

EMISSION ET ABSORPTION DANS LE DOMAINE OPTIQUE

Bibliographie :

Duffait : Expériences d'optique - agrégation de physique
Françon : Expériences d'optique physique
Sextant : Optique expérimentale

I EMISSION

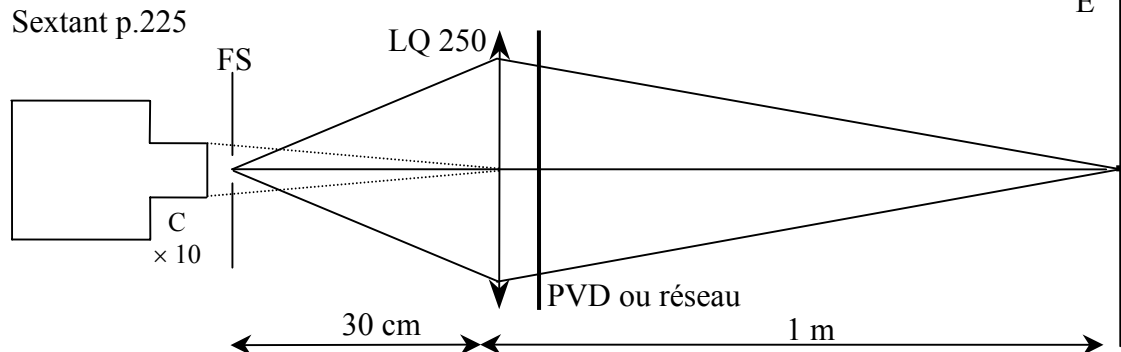
1.1 Par échauffement thermique

Cela concerne les lampes à incandescence ordinaires, les lampes Quartz-Iode et les lampes à arc. Leur fonctionnement est basé sur l'émission lumineuse d'un corps chauffé à haute température (incandescence). Les matériaux employés (tungstène, carbone) émettent un rayonnement voisin de celui du corps noir. Le spectre est continu et s'étend bien au-delà du visible, notamment dans l'infrarouge (cf. Sextant p.2).

1.1.1 Spectre d'une lampe Quartz-Iode

On se propose d'observer les différentes composantes spectrales.

Montage :



Ce type de source émettant faiblement dans l'UV, prendre une lentille de quartz pour améliorer la transmission dans ce domaine (c'est surtout pour le principe car la différence n'est pas flagrante en pratique). Pour plus de précision sur le comportement des différents verres, se reporter au Sextant p. 12-13.

Spectre visible :

Le montrer à l'aide du PVD.

Spectre UV :

Le verre absorbant l'UV, remplacer le PVD par un réseau peu dispersif (4000 LPI). Mettre en évidence l'UV à l'aide de l'écran fluorescent jaune ou plus simplement à l'aide d'une feuille de papier très blanche (le papier contient, comme dans les lessives, des azurants

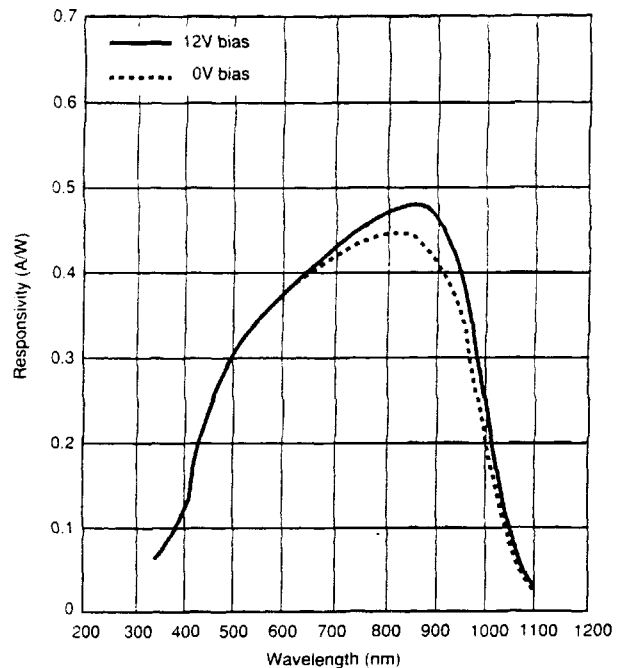
optiques pour renforcer sa "blancheur" qui absorbent le proche UV et réémettent dans le visible). Recouvrir la moitié du spectre pour pouvoir comparer.

Spectre IR :

Reprendre le PVD et déplacez le long du spectre une photodiode sensible dans l'infrarouge (OSD5T à Rennes). L'utiliser en polarisation inverse ($U_{\text{alim}} = 12 \text{ V}$, R_{pot} au max.) . **Soignez le montage optique** pour avoir un signal maximum (l'image du filament de la QI doit notamment être focalisé sur la lentille de projection).

Le signal dans l'IR est plus fort que dans le rouge.

Pour tenir compte de plus grande sensibilité de la photodiode dans l'IR, repérez à l'aide d'un filtre interférentiel une longueur d'onde dans le rouge (à Rennes, prendre le FI à 650 nm). Y placer la photodiode et mesurez le signal après avoir enlever le FI. Recherchez ensuite le maximum de signal dans l'IR.



