
MP11 : Emission et absorption de la lumière

Louis Usala et Julie Limonet
30/11/21

Bibliographie

- 📎 *Physique expérimentale*, **Fruchard**
- 📎 *Physique expérimentale*, **Jolidon**
- 📎 *MP11*, **Yohann Faure**, perso.ens-lyon.fr/yohann.faure/
- 📎 *MP11*, **Tristan Jocteur**, perso.ens-lyon.fr/tristan.jocteur-monrozier-fabre/
- 📎 *MP11*, **Corentin Pacary**, perso.ens-lyon.fr/corentin.pacary/

Expériences

- * Spectre d'émission d'une lampe quartz-iode,
- * Détermination de la constante de Rydberg par mesure des raies d'émission de l'hydrogène au goniomètre,
- * Vérification des dépendances en concentration et longueur de cuve dans la loi de Beer-Lambert pour le permanganate de potassium.

Table des matières

1 Emission d'un spectre continu	2
2 Emission d'un spectre discret	3
2.1 Aspect théorique (à ne pas présenter pendant le montage)	4
2.2 Expérience	4
3 Absorption	6
3.1 Influence de la concentration	7
3.2 Influence de la longueur	8

Introduction

L'étude du rayonnement des matériaux est particulièrement intéressante pour les caractériser. En astrophysique par exemple, on n'a accès à des informations sur les astres que par le rayonnement qu'ils émettent dans notre direction. Cependant, ce rayonnement permet d'avoir une idée de la composition et la température du corps pour peu qu'il soit analysé avec les outils adaptés.

1 Emission d'un spectre continu

C'est une expérience semi-qualitative qui permet de mettre en évidence le caractère polychromatique de la lumière visible et la répartition inégale de l'énergie entre les différentes longueurs d'onde.

Expérience

Référence : Leçon de Yohann Faure

Matériel, description :

c.f. Figure 1

Etape 1 : On éclaire une fente avec une lampe quartz-iode et on en fait l'image sur un écran à travers une lentille. On observe un rectangle blanc et fin.

Etape 2 : On ajoute un prisme à vision directe juste après la lentille. On observe un rectangle élargi couleur arc-en-ciel.

Etape 3 : On retire temporairement le filtre anti-calorique et on place un spectromètre sur le chemin de la lumière. On observe sur ordinateur le spectre de la lumière émise par la lampe.

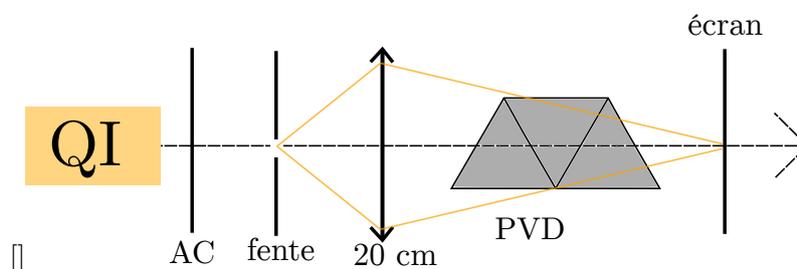


FIGURE 1

Attention

Il faut retirer la fibre optique du spectromètre et envoyer directement la lumière dans le boîtier. En effet, la fibre filtre certaines longueurs d'onde, ce qui éloigne le spectre obtenu d'un spectre de corps noir.

On cherche à comparer le spectre obtenu avec une référence. La loi de Planck donne une correspondance entre la luminance d'un corps à température T en fonction de la longueur d'onde considérée, dans le cadre du modèle du corps noir :

$$L = \frac{hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} \quad (1)$$

Le terme exponentiel étant très grand devant 1. (En effet, on s'intéresse à la zone de la courbe autour du maximum d'intensité. D'après la loi de Wien, à cette longueur d'onde, $\lambda T = 0.029 \text{ K m}$, d'où le terme exponentiel est de l'ordre de 10^2 .) On peut donc faire une régression linéaire sur les données récupérées en traçant $\ln(\lambda^5 L) = f\left(\frac{1}{\lambda}\right)$. En théorie, on s'attend à avoir une droite d'équation

$$\ln(\lambda^5 L) = \left(-\frac{hc}{k_B T}\right) \frac{1}{\lambda} + \ln(hc^2) \quad (2)$$

