

MP10 : Spectrométrie optique

Date : 27/01/21

Binôme : B01 : Baudribos Fabien et Jouan Armel

1 Objectifs pédagogiques

- Apprendre à utiliser différents types de spectromètre
- Comparer leur résolution et leur limite

2 Objectifs et messages forts du montage

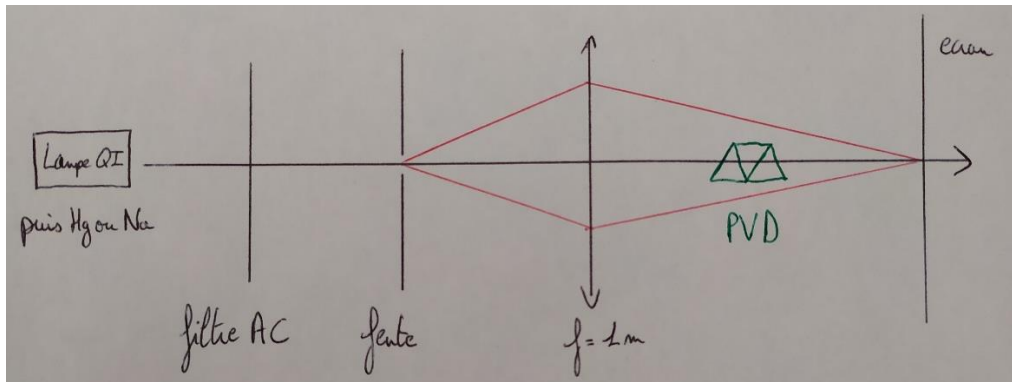
L'objectif de ce montage est de montrer comment utiliser les différents spectromètres (goniomètre, Michelson, ...) en détaillant leur fonctionnement et surtout en expliquant quels constituants vont limiter leur résolution et proposer une solution pour l'améliorer si c'est possible.

3 Introduction générale

La spectrométrie optique est l'étude des spectres optiques, c'est-à-dire, l'étude de la répartition énergétique du rayonnement lumineux en fonction de la longueur d'onde. On va étudier dans ce montage deux types de spectromètre (par réseau, par interférométrie) et on va comparer leur résolution.

Rappel historique : C'est Newton en 1666 qui a découvert que la lumière blanche étant en réalité un « mélange » de toutes les couleurs grâce à un spectromètre très simple : prisme. On va réaliser cette petite expérience tout de suite afin d'observer un premier spectre : le spectre de la lumière blanche qui est un spectre de bande.

Expérience introductive :



L'indice optique du verre dépend de la longueur d'onde (loi de Cauchy : $n(\lambda) = A + B/\lambda^2$) donc avec Snell-Descartes, on obtient des angles de diffraction différents pour les différentes longueurs d'onde.

On peut vérifier que le rouge (longueur d'onde la plus élevée) est moins dévié que le bleu (le PVD est centré sur le doublet du sodium).

On peut maintenant observer un autre type de spectre : spectre de raie avec la lampe à vapeur de mercure. On observe 4 raies : jaune, verte, bleu et violette (la dernière est peu visible par rapport aux autres) qui correspondent à des transitions atomiques des niveaux d'énergie discrets du mercure.

Enfin, on peut aussi observer le spectre du sodium mais on ne voit qu'une seule raie car la résolution de notre spectromètre n'est pas assez bonne pour séparer les deux raies de sodium. Ce qui limite la résolution dans cette manip, c'est la largeur de la fente.

4 Proposition de plan

I. Détermination de la constante de Rydberg

On va maintenant utiliser un spectromètre commercial pour caractériser le spectre d'une lampe à hydrogène et remonter à la constante de Rydberg.

Théorie :

La mécanique quantique nous donne une formule qui permet de relier la longueur d'onde à la constante de Rydberg : $\frac{1}{\lambda_{n,m}} = R_h \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ où $m > n$ et n et m sont les numéros des niveaux d'énergie.