Comparez le rapport des signaux au rapport des sensibilités de la photodiode (en prenant pour l'IR la sensibilité maximale) .

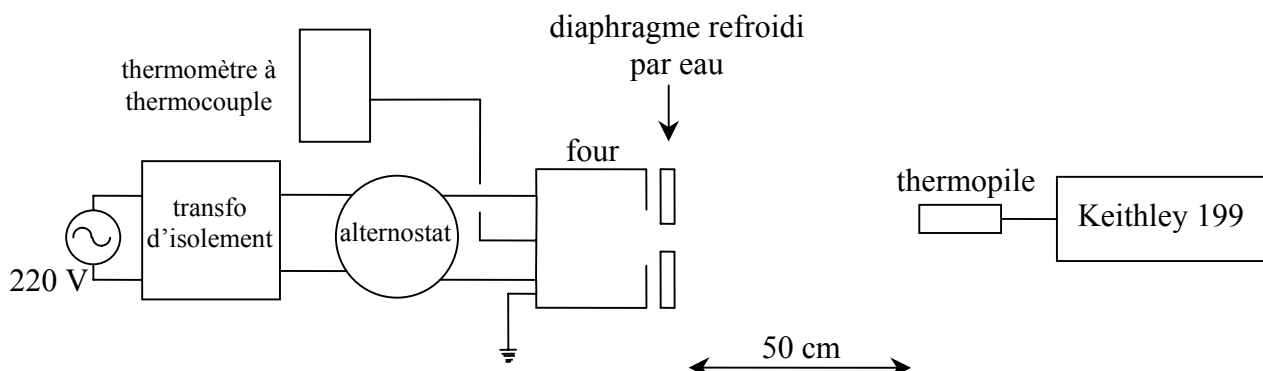
1.1.2 Vérification de la loi de Stéphan

Les sources thermiques émettant un rayonnement voisin de celui du corps noir (on rappelle qu'un corps noir est un corps qui absorbe l'intégralité du flux incident et qui, à l'équilibre, réémet donc un flux total égal au flux incident), on se propose de vérifier la loi de Stéphan qui relie l'existance de la source à sa température absolue :

$$M(T) = \sigma \cdot T^4$$

On rappelle que l'existance est une grandeur locale qui mesure le flux total rayonné dans un demi-espace par unité de surface de la source. Pour plus de précision sur les grandeurs photométriques, se reporter au Sextant p. 90-95

Montage : Sextant p.103



Important :

Cette manip est longue (1 heure environ) et délicate !

Si on veut espérer vérifier la loi, de nombreuses précautions doivent être prises :

Le signal de la thermopile est faible ($\approx 100 \mu\text{V}$) \Rightarrow faire chauffer le Keithley au moins 30 mn avant le début de la manip.

Posez le four sur un support stable ; le diaphragme doit être accolé au four (utiliser un double système de noix pour le maintenir).

L'alignement four-diaphragme-thermopile doit être aussi parfait que possible ! Ne plus y toucher par la suite !

Disposez le montage de façon à minimiser les lumières parasites entrant dans la thermopile (ne pas la diriger vers les fenêtres par exemple). Pour s'en convaincre, éclairez la thermopile avec une petite lampe à 1 ou 2 m \Rightarrow Il va sans dire que le noir le plus complet est indispensable.

Pour la même raison, **s'écarter du montage lors des mesures** (le mieux est de se mettre derrière la thermopile). Pour s'en convaincre, regardez l'influence de la présence de personnes proches du montage sur le signal.

Enfin **le débit d'eau doit être important** pour que le thermostatage soit efficace (**ce point est crucial**).

Si vous respectez tout ça, ça doit marcher !

Mode opératoire :

Réglez le débit de l'eau. Mesurez la température du four à l'ambiante $\Rightarrow T_0$

Alimentez le four avec une tension comprise entre 200 et 220 V (la contrôler avec un multimètre).

Notez la tension aux bornes de la thermopile pour des températures de four comprises entre 100 et 500 °C par palier de 50°. Voici à titre indicatif une série de mesures :

T (°C)	153	198	242	280	303	341	379	391	416	443	484	495
V (μV)	23	42	66	90	107	140	177	190	220	251	308	324

Interprétation :

Le détecteur devant mesurer un flux énergétique total, sa réponse spectrale doit être plate d'où le choix de la thermopile.

