

MP10 - SPECTROMÉTRIE OPTIQUE

5 Novembre 2015

Un spectre hante l'Europe : le spectre du communisme.
MARX

Flora AUBREE & Guillaume BLOT

Commentaires

La mesure de longueurs d'ondes est au centre du sujet. Dans cette optique, il ne faut pas oublier d'aborder la notion de résolution des appareils de mesure. Il faut également penser aux différents paramètres pouvant améliorer la détermination (diminution des incertitudes).

Le jury souligne que le principe de fonctionnement et les caractéristiques d'utilisation de tout appareil de mesure utilisé doivent être connus (en particulier : le pouvoir de résolution).

Le prisme à vision directe doit être réservé pour des observations qualitatives.

Lors de la réalisation du spectromètre à réseau, il faut se rappeler que la mesure des angles de déviation au goniomètre est bien plus précise que le simple pointé des raies au crayon sur un écran. Toutefois, cette deuxième approche a le mérite d'être plus visuelle et sans doute plus pédagogique.

Si le candidat utilise un réseau éclairé en incidence normale, il doit s'assurer de la bonne réalisation expérimentale de cette incidence.

Bibliographie

- *Duffait d'optique* → Construction d'un spectro, mesure de la constante de Rydberg, doublet du sodium.
- *Sextant* → Longueurs d'onde des lampes à vapeur usuelles.

Expériences

- ☛ Spectre de deux lumières « apparemment » jaunes.
- ☛ Construction et caractérisation d'un spectroscopie à réseau.
- ☛ Mesure de la constante de Rydberg.
- ☛ Écart entre les raies du doublet du sodium.
- ☛ Spectre d'émission d'un LASER.

Table des matières

1	Spectromètre à réseau.	2
2	Détermination de la constante de Rydberg	3
3	Écart entre les longueurs d'onde du doublet du sodium	5
4	Spectre d'un LASER	5

Introduction

On met en entrée du spectroscope construit en partie 1 deux lumières jaunes : une QI et une lampe au sodium (on tourne le variateur de la QI de sorte que les deux jaunes se ressemblent). Sur l'écran, on observe des figures différentes.

Bien qu'il soit capable de discerner les couleurs, l'œil humain est très limité dans sa caractérisation de la lumière. Pour preuve, on voit deux lumières de la même couleur (jaune) alors qu'elles ont un comportement différent lorsqu'elles traversent un système optique. Elles ont en fait un spectre différent.

D'autre part, la connaissance du spectre d'une lumière peut être utile au chimiste pour déterminer la composition d'une solution et au physicien pour mesurer diverses grandeurs¹ et même des constantes fondamentales.

1 Spectromètre à réseau.

➤ Duffait p122

On construit le spectroscope à réseau présenté figure 1 (on choisit le montage simplifié, qui ne contient qu'une seule lentille). C'est un montage de diffraction de Fraunhofer.

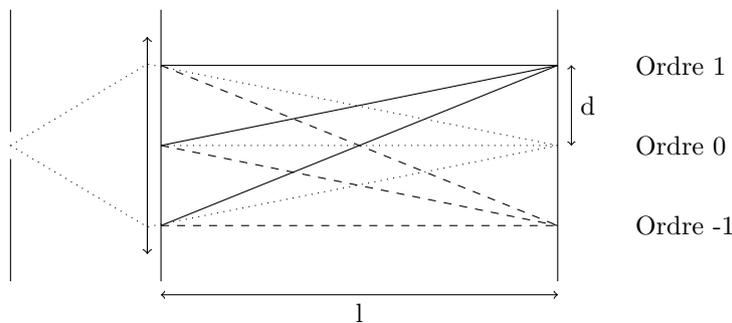


FIGURE 1 – Schéma du spectromètre à réseau en montage simplifié. Une seule longueur d'onde est représentée.

L'expérience suivante permet de vérifier la formule des réseaux : $\sin(i) - \sin(i') = -n\lambda k$ avec n l'inverse du pas du réseau, k l'ordre, $i = 0$ et $i' = \arctan(\frac{d}{l})$. Les longueurs d et l sont définies figure 1.