d'où on tire la température de la lampe en tant que corps noir grâce au coefficient directeur. Pour la régression, on pourra utiliser le code :

```
x=1/tab_lambda
y=np.log(tab_lambda**5*tab_L)
a,b=np.polyfit(x,y,deg=1)

plt.figure() # en echelle log (droite)
plt.plot(x, y, marker="+", linestyle="")
plt.plot(x, a*x+b)
plt.show()

plt.figure() # en echelle lineaire (courbe de corps noir)
plt.plot(tab_lambda, tab_L, marker="+", linestyle="")
plt.plot(tab_lambda, h*c**2/tab_lambda**5 * 1/(np.exp(h*c/tab_lambda*k*T)-1))
plt.show()

print(" temperature de corps noir : T=", -h*c/k/a )
```

La lampe QI n'émet pas de façon aussi homogène qu'un corps noir. On observe un pic d'absorbance et des chutes brutales d'intensité dans l'infrarouge et l'ultraviolet dues au passage dans la fibre optique.

Transition

La lampe quartz-iode émet un spectre continu dû aux interactions des atomes dans la matière. Cela dit, en prenant des éléments isolés, la mécanique quantique prévoit que les niveaux d'énergie soient discrets. Ainsi, le spectre observé n'est plus continu mais discret, et les longueurs d'onde observées ne caractérisent plus la température d'un corps mais directement les éléments qui le constituent !

2 Emission d'un spectre discret

Expérience quantitative permettant de déterminer la constante de Rydberg. C'est une constante empirique qui apparaît quand on relie les longueurs d'onde du spectre d'émission de l'hydrogène à des

différences d'inverses d'entiers. La mécanique quantique, développée après ces observations expérimentales, décrit le mécanisme conduisant à cette relation.

2.1 Aspect théorique (à ne pas présenter pendant le montage)

Découverte empirique

A la fin du XIX^e siècle, l'étude des raies spectrales de différents éléments permet de remarquer que les longueurs d'onde qu'ils émettent suivent une loi particulière : l'inverse de chaque longueur d'onde peut s'écrire comme une différence de deux inverses d'entiers au carré

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \equiv \frac{1}{\lambda_{n,m}}, \quad (n, m) \in \mathbb{N}^2, \quad n < m, \quad (3)$$

à une constante de proportionnalité R près qui est caractéristique de l'élément étudié. Les longueurs d'onde $\lambda_{n,m}$ sont classées en séries de même valeur de n . Les longueurs d'onde $\{\lambda_{n,m}\}$ pour n valant respectivement 1, 2, 3, 4, 5 et 6 sont appelées séries de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett, Pfund et Humphreys. Les raies émises par l'hydrogène dans le visible sont les 4 premières raies de la série de Balmer $\{\lambda_{2,3}, \lambda_{2,4}, \lambda_{2,5}, \lambda_{2,6}\}$.

Mécanique quantique

Les niveaux d'énergie d'un atome hydrogénoïde isolé sont quantifiés. La résolution de l'équation de Schrödinger pour ce problème à deux corps permet de déterminer les niveaux d'énergie du système. Ceux-ci sont indicés par un entier n (nombre quantique principal de l'électron) et les valeurs d'énergie correspondantes valent :

$$E_n = -\frac{Z^2}{n^2} \tilde{E} \simeq -13.6 \frac{Z^2}{n^2}, \quad (4)$$

où $\tilde{E} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 \left(1 + \frac{m_e}{m_N}\right)}$. m_e , m_N , Z sont la masse de l'électron, celle du noyau et le numéro atomique

de l'élément. Pour un même isotope d'un élément considéré, ces trois grandeurs sont toujours les mêmes (indépendantes de n). Un photon émis lors du passage entre deux niveaux a pour énergie :

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda_{n,m}} = E_m - E_n = Z^2 \tilde{E} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (5)$$

d'où

$$\frac{1}{\lambda_{n,m}} = \frac{Z^2 \tilde{E}}{hc} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = \frac{Z^2 m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c \left(1 + \frac{m_e}{m_N}\right)}. \quad (6)$$

On identifie ce résultat aux résultats expérimentaux, ce qui permet de trouver une expression théorique de la constante de Rydberg. On tire de cette expression des valeurs attendues pour certaines espèces : $R_{\text{hydrogène}} = 109\,677 \text{ cm}^{-1}$, $R_{\text{deutérium}} = 109\,707 \text{ cm}^{-1}$.