De plus, on sait que le spectre visible de la lampe à hydrogène correspond à la série de Balmer : $n=2$ (il existe d'autres séries : $n=1$ Lyman ; $n=3$ Paschen).

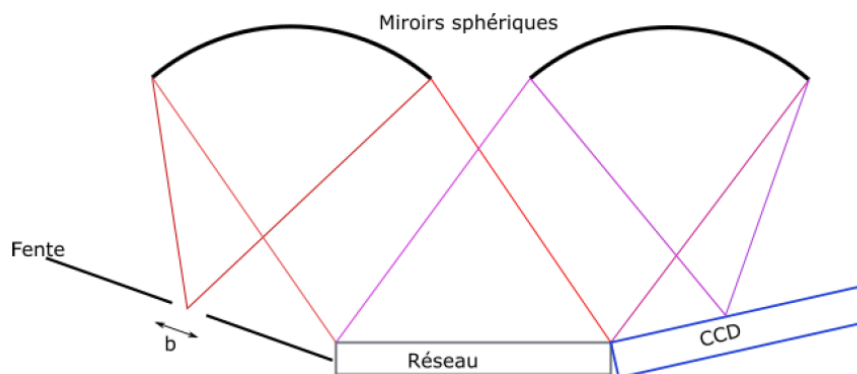
On va donc essayer de retrouver cette loi et d'en déduire une valeur de la constante de Rydberg.

Manip :

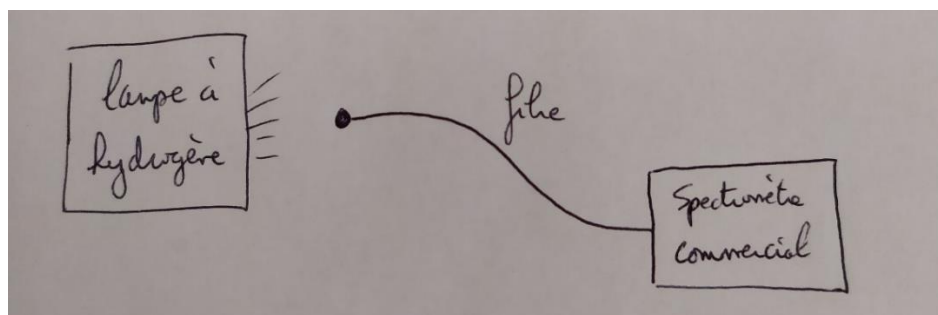
Matériels :

- Lampe à hydrogène
- Spectromètre commercial
- Fibre optique
- Pied + support pour placer la fibre optique devant la lampe

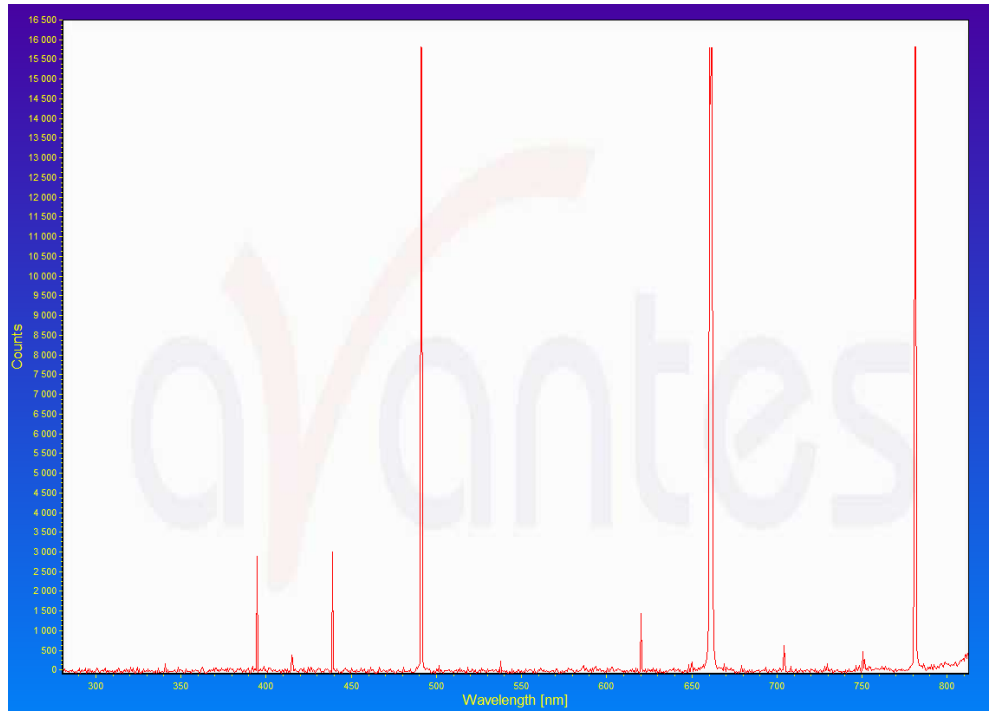
Le spectromètre commercial est composé d'une fente, d'un miroir sphérique à une distance $R/2=f$, un réseau en réflexion, un deuxième miroir sphérique qui focalise les rayons sur une barrette CCD. Un étalonnage du spectromètre permet de relier un pixel de la barrette CCD à une longueur d'onde. Le spectromètre était déjà étalonné.