L'exitance mesure le flux total rayonné dans un demi-espace par unité de surface de la source. Or la thermopile ne reçoit que la partie émise dans l'angle solide Ω (cf. Sextant p. 103). Si on note Σ_f la surface de l'orifice libre du four, la thermopile reçoit alors :

$$\Sigma_f \sigma \cdot T^4 \left(\frac{\Omega}{2\pi} \right)$$

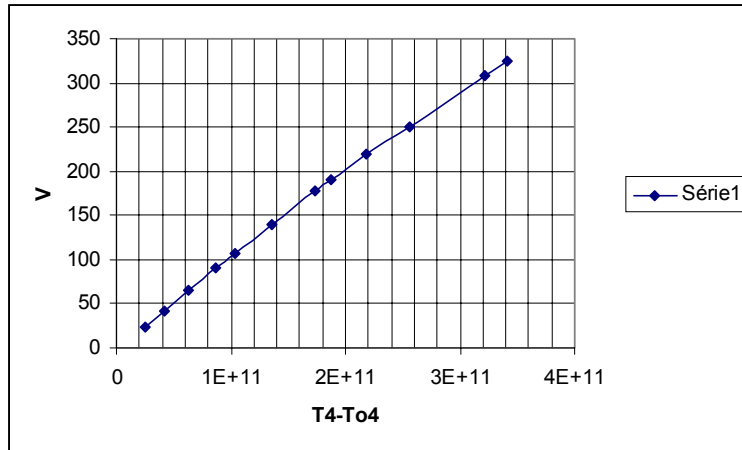
Si on note R la sensibilité de la thermopile (elle est notée dessus), la tension qu'elle fournit vaut alors :

$$V = R \Sigma_f \sigma \cdot T^4 \left(\frac{\Omega}{2\pi} \right)$$

Du fait de son principe de fonctionnement (cf. Sextant p. 78) le détecteur mesure en fait la différence entre le four à la température T et la température ambiante (vous pouvez le constater : lorsque le four est à température ambiante $V = 0$). On a donc au final :

$$V = R \sum_f \sigma_f (T^4 - T_0^4) \left(\frac{\Omega}{2\pi} \right)$$

L'expérience doit donc permettre de vérifier que le signal aux bornes de la thermopile est proportionnel à $T^4 - T_0^4$. Voici ce que l'on peut obtenir :



On peut être tenté de retrouver la constante de Stéfán mais cette détermination est peu précise car il intervient dans le montage de nombreux paramètres géométriques.

1.2 Par décharge dans les gaz

1.2.1 Spectre d'émission de l'Hydrogène atomique

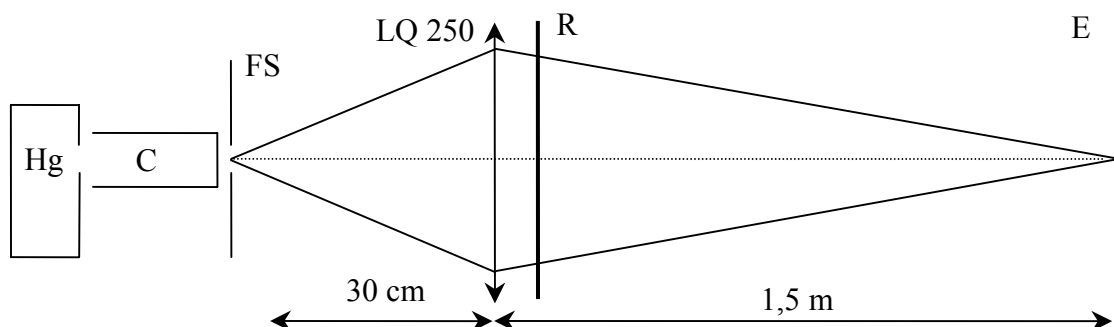
On peut étudier à l'oral la série de Balmer grâce à une lampe à Deutérium (qui s'échappe moins facilement que l'hydrogène) qui permet d'avoir un spectre de l'hydrogène lourd. Les longueurs d'onde dans le visible sont (cf. Sextant p. 4) :

$\lambda = 410.17 \text{ nm}$	violet
$\lambda = 434.05 \text{ nm}$	bleu
$\lambda = 486.05 \text{ nm}$	bleu
$\lambda = 656.28 \text{ nm}$	rouge

On peut montrer ce spectre à l'aide d'un PVD (montage identique au & 1.1.1). On obtient alors 3 raies visibles (la première étant peu intense). On peut ensuite l'enregistrer à l'aide d'un monochromateur et d'un photomultiplicateur.

Des mesures de longueurs d'onde, on en déduit la constante de Rydberg.

1.2.2 Spectre d'émission du Mercure



Lampe : Hg moyenne pression (50 W) pour montrer le spectre dans la salle.
Hg basse pression (20 W) pour les mesures.

Réseau : 8000 L.P.I. (1 inch = 2.54 cm)

Précautions : Pour les mesures, vérifiez l'alignement des différents constituants du montage (surtout le réseau) par auto-collimation. Il peut être utile de placer le réseau et l'écran sur un banc d'optique pour améliorer la précision dans la détermination des distances.

Observations :

Mettre en évidence avec la Hg MP les raies dans l'UV. Utilisez l'écran fluorescent ou à défaut une feuille blanche.

Faire les mesures avec la Hg BP en prenant une largeur de fente suffisamment fermée pour séparer le doublet jaune (soigner la mise au point de l'image de la fente source sur l'écran).

Placez une feuille de papier blanc sur l'écran ; repérez la position des différentes longueurs d'onde par une marque. Mesurez les distances X séparant ces marques de l'ordre zéro ; en déduire les longueurs d'onde et comparer aux données du Sextant p. 4.

