

MP-22-Spectrométrie en optique

Maud Viallet & Guillaume Deplus

28 novembre 2021

Bibliographie

- ⚡ **Fruchard, Lidon, Champion, Le Diffon**, *Physique expérimentale : optique, mécanique des fluides, ondes thermodynamiques* (Jolidon bleu)
- ⚡ **Jolidon**, *Physique expérimentale : optique, magnétisme, électrotechnique, mécanique, thermodynamique et physique non linéaire*
- ⚡ **Sextant**, *Optique expérimentale*
- ⚡ **Sallen, Meier**, *Réussir les TP de physique aux concours, ed. J'intègre*

Sitographie

Table des matières

1	Introduction	2
2	Spectrométrie à réseaux	2
2.1	Dispositif	2
2.2	Étalonnage du goniomètre à la lampe de mercure	3
2.3	Mesure de longueur d'onde : Na	3
3	Spectrométrie par interféromètre de Michelson	4
3.1	Intensité des interférences d'une source élargie spectralement	4
3.2	Dispositif expérimental	5
4	Spectrométrie en biréfringence	6
4.1	Montage expérimental	7
4.2	Intensité de l'interferogramme	7
5	Conclusion	7
6	Tableau	7
7	Montage surprise	7
8	Questions	8

1 Introduction

Pour avoir quelques idées, on peut aller voir :

- [Historique](#)
- [Cours-Techniques de l'ingénieur](#) (il faut être connecté à eduroam)

La **spectrométrie** est l'étude de la distribution de l'amplitude ou de puissance d'une grandeur en fonction de la fréquence. Ainsi, on retrouve cette notion dans de nombreux domaines que ce soit en spectrométrie de masse pour séparer les molécules à partir de leur masse moléculaire ou encore en spectrométrie acoustique. Dans le cadre de ce montage, on va s'intéresser en particulier à la spectrométrie en optique qui repose sur l'ensemble des techniques instrumentales d'analyse de densités spectrales. Elle permet de rendre compte des particularités intrinsèques des spectres lumineux.

Expérience (optionnelle)

On peut voir ici le spectre d'une QI, qui est un spectre continu. On constate que ce spectre est très différent du spectre de la lampe spectrale de Mercure qui est un spectre de raies d'émission.

2 Spectrométrie à réseaux

✎ Sallen, Meier, *Réussir les TP de physique aux concours*, ed. J'intègre, p.279

2.1 Dispositif

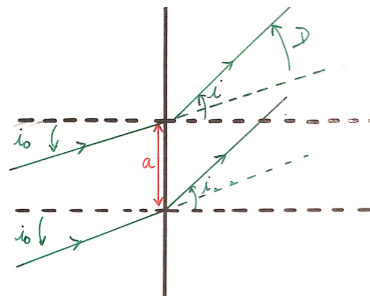


FIGURE 1 – Interférence à N ondes : le réseau

Un réseau sépare spatialement les longueurs d'ondes (phénomène d'interférence) selon la relation des réseaux :

$$a(\sin i - \sin i_0) = p\lambda, \quad p \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

On définit la déviation D par :

$$D = i - i_0 \quad (2)$$

C'est elle que l'on mesure au goniomètre! Cette grandeur varie avec l'angle d'incidence θ_0 et présente un minimum qui présente l'avantage de simplifier la relation des réseaux. On cherche la déviation D_m minimale pour un λ fixé :

