

# MP 10 : SPECTROMÉTRIE OPTIQUE

28 novembre 2018

Alexandre Klein & Julien Pollet

## Commentaires du jury

## Bibliographie

⚡ <i>Cap Prépa (PSI/PSI*)</i> , <b>Renvoizé</b>	→ vieux programme
⚡ <i>Optique</i> , <b>Houard</b>	→ couleur de l'atmosphère
⚡ <i>Onde électromagnétiques</i> <b>Garing</b>	→ ions colorés
⚡ <i>Electromagnétisme</i> <b>Perez</b>	→ Calcul de champs
⚡ <i>Mécanique 2</i> <b>Feynman</b>	→ Antennes

## Pré-requis

- Optique géométrique
- Optique ondulatoire
- Transformé de Fourier

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction Historique (5min)</b>	<b>2</b>
1.1	Expérience de Newton . . . . .	2
1.2	Les réseaux . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Mesure de la longueur d'onde du (doublet du) sodium (10min)</b>	<b>2</b>
2.1	Matériel . . . . .	2
2.2	Réglage du goniomètre . . . . .	2
2.3	Courbe d'étalonnage . . . . .	2
2.4	Mesure de $\lambda$ . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Mesure du doublet du sodium (10min)</b>	<b>3</b>
3.1	Matériel . . . . .	3
3.2	Réglage du michelson . . . . .	3
3.3	Positions des brouillages . . . . .	4
3.4	Tracer l'intensité au centre en fonction de $e$ . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Mesure de la Biréfringence d'une lame</b>	<b>5</b>
4.1	Matériel . . . . .	5
4.2	Analyse du spectre cannelé . . . . .	6
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>6</b>

## 1 Introduction Historique (5min)

La spectroscopie signifie l'étude des spectres soit dans la répartition de l'énergie selon chaque fréquence. Ici on s'intéresse uniquement au domaine du visible (optique).

### 1.1 Expérience de Newton

On peut aisément refaire l'expérience de Newton qui décomposa la lumière en arc-en-ciel en 1666 grâce à un prisme (Attention : ne pas aligner le jury et l'axe optique!). La spectroscopie repose sur un phénomène physique ayant un comportement différent sur des longueurs d'ondes différentes. Dans l'expérience de Newton c'est un phénomène dispersif : l'indice de la lumière varie en fonction de  $\lambda$  ( $n=a-b/\lambda$ ).

### 1.2 Les réseaux

On peut également illustrer qualitativement le fonctionnement des réseaux ici, en lumière blanche et avec une lampe spectrale à vapeur de sodium (spectre continu vs discontinu). Présenter les trois formules importantes des réseaux :

$$\sin \theta - \sin \theta_0 = \frac{m\lambda}{a} \quad (1)$$

$$2 \sin \frac{D_m}{2} = \frac{m\lambda}{a} \quad (2)$$

$$p = mN \quad (3)$$

avec :

$\theta$  l'angle avec la normale au réseau

$\theta_0$  l'angle du faisceau incident avec la normale

$D_m$  le minimum de déviation

$a$  le pas du réseau

$\lambda$  la longueur d'onde

$m$  l'ordre

$N$  le nombre de fente éclairées

Remarque : L'avantage des réseaux est d'être linéaire en  $\sin(\theta)$  et donc en  $\theta$  pour de petits angles

## 2 Mesure de la longueur d'onde du (doublet du) sodium (10min)

### 2.1 Matériel

1. Une lampe à vapeur de mercure-cadmium-zinc
2. Une lampe à vapeur de sodium
3. Un réseau avec 600 fente par mm

### 2.2 Réglage du goniomètre

Il est très important de régler la largeur de la fente, la lunette et le collimateur à l'infini (pour voir net sans se fatiguer), ainsi que l'horizontalité du plateau et de l'axe lunette-collimateur. Pour plus de détails se référer au site : [http://web.cortial.net/gonio/reg\\_onio.html](http://web.cortial.net/gonio/reg_onio.html)

### 2.3 Courbe d'étalonnage

Dans un premier temps il faut tracer une courbe (droite) d'étalonnage. Pour se faire on mesure le minimum de déviation à l'ordre 1 pour chacune des raies de la lampe Hg-Cd-Zn qui sont tabulées ci dessous (Attention 491.166 n'est pas très visible) :

L'incertitude pour  $D_m$  est de 2 minutes d'arc. On trace ensuite  $\lambda = f(\sin \frac{D_m}{2})$  qu'on modélise par  $\lambda = 2a \sin \frac{D_m}{2}$  et on obtient :

$$a = 1.642 \pm 0.002 \quad (4)$$

Remarque : il est bien de garder un ou deux points à faire devant le jury.

