



SORBONNE  
UNIVERSITÉ

université  
PARIS-SACLAY

*Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge*

---

## SPECTROSCOPIE

---

2024-2025



*This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.*

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Spectre de l'hydrogène atomique (série de Balmer)</b>	<b>4</b>
2.1	[1P] Mesure du spectre au spectromètre numérique . . . . .	4
2.2	[AP] Mesure du spectre avec le monochromateur . . . . .	4
<b>3</b>	<b>[1P] Absorption et émission moléculaires</b>	<b>5</b>
3.1	Spectre d'émission et d'absorption d'un colorant en solution . . . . .	5
3.2	Dispositif expérimental . . . . .	5
3.3	Enregistrement du spectre d'absorption avec l'ordinateur . . . . .	5
3.4	Spectre d'émission . . . . .	5
<b>4</b>	<b>[1P] Utilisation d'un goniomètre</b>	<b>6</b>
4.1	Description . . . . .	6
4.2	Réglage optique . . . . .	7
4.3	Réglage de l'horizontalité de la lunette . . . . .	7
4.4	Utilisation avec un réseau . . . . .	8
<b>5</b>	<b>[2P] Observation des modes de résonances d'un laser à l'aide d'une cavité Fabry-Perot</b>	<b>9</b>
5.1	Principe de la mesure . . . . .	10
5.2	Tension sur la cale piezo du Fabry-Perot . . . . .	10
5.3	Alignement de la cavité . . . . .	10
5.4	Mesure de l'écart entre modes longitudinaux du laser . . . . .	11
5.5	Mesure de la finesse . . . . .	11
5.6	Utilisation d'un laser vert de faible longueur de cavité. . . . .	11
<b>6</b>	<b>Données spectroscopiques</b>	<b>11</b>

## Bibliographie :

- BOUSQUET, Spectroscopie instrumentale, Chap. 4.
- PEREZ, Optique.
- ANNEQUIN et BOUTIGNY, Optique 2, Chap. 5 (très ancien).
- SEXTANT : Optique expérimentale.
- Livres de CPGE 1ère année (réglage du goniomètre).
- Livres de CPGE 2e année (notion de minimum de déviation des réseaux).

# 1 Introduction

La spectroscopie optique permet d'analyser la luminance spectrale  $L(\lambda)$  d'une source lumineuse (spectroscopie d'émission) ou le facteur d'absorption spectral  $a(\lambda)$  d'une substance traversée par de la lumière (spectroscopie d'absorption).

C'est un moyen d'investigation et d'analyse très utilisé, dans des domaines variés : physique des gaz, de la matière condensée, astrophysique, chimie, biologie, etc.

On distingue en général deux types de spectroscopes optiques :

- les spectroscopes dispersifs ou à fentes, qui permettent d'analyser la répartition spectrale du rayonnement lumineux (ex. : prisme, réseau)
- les spectroscopes interférentiels qui reposent sur l'analyse de figures d'interférences et permettent de mesurer des différences de fréquences (ex. : Fabry-Pérot ou Michelson).

Nous disposons de nombreuses expériences dans les polycopiés qui permettent d'illustrer la spectroscopie optique. En spectroscopie interférentielle :

- Mesure des doublets de Na et de Hg avec un interféromètre de Michelson,
- Mesure d'une largeur de raie avec un interféromètre de Michelson (raie verte d'une lampe Hg haute pression typiquement),
- (Manips supplémentaires) Spectroscopie du Rubidium avec comparaison à un Fabry-Pérot utilisé comme étalon de fréquence.

