

# MP13 - Biréfringence, pouvoir rotatoire.

8 décembre 2017 - Présentée par Jeanne BERNARD

Correction : V. DE ZOTTI<sup>1</sup>, C.-E. LECOMTE<sup>2</sup>

Le présent compte-rendu a pour but de résumer et compléter la discussion qui a suivi la présentation de la leçon en classe. Bien entendu, il est partiel et partial, et n'est qu'un point de vue qui n'engage que son auteur. Rappelons que c'est vous qui présenterez les leçons en fin d'année, et que c'est donc à vous de décider de ce que vous voulez en faire.

## Rapport du jury

Je résume ici les attentes du jury pour ce montage spécifiquement, extraite des rapports du jury des années précédentes. Ceux-ci sont compilés dans le Book 2017.

*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.*

*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.*

*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.*

*Les notions d'axe optique et de lignes neutres sont trop mal connues.*

*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 ».*

## Remarques générales

### 1 Forme

Le montage qui a été présenté est de bonne facture : les différentes manipulations présentées sont pertinentes et ont leur place dans ce montage. Pour chaque expérience, le rôle de chacun des éléments du montage a bien été décrit et le but de l'expérience expliqué. De façon générale, il faut :

- expliquer ce que l'on veut montrer ou quantifier ;
- détailler le rôle de **chaque** élément du montage, y compris les lentilles/diaphragmes qui ne sont pas directement utiles à l'exposé du phénomène ;

- manipuler proprement, en expliquant à l'oral ce que l'on fait ;
- écrire le résultat important au tableau, calculer son incertitude ;
- interpréter le résultat et conclure (éventuellement de façon critique).

Le tableau est soigné et bien tenu. Il faut y inscrire, pour chaque expérience, un schéma complet et annoté, l'allure des courbes, la loi théorique, les résultats expérimentaux, le résultat final avec incertitudes et sa valeur attendue.

Le rythme de parole est bon : il est soutenu mais pas trop rapide. Il faut bien garder à l'esprit que le jury recrute des professeurs, et que le dynamisme, la prestance et l'enthousiasme du candidat ne sont pas négligeables dans la notation.

Le temps a bien été géré : le montage a duré 40 minutes. C'est important de se conformer à cette exigence. L'introduction était assez courte, ce que le jury attend : il faut rapidement commencer les manipulations.

Il est bienvenu de manipuler devant le jury, de déplacer certains éléments du montage. Cela démontre votre aisance expérimentale (même si il ne faut pas en abuser, en particulier ne pas déplacer des éléments d'un montage dont le réglage est difficile).

Du temps a été perdu sur les applications numériques et le calcul des incertitudes. Je recommande d'utiliser une feuille de calcul Excel ou un petit programme sur la calculatrice pour faire les applications numériques. Cela permet de gagner du temps et diminue grandement les risques d'erreurs de calcul qui peuvent vous faire perdre bêtement du temps.

Je conseille toujours à tous la lecture du rapport du jury<sup>3</sup> sur le montage de physique de 2017, qui est complet sur les attentes du jury sur cette épreuve. Prenez le temps de le lire plusieurs fois au cours de l'année, surtout les conseils généraux pour le montage.

### 2 Fond – conseils pour la présentation

Les manipulations qui ont été présentées dans ce montage sont en nombre suffisant. Il faut plutôt chercher à faire les expériences proprement, et à les interpréter complètement plutôt qu'à en survoler un grand nombre. On peut aussi traiter l'effet Faraday (apparition d'un pouvoir rotatoire sous un champ magnétique). Cependant, cette manipulation peut être gourmande en temps en préparation car il faut étalonner au préalable l'électroaimant.

Ce montage nécessite quelques connaissances sur les milieux biréfringents. Sachez justifier le tracé des rayons pour le prisme, ou le rhomboèdre si vous l'utilisez (construction de Huygens), l'observation du spectre cannelé dans le cas de la lame à face parallèle de quartz. Il peut être aussi utile d'avoir quelques idées sur l'origine microscopique de la biré-

1. [vincent.de\\_zotti@ens-lyon.fr](mailto:vincent.de_zotti@ens-lyon.fr)

2. [charlesedouard.lecomte@ens-lyon.fr](mailto:charlesedouard.lecomte@ens-lyon.fr) <http://perso.ens-lyon.fr/charlesedouard.lecomte>

3. À l'adresse [http://www.agregation-physique.org/images/rapports/2017/rapport\\_AEPC\\_2017.pdf](http://www.agregation-physique.org/images/rapports/2017/rapport_AEPC_2017.pdf)

fringence comme du pouvoir rotatoire. On pourra par exemple lire Houard [2], qui est assez concis.