Le schéma du montage est le suivant :



On obtient grâce à ce montage le spectre suivant :



On sait grâce à la théorie que les 4 premiers pics sont aux longueurs d'ondes suivantes :

m	3	4	5	6
λ en nm	656,1	486,0	433,9	410,1

On repère donc les quatre pics d'intensité qui sont proches de ces longueurs d'onde et on trace l'inverse de la longueur d'onde en fonction de $1/m^2$, le coefficient directeur de la droite sera $-R_h$. Pour les incertitudes, j'ai zoomé sur les pics et j'ai pris la largeur à mi-hauteur comme incertitude sur la longueur d'onde, je les ai ensuite propagées pour avoir l'incertitude sur $1/\lambda$ et en les prenant en compte dans la régression linéaire de Igor, on obtient :

$$R_{h,exp} = (1,07 \pm 0,02) \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$R_{h,th} = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Dans ce spectromètre, c'est la résolution du capteur CCD qui va limiter la résolution du spectromètre.

Remarques :

- Il n'est pas évident d'obtenir le quatrième pic, il faut placer la fibre le plus proche possible de la lampe à hydrogène et ne pas hésiter à se déplacer de gauche à droite ou de haut en bas pour avoir quelques choses de plus significatif
- Il ne faut pas prendre en compte les autres pics qui restent présents lorsque l'on retire la lampe car ce sont des pics qui sont dû à d'autres molécules comme O_2 de l'air.
- Ne pas hésiter à modifier les paramètres d'acquisition du spectromètre : augmenter le moyennage pour réduire le bruit, augmenter le temps d'acquisition pour avoir des pics plus intenses.
- J'ai surement surestimé mes incertitudes car j'avais oublié de zoomer sur le spectre en live.
- Attention, on avait l'impression d'avoir un décalage de longueur d'onde pour les valeurs mesurées : peut venir de l'étalonnage qui n'est plus correct.

II. Réseau optique : détermination de la longueur d'onde moyenne du doublet du sodium

On va maintenant s'intéresser à la détermination du spectre de la lampe à vapeur de sodium. Pour cela, on va utiliser un goniomètre afin de déterminer la longueur d'onde moyenne du doublet du sodium. Un goniomètre permet de mesurer la déviation d'un rayon lumineux par un dispositif optique (ici un réseau).