En spectroscopie dispersive, il s'agit d'observer directement le spectre de la lumière analysée. Selon le but recherché on utilisera différentes méthodes pour obtenir ce spectre :

- Projection sur un écran en utilisant un réseau et une ou deux lentilles : Ce montage est particulièrement utile pour obtenir une expérience visuelle et est relativement simple à monter. Il permet d'illustrer les influences des largeurs des fentes d'entrée et sortie, du nombre de fentes du réseau éclairées... En revanche, il est moins précise que la mesure au goniomètre ;
- Mesures au goniomètre : Ce montage permet des mesures bien plus précises pour mesurer un spectre de raies que le montage précédent. Toutefois, l'expérience n'est pas visuelle et n'est donc pas très bien adaptée à l'étude de l'influence des paramètres du spectroscopie. Ce montage est par ailleurs inadapté aux lasers ;
- Mesure au spectromètre USB équipé d'une barrette CCD : Ce montage est rapide et précis. Même si elle ne met pas en valeur vos qualités expérimentales en termes de dispositif optique, la réalisation correcte de ce montage met en avant d'autres expertises instrumentales (collection de la lumière, choix de fibre, du temps d'acquisition, du moyennage, lien de ces paramètres avec la résolution spectrale, etc.) ;
- Mesure au monochromateur à réseau couplé à un détecteur : Il s'agit de la version "manuelle" du montage précédent. Il est donc plus long et délicat à mettre en œuvre. **Attention, bien lire le TP photodétecteur et la notice du monochromateur avant de l'utiliser, pour ne pas risquer de l'endommager.**

On pourra notamment se référer aux TPs "Optique : expériences de base", "Photorécepteurs" et "Interférences", en plus du contenu du présent TP.

Ces différents montages peuvent être utilisés pour étudier plusieurs spectres :

- Spectre d'émission d'une lampe à vapeur,
- Spectre d'émission d'une DEL de couleur ou blanche,
- Spectres d'absorption (semi-conducteur, colorant).

Des données de longueur d'onde de raies courantes sont fournies en fin de TP.

## 2 Spectre de l'hydrogène atomique (série de Balmer)

La partie visible du spectre de l'hydrogène atomique se situe dans la série de Balmer qui correspond à des transitions des niveaux de nombre quantique principal  $n = 3, 4, 5$  etc... vers le niveau de  $n = 2$ .

L'énergie du niveau de nombre quantique  $n$  est donnée par :

$$E_n = -\frac{Rhc}{n^2} \quad (1)$$

où  $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  est la constante de Rydberg. La longueur d'onde  $\lambda_n$  de la transition est définie par :

$$\frac{1}{\lambda_n} = R \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (2)$$

### Lampe à hydrogène

On se propose de faire une observation du spectre de la lampe de Balmer (ENSP 3701). Elle contient un mélange d'eau et d'eau deutérée (10% à la fabrication), occasionnant ainsi des traces d'oxygène moléculaire dans le spectre. L'utilisation d'eau deutérée est justifiée par le fait que le deutérium, plus lourd, s'échappe moins facilement. Les niveaux d'énergie sont alors un peu déplacés : variation relative de l'ordre de 1/1000 (Cohen-Tannoudji, Diu, Lalöe, Mécanique quantique, tome I, chapitre VII, Compléments AV II), soit 0.1 nm.

**Objectif :** Représenter  $1/\lambda_n$  en fonction de  $1/n^2$  et en déduire  $R$ .

**Table de données spectrales de référence :** Se reporter à la Notice N431 et en fin de TP.

On dispose de deux spectromètres pour réaliser le spectre de la lampe :

- un spectromètre USB branché sur un PC (avec l'inconvénient que la manip ne met pas beaucoup de qualités expérimentales en valeur) ;
- un monochromateur couplé à un photomultiplicateur.

### 2.1 [1P] Mesure du spectre au spectromètre numérique

Vous avez à votre disposition des spectromètres miniaturisés à fibre optique de caractéristiques différentes (largeur de la fente d'entrée ou nombre de pixels du détecteur CCD), lire la notice pour connaître celles du spectromètre que vous utilisez. Il s'agit de **spectromètres à réseau équipés d'une barrette CCD** reliés à un ordinateur par un câble USB. La lumière est transmise dans le spectromètre par une fibre optique. Un système optique composé de miroirs et d'un réseau de diffraction permet de faire, pour chaque longueur d'onde, l'image de la fente d'entrée du spectromètre sur la barrette CCD (si le diamètre du cœur de la fibre est plus petit que la fente d'entrée du spectro, elle joue alors le rôle de fente d'entrée). Une fibre de petit diamètre donne une meilleure résolution mais collecte peu de lumière. Le réseau est fixe et comporte 600 traits par mm. Le domaine spectral observé sur l'ensemble de la barrette est alors 350-1000 nm. Lors de l'utilisation du spectromètre, on fera le lien entre les différents choix expérimentaux (choix de fibre optique et les réglages du logiciel) et la résolution spectrale obtenue.