2.2 Expérience

On souhaite mesurer les longueurs d'onde d'émission de l'hydrogène à l'aide d'un goniomètre.

Expérience

Référence : c.f. Figure 2

Matériel, description :

Lampe à vapeur d'hydrogène, goniomètre, réseau en transmission (environ 1200 traits/mm).

Réglage :

- Pour la lunette autocollimatrice : régler l'oculaire à l'oeil de sorte à voir nets les objets lointains. Ensuite, coller un miroir derrière la lunette, allumer le rétro-éclairage du réticule et ajuster l'objectif de sorte que le réticule et son reflet soient nets en même temps.
- Pour le collimateur, éclairer la fente peu ouverte, la viser avec la lunette et régler le collimateur pour voir la fente dans le plan du réticule.
- Pour le réseau, installer le réseau au centre du goniomètre (éventuellement surélevé) et l'orienter de sorte que les angles de déviation de chaque ordre soient les mêmes à droite et à gauche. On pourra faire cette partie avec la lampe à vapeur de sodium (589.0 nm et 589.6 nm) et en profiter pour vérifier la valeur du pas du réseau.

Manipulation Remplacer la lampe à vapeur de sodium par celle d'hydrogène. Relever les valeurs des angles de déviation pour les différentes longueurs d'onde et les différents ordres. D'après la formule des réseaux, la lumière de longueur d'onde λ est déviée dans les directions θ telles que

$$\sin \theta = \frac{pn\lambda}{a}, \quad (7)$$

où $p \in \mathbb{Z}$ est l'ordre de déviation, $n = 1.000293$ est l'indice de l'air et a est le pas du réseau. On relève les angles de déviation des longueurs d'onde $\lambda_{2,3}$ (rouge), $\lambda_{2,4}$ (turquoise), $\lambda_{2,5}$ (bleu) et $\lambda_{2,6}$ (violet, peu visible), on en déduit les valeurs de longueur d'onde associées et fait la régression linéaire $\frac{1}{\lambda} = f\left(-\frac{1}{m^2}\right)$. La théorie prévoit :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right). \quad (8)$$

Le coefficient directeur de la droite trouvée est la valeur expérimentale de R_H .

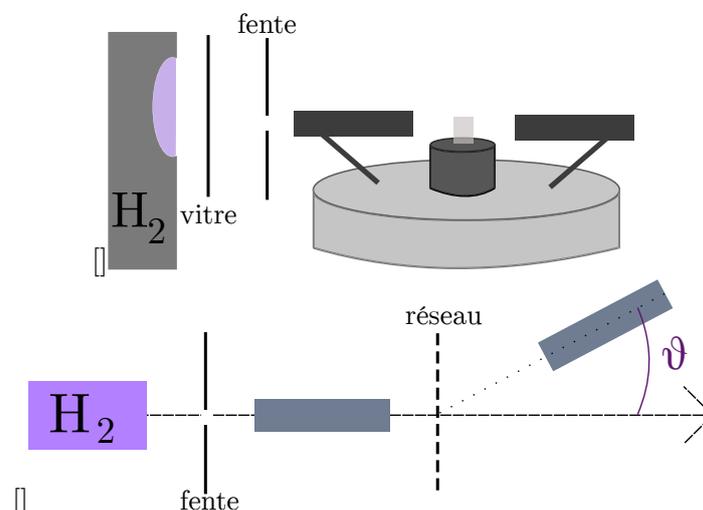


FIGURE 2 – Mesure de la constante de Rydberg de l'hydrogène avec un goniomètre.

Incertitudes :

D'après la formule de propagation des incertitudes

$$u(R_H) = R_H \sqrt{\left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(\theta)}{\tan \theta}\right)^2}. \quad (9)$$

La tangente vient du fait que l'on a un sinus au dénominateur de la formule sur R_H . Pour cette expérience, on prend $a = 1200 \text{ mm}^{-1}$, $\theta \lesssim 30^\circ$, $u(\theta) = 2 \frac{2}{60}^\circ$. L'incertitude majoritaire est celle sur le réseau. On la détermine avec l'étalonnage à partir des raies du sodium. Pour une incertitude de l'ordre de mm^{-1} , on obtient la valeur de R_H à $\pm 0.4\%$.

