

MP13 – BIRÉFRINGENCE ET POUVOIR ROTATOIRE

10 décembre 2015

Johan Pinaud & Dimitri Misiak

*"Vous vous prenez pour un enseignant?... Non j' s'entais
que c'était le moment d'faire une vanne mais y'a rien qui
est sorti."
PERCEVAL*

Commentaires du jury

2013, 2014 : 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.

1982 : 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

↗ *Exp. d'opt. à l'agrég. de ϕ* , **Duffait**

↗ *Optique expérimentale*, **Sextant**

→ Toutes les manipulations + tables des teintes de Newton

→ OdG et manipulations

A maîtriser

- Optique géométrique
- Interférences
- Polarisation et milieux biréfringents

Expériences

- ☛ Prisme de spath
- ☛ Épaisseur d'une lame avec spectre cannelé
- ☛ Biréfringence d'une lame avec Babinet
- ☛ Étude de l'effet Faraday
- ☛ Dépendance du pouvoir rotatoire à la longueur d'onde

Table des matières

1	Mise en évidence du phénomène de biréfringence	2
2	Mesures en biréfringence linéaire	2
2.1	Mesure de biréfringence du quartz par exploitation d'un spectre cannelé	2
2.2	Mesure d'épaisseur d'une lame de quartz avec compensateur de Babinet	3
3	Mesure avec pouvoir rotatoire	4
3.1	Étude de l'effet Faraday	4
3.2	Caractérisation de la dépendance en la longueur d'onde du pouvoir rotatoire	5

1 Mise en évidence du phénomène de biréfringence

Biréfringence d'un prisme de quartz

Matériel : *QI, filtre anticalorique (AC), fente, polariseur, lentille, prisme de spath, écran.*

- Présenter les deux images de la fente sur l'écran après traversée du prisme.
- Polariser la lumière pour mettre en évidence la polarisation des deux images.
- A l'aide de l'axe optique (parallèle aux arêtes du prisme), on peut trouver l'image ordinaire et l'image extraordinaire par leurs polarisations.
- Conclure et vérifier que le spath est un milieu (uniaxe) négatif : $\Delta n = -0.172 < 0$ (cf. Sextant)

Choix des manipulations

Il s'agit de l'un des rares montages où une expérience (un peu) qualitative captera l'attention du jury. Dans ce montage, on a le choix entre le prisme de spath et le rhomboèdre de quart.

Les images de la fente sont irisées à cause de la dispersion dans le prisme : les indices optiques (ordinaire et extraordinaire) dépendent de la longueur d'onde utilisée.

2 Mesures en biréfringence linéaire

Choix des manipulations

→ La biréfringence linéaire offre la possibilité de mesurer l'épaisseur optique de lames biréfringentes taillées parallèlement à l'axe optique. C'est-à-dire qu'avec une lame d'épaisseur e et de biréfringence $\Delta n = n_e - n_o$, on mesure $e\Delta n$, l'épaisseur optique. Ainsi, la mesure d'une des deux caractéristiques de la lame passe nécessairement par la connaissance de l'autre caractéristique.

→ Le montage requiert des manipulations quantitatives. Ainsi, il est difficilement possible d'y insérer les expériences de biréfringence linéaire spectaculaires telles que l'étude en lumière convergente ou la traversée d'un barreau de plexiglas par un laser.

2.1 Mesure de biréfringence du quartz par exploitation d'un spectre cannelé

Spectre cannelé de biréfringence

🔗 Duffait & Sextant

⊖ 10 min

L'objectif de cette manipulation est de mesurer la biréfringence d'une lame de quartz d'épaisseur connue avec un spectre cannelé de biréfringence.

Matériel : *QI, filtre AC, filtre interférentiels, fente, lentille, polariseur, lame biréfringente taillée parallèle, analyseur, PVD, écran, dispositif caliens*

- Avec l'écran, sans le PVD et avec une fente large, mettre les 2 polariseurs croisés à 45° des lignes neutres de la lame (à expliquer).
- En affinant la fente, on ajoute le PVD. On observe un spectre cannelé. Discussion sur les teintes de Newton, le blanc d'ordre supérieur et le lien avec les interférences de polarisation.
- Remplacer l'écran par le capteur CCD Caliens et repérer les positions de longueurs d'ondes de références (à l'aide de filtres interférentiels bien choisis).
- Enlever les filtres et obtenir le spectre cannelé en lumière blanche. On compte le nombre d'interfranges Δp entre les deux positions relevées précédemment. Ce nombre n'est pas forcément un entier !

Passage de l'écran à Caliens

Il est impératif de régler le dispositif Caliens avant la présentation. Il ne faut pas galérer longtemps devant le jury ! Utiliser un miroir, pour envoyer le spectre cannelé sur l'écran, qu'on enlève ensuite pour envoyer le spectre sur Caliens est judicieux.