Matériels :

- Goniomètre
- Réseau de 600 fentes/mm
- Miroir plan
- Support élévateur
- Lampe à vapeur de mercure
- Lampe à vapeur de sodium

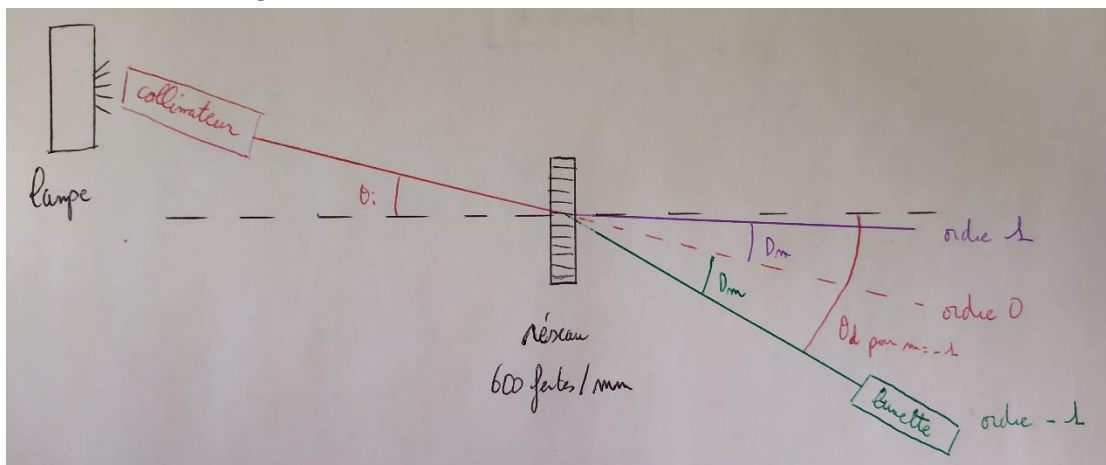
Il a été préalablement réglé (cf document réglage goniomètre) :

- Mise au point du réticule pour que l'œil n'accomode pas (oculaire)
- Réglage de l'objectif en faisant l'auto-collimation du réticule
- Réglage de l'orthogonalité de la lunette et du collimateur
- Réglage de la taille de la fente (assez fine)
- Réglage du collimateur afin d'avoir l'image net de la fente à travers la lunette

Étalonnage en préparation du goniomètre avec une lampe à vapeur de mercure :

Le but de cet étalonnage est d'associer la mesure d'un angle de déviation minimale à une longueur d'onde.

Le schéma du montage est le suivant :



Pour faire l'étalonnage, on utilise la formule des réseaux qui donne :

$$\sin(\theta_d) = \sin(\theta_i) + m \frac{\lambda}{a} \quad \text{où } m : \text{ordre et } a : \text{pas du réseau}$$

On peut la récrire : $2 \sin\left(\frac{D_m}{2}\right) = m \frac{\lambda}{a}$ où $D_m = \theta_d - \theta_i$: angle de déviation minimale

Afin de réduire les incertitudes, on mesure l'angle entre l'ordre 1 et l'ordre -1 qui vaut donc $2D_m$, il suffit ensuite de tracer la courbe d'étalonnage qui donne λ en fonction de $\sin\left(\frac{D_m}{2}\right)$.