### 2.2 [AP] Mesure du spectre avec le monochromateur

Dans le cas de l'utilisation du **monochromateur**, il faut faire l'image de la lampe sur la fente d'entrée pour éviter un décalage en longueurs d'onde, et prendre les précautions d'usage pour ne pas endommager le photomultiplicateur (voir le TP «Photodétecteurs»). Placer le monochromateur sur la raie la plus intense (656,28 nm) pour régler la tension d'alimentation du photomultiplicateur et la largeur des fentes d'entrée et de sortie. On peut ensuite réaliser un enregistrement de l'intensité en fonction de la longueur d'onde. Pour cela, faire défiler le monochromateur avec un moteur et enregistrer la tension aux bornes de la résistance branchée sur le photomultiplicateur. Attention, la lampe étant modulée à 100 Hz, un filtrage est nécessaire.

### 3 [1P] Absorption et émission moléculaires

#### 3.1 Spectre d'émission et d'absorption d'un colorant en solution

Nous proposons d'utiliser la rhodamine 610 en solution dans de l'éthanol. L'intérêt de ce colorant (utilisé dans certains lasers à colorant) est que ses spectres d'émission et d'absorption sont situés dans le spectre visible et bien séparés. D'autre part la raie verte du mercure se trouve dans la bande d'absorption, ce qui permet d'observer simplement le spectre d'émission.

**Valeurs tabulées :**

- $\lambda_{max} = 530 \text{ nm}$  en absorption
- $\lambda_{max} = 556 \text{ nm}$  en émission (fluorescence)

(Fruchard p344)

#### 3.2 Dispositif expérimental

On utilisera un spectromètre USB ou bien l'ensemble monochromateur-photomultiplicateur.

#### 3.3 Enregistrement du spectre d'absorption avec l'ordinateur

On réalise les enregistrements à l'aide du spectromètre relié à l'ordinateur. Dans un premier temps, **réaliser un spectre de référence** (en interposant une cuve remplie d'éthanol), qui résulte à la fois de la luminance spectrale  $L(\lambda)$  de la source, de la transmittance du solvant  $T_{solv}(\lambda)$ , de la réponse spectrale du spectromètre (essentiellement celle du réseau)  $r(\lambda)$ , et de la sensibilité spectrale  $s(\lambda)$  du détecteur :

$$V_{ref}(\lambda) = L(\lambda) \times T_{solv}(\lambda) \times r(\lambda) \times s(\lambda) \quad (3)$$

**Intercaler alors à la place de la cuve de solvant celle de solution de rhodamine.** La luminance spectrale est multipliée par la transmittance  $T(\lambda)$  de la cuve. Le signal détecté est alors :

$$V_{ech}(\lambda) = L(\lambda) \times T_{solv}(\lambda) \times T(\lambda) \times r(\lambda) \times s(\lambda) \quad (4)$$

La transmittance de l'échantillon s'obtient en effectuant le rapport  $\frac{V_{ech}}{V_{ref}}$ , ou, dans le cas où il existe un signal d'obscurité  $V_{obs}$ , il faut retrancher  $V_{obs}$  à  $V_{ech}$  et à  $V_{ref}$  :

$$T(\lambda) = \frac{V_{ech} - V_{obs}}{V_{ref} - V_{obs}} \quad (5)$$

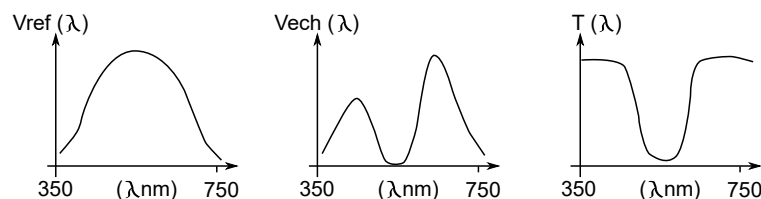


FIGURE 1 –

#### 3.4 Spectre d'émission

*Qualitativement*, on peut mettre en évidence l'absorption en éclairant la cuve avec une lampe QI et en utilisant un prisme à vision directe (le vert n'est pas transmis). L'émission (orange) peut également être mise en évidence en éclairant la cuve avec une lampe à mercure suivie d'un filtre vert :