→ Une lame biréfringente taillée en parallèle signifie que l'axe optique est parallèle aux surfaces de la lame. Ainsi, en incidence normale et en éclairage parallèle, une onde polarisée rectiligne perpendiculaire (resp. parallèle) à l'axe optique utilise l'indice ordinaire (resp. extraordinaire).

→ Les lignes neutres dépendent de l'éclairement de la lame : une première ligne neutre est perpendiculaire à l'axe optique du milieu et au vecteur d'onde (elle est liée à l'indice ordinaire), la seconde ligne neutre correspond à la projection de l'axe optique sur le plan perpendiculaire au vecteur d'onde (elle est liée à l'indice extraordinaire). Dans le cas général, on travaille en incidence normale, avec des rayons parallèles, sur une lame taillée parallèle, ce qui permet d'assimiler l'axe optique à cette seconde ligne neutre.

→ La configuration des polariseurs à 45° des lignes neutres permet d'obtenir des interférences bien contrastées. En effet, la polarisation en entrée de la lame est décomposée de manière égale sur les deux lignes neutres. Il y a donc interférences entre deux polarisations de "même amplitude" au niveau de l'analyseur.

Exploitation de la manipulation :

$$\Delta n = \frac{\Delta p}{e} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad \text{avec } \Delta p \text{ le nombre d'interfranges.}$$

Ici : $e = 4.0 \pm 0.1 \text{ mm}$, $\Delta p = 9 \pm 0.1$, $\lambda_1 = 633 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 546 \text{ nm} \Rightarrow \Delta n_{exp} = (8.94 \pm 0.13) \times 10^{-3}$
Pour le quartz, on a $\Delta n_{th} = 9.1 \times 10^{-3}$.

2.2 Mesure d'épaisseur d'une lame de quartz avec compensateur de Babinet

Compensateur de Babinet

↗ Duffait & Sextant

⊖ 10 min

On s'intéresse maintenant à la mesure de l'épaisseur d'une lame fine (pas d'épaisseur optique trop grande avec le Babinet!).

Matériel : *QI, filtre AC, filtre interférentiel, polariseur, compensateur de Babinet, analyseur, lentille, écran.*

- Sans la lame, montrer les teintes de Newton en lumière blanche, commenter avec le principe du compensateur de Babinet.
- Passer en monochromatique, réaliser le calibrage du Babinet $\Rightarrow 109.0 \text{ nm/mm}$.
- Repasser en lumière blanche, et noter la position du vernier où la frange noire est au centre. Intercaler la lame, bien faire coïncider les lignes neutres de la lame et du Babinet. On observe un décalage des teintes de Newton.
- Recentrer la frange noire. Noter la position du vernier.

→ La lentille fait l'image du compensateur du Babinet sur l'écran. En effet, les interférences sont localisées à sa surface.

→ Il ne faut pas prendre une lame d'épaisseur optique trop grande pour éviter de sortir du domaine du Babinet.

→ La frange noire est utilisée pour la mesure car c'est la seule dont la position n'est pas influencé par la dépendance en longueur d'onde de la biréfringence de la lame à mesurer.

Exploitation de la manipulation :

On utilise le calibrage du Babinet pour faire correspondre le décalage pour recentrer la frange Δx avec la différence de marche créée par la lame $\delta = e\Delta n$:

$$\delta = 109.0 \times \Delta x = 109.0 \times 10.87 = 1187 \text{ nm}$$

La biréfringence du quartz est de $\Delta n = 9.1 \times 10^{-3} \Rightarrow e_{exp} = \frac{\delta}{\Delta n} = 130 \mu\text{m}$.
L'indication sur la lame propose : $e_{th} = 125 \mu\text{m}$

3 Mesure avec pouvoir rotatoire

3.1 Étude de l'effet Faraday

Effet Faraday

♣ Duffait & Sextant

⊖ 10 min

Cette manipulation permet d'introduire le phénomène de pouvoir rotatoire et le phénomène de biréfringence provoquée. On caractérise également l'effet Faraday par une mesure simple du pouvoir rotatoire en fonction du champ magnétique traversant le flint.

Matériel : laser, densité optique, polariseur, électroaimant, flint, analyseur, écran, teslamètre, alimentation courant-continu

- Sans le flint et laser à l'arrêt, mesurer le champ magnétique à l'intérieur de l'entrefer à l'aide du teslamètre. Il faut respecter la même distance à l'entrefer qu'avec la présence du flint.
- Laser en marche, croiser polariseur et analyseur pour obtenir extinction.
- Mettre en place le flint et le soumettre progressivement au champ magnétique mesurer. On observe une tache lumineuse sur l'écran. Expliquer le phénomène de biréfringence provoquée et le pouvoir rotatoire.
- Mesurer l'angle nécessaire pour obtenir l'extinction. Compléter le tableau des valeurs mesurées en préparation.