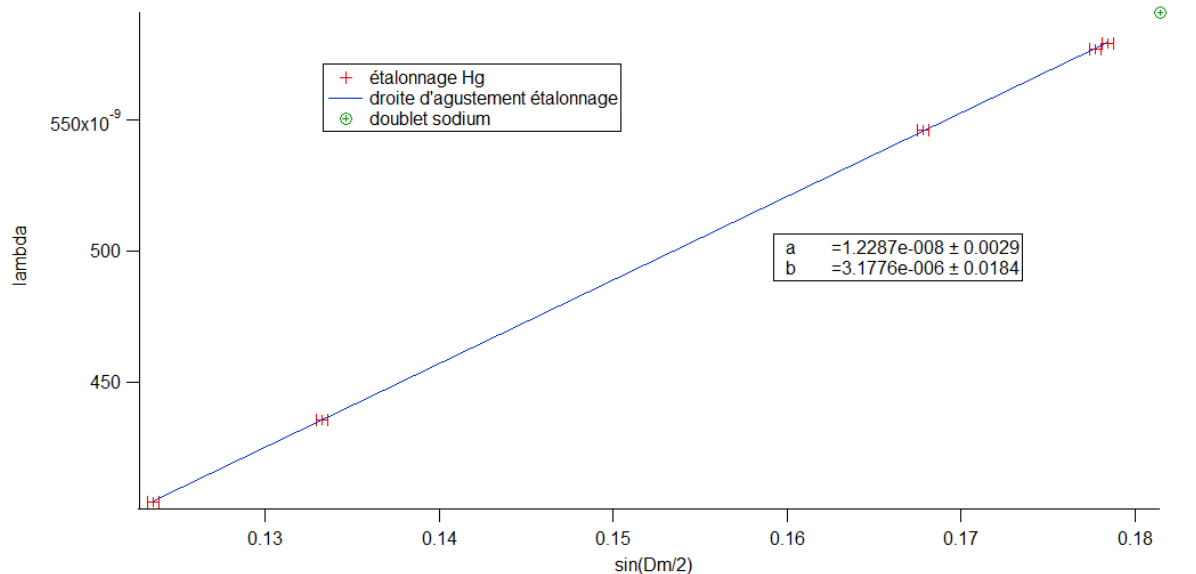
La pente de cette droite vaut $2a$ on peut donc en déduire une valeur précise du pas du réseau.

Les longueurs d'onde des raies du mercure sont tabulées :

raie	jaune	jaune	verte	bleue	violette
λ en nm	579,1	577,0	546,1	435,8	404,7

Pour mesurer l'angle de déviation minimale, il faut regarder à travers la lunette la raie que l'on souhaite étudier, on fait tourner le réseau tout en suivant la raie avec la lunette et lorsque la raie « rebrousse chemin », on est à l'angle de déviation minimale.

La courbe d'étalonnage que l'on a obtenu est la suivante :



Mesure de la longueur d'onde moyenne du doublet du sodium $\lambda_{0,Na}$:

Il suffit maintenant de mesurer l'angle de déviation minimale pour la raie du sodium (en réalité c'est un doublet mais on ne peut pas séparer les deux raies avec ce spectromètre) et d'en déduire la longueur d'onde $\lambda_{0,Na}$ grâce à l'étalonnage.

On a obtenu $\lambda_{0,Na,exp} = 590 \pm 3$ nm et la valeur tabulée : $\lambda_{0,Na,th} = 589,294$ nm

L'incertitude est une nouvelle fois trop élevée car je n'avais pas mesuré le bon angle avec le goniomètre, le goniomètre a une précision inférieure au nm.

Ce qui limite la résolution de ce spectromètre est à la fois le pas du réseau car il faut que le pas du réseau soit assez faible pour que les angles de déviation minimale soient les plus grands possibles. La largeur de la fente est aussi un élément limitant, il faut donc la réduire au maximum tout en gardant une luminosité suffisante pour voir les raies.

Ce spectromètre ne nous a pas permis de séparer les deux raies du sodium donc on va utiliser un spectromètre avec une meilleure résolution : interféromètre de Michelson.