Calculs :

$$\sin i' + \sin i = Nk\lambda = N\lambda \text{ à l'ordre } 1$$

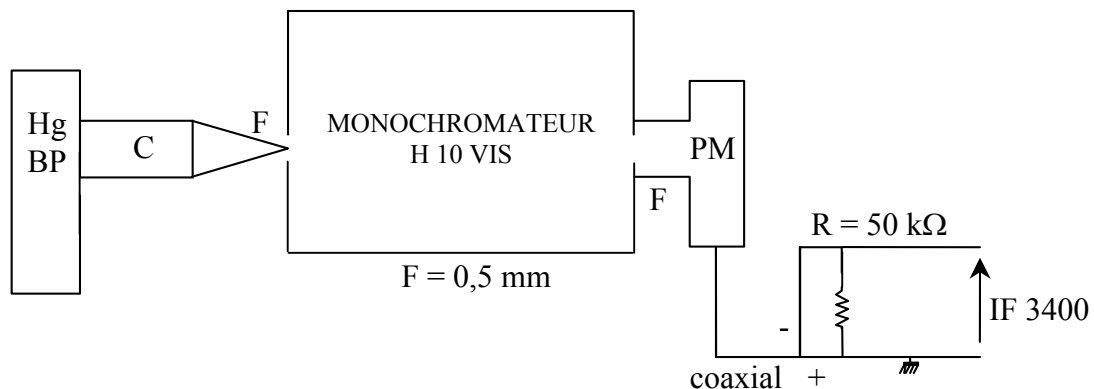
$$\sin i = N\lambda \text{ à l'incidence nulle}$$

$$\text{or } \tan i = X/D \text{ avec } D = d_{R-E}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{1}{N} \sin \left[\arctg \left(\frac{X}{D} \right) \right]$$

Utilisation du monochromateur :

On peut améliorer la précision des mesures en utilisant le monochromateur avec les fentes de 0.5 mm. Focalisez l'image de la lampe sur l'entrée de l'appareil à l'aide du condenseur à tube. Recouvrir l'ensemble avec un tissu noir pour minimiser les lumières parasites.



Enregistrement du spectre :

Utilisez le photomultiplicateur ; envoyez le courant anodique dans une résistance de 50 kΩ via un câble coaxial (le courant étant négatif, inversez la polarité du coax par rapport à celle de la table traçante IF 3400 pour avoir une tension positive). **Le courant maximum délivré par le PM ne devant dépasser en aucun cas 100 μA**, ajustez la tension d'alimentation du PM de façon à ne pas dépasser 1 V sur la table traçante lorsqu'on est au maximum de réponse sur le PM.

Pour obtenir en X un signal proportionnel à la longueur d'onde, on dispose d'un potentiomètre résistif multitour linéaire situé à l'arrière du monochromateur qui suit les mouvements du vernier.

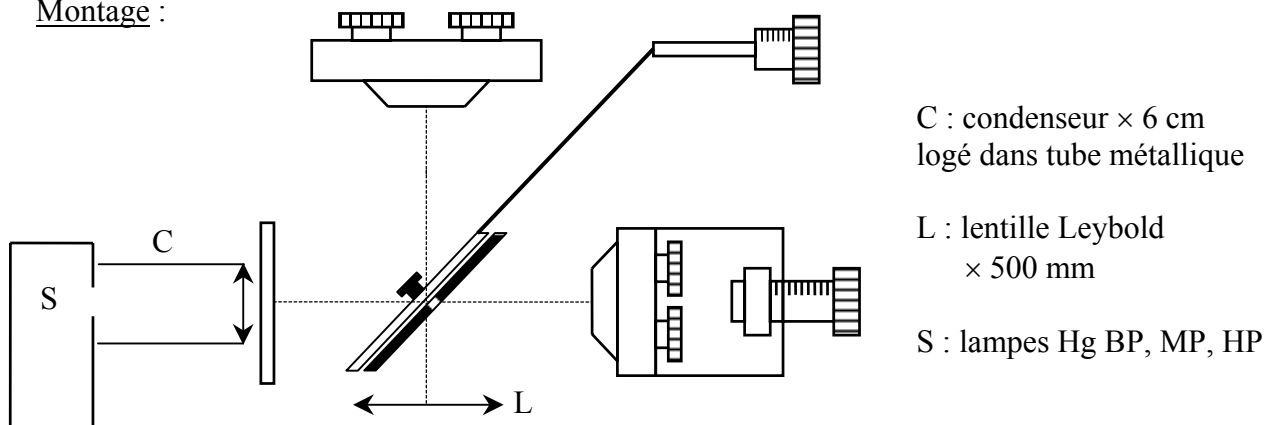
Branchez entre le noir et le rouge une alimentation continue de quelques volts ; vous avez alors entre la borne noire et la borne blanche une tension variable proportionnelle à la lecture du vernier (celle ci doit être nulle lorsque le vernier affiche 200 - le vérifier). Envoyez ce signal sur la voie X ($\approx 0.1 \text{ V/div}$) de la table traçante.

Enregistrez le spectre de la lampe puis repasser sur les différentes raies d'émission et notez la valeur qu'indique le vernier pour chaque raie. Convertir en longueur d'onde.