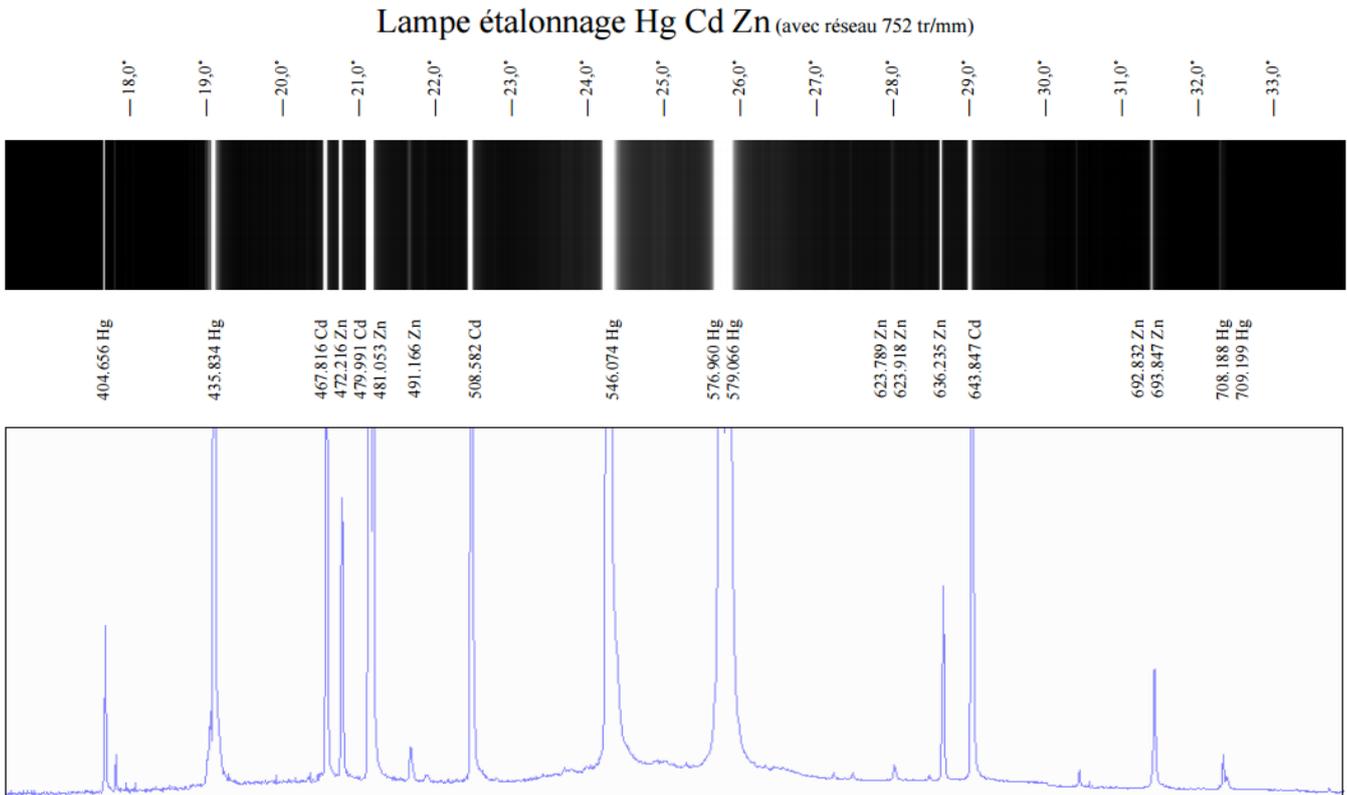


FIGURE 1 – Spectre d'une lampe Hg-Cd-Zn

## 2.4 Mesure de $\lambda$

Le protocole est sensiblement le même pour mesurer la longueur d'onde, on mesure le minimum de deviation ici l'incertitude sur  $D_m$  peut être plus importante car la raie est épaisse. Puis on utilise la formule (2) pour trouver  $\lambda$  :

$$\lambda = 2a \sin \frac{D_m}{2} = (598 \pm 2(ou1))nm \quad (5)$$

$$\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta D_m}{D_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2} \quad (6)$$