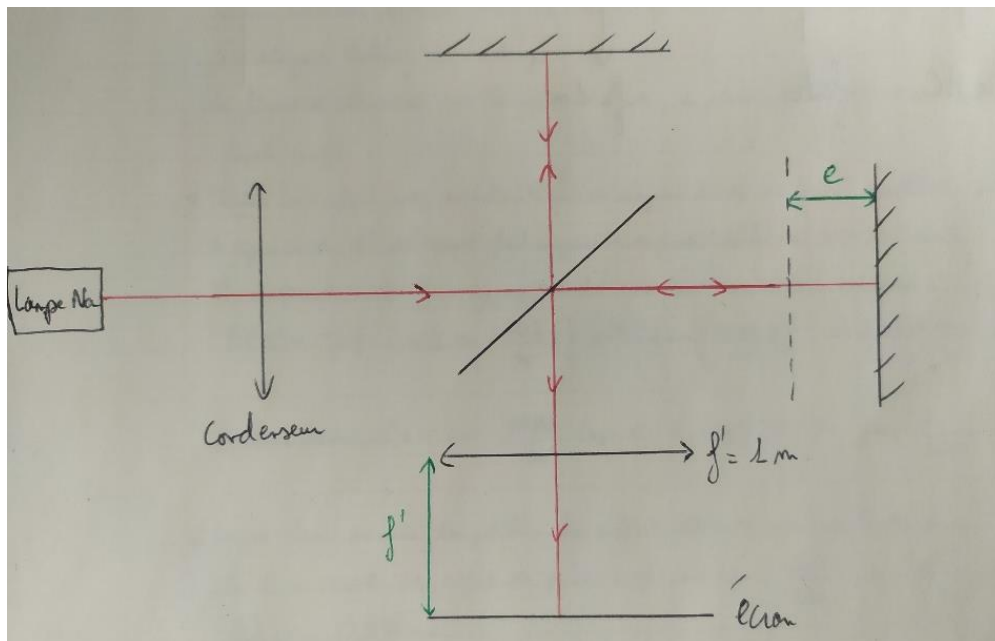
III. Interféromètre de Michelson : mesure de l'écart du doublet du sodium

On va donc utiliser l'interféromètre de Michelson réglé en lame d'air pour mesurer l'écart entre les deux raies du sodium.

Matériels :

- Interféromètre de Michelson
- Laser + objectif de microscope qui peut se viser sur le laser
- Ecran
- Support élévateur
- Lampe à vapeur de sodium
- Condenseur
- Lentille de focale de 1m
- Dépoli

Le schéma du montage est le suivant :



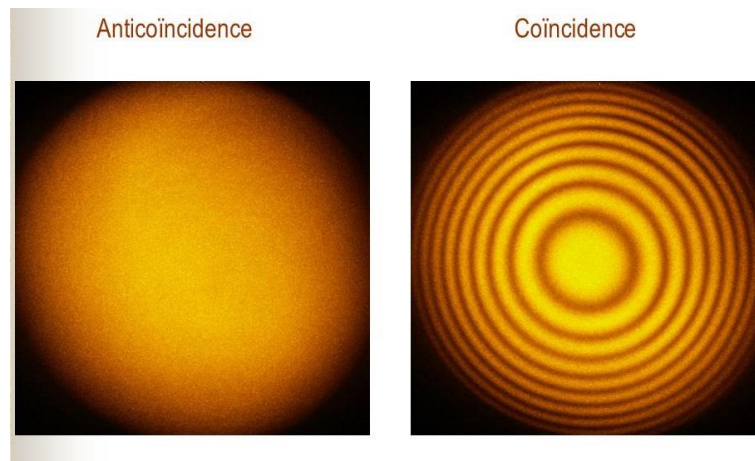
Théorie :

On pose les grandeurs suivantes : les deux longueurs d'onde du doublet du sodium sont λ_1 et λ_2 avec $\lambda_2 > \lambda_1$, la longueur d'onde moyenne est : $\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ et l'écart spectrale est : $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$.

On considère que l'on a deux ondes monochromatiques de longueur d'onde λ_1 et λ_2 incohérentes entre elles. L'expression de l'éclairement est donc la suivante :

$$E(M) = 2E_0 \left[1 + C(e) \cos \left(\frac{4\pi e}{\lambda_0} \right) \right] \text{ où } C(e) = \cos \left(\frac{2\pi \Delta\lambda e}{\lambda_0^2} \right) : \text{terme de contraste}$$

On va donc observer un enchainement de coïncidences (terme de contraste vaut 1 donc on observe très bien les figures d'interférence) et d'anti-coïncidences (terme de contraste vaut 0 donc l'image est uniforme).



On choisit d'observer les anti-coïncidences car elles sont plus simples à repérer que les coïncidences.