Vérification de la formule des réseaux

➤ Duffait p122

⊖ 3-4 minutes

Matériel : Une fente, une lentille ($f = 120$ mm), deux réseaux (100 traits/mm et 200 traits/mm), un écran dépoli² millimétré, une lampe à vapeur de mercure.

Expérience :

- Faire l'image de la fente sur le dépoli (sans le réseau), puis placer le réseau (100 traits/mm). S'assurer qu'il est bien éclairé en incidence normale.
- Mesurer l et la valeur de d (pour l'ordre 1) pour chaque longueur d'onde (connue) de la lampe à vapeur de mercure.
- Tracer $\sin(\arctan(\frac{d}{l}))$ en fonction de λ ⁽³⁾, constater la linéarité, au passage déterminer n (on en déduira une estimation de l'incertitude sur n , valeur inscrite sur le réseau⁴).
- Marquer sur le dépoli les raies correspondant à l'ordre 2. Passer au réseau 200 traits/mm. Constater que l'ordre 2 du premier réseau est placé à l'ordre 1 du deuxième réseau, aux incertitudes près.

1. Voir conclusion.

2. Un écran dépoli permet d'avoir une image lumineuse, permettant de voir les ordres 1, 2 et 3 même en salle de classe. Les figures s'observent par transmission.

3. On trace toujours la grandeur qui a le moins d'incertitudes en abscisses.

4. En toute rigueur, il faut $N \gg 1$ mesures pour interpréter ceci comme une erreur de type A (statistique).

Remarque

Dans cette expérience la figure de diffraction est projetée et les angles mesurés « à la main ». C'est un choix pédagogique, car la mesure des angles serait plus précise au goniomètre.

Grandeur	Estimateur	Source d'incertitude	Incertitude	Distribution	Incertitude relative type
l	74.5 cm	Total			$\frac{u(l)}{l} = 0.004$
		Position du réseau sur la monture	0.5 cm	\square	
		Épaisseur du dépoli	0.2 cm	\square	
		Lecture	0.1 cm	\wedge	
d	6.0 cm^5	Total			$\frac{u(d)}{d} = 0.008$
		Épaisseur de l'image de la fente ($\times 2^6$)	$0.05 \text{ cm} (\times \sqrt{2})$	\square	
		Erreur de lecture ($\times 2$)	$0.1 \text{ cm} (\times \sqrt{2})$	\square	
i	0.129 rad	Erreur faite avec $\sin(\tan^{-1}(\frac{d}{l})) \approx \frac{d}{l}^7$			0.008

TABLE 1 – Budget d'incertitudes calculé grâce au logiciel GUM-MC.

Le budget d'incertitude, en plus de donner l'incertitude sur $\sin(\arctan(\frac{d}{l}))$ (0.009), montre qu'on ne peut pas prendre $\sin(\arctan(\frac{d}{l})) \approx \frac{d}{l}$.

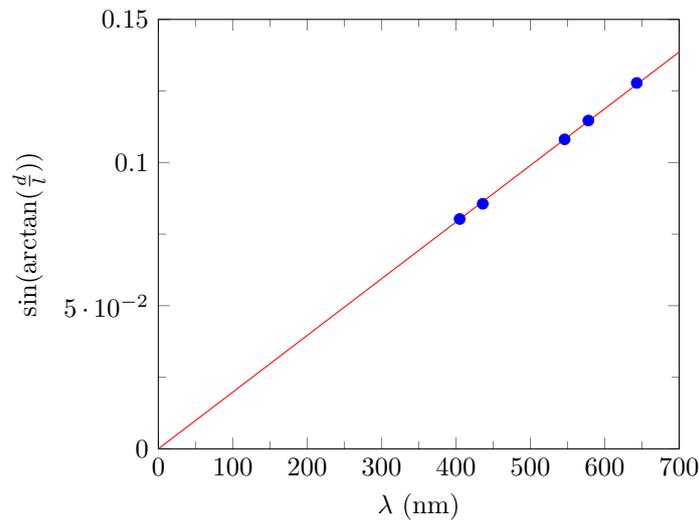


FIGURE 2 – Vérification de la formule des réseaux. La régression donne $n = 198$ traits/mm.

