

M13 : Biréfringence et pouvoir rotatoire

Louis Heitz et Vincent Brémaud

Jeudi 11 février 2021



Sommaire

Rapport du jury	3
Bibliographie	3
Introduction	4
I Biréfringence linéaire	4
I.1 Spectroscopie : spectre cannelé	4
I.2 Interférences : Compensateur de babinet	5
II Biréfringence circulaire	6
II.1 Spectre cannelé quartz taillé orthogonalement à l'axe optique	6
II.2 Effet Faraday	6
Conclusion	7
A Correction	7
B Commentaires	8
C Expériences faites les années précédentes	8
D Tableau présenté	8

Le code couleur utilisé dans ce document est le suivant :

- → Pour des éléments de correction / des questions posées par le correcteur
- Pour les renvois vers la bibliographie
- Pour des remarques diverses des auteurs
- ⚠ Pour des points particulièrement délicats, des erreurs à ne pas commettre
- Pour des liens cliquables

Rapports du jury

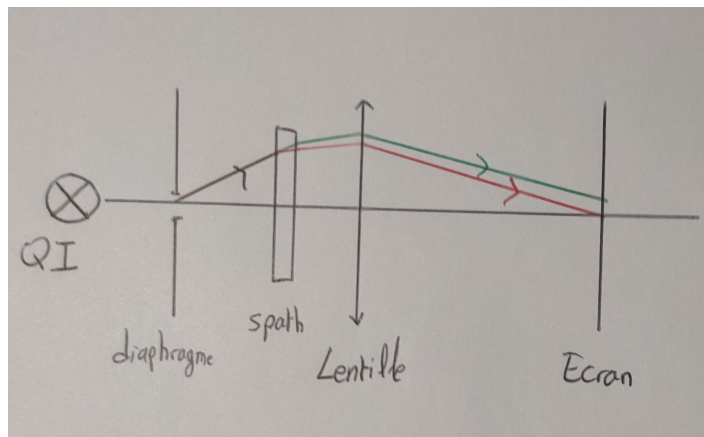
- **2017** : Le candidat doit être capable d'expliquer le principe physique des protocoles utilisés lors de l'étude de la biréfringence d'une lame mince. Le jury attend des mesures quantitatives avec confrontation aux valeurs tabulées.

Bibliographie

- [1] *Champeau, Ondes lumineuses*. Très utile pour les fondements théoriques. Chapitre 15 pour la théorie de l'optique anisotrope, chapitre 18 pour le pouvoir rotatoire : "explication" effet Faraday et interprétation constante de Verdet.
- [2] *ALD et al., Physique expérimentale* Pour le spectre cannelé et le compensateur de Babinet
- [3] *Houard, Optique* Pour les schémas et les illustrations.
- [4] Notice du barreau de flint, on y trouve la constante de Verdet
- [5] Animation **P A R F A I T E** pour expliquer la biréfringence.
- [6] Les énoncés de TP pour avoir les valeurs tabulées

Introduction

On commence avec deux expériences qualitatives : on met en évidence la biréfringence linéaire à l'aide d'un cristal de spath et la biréfringence circulaire (pouvoir rotatoire) à l'aide d'une solution de glucose.



Ici on pourrait mettre plus explicitement en avant la différence linéaire/rotatoire : avec une polarisation rectiligne monochromatique, une biréfringence linéaire va l'éteindre à certains endroits (en sortie on a en général une elliptique). Alors que pour la biréfringence circulaire on a toujours une polarisation linéaire en sortie

Au cours ce montage, on va utiliser d'autres dispositifs permettant d'être plus quantitatifs par rapport à ces phénomènes.

I Biréfringence linéaire

A l'aide d'une lame (taillée parallèlement à l'axe optique), entre un analyseur et un polariseur croisés on peut réaliser des interférences : chaque polarisation voit un indice différent, puis on les recombine grâce à l'analyseur.

I.1 Spectroscopie : spectre cannelé

Voir dans [2]

Annoncer directement qu'on veut obtenir un ordre de grandeur de la biréfringence, qu'elle dépend de λ , on affinera ensuite On montre que le déphasage entre les deux polarisations est

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n e$$

où $\Delta n = n_e - n_o$ est la biréfringence du matériaux considéré et e l'épaisseur de la lame.

En l'éclairant en lumière blanche, on observe alors des cannelures : certains longueurs d'ondes sont éteintes (celles pour lesquelles $\Delta\phi = p\pi$). En comptant le nombre de cannelure on peut remonter à la biréfringence de la lame, en effet :

$$N - 1 = \Delta n e \left(\frac{1}{\lambda_{min}} - \frac{1}{\lambda_{max}} \right)$$

où N est le nombre de cannelure dans le spectre (en comptant celles à λ_{min} et λ_{min}) et $\lambda_{min,max}$ indique la longueur minimale (maximale) où il y a une cannelure dans le spectre.