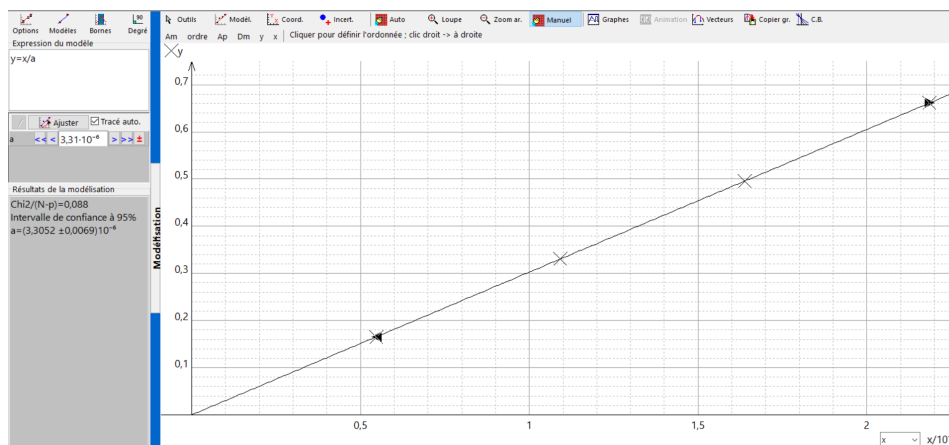
$$\frac{dD}{di_0} = 0 \implies di = di_0 \quad (3)$$

Or en différenciant la formule des réseaux et en injectant cette condition, on a :

$$\cos i = \cos i_0 \implies i = -i_0 \implies D_m = 2i \quad (4)$$

Il existe une deuxième solution $i_0 = i$ mais elle ne nous intéresse pas car elle correspond à une déviation nulle. En réinjectant ces égalités dans la formule des réseaux, on a une relation entre D_m et λ :

$$2 \sin \frac{D_m}{2} = \frac{p\lambda}{a} \quad (5)$$


 FIGURE 2 – Régression linéaire de $2 \sin \frac{D_m}{2}$ en fonction de $p\lambda$

2.2 Étalonnage du goniomètre à la lampe de mercure

Voir Réglage goniomètre

Remarque

Ici, on a fait le choix de faire l'étalonnage avec du Mercure, mais il s'avère que le mercure émet beaucoup dans l'ultraviolet donc il est dangereux pour les yeux. Penser à mettre un filtre anti-UV.

Détermination du pas du réseau

On trace le minimum de déviation moyenné entre les angles positifs D_m^+ et négatifs D_m^- pour s'affranchir de la détermination du de la normale (le placement du réseau sur le plateau ne devient plus un paramètre de la mesure) ; tel que $D_m = (D_m^+ - D_m^-)/2$.

NB : Il faut faire attention à ce que l'on rentre dans la commande de régressi car l'angle D_m^- est proche de 360° mais l'orientation des angles à son importance ici. Ainsi, la formule utilisée est en réalité $D_m = (D_m^+ - (D_m^- - 360))/2$.

On a tracé en préparation les ordres : ± 2 , ± 3 , ± 4 . On mesure l'ordre ± 1 pendant la présentation. On fait ça sur le réseau de 300 traits/mm.

$$\sin \frac{D_m}{2} = f(p\lambda) \quad (6)$$

On trouve alors un pas $a = 3,305 \pm 0,007 \mu\text{m}$ et 303 ± 1 traits/mm.

Transition

Une fois le paramètre du réseau mesuré, on peut s'en servir pour déterminer la longueur d'onde d'une raie dans un spectre.

2.3 Mesure de longueur d'onde : Na

On se sert de notre réseau de 300 traits étalonnés pour faire une deuxième régression linéaire qui donne cette fois-ci la longueur d'onde moyenne du sodium (avec un réseau assez bon, aux hauts ordres, plus dispersifs, on voit qu'il y a deux pics).

Les mesures ont déjà été faites en préparation pour ± 2 , ± 3 , ± 4 : on fait la mesure pour l'ordre ± 1 (même si c'est assez répétitif avec l'étalonnage), avec les incertitudes (angles et pas du réseau), on trouve :

$$\lambda = 589 \pm 2 \text{ nm} \quad (7)$$

Remarque

- Ce qui est dommage avec le goniomètre c'est qu'on ne montre rien au jury à ce moment là... Peut-être essayer de projeter ce que l'on voit à travers la lunette pour que ce soit plus visuel.
- *Pour aller plus loin* : [Simulation - réseaux blazés](#)

Transition

Ordres supérieurs - on voit le doublet du sodium mais on ne peut pas faire de mesures précises : on va passer à une méthode pour voir l'élargissement spectral d'une source (filtre interférentiel ici).