↓ Des industriels ont miniaturisé ce montage et proposent maintenant des spectromètres peu encombrants et performants.⁸

2 Détermination de la constante de Rydberg

↗ Duffait p134

Par mesure du spectre d'une lampe à vapeur d'hydrogène, on peut déterminer la constante de Rydberg.



5. On prend la plus petite valeur de d , car c'est celle qui aura la plus grande incertitude relative.

6. Pour l'ordre 0 et l'ordre 1.

7. Ceci est une erreur (qu'on pourrait sans problème corriger), elle n'a donc pas sa place stricto sensu dans un budget d'incertitudes. Il est toutefois commode de l'y placer, pour la comparer aux incertitudes relatives des diverses valeurs.

8. En réalité, les spectromètres commerciaux fonctionnent avec deux miroirs sphériques et un réseau blasé en réflexion.

Mesure de la constante de Rydberg

⚡ Duffait p134

⊖ 5-7 minutes

Matériel : Un spectromètre (le HR2000 donne de bons résultats⁹, il s'utilise avec le logiciel Spectra Suite¹⁰), une lampe à vapeur de mercure, une lampe à vapeur d'hydrogène.

Expérience :

- Étalonner le spectromètre avec une lampe à vapeur de mercure.¹¹
- Mesurer le spectre d'une lampe à vapeur d'hydrogène, et relever les longueurs d'onde des raies.¹²
- Tracer $\frac{1}{\lambda}$ en fonction de $\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}$.

Remarque

Pour l'étalonnage les longueurs d'onde des principales lampes à vapeur sont données par ⚡ Sextant p4.

L'étalonnage donne $\lambda = (0.2225 \pm 0.0008)i + 376.8 \pm 0.6$, où i est le numéro du pixel.

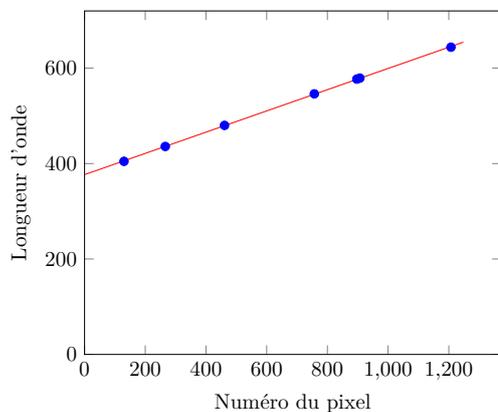
La théorie prévoit $\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ avec $n = 2$ pour toutes les longueurs d'onde dans le visible et $m \in \mathbb{N}^*$, $m > n$.

Les raies sont plus faciles à identifier avec le tableau 2, donné par ⚡ Duffait p134.

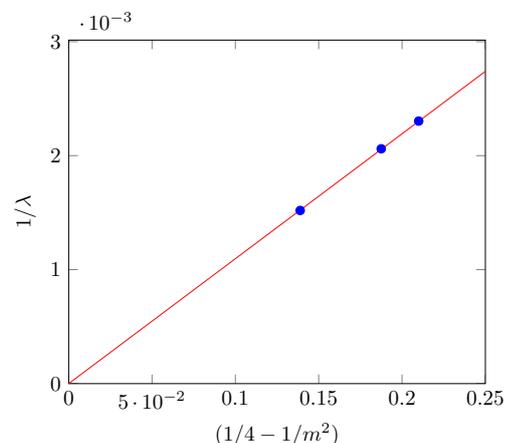
m	λ (nm)
3	656.3
4	486.1
5	434.1
6	410.2

TABLE 2 – Longueur d'onde dans le vide des raies de l'hydrogène.

Les incertitudes de cette mesure sont celles dues à la largeur d'un pixel du capteur (distribution rectangulaire, donc $u = \frac{1}{2\sqrt{3}}\text{px}$) et celle sur l'étalonnage. Ces incertitudes sont propagées sur tous les graphes par Régressi, jusqu'à la valeur de R_H .