## 3 Mesure du doublet du sodium (10min)

### 3.1 Matériel

1. Un michelson (avec bon moteur? le 1 )
2. matériel de réglage du michelson (laser + lampe torche)
3. système d'acquisition d'intensité (photo diode + montage de charge) (optionnel)

### 3.2 Réglage du michelson

On souhaite ici régler le michelson en lame d'air. On règle tout d'abord la compensatrice, pour se faire on fait passer un laser par la séparatrice et la compensatrice uniquement, puis on règle les vis de la compensatrice pour avoir le minimum de point image possible (idéalement un seul).

Ensuite on place le laser en entrée du michelson pour éclairer les miroirs en leur centre, on règle alors le réglage grossier de l'inclinaison des miroirs pour réduire encore le nombre de point image (idéalement un seul). Puis on élargit le faisceau à l'aide d'un objectif de microscope pour apercevoir enfin des anneaux.

On chariotte pour diminuer le nombre d'anneaux tout en touchant les vis de réglage fin de l'inclinaison des miroir pour garder les anneaux au centre. On trouve alors un encadrement du contact optique entre les positions pour lesquels on observe un seul anneau à l'écran (noter celui ci).

On passe alors en coin d'air (à l'aide du réglage grossier d'inclinaison) et on conjugue les miroirs avec un écran à l'aide d'une lentille. On explore ensuite l'intervalle encadrant le contact optique avec la lampe torche en partant du centre de l'intervalle jusqu'à trouver les teintes de Newton (noter la position du contact optique précisément (10.76 mm pour le michelson 1)).

On repasse finalement en lame d'air et on projete l'image en mettant un écran dans le plan focale image.

### 3.3 Positions des brouillages

Lorsqu'on éclaire avec une lampe à vapeur de sodium (et un condenseur) on observe régulièrement des brouillages dus à la superposition des figures d'interférence issue de chaque raie (un brouillage tous les 0.30 mm environ). On note donc les positions  $x_n$  successives de chaque brouillage n avec une incertitude assez importante (0.05mm ou 0.10mm) puis il faut alors tracer la droite  $x_n = an + b$ . On retrouve alors a et  $\delta\lambda$  :

$$a = ??? \pm ??? \quad (7)$$

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{a} = (0.6 \pm ???) nm \quad (8)$$

$$\Delta(\delta\lambda) = \delta\lambda \sqrt{2\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\delta a}{a}\right)^2} \quad (9)$$

### 3.4 Tracer l'intensité au centre en fonction de e

On peut également monter un montage de charge de photodiode pour mesurer l'intensité au centre de la figure d'interférence (voir montage photorecepteur) et faire défiler les anneaux à l'aide du moteur. L'intensité au centre en fonction de l'épaisseur e de la lame d'air pour une source monochromatique de longueur d'onde est :

$$I = I_0 \left(1 + \cos\left(\frac{4\pi e}{\lambda}\right)\right) \quad (10)$$

Si on superpose deux figures d'interférence pour deux longueurs d'onde proche séparées de  $\delta\lambda$  on obtient :

$$I = I_0 \left(1 + \cos\left(2\pi \frac{e\delta\lambda}{\lambda^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{2e}{\lambda}\right)\right) \quad (11)$$