3 Spectrométrie par interféromètre de Michelson

➤ **Jolidon vert**, p.73 **NB** : on a fait ici un mélange des montages présentés en spectroscopie dynamique et statique.

3.1 Intensité des interférences d'une source élargie spectralement

Pour une source qui a un élargissement spectral de forme porte (égales intensités sur la largeur), on a une figure d'interférences de la forme :

$$I(\delta) = 2I_0 \left[1 + \operatorname{sinc} \left(\frac{\pi \Delta \lambda}{\lambda_0^2} \delta \right) \sin \left(\frac{2\pi \delta}{\lambda_0} \right) \right] \quad (8)$$

On va trouver un gros ventre et des petits lobes dans la figure d'interférences. Le nombre d'oscillations rapides Δp dans la figure donne accès à l'élargissement spectral par la formule :

$$\Delta p = \frac{\lambda_0}{\Delta \lambda} \quad (9)$$

Pour le filtre vert, on trouve un $\Delta \lambda = 5.8 \text{ nm}$. Ce qui est cohérent avec une mesure réalisée précédemment au spectromètre commercial.

Remarque

En observant le spectre du filtre interférentiel à l'aide du spectromètre commercial, on peut obtenir la longueur centrale du filtre. De plus, on remarque que la densité spectrale du filtre interférentiel n'est pas tout à fait une porte mais une double gaussienne très très proche. On peut se convaincre par un calcul que pour un profil avec deux gaussiennes proches de même étalement spectral, on a des annulations de contraste selon la même périodicité.

3.2 Dispositif expérimental

Montage

Réglage du Michelson

- Vérifier que les vis du réglage fin ne sont pas en butée (au tiers de course)
- Réglage des compensatrice du Michelson avec le laser
- On s'approche du contact optique avec le laser éclaté à l'aide d'un objectif de microscope (pour le Michelson P70.2, le contact optique est environ vers 10,73mm)
- réglage fin à l'aide de la lampe de mercure (mettre un dépoli pour regarder dedans). On fait le oui-oui non-non puis on regarde près du contact optique la forme des anneaux et on modifie leur forme à l'aide du réglage fin de la compensatrice.

On utilise une QI dont on peut contrôler l'intensité lumineuse en sortie. On oublie pas le **filtre anti-calorique**. On a réglé le Michelson en lame d'air. On se place au contact optique pour passer en coin d'air (avec la lampe de sodium ou directement avec le filtre interférentiel qui suit la QI). Une fois en coin d'air, on utilise une lentille convergente de focale $f = 160\text{mm}$. On conjugue les miroirs avec un écran pour voir les franges d'interférence avec le filtre.

NB :

- le contraste est bon mais c'est assez compliqué de conjuguer les deux. On voit bien les franges sur une large plage de distance...
- il faut bien se mettre au contact optique car on a vite du brouillage car la largeur spectrale du filtre est grande (par rapport au doublet du sodium par exemple)

Une fois qu'on a les franges, on peut mettre le capteur, ici la photodiode. Il faut bien faire attention à ce que la largeur d'une interfrange soit au moins aussi large que le capteur, pour cela on joue alternativement avec les réglages grossier et fins des miroirs pour augmenter la taille des franges.

Montage électrique (cf. MP-Photorecepteur)

On branche en série une résistance et une photodiode en mode passant avec une alimentation continue ± 15 . On prend la tension aux bornes de la résistance $R = 1\text{M}\Omega$ à l'aide d'un oscilloscope réglé en haute définition et en mode défilement avec un pas par division de 50s. Le montage électrique reste très bruyé il faut intercaler entre la résistance et l'oscilloscope un passe bas d'ordre 4 avec une fréquence de coupure de 10 Hz. **NB :** On a toujours du bruit à cause du 50 Hz du secteur (cf. FIGURE 5)

On se place en bordure de brouillage et on met en route le moteur de l'interféromètre de Michelson. L'oscilloscope enregistre la tension aux bornes de la photodiode (cf. FIGURE 3)

Remarque

Il faut compter une minute pour que l'intégralité du premier ventre de l'interférogramme passe sur l'oscilloscope. Si la pièce est suffisamment sombre, on peut obtenir les premiers et seconds ventres du sinus cardinal.