(a) Étalonnage du spectromètre.



(b) Régression linéaire aboutissant à la valeur de la constante de Rydberg.

On trouve $R_H = (1.096 \pm 0.001) \times 10^5 \text{cm}^{-1}$ ($k = 2,95\%$).

La valeur attendue théoriquement est $R_H = 109677 \text{cm}^{-1}$.

↓ *Le spectromètre à réseau a ses limites en résolution. Pour résoudre des doublets ou mesurer des largeurs spectrales, on peut utiliser la spectrométrie par transformée de Fourier.*

9. Le HR4000 a une plage trop faible.

10. Ce logiciel ne fonctionne pas sur les PC récents (numéros 1, 6, 8 et 9).

11. Le spectromètre utilisé a été calibré par son constructeur. On peut aussi utiliser les coefficients de calibration indiqués sur le boîtier, à rentrer directement dans le logiciel Spectra Suite.

12. La lampe contient du Deutérium plutôt que de l'hydrogène (pour limiter la diffusion à travers le verre), mais la différence est négligeable.

3 Écart entre les longueurs d'onde du doublet du sodium

↗ Duffait p76

Un cas particulier de spectrométrie par transformée de Fourier est le dédoublement du doublet du sodium.

Remarque

On peut aussi mesurer le doublet jaune d'une lampe à vapeur de mercure, à condition de l'isoler grâce à un filtre interférentiel.



Mesure de l'écart entre les raies du doublet du sodium

↗ Duffait p76

⊖ 1-3 minutes

Matériel : Une lampe à vapeur de sodium, un interféromètre de Michelson, un LASER He-Ne, un objectif de microscope¹³, un condenseur, deux lentilles ($f = 100$ mm et $f = 200$ mm), un écran dépoli¹⁴.

Expérience :

- Régler le Michelson en lame d'air.
- Mettre en entrée du Michelson la lampe à vapeur de sodium, avec le condenseur. Faire l'image des anneaux (localisés à l'infini) avec la lentille $f = 200$ mm quelque part, et agrandir cette image sur le dépoli avec la lentille $f = 100$ mm.
- Charioter, observer le brouillage des interférences (on peut voir 3 brouillages de chaque côté du contact optique). Mesurer le chariotage $5\Delta e$ ¹⁵ pour parcourir 6 brouillages, de part et d'autre du contact optique.

On utilise $\Delta\lambda = \frac{\lambda_m^2}{2\Delta e}$, avec $\lambda_m = 0.589 \mu\text{m}$ mesuré avec le spectro de la partie 2. On trouve $\Delta e = (290 \pm 1) \mu\text{m}$ ($k = 1$, 67%), donc $\Delta\lambda = (0.598 \pm 0.005) \text{nm}$ ($k = 2$, 95%). La valeur théorique est $\Delta\lambda = 0.5974$ nm.

Calcul de l'incertitude :

$$u(\Delta\lambda) = \sqrt{\left(\frac{2\lambda_m}{\Delta e}\right)^2 (u(\lambda_m))^2 + \left(\frac{\lambda_m^2}{2\Delta e^2}\right)^2 (u(\Delta e))^2}$$

↓ *Il est possible d'avoir une précision encore meilleure en mettant à profit des interférences à ondes multiples. Cela peut s'avérer utile pour mesurer le spectre d'un LASER.*