De plus ces raies ont une certaine largeur, ce qui fait qu'on observe un brouillage permanent à partir d'une certaine épaisseur de lame d'air (problème de cohérence temporelle). Ces raies ont un profil respectivement gaussien ou lorentzien pour des lampes à basse pression ou à haute pression qui peuvent être caractérisées par une largeur à mi-hauteur notée  $d\lambda$ . Pour simplifier l'étude on peut considérer des profils en porte de largeur  $d\lambda$ . Si on trace l'intensité (pour un profil porte) en fonction de l'épaisseur de la lame on obtient donc :

$$I = I_0 \left(1 + \frac{\sin\left(2\pi \frac{e d\lambda}{\lambda^2}\right)}{2\pi \frac{e d\lambda}{\lambda^2}} \cos\left(2\pi \frac{e\delta\lambda}{\lambda^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{2e}{\lambda}\right)\right) \quad (12)$$

On va donc faire défiler les anneaux en fonction du temps pour retrouver 3 échelles de temps caractéristiques qu'on pourra relier à des échelles de longueur d'onde. Le graphe temporel obtenu est similaire à celui présenté sur la figure si la vitesse de chariotage est constante et le capteur linéaire en intensité. Il faut charioter sur une très grande distance, le moteur tournant à environ 1 tour en 15 min, il faudra prévoir environ 1h30 pour observer le brouillage total à partir du contact optique. On peut remonter aux échelles de temps en traçant la transformée de fourrier de cette longue acquisition.

Important : Il est en réalité assez complexe d'obtenir un tel graphe car la vitesse du moteur n'est pas vraiment constante et que l'intensité mesurée n'est pas réellement celle qu'on souhaiterait (réponse non linéaire ? léger déplacement du centre de la figure ? autre ?). Cette version de la manip est longue, périlleuse, difficile à réaliser, ne vous permet pas de manipuler devant le jury et n'apporte finalement que peu de chose...

On peut déterminer la vitesse du moteur plus précisément en regardant la première fréquence de la transformée de fourrier  $f_1$  :