Il y a anti-coïncidences quand $C(e) = 0$ donc quand $x_p = \frac{\lambda_0^2}{2\Delta\lambda} p + cst$ où x_p : position du miroir mobile et p : ordre d'interférence

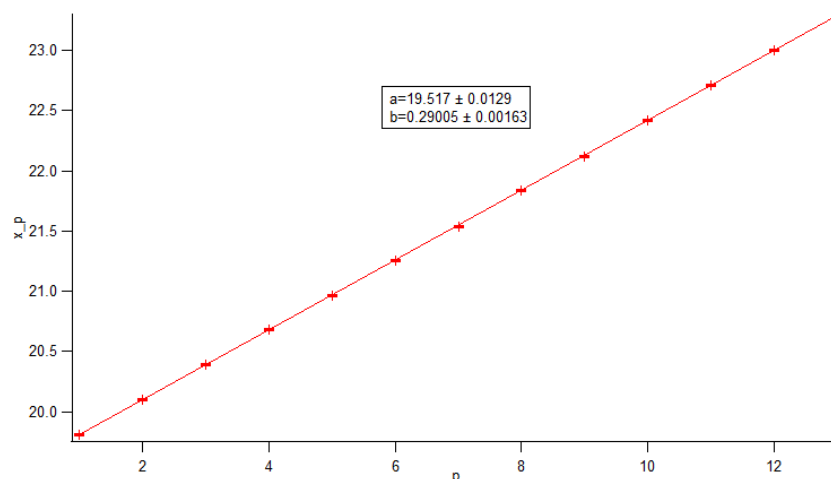
On va donc mesurer les différents x_p et tracer x_p (en mm) en fonction de p . Le coefficient directeur de la droite va nous permettre de remonter à l'écart spectral $\Delta\lambda$.

Manip :

Il faut régler dans un premier temps le Michelson en lame d'air (cf Physique Expérimental), ne pas montrer les réglages du Michelson dans ce montage car ce n'est pas l'objectif du montage.

Ensuite on se place au contact optique et on s'éloigne petit à petit de celui-ci en repérant les anti-coïncidences. En live, on peut repérer qu'une seule de ces anti-coïncidences à un ordre où cela est très facilement repérable (vers l'ordre 5).

On obtient la courbe suivante :



On obtient donc, avec la régression linéaire, l'écart spectrale :

$$\Delta\lambda_{\text{exp}} = 0,599 \pm 0,004 \text{ nm}$$

C'est très proche de la valeur tabulée : $\Delta\lambda_{\text{th}} = 0,597 \text{ nm}$

Pour le calcul des incertitudes, on rentre l'incertitude de la mesure de x_p sur Igor et ensuite on propage les incertitudes de la pente pour obtenir l'incertitude de l'écart spectral.

La résolution de l'interféromètre est limitée par le déplacement du miroir mobile car au bout d'un moment, on ne plus distinguer précisément où sont les anti-coïncidences.

5 Conclusion du montage, ouverture possible

Ce montage a permis de montrer l'utilisation de différents spectromètre (les deux premiers à réseau et le dernier par interférence) avec des résolutions très différentes. Il est donc important de retenir qu'il faut adapter le choix du spectromètre à ce que l'on souhaite observer (exemple : pour observer le doublet du sodium, il faut une très bonne résolution).

6 Autres manips, alternatives pour le montage

Une autre manip est possible pour ce montage : cavité confocale

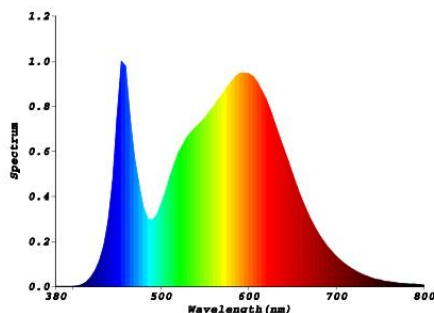
7 Questions du correcteur

Correction étudiante :