Analyse : les résultats sont obtenus avec une bonne précision (3 à 4 chiffres significatifs) mais ne permettent pas de conclure sur l'isotope utilisé (hydrogène ou deutérium). Ne pas hésiter à mettre en doute la détermination de $\lambda_{2,6}$, peu visible à l'oeil. n.b. Cette expérience peut aussi se faire avec un spectromètre en éclairant directement la fibre optique et en mesurant les longueurs d'onde numériquement. Puisque cet instrument est déjà utilisé dans la section suivante, il a été choisi de ne pas l'utiliser ici. Comparaison rapide des deux méthodes :

- Le spectromètre doit être étalonné en longueur d'onde (c.f. partie suivante).
- La précision sur λ est meilleure avec le goniomètre (à cause de la résolution du spectromètre et de la mesure unique : on n'a pas plusieurs ordres à mesurer).
- Le spectromètre permet de visualiser toutes les longueurs d'onde d'un coup à l'écran.
- La longueur d'onde $\lambda_{2,6}$ autour de 410 nm est plus visible au spectromètre qu'à l'oeil. Elle est peu intense mais on peut laisser un plus long temps de pose pour cette mesure afin de séparer ce rayonnement du bruit, quitte à faire saturer les autres longueurs d'onde.

n.b. Montrer au jury la raie mesurée en direct avant d'aligner le réticule dessus pour qu'elle soit plus visible.

Transition

Les deux expériences précédentes ont illustré comment la matière interagit avec la lumière en l'émettant. Mais si la matière ne pouvait qu'émettre de la lumière, cela ne présenterait aucun intérêt. Pour observer et mesurer la lumière, la matière doit aussi l'absorber.

3 Absorption

Cette section vise à tester la loi de Beer-Lambert :

$$A = \varepsilon lc, \quad (10)$$

avec ε le coefficient d'absorption molaire. De même qu'en chimie, on cherchera à vérifier la dépendance linéaire de l'absorbance en concentration. Mais on profitera du dispositif expérimental pour vérifier également la dépendance linéaire en longueur de cuve.

Expérience

Référence : Leçon de Tristan Jocteur, Figure 3

Matériel, description :

- Solutions de permanganate de potassium en concentrations variables entre $2 \cdot 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ et $2 \cdot 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$. (4 à 10 solutions, 50 mL de chaque sauf de la moins concentrée : 100 mL.)
- Spectromètre Ulice (logiciel Spid-HR) ou Ocean View 2000 (P17.15, logiciel SpectraSuite, pas l'autre plus récent). c.f. annexe sur l'étalonnage.
- Lampe QI, filtre AC, lentille $f = 100 \text{ mm}$, miroir plan, écran, potence, règle graduée 20 cm.
- Eprouvette graduée transparente de 100 mL, béchers et pipettes jaugées.

Noter le coefficient de proportionnalité entre volume (graduation de l'éprouvette) et hauteur de solution (règle graduée).

Réaliser le montage de la Figure 3. Faire en sorte que la lentille envoie un faisceau parallèle (image à l'infini d'un diaphragme placé en amont) et que le miroir renvoie ce faisceau verticalement au travers de l'éprouvette. Un second diaphragme pourra être ajouté entre le miroir et l'éprouvette.

Ajuster le temps de pose du spectromètre pour éviter toute saturation. Faire le blanc (bouton spécifique, éprouvette vide) et le noir (bouton spécifique, lampe QI éteinte). Passer en mode absorbance.

Pour chaque mesure, se placer dans la zone d'absorbance maximale du spectre et déterminer la plus haute valeur d'absorbance.