On peut maintenant déterminer les deux premières annulations de contraste sur la FIGURE 4). On veut connaître le nombre de pics entre ces deux annulations, pour cela on zoome sur quelques périodes à l'intérieur de l'enveloppe du sinus cardinal (**Attention** ; on ne mesure pas QU'UNE SEULE PERIODE mais PLUSIEURS!!!!!!).

On a entre les deux annulations 59 s et une période entre deux ordres de 620 ms. On trouve au total 95 ± 5 ordres.

Ainsi on a une largeur spectrale $\Delta\lambda$ qui vaut $5.7 \pm 0.3 \text{ nm}$. **Calcul des incertitudes** (à indiquer sur le tableau)

$$u(\Delta\lambda) = \Delta\lambda \sqrt{\left(\frac{u(p)}{p}\right)^2 + \left(\frac{u(\lambda_0)}{\lambda_0}\right)^2} \quad (10)$$

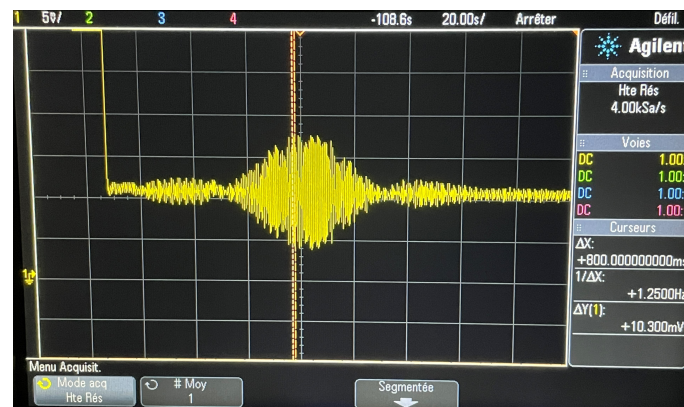
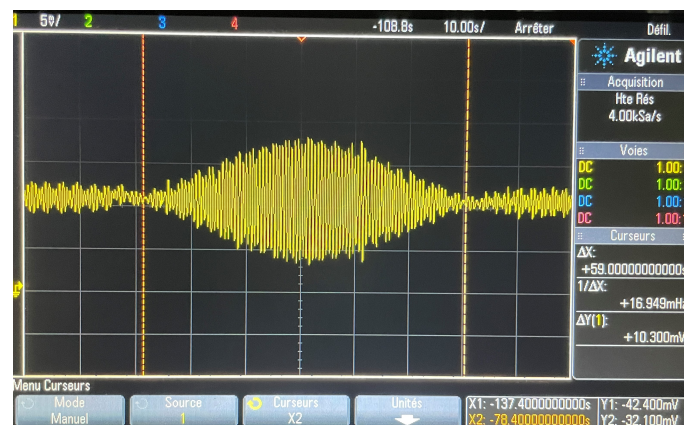
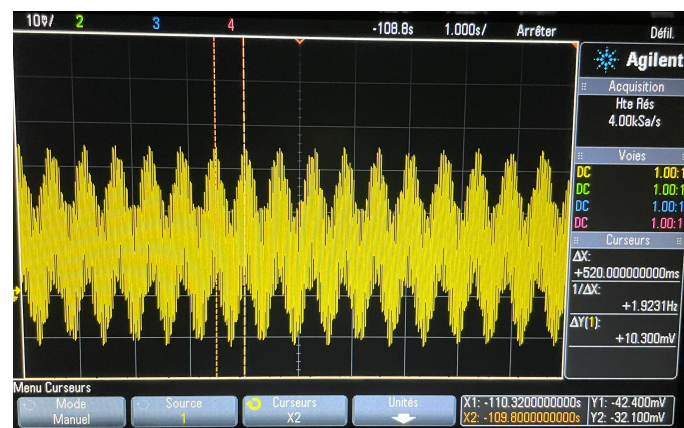