Pour un cristal de spath, avec $e = 2.1\text{mm}$, on obtient :

$$\Delta n \simeq 9 \times 10^{-3}$$

Transition : Cette méthode n'est pas très précise, on va utiliser un instrument qui permet d'obtenir une meilleure estimation

Ici on fait l'hypothèse que Δn est constant dans le visible, ce qui n'est pas évident a priori, mais incertitude sur la valeur de la lame est beaucoup plus grande que celle sur la valeur de Δn : on peut la négliger ici. On mesure donc une biréfringence moyenne

I.2 Interférences : Compensateur de babinet

Pour fonctionnement et construction, voir [2]

On cherche à déterminer la biréfringence d'un cristal de quartz dont l'axe optique est parallèle à la face d'entrée. On éclaire en incidence normale la face d'entrée, ainsi les deux indices perçus par l'onde sont n_o et n_e et on cherche à mesure $\Delta n = n_e - n_o$.

Pour se faire, on utilise une lumière blanche et un filtre anticalorique (pour ne pas endommager les optiques). On place ensuite un diaphragme au foyer objet d'une lentille convergente, de sorte à obtenir un faisceau parallèle en sortie.

On place un polariseur et un analyseur, croisés.

On place entre les deux le compensateur de Babinet. On fait tourner le polariseur et l'analyseur simultanément (ils restent donc croisés) de sorte à obtenir une extinction. On sait alors que les lignes neutres du compensateur sont confondues avec les axes du polariseur et de l'analyseur. On tourne ensuite le polariseur et l'analyseur simultanément de 45° . (Cela sert à maximiser le contraste)

Le compensateur de Lyon est plus pratique : on peut faire tourner le compensateur directement, et non pas polariseur/analyseur

On fait ensuite l'image du réticule par une lentille convergente : c'est ici que les interférences sont localisées (puisque le rayon extraordinaire et le rayon ordinaire partent dans des directions différentes, c'est une situation analogue à un Michelson en coin d'air).

On règle le compensateur de sorte à avoir une raie sombre au centre des irisations (à l'aide du réticule) et note la valeur obtenue, notons la X_0 .

On place ensuite la lame à étudier, avec ses axes parallèles à ceux du compensateur.

Pour étalonner le compensateur, on place en amont un filtre interférentiel (longueur d'onde λ_0 de la raie D du sodium, pour lesquelles les données sont tabulées) pour obtenir une lumière monochromatique

et on mesure de quelle distance on doit déplacer la vis micrométrique pour ajouter λ_0 à la différence de marche (faire défiler une frange). On note ce déplacement X_0 . (En pratique on prend plusieurs franges pour minimiser l'incertitude relative). La valeur de la vis micrométrique est notée X_{ref} .

On se replace en lumière blanche, et on relève la position de la vis micrométrique lorsque la raie noire est au centre de la figure d'interférences, notons cette position X_1 .

On en déduit alors Δn selon :

$$\Delta n = \frac{\lambda_0 (X_1 - X_0)}{e X_{ref}}$$

Transition : Que se passe-t-il maintenant si on tourne le Quartz de 90° de sorte que son axe optique soit orthogonal à la face d'entrée?... A priori du point de vue de la biréfringence linéaire, rien ne se passe puisque les rayons voient un milieu isotrope. Mais pourtant on observe toujours un spectre cannelé mais si on continue de tourner le polariseur et l'analyseur, il y a toujours de la lumière... Il s'agit en fait du phénomène de pouvoir rotatoire que l'on va analyser ici

II Biréfringence circulaire

II.1 Spectre cannelé quartz taillé orthogonalement à l'axe optique

On reprend le même montage que dans la première expérience, on remplace simplement le quartz parallèle par un canon de quartz taillé perpendiculairement. Le quart va dévier le plan de polarisation de la lumière incidente d'un angle ψ dont on montre que

$$\psi = \frac{Ae}{\lambda^2}$$

où A est le pouvoir rotatoire du quartz, et e l'épaisseur de la lame.

Pour chaque angle α dont on a tourné l'analyseur on relève les longueurs d'ondes qui sont éteintes. On sait alors que $\alpha = \frac{Ae}{\lambda^2} = k\pi$. En tournant jusqu'à 180° on peut suivre petit à petit chaque ordre k . On trace ensuite $1/\lambda^2 = f(\alpha)$ donc la pente donne accès à A et l'ordonnée à l'origine à l'ordre.