4 Spectre d'un LASER

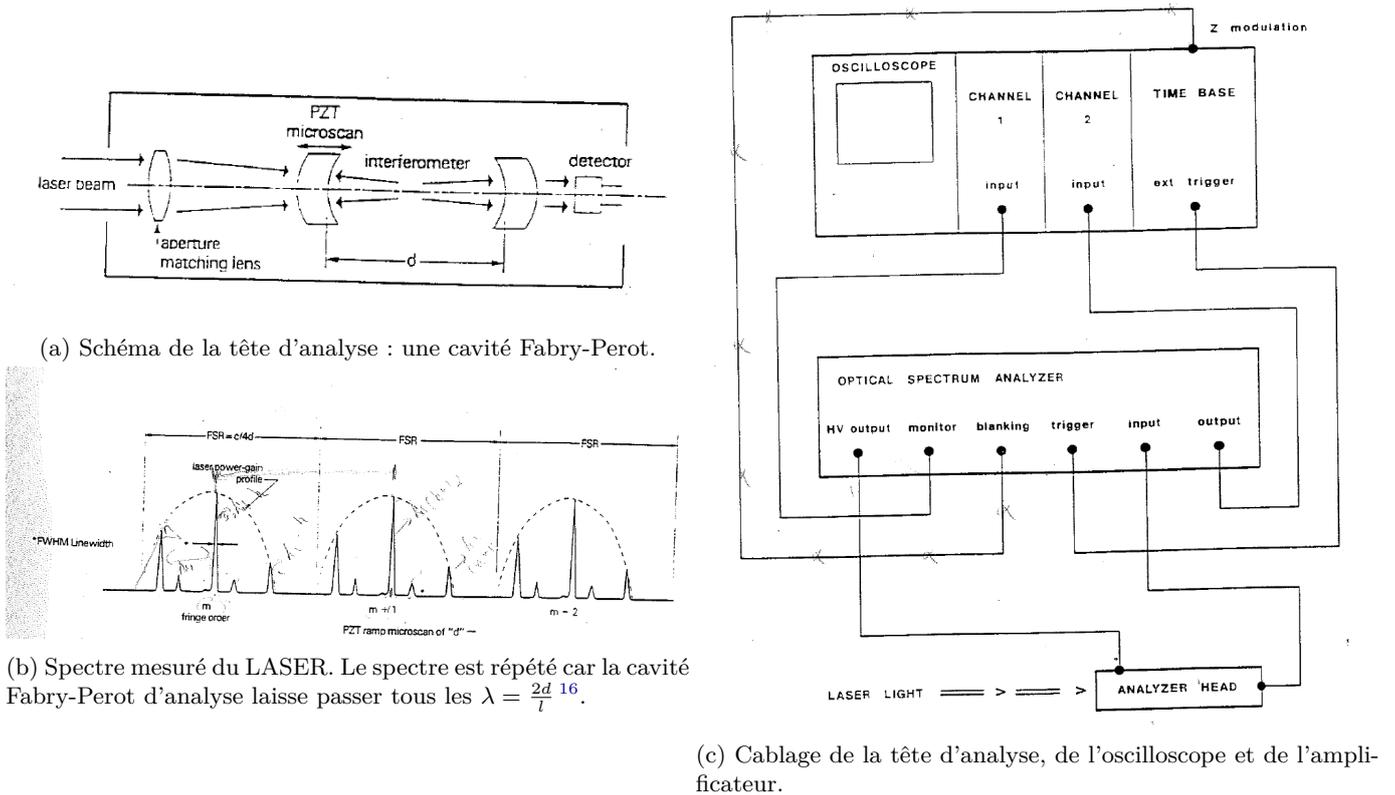
Le spectre d'un LASER est déterminé par deux facteurs : la raie du milieu amplificateur et la fonction de transfert de la cavité. Grâce à une cavité Fabry-Perot (figure 4a), il est possible de mesurer le spectre d'émission du LASER (figure 4b) et d'en déduire des caractéristiques de ces deux composants du LASER.

La longueur de la cavité Fabry-Perot d'analyse est contrôlée par une tension électrique. Un détecteur est placé après cette cavité, de sorte que la lumière qui lui parvient vérifie $2d = n\lambda$, avec d la longueur de la cavité, λ la longueur d'onde et $n \in \mathbb{N}$. Ainsi, en faisant varier la tension envoyée à la cavité d'analyse, on peut sélectionner la longueur d'onde mesurée par le capteur, ce qui permet de tracer le spectre de la lumière incidente.

13. Il y en a un, très pratique, qui peut se monter directement sur le LASER.

14. Même remarque que pour la première expérience : un dépoli permet d'avoir une plus grande luminosité.

15. Entre 6 poteaux, il y a 5 intervalles.

FIGURE 4 – Figures relatives à la cavité courte focale d'analyse spectrale (P17.11) ¹⁷.