FIGURE 3 – Interférogramme du filtre interférentiel


 FIGURE 4 – Zoom sur l'enveloppe du *sinc*

 FIGURE 5 – Signal en cos modulé par le *sinc*

Transition

On sait maintenant comment analyser le spectre d'une source lumineuse (raie spectrale ou largeur spectrale). Le but de la spectrométrie n'est pas uniquement de connaître la nature des sources mais aussi de pouvoir extraire des spectre des propriétés de systèmes physiques. On va s'intéresser ici à la biréfringence d'une lame.

4 Spectrométrie en biréfringence

🔗 Jolidon bleu, p.233

Le but ici est de mesurer la biréfringence d'une lame de quartz à faces parallèles (on dit quelques mots sur les lignes neutres et les axes ordinaires/extraordinaires).

4.1 Montage expérimental

Observation du spectre cannelé

On place sur la paillasse à la suite : la lampe QI, le filtre anti-calorique, une fente, une lentille, deux polariseurs et un écran. On conjugue la fente et l'écran via la lentille. On cherche à placer les polariseurs en configuration croisée. On ajoute la lame entre les deux polariseurs. On cherche l'extinction (cela signifie que l'une des lignes neutres de la lame est confondue avec l'axe de polarisation du premier polariseur. Delà, on tourne la lame de 45° (en réalité, il est plus commode de tourner les polariseurs et analyseurs car ils sont gradués). Ce réglage n'a pas à être précis, on joue ici uniquement sur la luminosité de la figure et **pas** le contraste. On ajoute un prisme à vision directe entre l'analyseur et l'écran et on observe un magnifique spectre cannelé (provenant d'un blanc d'ordre supérieur) !!

On va maintenant grâce à ce spectre cannelé remonter à la biréfringence de la lame. Pour cela, on peut enlever la fente et la lentille et on remplace le prisme par un spectromètre commercial (boîte noire). On fait une acquisition à l'aide du logiciel Ocean Optics (spectromètre qui a été étalonné à l'avance à l'aide des coefficients et dont on a vérifié les valeurs avec une lampe spectrale de Cd-Hg).

4.2 Intensité de l'interferogramme

Avec la disposition présentée précédemment (polariseur et analyseur en croisés à 45° des lignes neutres de la lame), on a alors l'intensité en sortie qui s'exprime : **Jolidon bleu**, p.237

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

avec e l'épaisseur de la lame, Δn le biréfringence de la lame.

Remarque

Ici, on aurait pu supposer connue la biréfringence et mesurer l'épaisseur de la lame.

De plus on a la relation entre N annulations de contraste :

$$N + 1 = \Delta n e \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) \quad (12)$$

Remarque

On peut aussi faire la régression linéaire entre les longueurs d'onde et les ordres d'interférence, c'est-à-dire $\lambda_p = \frac{4}{3} \frac{\Delta n e}{p}$, avec p l'ordre d'interférence.

On trouve alors $\Delta n = (10 \pm 0.1) \times 10^{-2}$, ce qui est proche de ce qu'on l'on peut trouver dans la littérature.

5 Conclusion

Il existe de nombreux moyens pour analyser des spectres (que ce soit pour déterminer une longueur d'onde ou même une largeur spectrale). La résolution de ces spectres sont très bonne, ce qui permet de les utiliser pour remonter vers des grandeurs caractéristiques de système physique comme ici la biréfringence. Mais c'est aussi un domaine très répandu en astrologie notamment pour analyser la compositions des étoiles.

6 Tableau

Remarque : Il faudrait ajouter sur le tableau un calcul d'incertitude.