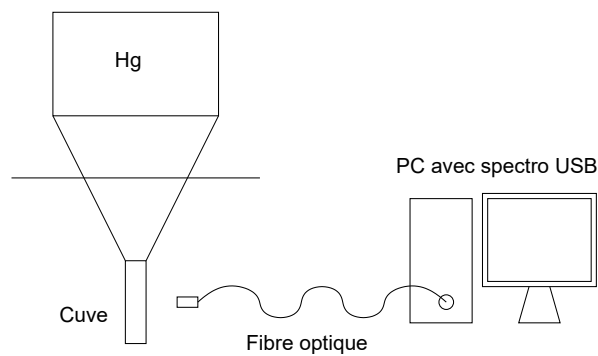


FIGURE 2 –

On peut réaliser une expérience de photoluminescence : le colorant est excité par un rayonnement sensiblement monochromatique, correspondant à un domaine spectral où il est bien absorbant (cf. expérience précédente). Pour s'affranchir de la lumière incidente de la lampe spectrale, et avoir le signal le plus fort possible, on pourra disposer la fibre optique dans l'orifice latéral de la cuve. On choisit ici la raie verte du Mercure (obtenue en filtrant la sortie d'une lampe Hg, ou avec un laser Helium-Néon vert). Le signal observé a l'allure suivante :

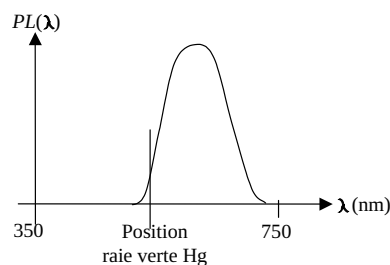


FIGURE 3 –

**Observer que la luminescence a lieu à des énergies inférieures à celle de la lumière excitatrice.** La bande de luminescence est à plus basse énergie que la bande d'absorption.

En comparant les spectres de transmittance et de luminescence, interpréter les couleurs du colorant : magenta en transmission, orange en luminescence.

*Remarques :*

- la raie fine excitatrice n'est pratiquement pas visible sur le spectre précédent, car le phénomène de diffusion est ici faible devant celui de luminescence.
- le signal de luminescence obtenu est affecté par la réponse spectrale du détecteur. Contrairement au cas de l'absorption, il n'est pas possible de s'en affranchir simplement.

## 4 [1P] Utilisation d'un goniomètre

### 4.1 Description

Un goniomètre est un appareil permettant de mesurer de manière précise des angles. On va s'en servir ici pour déterminer les longueurs d'onde des raies d'émission d'une lampe spectrale. Le but du réglage consiste à observer à travers la lunette afocale (observation à l'infini) les rayons émergents de la fente source à l'infini (donc parallèles) après déviation par un élément dispersif (réseau ou prisme). Il faut aussi aligner les axes de la lunette et du collimateur, qui doivent être perpendiculaires aux éléments dispersifs. Les angles se lisent à l'aide d'un système de vernier via le deuxième oculaire placé sous la lunette.