Concernant les incertitudes, il faut se questionner à propos du montage : s'agit-il d'un montage à visée métrologique ou le but est-il la mise en évidence de phénomènes physiques ? On se situe ici plus dans le deuxième cas, la discussion des incertitudes n'est pas le point primordial. Néanmoins, il ne faut pas négliger leur calcul, chaque incertitude doit pouvoir être correctement et rigoureusement justifiée. Vous pouvez détailler un ou deux calculs d'incertitude pendant le montage. C'est un point du montage à améliorer : certaines incertitudes n'étaient pas bien justifiées, ou incorrectes (voir Retour sur la présentation).

Consulter la notice des appareils ou dispositifs utilisés (spectromètre pour l'expérience du spectre cannelé, fiole jaugée pour le pouvoir rotatoire, épaisseurs des lames, multimètres pour d'autres montages) pour connaître l'incertitude sur les valeurs utilisées. Si les incertitudes apparaissent sur un graphique, il faut être en mesure de justifier comment ces dernières ont été calculées, et le traitement qu'en fait le logiciel.

Il faut garder à l'esprit que le calcul d'une incertitude ne permet pas de "rattraper" une manipulation peu soignée : il faut manipuler le plus proprement possible, utiliser les outils adaptés puis estimer l'incertitude (que l'on aura cherché à minimiser). Ne pas mentionner des sources d'incertitudes qui ne peuvent pas expliquer un grand écart entre modèle et expérience (présence d'impuretés donc la concentration est très faible, dépendance en température, etc.). Il faut pour cela faire les expériences complètement pendant l'année (analyse comprise) et réfléchir à leur interprétation.

## Retour sur la présentation

### Introduction (1 min)

L'introduction situait bien le sujet et la problématique du montage. Elle n'était pas trop longue, ce qui est positif. Cela a été l'occasion de donner les définitions de biréfringence et de pouvoir rotatoire, qui étaient précises et concises. Pour avoir des définitions en introduction de montage, je vous conseille le Dictionnaire de physique de Taillet [4].

Vous avez précisé que la façon de tailler les lames serait un fil directeur du montage, c'est assez risqué si vous n'êtes pas complètement à l'aise par rapport aux milieux anisotropes.

## 1 Biréfringence (20 min)

### Etude d'un prisme de spath (2 min 30)

Cette partie a été l'occasion de montrer la biréfringence d'un prisme de spath taillé de telle façon à séparer les rayons ordinaire et extraordinaire. C'est bien de montrer la polarisation des deux rayons en sortie. Vous pouvez aussi montrer l'effet de l'ajout d'un polariseur en entrée.

Néanmoins, il n'est pas si facile d'interpréter ces observations : on observe plusieurs phénomènes simultanément :

des réflexions qui induisent de nombreuses images, la dispersion qui étale le spectre lumineux, et la biréfringence qui sépare les polarisations. Il est peut-être plus facile d'utiliser un rhomboèdre de spath : les faces sont parallèles et l'axe optique est incliné par rapport à ces faces. On observe deux images<sup>4</sup> : l'image ordinaire à l'endroit de l'image géométrique, et l'image extraordinaire, décalée.

### 1.1 Mesure de $\Delta n$ par spectre cannelé (8 min)

Il ne faut pas dire que l'on n'observe pas de séparation de faisceau car la lame est mince : c'est la façon dont le cristal est taillé par rapport à l'axe optique qui fait cela. Pour une lame taillée parallèlement à l'axe optique, les faisceaux ordinaire et extraordinaire suivent la même trajectoire. Par contre, ils ne se propagent pas avec le même indice.

Il n'est pas utile de montrer le spectre avec un PVD si sa résolution est insuffisante pour observer les cannelures. Vous pouvez utiliser un réseau avec un grand nombre de traits (*a priori* cela devrait suffire), puis utiliser le spectromètre commercial par exemple. Il est peut-être préférable d'utiliser un spectromètre OceanOptics pour réaliser cette mesure, cela permet de diminuer l'incertitude sur la longueur d'onde (et éventuellement de réaliser une interprétation plus poussée des mesures).

Il faut mieux justifier l'origine des valeurs d'incertitude prises. Pour l'épaisseur de la lame, si vous avez utilisé un Palmer, vous pouvez vous référer à [1] p.20 et pour la longueur d'onde, consultez la notice de Spid-HR. Par ailleurs, le calcul de l'incertitude proposé ici et dans le photocopié est faux : l'incertitude sur  $\Delta\lambda$  n'est pas indépendante des incertitudes sur  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ . On doit utiliser la formule de propagation de l'incertitude-type (voir [1] p.24). Le calcul est réalisé complètement ci-dessous.