7 Montage surprise

Il s'agit d'un montage avec :

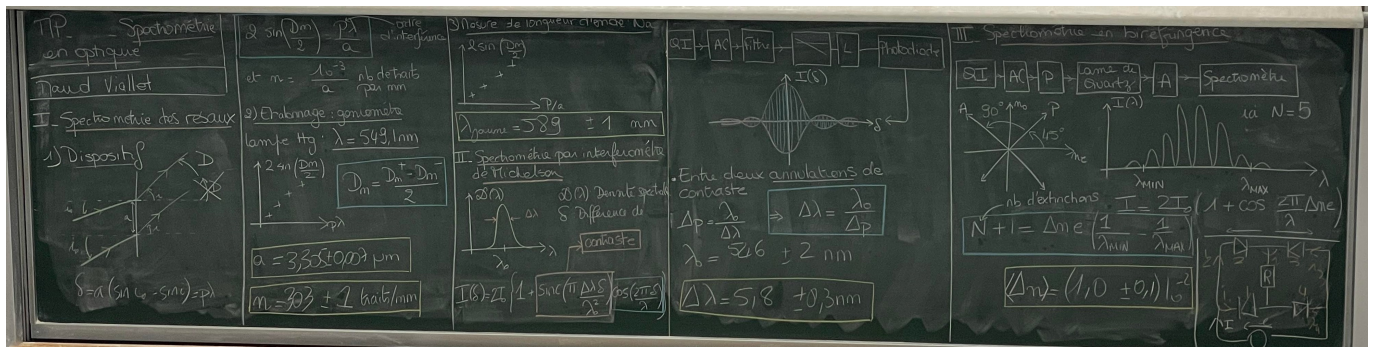


FIGURE 6 – Tableau

- 1 moteur
- 1 GBF
- Un oscillo

BUT = faire tourner le moteur de manière continue. Comment le faire tourner : on veut lui appliquer un courant continu pour faire en sorte que le moteur tourne de manière continue.

On se doit de réaliser un redresseur : c'est à dire un montage avec quatre diodes pour sortir des tensions continues à partir d'un courant alternatif.

8 Questions

- Définition du minimum de déviation : le schéma réalisé pour D est pas bon
- Quand on a réglé la lunette à l'infini ? *On règle la lumière de la fente pour qu'elle envoie une image à l'infini*
- ordre des réglages ? *d'abord la lunette puis on règle la fente.*
- Orthogonalité du réseau ? *on a réglé de l'horizontalité du plateau, mais pour réseau ça ne compte pas puisqu'on cherche un minimum de déviation* **rem : je pense qu'on aurait pu évoquer placer**
- on a confiance en le constructeur ou notre mesure ? *j'imagine que les*
- Prix d'un réseau ? *100 balles ? une trentaine d'euros.*
- Quelle lampe à vapeur a été utilisée ? usages et dangers de la lampe de mercure ? *tant que l'ampoule ne se casse pas c'est ok. Un autre danger ? Où les lampes à mercure émettent-elles On a beaucoup de raies dans le bleu : rayonnement UV donc filtre à UV bienvenu pour ne pas s'abîmer les yeux*
- Pourquoi s'inquiéter de l'incertitude ± 1 nm ? *Ça paraît beaucoup.*
- largeur du doublet du sodium ? 0.6nm donc c'est finalement pas si déconcertant au vu de la largeur de la raie.
- Problématique de l'incertitude sur le λ_0 pour déterminer l'élargissement spectral ?
- Au gonio, on peut observer l'élargissement du doublet du sodium, mais pas le mesurer, pourquoi ? *résolution du vernier qui limite la mesure. On prendrait un réseau plus dispersif, même si la mesure n'est pas précise*
- Pourquoi un filtre interférentiel et pas le doublet du sodium ? *parce que ça prendrait 30 minutes avec un moteur qui peut avoir une dérive*
- mesure du temps d'oscillation ? problème dans la mesure ? *il aurait fallu prendre dix périodes*
- QI tête du spectre ? *on peut le deviner dans le*
- D'avantage de contraste en coin d'air ? On ne voit rien en lame d'air.
- Comment fonctionne un spectromètre ?
- Quelle est la résolution d'un appareil ? *On peut donner une minoration de cette dernière puisqu'on résout le doublet du sodium*
- Pour les angles du polariseur-analyseur, on les règle pour la rotation à 45 ? Précision ? implication sur la précision de Δn ? Ne c