1.2.3 Estimation d'une largeur de raie

On se propose de mettre en évidence l'influence de la température et de la pression sur la largeur d'une raie et de faire une estimation de cette largeur. La raie étudiée est la raie verte du mercure. Etant donné la résolution nécessaire, l'emploi d'un interféromètre est indispensable.

Montage :



Réglez l'interféromètre en anneaux d'égale inclinaison (cf. montage M 08 bis).

Placez un écran blanc au foyer de la lentille L, un écran noir entre la source et l'écran pour éliminer la lumière parasite.

Intercalez un filtre gélatine vert pour isoler la raie désirée.

Mesure :

Sextant p. 240

Partir du contact optique avec la Hg MP ; chariotiez. Observez que le contraste sur l'écran diminue progressivement lorsque l'on augmente la différence de marche de part et d'autre de la différence de marche nulle. Chariotez jusqu'à disparition des anneaux ; repérez la valeur du chariotage effectué depuis le contact optique. Le critère visuel n'étant pas précis, seul l'ordre de grandeur de δ a un sens.

Calcul de $\Delta\lambda$:

Dans le cas d'une onde parfaitement monochromatique, le déphasage entre les rayons issus des deux miroirs vaut $\phi = 2\pi\delta/\lambda = 2\pi\sigma\delta$ avec $\sigma = 1/\lambda$.

$$\begin{aligned} \text{L'intensité résultante vaut : } I &= a^2 + b^2 + 2ab\cos\phi \\ &= 2a^2(1+\cos\phi) \quad \text{si } a = b \end{aligned}$$

$$= B_{\sigma}(1 + \cos 2\pi\sigma\delta)$$

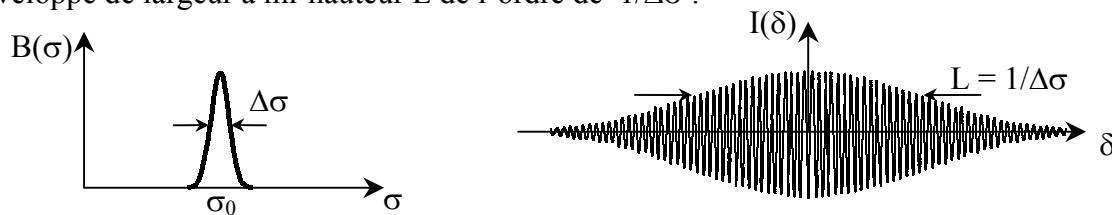
Si la source émet de la lumière dans un intervalle spectral qui s'étend de σ_1 à σ_2 avec la répartition spectrale $B(\sigma)$, l'intensité vaut alors :

$$I(\delta) = \int B(\sigma) [1 + \cos 2\pi\sigma\delta] d\sigma$$

Soit $I(\delta) = I_{\text{moyen}} + \Delta I(\delta)$, avec $\Delta I(\delta) = \int B(\sigma) \cos 2\pi\sigma\delta d\sigma$

On retrouve la propriété générale

des interférences à deux ondes : la variation d'intensité autour de la valeur moyenne $\Delta I(\delta)$ est donnée par la transformée de Fourier (en cosinus) de la répartition spectrale $B(\sigma)$. Si on considère le cas d'une raie large à $\sigma_0 = 1/\lambda_0$, avec un profil de largeur à mi-hauteur $\Delta\sigma$, la transformée de Fourier est le produit d'une sinusoïde de période $\delta_0 = 1/\sigma_0 = \lambda_0$, par une enveloppe de largeur à mi-hauteur L de l'ordre de $1/\Delta\sigma$:



On n'obtient qu'un ordre de grandeur car le résultat de l'intégration dépend du profil spectral de la raie. Si le profil est gaussien, on a $L\Delta\sigma = 0,88$. Si le profil est lorentzien, on a $L\Delta\sigma = 0,44$. L'étude du profil de la raie étudiée dépasse largement le cadre du TP. Une telle étude nécessiterait une mesure quantitative (enregistrement) avec une chaîne de mesure bien linéaire. Par conséquent, les résultats obtenus ne seront que des ordres de grandeur (en plus, la chute de contraste évaluée à l'œil ne correspond pas à une diminution d'un facteur 2 de celui-ci).

Résultats :

Avec la Hg MP, on observe une décroissance notable du contraste pour un déplacement du miroir à partir de l'origine $\delta \approx 0,2$ mm. Donc $L = 2\delta \approx 0,4$ mm.

Comme $L \approx 1/\Delta\sigma = \lambda^2/\Delta\lambda$ avec $\lambda = 546$ nm, on a : $\Delta\lambda \approx \lambda^2/L \approx 0,7$ nm

Avec la Hg BP, $\delta \approx 2$ mm $\Rightarrow \Delta\lambda \approx 0.07$ nm

Remarque :

Ces valeurs sont données à titre indicatif ; elles dépendent entre autres du temps depuis lequel la lampe a été allumée.

On peut faire un enregistrement de l'interférogramme en TP (long et délicat). On le déconseille en montage vu le temps nécessaire et les difficultés de sa réalisation.