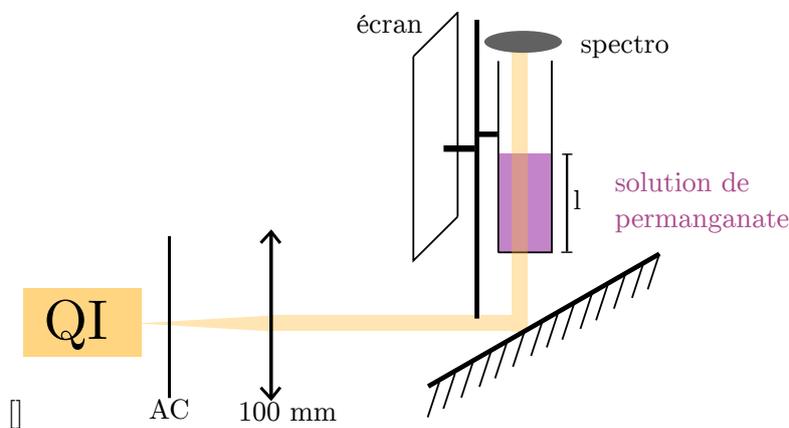


FIGURE 3 – Montage expérimental du spectrophotomètre "à la physicienne".

3.1 Influence de la concentration

Manipulation

Réaliser les mesures d'absorbance à hauteur de solution fixe (environ 20 mL) et pour des concentrations variables.

Résultat

Tracer la courbe $A = f(c)$ et interpoler par une droite affine. (L'ordonnée à l'origine sera interprétée comme un gain ou une perte de lumière due aux réflexions dans le verre qui changent avec le niveau

de liquide et le déplacement de l'éprouvette.) Le coefficient directeur obtenu est $l\varepsilon$. L'incertitude sur ε est donnée par :

$$u(\varepsilon) = \varepsilon \sqrt{\left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(l)}{l}\right)^2 + \left(\frac{u(c)}{c}\right)^2}. \quad (11)$$

Garder la valeur de ε pour la comparer à celle obtenue dans l'expérience suivante.

3.2 Influence de la longueur

Manipulation

Réaliser les mesures d'absorbance à concentration fixe ($2 \cdot 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$) et pour des hauteurs variables (tous les 10 mL entre 10 mL et 100 mL).

Résultat

Même démarche avec $A = f(l)$. Le coefficient directeur est $c\varepsilon$. Comparer les deux valeurs obtenues pour ε . Se préparer à justifier les incertitudes importantes, notamment par les pertes lumineuses variables dues aux réflexions sur le verre.

Manip surprise

Tracer le portrait de phase du pendule.

On va avoir besoin de la position et de la vitesse du pendule au cours du temps. On a un capteur au niveau du pendule permettant de déterminer l'une ou l'autre de ces grandeurs. On observe la sortie à l'oscilloscope. On observe le signal à l'oscilloscope. On a un signal par pendule, correspondant à la position du pendule. On a besoin d'observer la dérivée du signal, ce qu'on peut faire à l'oscilloscope.

Pouvez-vous mettre en évidence un phénomène de battement ?

Pour cela il faut coupler les oscillateurs. Un dispositif permet de relier les deux axes de rotation avec une constante de couplage plus ou moins importante (comme pour un pendule de torsion). Les deux pendules peuvent avoir une fréquence différente mais le phénomène de battements est d'autant plus visible que les fréquences sont proches. (Donc il faut mettre les masses au même niveau.) Idée : faire partir un pendule au plus bas sans vitesse initiale et l'autre avec un angle initial non nul (assez grand). Observer au cours du temps le pendule initialement arrêté qui se met à osciller avec une amplitude qui augmente puis revient à zéro périodiquement.

Questions

- **Vous avez cherché à interpoler le spectre de la QI par la loi de Planck. Vous avez trouvé un T ?** Température de près de 4000 K , température un peu grande, on attend plutôt 3300 K pour une lampe halogène, la forme ne correspond pas au corps noir.
- **Question sur les paramètres du fit**
- **Mécanismes d'émission d'une QI** Filament de tungstène chauffé par effet Joule jusqu'à incandescence. Le gaz d'halogène permet de régénérer le filament de tungstène. En effet, les halogénures peuvent réagir avec le tungstène. Les halogénures de tungstène ont tendance à se former à moyenne température et à se séparer à haute température. Or les zones de filament les plus chaudes sont les plus fines (car l'effet Joule se fait sur une section plus fine). Donc les halogénures de tungstène se forment là où la section est la plus grande (ce qui consomme le tungstène car la molécule formée se sublime) et ils se décomposent là où le filament est le plus fin. Ceci permet de régénérer le fil et d'augmenter la durée de vie de l'ampoule.
- **Spectre que vous avez sorti, spectre d'émission ? Vous caractérisez plutôt la lampe ou le capteur ?** On peut en faire une expérience qui caractérise l'absorbance et donc les éléments sur le chemin optique.