La valeur obtenue à la fin tombe significativement en dehors des barres d'erreurs. Vu le protocole utilisé, c'est normal d'avoir une valeur supérieure à la valeur attendue. Supposer  $\Delta n$  indépendant de la longueur d'onde n'est pas rigoureusement exact. On pourra lire Fruchart et al. p.242 à 246 [1]. Une analyse plus poussée du spectre cannelé est proposée.

### 1.2 Mesure de $e$ avec un compensateur de Babinet (9 min 30)

Sur cette partie, il faut mieux détailler le rôle de chaque élément du montage, les conditions d'éclairage (parallèle, convergent). Notamment, le fonctionnement et la procédure d'étalonnage du compensateur de Babinet n'étaient pas claires.

Vous pouvez aussi expliquer la nature des couleurs observées (ce sont des teintes de Newton, analogues à la figure que l'on peut observer avec interféromètre de Michelson réglé en lame d'air).

L'expérience a globalement bien été menée même si là encore du temps a été perdu sur les applications numériques. Il faut là aussi mieux justifier les incertitudes (ou être capable de le faire).

4. voir [http://perso.ens-lyon.fr/charlesedouard.lecomte/TD6\\_13em.pdf](http://perso.ens-lyon.fr/charlesedouard.lecomte/TD6_13em.pdf), exercice 4

On considère la formule :

$$\Delta n = \frac{p}{e} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

La formule de propagation des incertitudes-type est :

$$\begin{aligned} u(\Delta n) &= \sqrt{\frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda_1} u(\lambda_1)^2 + \frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda_2} u(\lambda_2)^2 + \frac{\partial \Delta n}{\partial e} u(e)^2} \\ &= \sqrt{\left[ -\frac{p}{e} \frac{\lambda_2^2}{(\lambda_1 - \lambda_2)^2} \right]^2 u(\lambda_1)^2 + \left[ \frac{p}{e} \frac{\lambda_1^2}{(\lambda_1 - \lambda_2)^2} \right]^2 u(\lambda_2)^2 + \left[ -\frac{p}{e^2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \right]^2 u(e)^2} \\ &= \frac{p}{e} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \sqrt{\left[ \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \right]^2 \left( \frac{u(\lambda_1)}{\lambda_1} \right)^2 + \left[ \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \right]^2 \left( \frac{u(\lambda_2)}{\lambda_2} \right)^2 + \left( \frac{u(e)}{e} \right)^2} \end{aligned}$$

## 2 Pouvoir rotatoire (18 min)

### 2.1 Loi de Biot : glucose $\alpha$ et $\beta$ (13 min)

La manipulation qui a été présentée est originale. C'est un point positif d'avoir une manipulation moins classique (aux côtés de manipulations sûres qui vous permettent d'assurer une note correcte).

C'est bien d'utiliser un éclairage à la longueur d'onde correspondant à la valeur tabulée du pouvoir rotatoire (ici la raie D du sodium), et de le mentionner explicitement à l'oral. Le pouvoir rotatoire dépend en effet beaucoup de la longueur d'onde (voir Houard [2], p.282 à 285).

Cette manipulation doit être menée soigneusement pour avoir une valeur de pouvoir rotatoire de la solution aussi précise que possible. Vous pouvez faire l'image du diaphragme sur l'écran avec une lentille de façon à avoir une image plus nette et ainsi mieux repérer l'extinction. Vous pouvez également réaliser la mesure de l'angle de rotation du plan de polarisation pour différentes concentrations. Utilisez aussi des polariseurs avec des graduations sur 360°.

Il faut réaliser correctement une dilution : placer le soluté dans une fiole jaugée, remplir aux trois-quarts la fiole d'eau, mélanger jusqu'à dissolution totale du produit, puis compléter jusqu'au trait de jauge en homogénéisant régulièrement la solution. Vous pouvez ensuite réaliser des dilutions de cette solution mère.

Si vous êtes à l'aise avec le fonctionnement d'un biquartz de soleil ou d'un analyseur à pénombre, vous pouvez les utiliser pour repérer avec une grande précision l'extinction.

Attention à toujours bien justifier pourquoi vous tombez en dehors des barres d'erreurs. Si vous évoquez par exemple la dépendance en température, il faut avoir un thermomètre sous la main et connaître les dépendances du pouvoir rotatoire spécifique et de la proportion glucose  $\alpha/\beta$  en fonction de la température. Évitez à tout prix des explications imprécises !

### 2.2 Dispersion rotatoire du quartz (5 min)

Il faut être beaucoup plus précautionneux pour réaliser cette expérience. Utiliser un diaphragme et une lentille pour obtenir un faisceau de lumière parallèle. On peut obtenir dans ce cas une extinction totale sur une plage d'angle réduite. Pour indication, j'ai obtenu, pour une lame de quartz taillée perpendiculairement à l'axe optique de 2 mm d'épaisseur :

$\lambda$ (nm)	408	436	549	581	634
$\theta$ (°)	97 ± 14	83 ± 3	51 ± 1	44 ± 1	38 ± 2

Ce qui est cohérent avec les valeurs données dans Duffait [5] p.170, en prenant un ajustement linéaire (et non affine) pour  $\theta$  en fonction de  $1/\lambda^2$ .