Mesure en préparation

Les mesures de cette manipulation sont longues et plutôt dures (dans le sens où l'effet Faraday reste faible et qu'il faut se pêter les yeux à chaque mesure pour obtenir l'extinction – dédicace à mon binôme ☺). En plus, la mise en place de l'électroaimant lourd est impossible à faire seul. Il est donc impératif d'être gentil avec les techniciens et demander leur aide pour monter la manip' et faire les mesures (sauf celle à champ magnétique maximum, avec effet Faraday visible, à faire devant le jury!).

→ La biréfringence provoquée peut également être illustrer par cellule à effet Kerr (quantitatif) mais moins par la photo-élasticité (qualitatif) ou la biréfringence des cristaux liquides (qualitatif). → Cette manipulation nécessite sa propre ligne/banc optique! → Pour rappel, le pouvoir rotatoire définit la capacité d'un matériau à faire pivoter le plan de polarisation de la lumière qui le traverse. Une polarisation rectiligne ressort donc rectiligne mais sa direction à pivoter d'un certain angle. → Autre interprétation : une polarisation rectiligne se décompose en 2 polarisations circulaire (gauche et droite) qui sont liées à des indices différents dans le flint. Ainsi, l'une des polarisation circulaire prend du retard, d'où une polarisation rectiligne de direction différente en sortie et des interférences après traversée de l'analyseur.

Exploitation de la manipulation :

On trace sur ordinateur $\alpha = f(B)$ avec α le pouvoir rotatoire et B le champ magnétique. Une régression linéaire permet de valider (normalement) la loi de Verdet : $\alpha = V \times d \times B$ avec V la constante de Verdet et d la longueur du flint.

⇒ $\alpha = C \times B$ avec C donné par la régression linéaire : $C = 15.1 \pm 0.6 T^{-1}$ (à 95%) avec $\chi^2 = 2.26$ pour 5 degrés de liberté ⇒ 90% de chance d'avoir un modèle juste.

Le flint mesure $\approx 3cm$ et pour un flint léger $V \approx 5cm^{-1}.T^{-1}$, les valeurs trouvées semblent cohérentes.

3.2 Caractérisation de la dépendance en la longueur d'onde du pouvoir rotatoire

Pouvoir rotatoire d'une lame en lumière monochromatique

➤ Duffait & Sextant

⊖ 10 min

Cette expérience permet d'approfondir l'étude du phénomène de pouvoir rotatoire en soumettant le milieu à plusieurs longueurs d'ondes. On en déduit l'évolution des indices du milieu en fonction de la longueur d'onde.

Matériel : QI, filtre AC, filtres interférentiels, fente, lentille, polariseur, 2 lames de quartz taillées \perp (fine et épaisse), PVD, écran.

- Avec la lame mince, éclairer en lumière blanche, expliquer rapidement les interférences qui sont à l'origine des couleurs observées.
- Avec filtres monochromatiques, faire les mesures du pouvoir rotatoire en fonction de la longueur d'onde (α, λ).
- Faire l'exploitation
- Pour étoffer, on peut ajouter la lame épaisse, discuter sur le spectre cannelé obtenu, l'ordre des couleurs, la place des franges sombres/lumineuses. On peut aussi montrer comment vérifier qu'une lame fine est levogyre ou dextrogyre.

Exploitation de la manipulation :

On trace à l'ordinateur $\alpha = f(\frac{1}{\lambda^2})$ et on suit avec une régression linéaire pour vérifier que :

$$\alpha = \frac{A}{\lambda^2}$$

avec $A = m^2$. On vérifie bien que "le bleu tourne plus que le rouge", ce qui permet de lever l'ambiguïté sur le signe de α d'une lame mince.

Autre manipulation

Il y a moyen de faire une manipulation très bien avec une vérification de la loi de Biot avec un polarimètre à pénombre (repérage de mêmes niveau de gris) : c'est une méthode de détermination du pouvoir rotatoire plus précise que le repérage de l'extinction qu'on utilise ici. De plus, ça ajoute plus de diversité de mesure dans la partie pouvoir rotatoire. Attention, cette manipulation nécessite de travailler à la longueur d'onde associé à la lame $\lambda/2$ du polarimètre à pénombre, qui correspond de manière générale au doublet jaune du sodium. Pour plus de détail, regarder les sections dédiées dans le Duffait, le Sextant, ou les "fiches techniques pour l'épreuve de montage de chimie organiques de l'agrégation" (2014-2015) qu'on nous a distribué sous forme de fascicule bleu pour le cours de chimie organique.

Questions/Commentaires