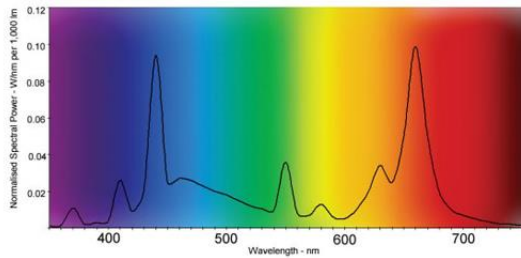
- Pourquoi le prisme est dispersif ? car son indice optique dépend de λ (loi de Cauchy)
- Comment fonctionne une lampe QI ? Un fil qui chauffe. Mais le métal de ce fil se dégrade en chauffant donc l'iode permet au fil de se « restaurer »
- Pourquoi les pics de l'hydrogène sont larges ? dû ici à la résolution du capteur
- Principe du capteur CCD ? C'est un semi-conducteur qui va libérer des électrons avec l'apport d'énergie lumineuse et qui vont être ensuite converti en courant (capteur quantique)
- Comment savoir si les autres pics sont bien ceux de O₂ ? On peut comparer avec les valeurs tabulées
- Pourquoi on envoie une image à l'infini dans le goniomètre ? pour se placer en régime de diffraction de Fraunhofer exacte et car l'œil accommode mieux
- Expliquer comment on a fait l'étalonnage du goniomètre ? cf plus haut
- Comment on éclaire le Michelson avec la lampe à vapeur de sodium ? on place un condenseur pour avoir le maximum d'anneaux (i : angle d'incidence assez grand), on observe les interférences à l'infini
- Les anti-coïncidences dépendent de i ? Oui mais cela n'a pas un gros impact sur nos mesures car le brouillage des franges se fait sur une petite zone de x et que les variations dû à i sont comprises dans cette intervalle

Prof :

- Pourquoi on ne peut pas résoudre le doublet du sodium avec le prisme ? car les angles de dispersion des deux longueurs d'onde sont quasiment identiques et la largeur de la fente est trop grande
- A quoi ressemble de spectre du Néon, LED ? pour la LED on a placé le spectromètre devant les LED du plafond de la salle et on a obtenu un spectre de cette allure :



Le pic à droite est dû à un traitement au phosphore
Pour les néons on a un spectre avec des raies :



- On voit quel ordre de diffraction pour le spectromètre commercial ? on ne voit surement que l'ordre 1 si le réseau est blazé
- Détailler la composition du collimateur du goniomètre ? une fente et une lentille convergente
- Comment avoir un angle de diffraction suffisant ? on diminue le pas du réseau où on regarde des ordres supérieurs, ici l'angle est déjà élevé à l'ordre 1 car le pas du réseau est assez faible
- Quelle est l'éclairage du Michelson, ce que l'on observe ? cf correction étudiante

Manip surprise :

Mesurer la résistance de sortie R_s du GBF avec une boîte à décade, GBF et un multimètre.

On envoie un signal continu de tension E au circuit ouvert (pour être plus précis) avec en série le GBF et la boîte à décade de résistance variable R . On mesure avec le multimètre la tension aux bornes de la boîte à décade qui est : $U = \frac{R}{R+R_s} E$.

On remarque que pour $R=R_s$, $U=E/2$ donc on fait varier R jusqu'à obtenir une tension $U=E/2$.

8 Remarques importantes du correcteur

- Absolument parler de résolution
- La manip d'introduction est intéressante
- Bien parler de ce que l'on observe et de ce que l'on fait pour le goniomètre car ce n'est pas du tout visuel pour le jury
- Bien distinguer précision, résolution et incertitude
- Les trois manip logent normalement en 30min
- Ne pas faire la manip du Czerny-Turner car c'est assez dur à faire et ça ne marche pas très bien
- Être au fait des spectres usuels des lampes (LED, Ne, vapeurs, QI, ...)

9 Bibliographie pour construire la leçon

- Physique expérimentale aux éditions De Boeck (celui d'ALD) (Rydberg, Michelson)
- Optique expérimentale – Sextant (réseau, explications Michelson)