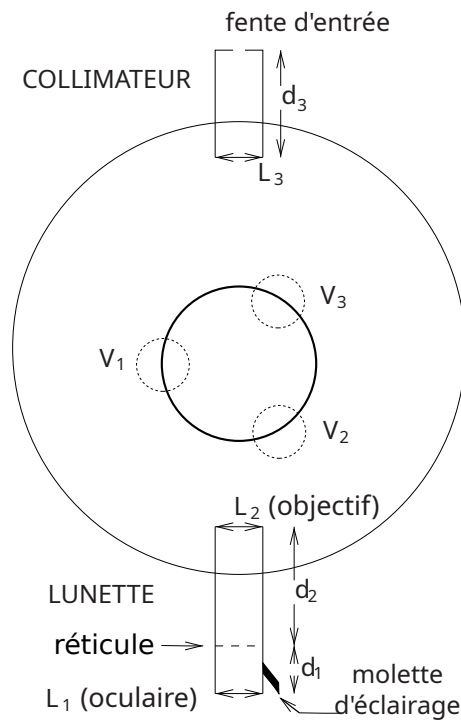


FIGURE 4 –

## 4.2 Réglage optique

Commençons par le réglage de la lunette autocollimatrice d'observation. Régler d'abord la distance  $d_1$  (tirage de l'oculaire) de manière à voir net le réticule (croix) sans accommoder (i.e. en relâchant complètement le cristallin de l'œil). Ce réglage peut dépendre de la vision de chaque utilisateur. Basculer vers l'avant la manette sur le côté de l'oculaire : on éclaire ainsi le réticule avec une lampe par l'intermédiaire d'une lame semi-réfléchissante. Le réticule peut donc alors servir d'objet pour un réglage par autocollimation. Placer un miroir devant l'objectif de la lunette, et régler la distance  $d_2$  (tirage de l'objectif) de manière à voir nets simultanément le réticule et son image réfléchi par le miroir. Rebasculer la manette et enlever le miroir. La lunette est alors réglée pour une observation à l'infini : les foyers de  $L_1$  et  $L_2$  sont confondus, et le réticule est dans leur plan. Réglons maintenant le collimateur, en l'alignant avec la lunette d'observation. Ajuster la distance  $d_3$  de manière à voir net les bords de la fente d'éclairage dans le même plan que le réticule. La fente est alors dans le plan focal objet de la lentille  $L_3$ , qui produit donc un faisceau de rayons parallèles.

## 4.3 Réglage de l'horizontalité de la lunette

On va maintenant régler les alignements des différents éléments du goniomètre. L'axe du collimateur est par construction perpendiculaire à l'axe de rotation de la partie inférieure du plateau central ; par contre l'horizontalité de l'axe de la lunette est réglable par une vis (appelée  $V_0$  dans la suite), tandis que la partie supérieure du plateau central est orientable librement par rapport à la partie inférieure à l'aide des vis  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  :

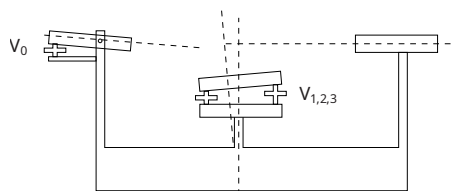


FIGURE 5 –

Régler grossièrement les trois vis du plateau autour de leur mi-course, de manière à avoir le plateau à peu près horizontal. Ajuster de même  $V_0$  pour rendre, à vue d'œil, la lunette horizontale. On va régler précisément  $V_0$  de

manière à rendre l'axe de la lunette perpendiculaire à l'axe de rotation de la partie inférieure du plateau (et ainsi colinéaire au collimateur). Pour cela poser la lame à faces parallèles sur le plateau, avec les faces parallèles à l'axe défini par deux des trois vis du plateau.

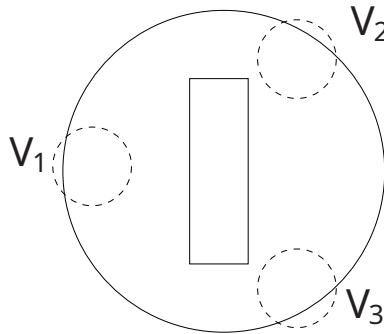


FIGURE 6 –

Éclairer le réticule à l'aide de la manette sur le côté. On va faire un réglage par auto-collimation en utilisant la réflexion sur la face avant de la lame. Aligner la lunette perpendiculairement à la lame, de manière à voir le réticule et son image ; amener à coïncidence leurs bras horizontaux, en faisant la moitié du chemin avec  $V_0$  et l'autre moitié avec  $V_1$ . Faire pivoter le plateau de 180 degrés. Recommencer le réglage de  $V_0$  et  $V_1$ , faire pivoter de nouveau le plateau, ainsi de suite jusqu'à ce que la coïncidence persiste sur les deux faces de la lame. L'axe de la lunette est alors perpendiculaire à l'axe de rotation central, quel que soit l'angle de contact entre la lame et le plateau :