Influence de T :

Placez l'interféromètre au contact optique. Prendre comme source la lampe à vapeur de Hg HP 150 W préalablement éteinte (elle doit être froide au départ !) et munie d'un condenseur de 6 cm. Allumez la lampe, ajustez rapidement le tirage de la lampe et sa position de façon à éclairer la totalité des miroirs avec un faisceau le plus convergent possible.

Chariotez. Au bout d'environ 0.2 mm de translation, le contraste devient nul. Revenir en arrière à un endroit où les anneaux sont visibles. Attendre quelques minutes. Qu'observe-t-on ? Conclusion ?

Influence de P :

Partir de l'expérience précédente à un endroit où l'on n'observe plus d'anneaux. Remplacez la Hg HP par une Hg BP. Que constatez-vous ? Justifiez.

1.3 Emission induite

Les processus qui viennent d'être vus sont des processus d'émission spontanée. Les lasers utilisent quant à eux un processus d'émission induite → se reporter au montage sur les lasers pour des idées de manipulation sur ce sujet.

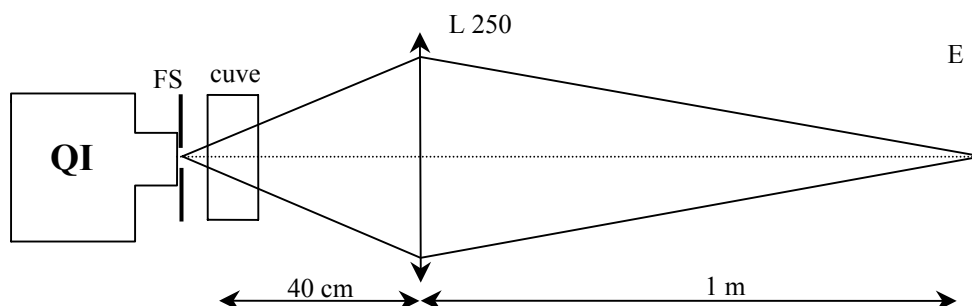
II ABSORPTION

2.1 Absorption par un liquide

Biblio : Duffait p. 131

On étudie le spectre d'absorption d'un colorant en solution : le permanganate de potassium en concentration faible.

2.1.1 Visualisation directe du spectre



Observez le spectre à l'aide d'un PVD ; Commencez avec une cuve pleine d'eau distillée puis rajouter **quelques** cristaux de KMnO_4 . Homogénéisez la solution.

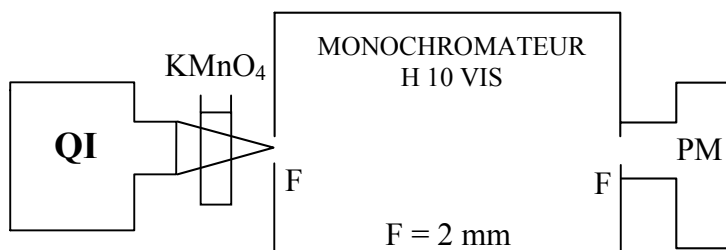
Si la concentration est assez faible, on observe 5 bandes d'absorption dans la partie centrale (région verte) du spectre.

On peut éventuellement remplacer la QI par une lampe à vapeur de mercure haute pression ; elle permet de relever l'absorption sur le fond continu tout en se référant aux raies qui étalonnent en longueurs d'ondes.

Quand on augmente la concentration, la structure en bandes disparaît. La substance absorbe dans le vert et un peu dans le bleu. Au bout d'une certaine concentration seul le rouge est réémis d'où la couleur de KMnO_4

2.1.2 Enregistrement du spectre

Facultatif.



Utilisez une cuve très propre et de l'eau distillée. Si, après lavage, des traces de permanganate persistent, les éliminer par réaction rédox avec un mélange d'acide sulfurique et de thiosulfate de sodium.

Préparez une solution de permanganate diluée.

Ajustez la focalisation de la QI, la position de la cuve et de la photodiode pour avoir un signal maximum. Enregistrez au noir (on peut utiliser un drap noir pour éliminer les lumières parasites). Faire un enregistrement avec une cuve pleine d'eau distillée puis avec la solution de permanganate. Vérifiez l'allure des courbes en consultant le Duffait p. 131.

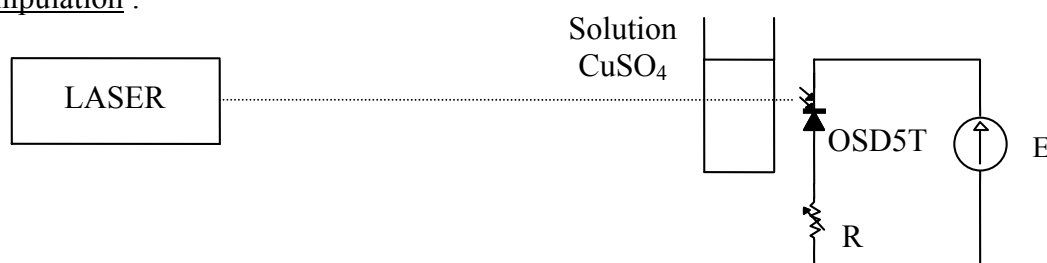
2.1.3 Loi de Beer-Lambert

Pour une substance absorbante, l'intensité transmise est de la forme $I = I_0 e^{-\alpha l C}$ où l est l'épaisseur de solution traversée et α est proportionnel à la section efficace d'absorption. Pour simplifier l'analyse des résultats on raisonnera en termes de densité optique :

$$D = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \alpha \cdot l \cdot C$$

C'est la grandeur adoptée par les spectroscopistes car elle est additive (le signaler en montage)

Manipulation :



On utilise ici du CuSO_4 qui absorbe dans le rouge et permet d'utiliser comme source un laser (He-Ne ou à SC). La longueur d'onde à laquelle on travaille est alors bien définie et le signal est assez fort.