On en déduit alors

$$A = 1.4 \pm 0.1 \text{ rad m}$$

En accord avec la valeur tabulée.

Transition : Ici il s'agit d'une biréfringence circulaire naturelle, mais on peut également l'engendrer avec un champ magnétique comme on va le voir.

II.2 Effet Faraday

On étudie un morceau de flint, de longueur ℓ auquel on applique un champ magnétique \vec{B} parallèle à la direction de propagation de la lumière. On montre alors que cela implique une rotation du plan de polarisation d'un angle θ tel que :

$$\theta = \mathcal{V} \ell B$$

où \mathcal{V} est la constante de Verdet, qui dépend de la longueur d'onde considérée. Cet angle ne dépend que de la norme du champ magnétique et non pas de sa direction ce qui est lié au caractère pseudo-vectoriel du champ magnétique *à creuser*.

On utilise en pratique un électroaimant alimenté par un autotransformateur pouvant délivrer jusqu'à 2 Ampère. On utilise un laser à diode de longueur d'onde dans le vert. On place le barreau de flint dans l'électroaimant et on place un analyseur et un polariseur croisés en entrée/sortie du dispositif. On fait varier le champ magnétique et on relève l'angle pour lequel il y a à nouveau extinction en sortie, ce qui donne directement θ

On en déduit, pour un laser à 435nm

$$\mathcal{V} = 46 \pm 1 \text{ T rad}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

En accord avec la valeur tabulée.

Conclusion

A Correction

→ Dans l'expérience introductive, pourquoi observe-t-on deux tâches ? C'est parce qu'il y a deux indices de réfractions perçus, on est en incidence non normale, donc il y a réfraction, donc finalement deux tâches formées : une pour chaque indice perçu.

→ Pour la constante de Verdet, y-a-t-il une dépendance en longueur d'onde ? Oui, cf la notice du matériel.

→ Pourquoi y-a-t-il une extinction quand les axes des polariseurs sont parallèles aux axes propres de la lame ? Quand les axes sont parallèles, il n'y a qu'un indice perçu par l'onde et donc tout se passe comme si on avait un milieu isotrope.

→ Que voit-on avec le compensateur de Babinet ? On observe les interférences entre les deux faisceaux réfractés, localisées au voisinage du compensateur.

→ Pourquoi le compensateur de Babinet permet une mesure plus précise de la biréfringence ? Permet de se placer à une longueur d'onde donnée grâce à l'étalonnage

→ Différence axe principal / axes propres / axes optiques ? Axe optique : direction de propagation selon laquelle l'indice optique ne dépend pas de la polarisation. Axes principaux : base dans laquelle le tenseur diélectrique est diagonal, ils sont orthogonaux entre eux. Axes propres = axes principaux.

→ La biréfringence dépend de la longueur d'onde ? Oui, qualitativement, si chaque indice dépend de λ selon une loi de Cauchy, la différence suivra une loi analogue.

→ Applications de la biréfringence ? Ecran à cristaux liquides (peut faire l'objet d'une intro)

⚠ **Pour Babinet** : Contrairement aux schémas souvent faits (dont celui d'ALD), les deux prismes bougent ensemble, ils ne glissent pas l'un sur l'autre. Ca suffit à introduire une différence de marche et c'est plus facile à réaliser en pratique.

B Commentaires

Montage clairement trop long et à reprendre en partie. Le compensateur de Babinet semble être un incontournable. Comme mentionné, on peut introduire le montage avec la biréfringence linéaire/circulaire et montrer la différence entre les deux biréfringences : polarisation linéaire en sortie pour la biréfringence circulaire ; elliptique dans le cas général pour la biréfringence linéaire.

La correctrice a proposé le plan suivant :

1. Spectre cannelé d'une lame peu biréfringente (i.e. de faible épaisseur), à exploiter plus en profondeur que pour trouver une biréfringence moyenne en tournant l'axe de la lame et en regardant les longueurs d'ondes éteintes.
2. Compensateur de Babinet
3. Pouvoir rotatoire : Spectre cannelé OU Effet Faraday OU mesure à 2 longueurs d'ondes différentes

C Expériences faites les années précédentes

- Biréfringence d'un cristal de spath
- Compensateur de Babinet
- Effet Pockels
- Pouvoir rotatoire du saccharose
- teintes de Newton
- Spectre cannelé
- Effet Faraday
- Barreau de plexigal anisotrope
- interférences en lumière convergente (croix de Malte)

D Tableau présenté