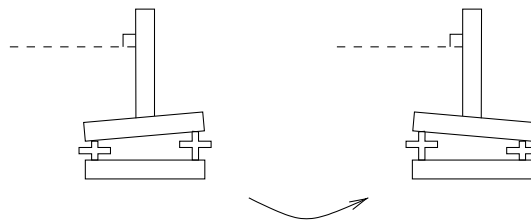


FIGURE 7 –

Il ne faut plus toucher à  $V_0$  à partir de maintenant.

#### 4.4 Utilisation avec un réseau

Placer le réseau au centre de la plate-forme centrale du goniomètre, parallèle à l'axe défini par deux des trois vis du plateau (cf. figure précédente pour la lame). Il faut régler les trois vis du plateau pour que le plan du réseau soit perpendiculaire au faisceau lumineux, et pour que ses traits soient parallèles à l'axe de rotation du goniomètre. Le premier réglage se fait en jouant sur  $V_1$  : avec le réticule éclairé, ajuster cette vis pour que les bras horizontaux du réticule et de son image par réflexion sur une des faces du réseau coïncident. Avant la suite du réglage, vérifier que la fente d'éclairage est bien verticale. Supprimer l'éclairage du réticule ; approcher une lampe spectrale (mercure, ou mercure-cadmium-zinc) de la fente d'éclairage, en masquant les lumières parasites. Vérifiez que vous voyez les différentes raies dans la lunette d'observation. Régler la largeur de la fente d'illumination la plus fine possible de manière à avoir une plus grande précision dans la lecture des angles, mais assez large pour que l'intensité lumineuse soit suffisante. Régler les vis  $V_2$  et  $V_3$  de manière à avoir des raies verticales ; on peut aussi masquer la fente d'illumination de manière à ne garder qu'une petite portion verticale des raies de diffraction, et vérifier qu'elles sont toutes alignées horizontalement.

#### Mesures

Pour une plus grande précision dans la détermination de la longueur d'onde d'une raie par un réseau à transmission, il faut utiliser la méthode du minimum de déviation<sup>1</sup>. Celle-ci permet d'éviter une mesure absolue des angles d'incidence sur le réseau. On se trouve alors dans la configuration schématisée ci-dessous :

1. Un calcul rapide peut vous convaincre qu'il n'existe pas de minimum de déviation pour un réseau en réflexion.



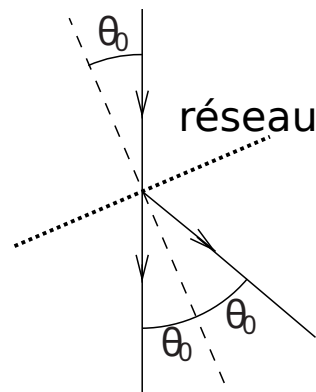


FIGURE 8 –

À l'ordre  $p$ , on a alors  $2a \sin(\theta_0) = -p\lambda$ , à savoir démontrer. Mesurer la déviation  $D = 2\theta_0$ , en déduire la longueur d'onde correspondante. Pour une meilleure précision, on peut choisir un ordre de diffraction élevé (voire effectuer un ajustement à partir de tous les ordres visibles...).

Pour étudier le réseau en lui-même, on pourra

- examiner l'influence du nombre de traits par unité de longueur sur la distance entre les ordres,
- examiner l'influence du nombre de fentes éclairées sur le pouvoir de résolution (par exemple en utilisant une fente réglable dont on pourra facilement changer la largeur),
- déterminer si les réseaux étudiés sont "blazés"<sup>2</sup>, *i.e.* si le maximum d'intensité est placé dans un ordre de diffraction non nul, typiquement 1 ou  $-1$  (il peut alors être utile de passer en lumière blanche afin d'utiliser l'absence de dispersion dans l'ordre 0 de diffraction pour le repérer facilement).