- **Qu'est-ce qu'on a dans la lampe à hydrogène ?** Hydrogène dissocié pour ces températures, et c'est ce qui correspond à la loi de Rydberg.
- **Quelle température pour cette lampe ?** Autour de 5000 K en ordre de grandeur. On chauffe par des décharges électriques, qui d'ailleurs permettent de séparer les molécules.
- **Moyen de connaître la température du gaz à l'intérieur de l'ampoule ?** On pourrait supposer l'équilibre thermo et fitter les intensités des différentes raies d'émission par la loi du corps noir.
- **Python, utilisation de np.zeros**
- **Pourquoi avoir ajouté plaque en verre ?** Pour filtrer rayonnement dans UV, pour protéger les yeux. Mais du coup questions sur point à limite uv. Peut être essayer la mesure sans la plaque. On aurait aussi pu utiliser un spectromètre.
- **Pourquoi avoir choisi la raie turquoise ?** Elle est plus visible que d'autre, et plus repérable dans les conditions de préparation, avec pas mal de lumière parasite.
- **Incertitudes sur le pas du réseau** On considère des longueurs d'onde déjà connues, celles du doublet du sodium. On compare le pas trouvé à celle indiquée par le constructeur, et comme cette dernière marchait mieux pour déterminer la constante de Rydberg, j'ai considéré que cette erreur était liée aux incertitudes.
- **Comment on lie les incertitudes au pas du vernier ?** On détermine l'angle à la minute d'arc. La visse de réglage fin permet cette précision
- **On devait voir quoi dans le gonio ?** Raie au premier ordre
- **Comment fonctionne un spectro ?** Reçoit lumière émise via fibre optique, elle est déviée vers un miroir arrondi qui les envoie à l'infini vers un réseau en réflexion qui sépare les différentes longueurs d'onde en sortie. Un autre miroir sphérique les envoie vers une barrette de capteur.
- **offset sur l'absorbance molaire et précisions sur incertitudes.** Offset peut être du aux nombreuses réflexions possibles. Incertitude de 0.1 sur la concentration. Fluctuations sur le spectre d'absorbance donne incertitude sur absorbance.
- **C'est quoi la politique pour ce genre d'incertitudes ?**
- **D'autres moyens de déterminer la dépendance en longueur ?** Avec un bécher penché. Un peu plus technique.
- **Réexplication du spectre de la QI** Spectre d'une lumière qui est émise par la QI, puis passe dans le condenseur qui absorbe. Puis absorbance d'une espèce (gaz dans l'ampoule ?).
- **Rapport avec nom Quartz-iode ?** Font partie catégorie lampe halogène, pour la QI c'est de l'iode. L'ampoule est en quartz, qui a une bonne résistance à la chaleur.
- **Si on enlève ces paramètres est-ce qu'on retrouverait un corps noir ?** Oui car on enlève des absorbances mais dépend également du coefficient d'émissivité (voir BUP).
- **Comment on passe d'un spectre discret à un spectre continu ?** Plasmas dense et donc interactions entre les atomes. Energie cinétique qui forme un continuum.
- **Questions sur l'interpolation** On montre que l'interpolation marche pour le spectre du soleil, même sur une plus petite étendue de λ .

Remarques

- Attention sur les graph Python à utiliser des couleurs qui sont distinguables.
- Eprouvette un peu penchée, système pas parfaitement aligné
- Un peu gênant d'enlever et de remettre l'éprouvette. Mais obligé pour les concentrations différentes
- Saturation à plus haute concentration assez intéressant niveau physique, vaut le coup d'en discuter.
- Raie turquoise un peu décevante car peu d'intensité, on veut en prendre plein les yeux.
- Sinon c'était bien

Annexe : étalonnage du spectromètre

Pour étalonner un spectromètre, il faut savoir sur quels pixels de la barette CCD du spectro tombent quelques longueurs d'onde connue puis en déduire par une interpolation (fit) polynomiale la longueur d'onde des rayonnement tombant sur tous les autres pixels.