On peut mettre en évidence l'influence de l'épaisseur traversée ou de la concentration (on conseille plutôt la première solution car on est alors sûr de travailler à α constant).

Pour l'influence de la concentration, prendre des solutions pas trop concentrées et bien homogènes. Utilisez de l'eau distillée pour éviter la diffusion par les impuretés. Les faces des cuves doivent être parfaitement propres (pas de traces de doigt). Notez la réponse de la photodiode avec une cuve pleine d'eau (vérifier si ce signal correspondant à I_0 reste constant). On doit vérifier que le rapport des densités correspond approximativement au rapport des concentrations (les écarts deviennent vite importants si on manipule mal).

Pour l'influence de l'épaisseur, on peut associer plusieurs cuves en parallèles, mesurer I_0 avec une cuve remplie d'eau distillée puis deux cuves et refaire ensuite les mêmes mesures avec les cuves remplies de la solution de CuSO_4 .

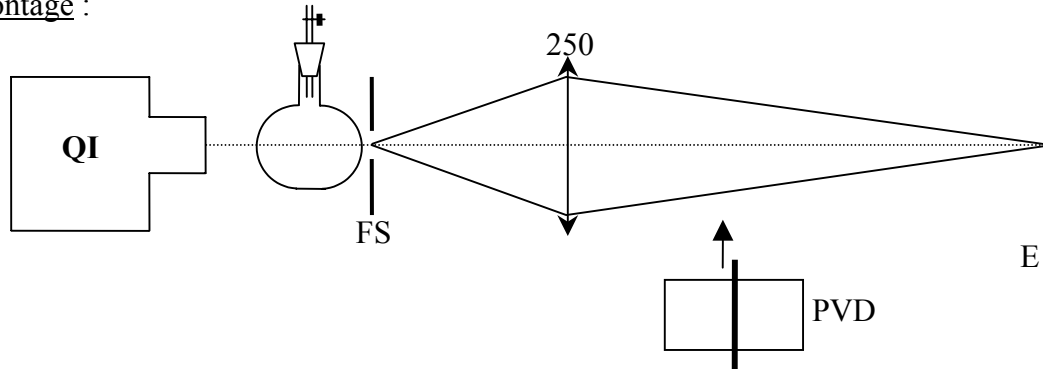
2.2 Absorption par un gaz

Suivant le matériel dont on dispose, on peut montrer le spectre d'absorption de I_2 gazeux ou de NO_2 .

Pour I_2 , chauffez du di-iodé solide dans un ballon avec un léger vide (cf. schéma ci-dessous) pour éviter son oxydation à l'air. On observe plusieurs bandes d'absorption grâce au PVD.

Pour NO_2 , placez des morceaux de cuivre dans le ballon. Rajoutez via une ampoule à décanter (il faut une ampoule à retour pour éviter les surpressions) de l'acide nitrique. Des vapeurs rousses de NO_2 apparaissent. Au fur et à mesure de leur apparition, le bleu puis le vert disparaissent (le montrer avec un PVD).

Montage :

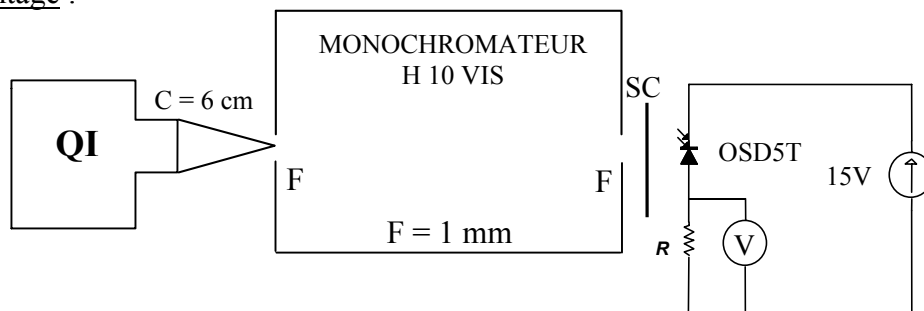


2.3 Détermination du gap d'un semi-conducteur

Le cristal semi-conducteur, transparent pour $hc/\lambda < E_g$, devient opaque lorsque hc/λ dépasse E_g . Le photon a alors en effet une énergie suffisante pour exciter un électron de la bande de valence dans la bande de conduction.

On dispose ici de deux échantillons de sélénure de zinc dopé au manganèse d'aspect "orange" déposés sous forme de mince pellicule sur plaque de verre. Utilisez cette simple observation visuelle pour situer le gap de ces semi-conducteurs par rapport aux limites du visible, qui sont 1.6 et 3.1 eV.