Une façon astucieuse d'observer l'extinction est d'utiliser un analyseur à pénombre (voir Duffait [5] p.182). Au lieu de détecter une extinction, l'oeil doit observer une égalité de teinte, ce qui permet de repérer avec beaucoup plus de sensibilité l'angle.

### Conclusion (1 min)

La conclusion peut être l'occasion de récapituler rapidement les différentes mesures et leur intérêt. Comme l'introduction, elle ne doit pas être trop longue car le jury n'attend pas que vous restiez trop longtemps sans manipuler.

## Questions

Les questions servent d'abord à éclaircir les points peu clairs du montage, tester votre connaissance des appareils et dispositifs utilisés, puis ensuite à tester vos connaissances plus largement. Voilà quelques points qui pourraient être discutés lors des questions. La séance de questions durera au maximum 20 minutes le jour J.

- Pourquoi obtient-t-on deux images avec le prisme de spath et une seule dans le cas des lames à faces parallèles ?

Cela découle de la façon dont est taillé le cristal. Dans le cas du prisme, l'axe optique n'est pas parallèle à la face d'entrée, la construction de Huygens (surface des vitesses) nous donne que le rayon lumineux ordinaire ne suit pas la même trajectoire que le rayon extraordinaire. On obtient l'image ordinaire à la place de l'image géométrique.

- Pourquoi obtient-t-on un spectre à l'endroit du rayon extraordinaire (pour l'expérience du prisme de spath) ?

Car les indices dépendent de la longueur d'onde et que le prisme est éclairé en lumière blanche.

— Quel est le principe du prisme à vision directe?

Un prisme à vision directe est un assemblage de trois prismes taillés dans des verres différents. Grâce à un choix judicieux des types de verre et des formes de prismes, la déviation moyenne pour la lumière blanche est ramenée à 0. La dispersion observée est en  $1/\lambda^2$ .

— Comment fonctionne le spectromètre?

Il est constitué d'un réseau par réflexion, et l'image est envoyée sur une barrette CCD. On étalonne un spectromètre en utilisant une lampe spectrale dont la position des raies est connue avec une grande précision. La résolution du spectromètre dépend du réseau utilisé ainsi que de la taille des cellules de la barrette CCD.

— Comment augmenter le contraste du spectre cannelé?

Polariseurs et analyseurs doivent être croisés, et la lame tournée de  $45^\circ$  par rapport à ses lignes neutres. Pour l'expression du contraste de façon générale, on pourra se reporter à [1], p.236.

— Quelles hypothèses pour la formule  $\Delta n = \frac{p}{e} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$  ?

On suppose  $\Delta n$  indépendante de la longueur d'onde. Cette hypothèse n'est pas très juste et fait que l'on aboutit souvent à un résultat en dehors des barres d'erreurs (voir plus haut).

— Rappeler le principe de fonctionnement d'un compensateur de Babinet, ainsi que la procédure d'étalonnage.

Voir [1], p.251 à 255.

— Comment est préparée la solution de glucose?

— De quelle manière le pouvoir rotatoire dépend-il de la

température?

Très peu (environ 5/10000 par  $^\circ\text{C}$ ).

— Les lois de Snell-Descartes sont-elles valables dans les milieux anisotropes?

Oui, pour le vecteur d'onde (découle de la construction de Descartes). Oui pour la trajectoire des rayons ordinaires (découle de la construction de Huygens), mais pas pour la trajectoire des rayons extraordinaires.

— Applications de la biréfringence.

Observation des roches en lumière polarisée, construction d'instruments d'optique (prismes (Wollaston, Glan-Taylor, Rochon), déviation de faisceau), afficheurs à cristaux liquides, photoélasticimétrie.

— Applications du pouvoir rotatoire.

Dosages par polarimétrie, effet Faraday.

Je reste à votre disposition par mail si vous avez d'autres questions.

## Références

- [1] FRUCHART M., LIDON P., THIBIERGE É., CHAMPION M. et LE DIFFON A., Physique expérimentale : optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique, De Boeck, 2016
- [2] HOUARD S., Optique : une approche expérimentale et pratique, De Boeck, 2011
- [3] SEXTANT, Optique expérimentale, Hermann, 1997
- [4] TAILLET R., VILLAIN L. et FEBVRE P., Dictionnaire de physique
- [5] DUFFAIT R., Expériences d'optique à l'agrégation de sciences physique, Bréal, 1997