisation, leurs interprétations sont différentes.

Ces propriétés de biréfringence peuvent servir à fabriquer des lames quart d'onde ou demi-onde, très utiles pour déterminer la polarisation d'une source lumineuse.

Par ailleurs, les effets liés à ces effets de biréfringences permettent la mesure d'épaisseurs, des contraintes, des champs électriques (effet Kerr), la visualisation des domaines de Weiss dans les matériaux ferromagnétiques...