Montage :



Placez l'échantillon contre la fente de sortie, immédiatement suivi par la photodiode au silicium (réf. OSD5T), polarisée en inverse.

Le signal étant faible, ajustez au mieux la position de la lampe et de la photodiode pour avoir un signal le plus fort possible.

Branchez **directement** à la place de la résistance sur le schéma la voie Y ($\approx 50 \text{ mV/div}$) de la table traçante jaune IF3400 (son impédance d'entrée vaut $\approx 1 \text{ M}\Omega$). Le réglage de la voie X est analogue au § 1.2.2.

Faire **dans le noir** un enregistrement avec (courbe 1) et sans SC (courbe 2) pour s'affranchir de la fonction d'appareil de l'ensemble lampe + monochromateur et de la réponse spectrale de la photodiode. En divisant C_2 par C_1 pour quelques valeurs on obtient la fonction de transmission de l'échantillon.

de fluorescence sur la fluoescéine (on peut la remplacer à l'oral par de la rhodamine ; cf. Sextant p. 225 & V.1.5.2 et Françon p. 259 et 263). Ce phénomène se distingue du précédent par la différence entre les longueurs d'ondes absorbées et celles qui sont réémises.

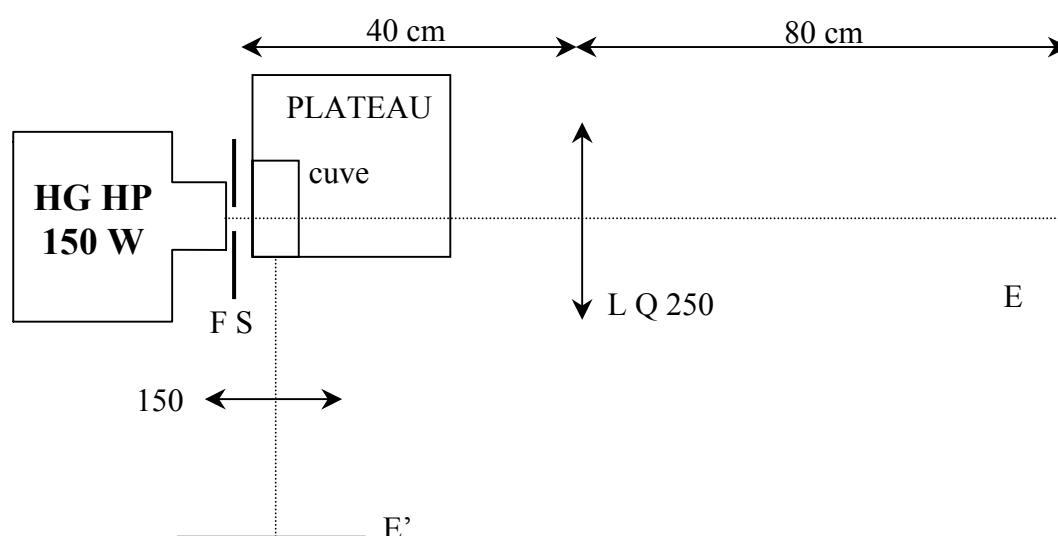
3.2.1 Mise en évidence du phénomène

La fluorescéine absorbe le bleu et réémet dans le vert. On peut le montrer en éclairant par une lampe blanche (QI) une solution de fluorescéine et en observant les différences entre la lumière transmise et la lumière diffusée lorsqu'on interpose différents filtres. Faire l'observation avec un filtre bleu, jaune et rouge ; expliquez les différences (le photon excitateur doit avoir une énergie supérieure au photon réémis).

3.2.2 Spectre d'absorption, d'émission

Montage :

Le montage proposé permet l'observation simultanée du phénomène d'absorption (suivant l'axe optique avec l'écran fluorescent) et de réémission (perpendiculaire à l'axe optique avec l'écran diffusant dirigé vers le public).



Suivant le spectre que l'on veut observer, on place un PVD après l'une ou l'autre des lentilles (prendre de préférence une lentille de quartz suivant l'axe optique pour minimiser l'absorption de l'UV par le montage).

Prendre comme source une lampe à vapeur de mercure (car la fluorescéine absorbe l'UV, or une QI n'en émet pas beaucoup) haute pression (car elle possède un spectre continu en plus du spectre de raies). La cuve doit être propre pour minimiser la lumière diffusée. Ajustez sa hauteur de façon à avoir la moitié du spectre direct avec fluorescéine, l'autre moitié sans.

Placez l'axe optique sur le bord de la cuve pour avoir un maximum de lumière dans le spectre transverse.

Observations :

Visualisez le spectre direct avec la cuve remplie d'eau dans un premier temps puis avec la fluorescéine. En déduire le domaine spectral dans lequel la fluorescéine absorbe. On peut modifier la quantité de fluorescéine dissoute pour observer l'effet de la concentration.

Visualisez le spectre transversal ; le phénomène étant peu lumineux, on a intérêt à recouvrir la partie directe du montage avec un drap noir. En déduire le domaine spectral dans lequel la fluorescéine réémet.