**Remarque :** on utilise historiquement un prisme plutôt qu'un réseau. Cependant un prisme a un moins bon caractère dispersif, et surtout a une dispersion non-linéaire, donc très difficile d'en tirer des mesures quantitatives.

**Données spectrales :** voir en fin de TP.

## 5 [2P] Observation des modes de résonances d'un laser à l'aide d'une cavité Fabry-Perot

On pense souvent à un laser comme une source monochromatique. Cependant, un laser est souvent multimode. Dans cette expérience, on cherche à étudier ces modes grâce à une cavité Fabry-Perot.

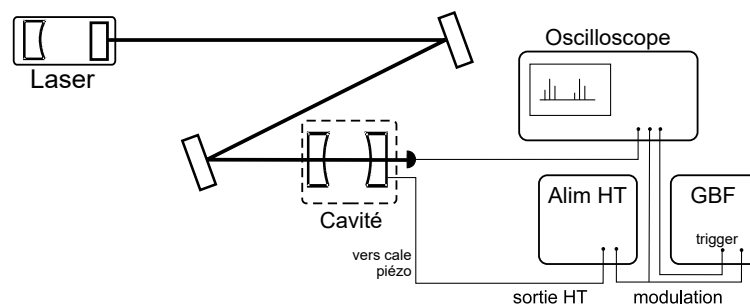


FIGURE 9 –

2. Le "blaze" est un effet de phase car la figure de diffraction d'une fonction  $T(x)$  réelle est symétrique autour de l'ordre zéro, cf. *Symétrie de la figure de diffraction*.

## 5.1 Principe de la mesure

On utilise un laser vert (HeNe à 543 nm). La longueur de sa cavité linéaire plan convexe du laser est  $L = 36$  cm environ. On utilise un Fabry-Perot confocal constitué par une cavité linéaire formée par deux miroirs convexes de rayon  $R$  séparés par une distance  $d_0 = R$ . Ce Fabry Pérot confocal a une longueur  $d_0 = 4$  cm. Ce système possède une lentille en face avant, avant sa cavité confocale et dont le rôle est de faciliter l'injection du laser. L'intérêt de prendre un Fabry-Perot confocal au lieu de prendre un Fabry-Perot non confocal est qu'il est très facile à aligner. Compte tenu de la géométrie particulière de la cavité, un faisceau se superpose à lui-même en 2 allers-retours dans la cavité, même s'il n'est pas bien aligné dans la cavité. On peut, à l'aide d'une cale piézoélectrique sur laquelle on applique une haute tension, modifier sa longueur de quelques micromètres.

Pour une cavité linéaire de longueur  $L$ , les champs résonants doivent être en phase après un aller retour de longueur  $2L$  dans la cavité. Ils ont donc une fréquence  $\nu_p = pC/2L$ , soit  $\nu_p = pISL$ , où  $ISL = C/2L$  est l'intervalle spectral libre de la cavité. Pour une cavité **confocale** de longueur  $d_0$ , les modes résonants parcourent 2 allers-retours dans la cavité avant de revenir en phase. À partir de la définition de l'ISL donnée par  $\nu_p = pISL$  l'intervalle spectral libre vaut donc  $ISL_F P = c/4d_0$ . Calculer les valeurs numériques des intervalles spectraux libres (ISL) du laser ( $c/2L$ ) et de la cavité Fabry-Perot confocale ( $c/4d_0$ ).

Le laser dont la longueur de cavité est fixe présente plusieurs modes longitudinaux séparés de l'ISL du laser. Quand le laser est injecté dans le Fabry-Perot, le Fabry-Perot ne peut transmettre que les modes qui sont résonants dans sa propre cavité. En faisant varier quasi linéairement la longueur de la cavité du Fabry-Perot en appliquant sur la cale piezo une rampe de tension, on peut ainsi visualiser les résonances du laser dans la cavité Fabry-Perot.