Mesure du spectre d'un LASER

Doc du P17.11

⊖ 1-5 minutes

Matériel : La cavité courte focale d'analyse spectrale (P17.11), son amplificateur, un oscilloscope, un LASER (vert ou rouge, peu importe).

Expérience :

- Cabler la tête d'analyse, l'amplificateur et l'oscilloscope comme indiqué figure 4c.
- Envoyer le LASER dans la tête d'analyse. Il est important que le LASER soit EN TRAIN DE CHAUFFER ¹⁸ si on veut observer la largeur de raie du milieu amplificateur. Il faut donc allumer le LASER au cours du montage.
- Observer le spectre sur l'oscilloscope (on peut, en première approche, régler tous les boutons de l'amplificateur au maximum).
- Mesurer l'intervalle spectral libre (*FSR* défini figure 4b), en déduire la calibration ¹⁹.
- Mettre l'oscilloscope en mode « persist ». Observer la raie du milieu amplificateur.
- Mesurer l'écart entre deux raies, en déduire la longueur de la cavité.
- Mesurer un majorant de la largeur de raie ²⁰.

16. Par chance (ou plutôt par astuce), les spectres ne se recouvrent pas (i.e. la largeur spectrale du LASER est plus petite que l'intervalle spectral libre).

17. Disponibles dans la doc du P17.11 : <http://www.ens-lyon.fr/DSM/AGREG-Physique/oral/Notices/N017-011.pdf>

18. Le chauffage du LASER change la taille de la cavité LASER, ce qui déplace les raies émises par le LASER.

19. Un *FSR* correspond à 2 GHz d'après la documentation.

20. On ne peut avoir qu'un majorant car la largeur de raie est due à la finesse de la cavité LASER et à celle de la cavité d'analyse.

Remarque

L'avantage de cette expérience est que son temps est très modulable. En effet, les différentes exploitations sont indépendantes.

Les raies émises par le LASER sont issues de la cavité LASER, elles vérifient donc $2e = n\lambda = n\frac{c}{\nu}$ (avec e la longueur de la cavité LASER), donc $\nu = n\frac{c}{2e}$, donc l'écart entre deux raies successives est $\Delta\nu = \frac{c}{2e}$, d'où $e = \frac{c}{2\Delta\nu}$ ²¹.

Conclusion

Dans ce montage, nous nous sommes intéressés à la fabrication et à l'utilisation de spectromètres. Tout d'abord, la construction d'un spectromètre à réseau et son utilisation avec une source de longueurs d'onde connues a permis de vérifier la formule fondamentale des réseaux. Ensuite, nous avons vu comment étalonner un spectromètre commercial, et se servir de cet étalonnage pour déterminer des longueurs d'onde inconnues, pour finalement remonter à la valeur d'une constante fondamentale. Pour dépasser les limites de résolution des spectromètres à réseau, la spectroscopie par transformée de Fourier a été utilisée pour déterminer l'écart entre les deux raies du doublet du sodium. Enfin, une spectrométrie par cavité Fabry-Perot a permis une résolution suffisante pour résoudre le spectre d'un LASER, et d'en déterminer quelques caractéristiques.

La spectrométrie peut également être utilisée pour étudier la composition chimique de certains objets (étoiles, solides²², solutions, gaz, ...), ainsi que pour mesurer diverses grandeurs (épaisseur d'une lame de verre²³, différence d'indices pour un cristal biréfringent uniaxe²⁴, ou même une température²⁵).

21. Rigoureusement, il s'agit du chemin optique dans la cavité.

22. cf LIBS (Spectroscopie sur plasma induit par LASER.)

23. Spectrométrie du blanc d'ordre supérieur sortant d'un Michelson (attention : pas de bibliographie disponible, voir le poly MP 26 « Mesure de longueurs » 2015). Pour cette expérience, on conseille une lamelle de microscope et le spectromètre HR4000.

24. ↗ Sextant p286, Duffait p145

25. Assurez-vous de maîtriser le sujet si vous en parlez.