On commence par chercher des longueurs d'onde connues. Pour ce faire, on utilise une lampe dont les raies spectrales sont connues. (Pour quelques valeurs connues, c.f. **Jolidon** ou les valeurs ci-dessous.) La lampe à vapeur de mercure et cadmiud $Hg-Cd$ est pratique car elle a plein de raies dans le visible. *Code triche* : si on cherche à déterminer les longueurs d'onde des raies d'une autre lampe (hydrogène par exemple), on peut ajouter aux raies d'étalonnage celles de la lampe en question et on est assuré de tomber juste pour les mesures. De toute façon l'incertitude du spectromètre est plus grande que celle sur la précision des lampes spectrales : on ne peut même pas séparer le doublet du sodium (sauf avec Ocean View 4000). Mais l'honnêteté intellectuelle fera choisir aux lecteurices l'option sans code triche.

- Visualiser une première fois le spectre avec le spectro mal étalonné pour avoir une idée des raies observables.
- Aller dans les paramètres du logiciel et changer l'étalonnage de sorte que 1 pixel corresponde à 1 nm. Pour Ulice/Spid-HR, rentrer 2 raies d'étalonnage : 1 nm = pixel 1 et 2047 nm = pixel 2047. Pour Ocean View/SpectraSuite, changer les coefficients en $(I, C_1, C_2, C_3) = (0, 1, 0, 0)$.
- Mesurer sur le spectre les numéros de pixel auxquels tombent les raies. (Techniquement, ça se fait avec le réticule comme si on mesurait des longueurs d'onde).
- Pour Ulice/Spid-HR, rentrer les nouvelles valeurs : longueurs d'onde théoriques d'un côté (c.f. après), numéros de pixels fraîchement mesurés de l'autre. Pour info, le spectro détermine la longueur d'onde comme étant $\lambda = an + b$ avec n le numéro du pixel et a, b deux coefficients issus d'une régression linéaire.
- Pour Ocean View/SpectraSuite, les 4 coefficients précédents correspondent à la formule polynomiale qui permet de déduire la longueur d'onde à partir d'un pixel quelconque : $\lambda = C_3n^3 + C_2n^2 + C_1n^1 + I$. Des valeurs sont proposées sur le spectromètre mais elles sont susceptibles de changer au cours du temps. Pour faire l'étalonnage, il faut calculer soi-même les coefficients. L'interpolation se fait bien avec python : on entre les valeurs de pixels dans le tableau **pix**, celles de λ dans le tableau **lambda** et on détermine les coefficients avec $C3, C2, C1, I = \text{numpy.polyfit}(\text{pix}, \text{lambda}, \text{deg} = 3)$.
Il n'y a plus qu'à rentrer les valeurs obtenues dans le logiciel. *Indice* : les coefficients C_3 et C_2

sont beaucoup plus petits que les deux autres. Si la fonction *polyfit* a mal été implémentée, inverser le sens des variables. Penser aussi à utiliser une notation du type "6.248625178E-9" dans le logiciel.

Annexe de l'annexe : longueurs d'onde théoriques de quelques lampes spectrales

Ces mesures sont attendues dans l'air, d'indice optique $n = 1.000\ 293$.

Raies du mercure (**Jolidon**)

λ (nm)	Couleur
404.66	violette
435.83	violette
546.07	verte
576.96	jaune
579.06	jaune
690.74	rouge (peu intense)

(12)

Raies du cadmium (**Jolidon**)

λ (nm)	Couleur
467.81	bleue
479.99	bleue
508.58	verte
643.85	rouge

(13)

Raies du sodium (**Jolidon**)

λ (nm)	Couleur
589.00	jaune
589.59	jaune
818.33	IR (peu intense)
819.48	IR (peu intense)

(14)

Raies de l'hydrogène (**Fruchard**)

Série de Balmer	λ (nm)	Couleur
$\lambda_{2,6}$	410.29	violette (peu intense)
$\lambda_{2,5}$	434.17	bleue
$\lambda_{2,4}$	486.27	turquoise
$\lambda_{2,3}$	656.47	rouge

(15)