$$v = \frac{\lambda}{2f_1} = (555 \pm ???) \mu m/s \quad (13)$$

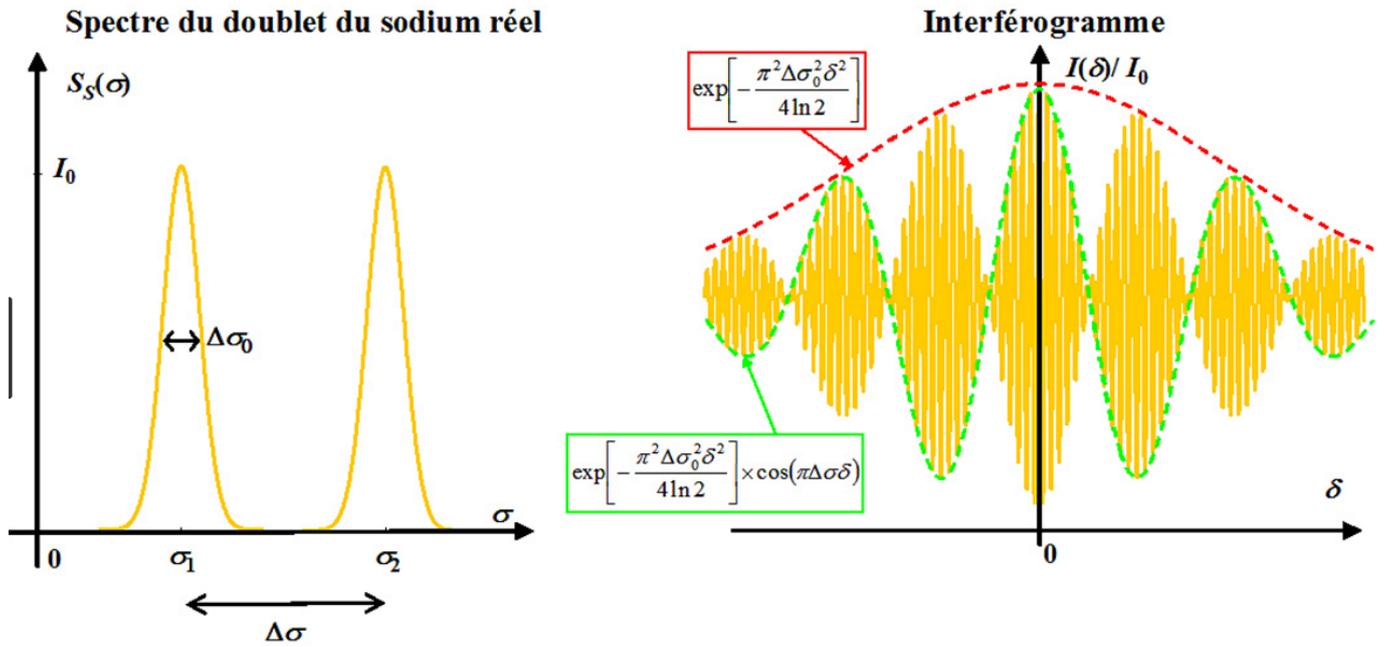


FIGURE 2 – Figure d’interférence pour un profil Lorentzien

$$\Delta v = v \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f_1}{f_1}\right)^2} \tag{14}$$

On en deduit ensuite  $\delta \lambda$  et  $d \lambda$  avec les deux autres fréquences :

$$\delta \lambda = \frac{f_2 \lambda^2}{v} = (0.6 \pm ???) nm \tag{15}$$

$$\Delta \delta \lambda = \delta \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta f_2}{f_2}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2} \tag{16}$$

$$d \lambda = \frac{f_3}{\lambda^2} v = (??? \pm ???) nm \tag{17}$$

$$\Delta d \lambda = d \lambda \sqrt{\left(\frac{\Delta f_3}{f_3}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2} \tag{18}$$

## 4 Mesure de la Biréfringence d’une lame

Si la spectrométrie permet dans un premier de temps de déterminer des longueurs d’onde et d’étudier le spectre de différentes sources lumineuses, on peut ensuite s’en servir pour mesurer certains paramètres physiques (ex : ???), on va ici s’intéresser à la biréfringence d’une lame d’une épaisseur donnée :

### 4.1 Matériel

1. Différente lame biréfringente sur leur support (boîte en bois). Notamment une lame de quartz parallèle  $e = 1.53 mm$
2. Deux polariseurs
3. Un diaphragme
4. Lampe Quartz-Iode
5. spectromètre

## 4.2 Analyse du spectre cannelé

On place successivement la lampe Quartz-Iode, le diaphragme, un polariseur à 45, la lame de quartz, l'analyseur croisé avec le polariseur puis une lentille pour focaliser le faisceau sur l'entrée de la fibre optique du spectromètre (voir figure).

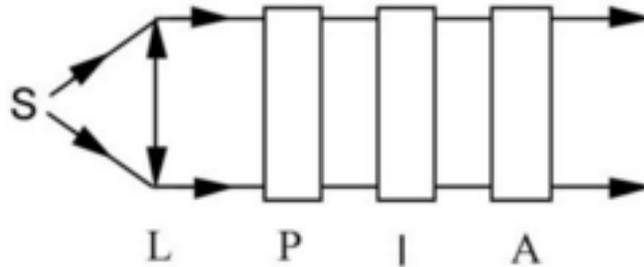


FIGURE 3 – Montage de mesure de la biréfringence

On observe alors sur le spectromètre avec un temps d'acquisition de 100ms et un moyennage sur 5 acquisitions un spectre cannelé. On observe  $N$  cannelures entre  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  en déduit :

$$n_e - n_o = \frac{N}{e} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (19)$$

$$\Delta \Delta n = \Delta n \sqrt{\left(\frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \Delta \lambda}{\Delta \lambda}\right)^2} \quad (20)$$

## 5 Conclusion

Ce montage permet de donner une vue d'ensemble de ce qu'est la spectrométrie, de ses applications les plus basiques et les moins précises à l'affinage grâce à des systèmes optiques plus compliqués. Cela permet aussi de montrer que bien que le but premier de la spectrométrie réside dans la mesure de longueur d'onde, elle permet aussi de remonter à des paramètres physiques de certains matériaux tels que les indices ordinaire et extraordinaire d'un cristal biréfringent. Enfin, il permet de se familiariser avec un spectromètre dans le cadre de ces mesures.