## 5.2 Tension sur la cale piezo du Fabry-Perot

Prendre un GBF qui permet de couper simplement le signal de sortie. ATTENTION envoyer sur l'oscilloscope la tension du GBF et JAMAIS la sortie de l'ampli Haute tension. Choisir un signal triangulaire symétrique de qqs dizaines de Hz ( la cale piézoélectrique n'apprécie pas les variations trop rapides et le fait savoir en grinçant) dans la gamme 0-10 V (c'est écrit sur le boîtier). Penser à mettre un offset pour que **le signal de modulation du GBF soit toujours positif. Il doit de plus être toujours inférieur à 10V.**

Le signal du GBF est appliqué sur l'amplificateur haute tension (EXT INPUT) dont la sortie (OUTPUT) sera envoyée sur la cale piezo du Fabry-Perot. L'amplificateur (calibre 150V à l'arrière) a un gain de 15.

Dans un premier temps, on n'allume pas l'amplificateur.

## 5.3 Alignement de la cavité

On réalise le montage indiqué sur la figure. Les deux miroirs servent à centrer et à aligner le faisceau issu du laser vert sur la cavité du Fabry-Perot confocal.

**Alignement grossier (sans la photodiode) :**

- De façon générale, on corrige principalement la position du faisceau laser avec l'orientation du premier miroir (le plus éloigné de la cavité), et l'alignement avec le second.
- Pour chaque miroir, le système permet de modifier l'orientation selon les deux directions transverses à la propagation du faisceau (horizontale/verticale).
- On commence par mettre les vis de réglage au milieu de leur plage de variation (on peut les visser à fond, les dévisser complètement en comptant le nombre de tours et revenir de la moitié en arrière) et de centrer/aligner très grossièrement le faisceau en tournant les montures des miroirs.
- On fait ensuite un premier réglage. Surveiller notamment la tache du faisceau incident sur la lentille à l'entrée de la cavité Fabry-Perot, et la réflexion de la cavité qui doit revenir vers le laser (on peut l'observer autour des miroirs avec un petit morceau de papier). Le miroir M1 le plus loin du Fabry-Perot permet de centrer le faisceau sur le Fabry-Perot. Le miroir M2 le plus proche du Fabry-Perot permet de renvoyer le faisceau réfléchi par le Fabry-Perot dans une direction très proche de celle du faisceau incident. On commence donc par centrer avec M1 le faisceau incident sur le centre de l'entrée du Fabry-Perot, puis on aligne la réflexion

avec le miroir M2, puis on recommence avec M1 puis M2, jusqu'à la convergence. Il est déconseillé de renvoyer le faisceau réfléchi directement dans l'axe du laser. En effet, il serait alors amplifié ce qui donnerait lieu à de fortes instabilités sur l'intensité du laser. En pratique la tache de réflexion doit être aussi proche que possible du trou de sortie du laser, mais pas dans le trou.

- On regarde la figure de transmission du Fabry-Perot (typiquement, une ellipse due aux réflexions successives du laser dans la cavité ou deux points si on est près du réglage final). Jouer sur les réglages des miroirs M1 et M2 (alternativement les 2 horizontaux, les 2 verticaux, etc.) pour en réduire la taille (ce qui correspond à améliorer l'alignement du laser sur l'axe de la cavité).
- Quand la tache est petite à la sortie (de l'ordre de quelques mm), on peut passer à l'alignement fin.

### Alignement fin :

- On peut allumer l'alimentation haute tension avec le signal en dent de scie.
- On doit alors observer sur une photodiode placée derrière la cavité (vérifier régulièrement qu'elle est bien centrée) (avec l'oscilloscope synchronisé par le GBF) les pics de transmission de la cavité, organisés en blocs (chaque bloc correspond aux modes longitudinaux du laser qui éclairent le Fabry Pérot).
- Jouer sur les réglages pour maximiser la hauteur des pics et les rendre les plus fins possible. Normalement les pics sont très fins et symétriques sur l'oscilloscope. Si ce n'est pas le cas, cela peut être dû à un effet de filtrage temporel de la photodiode. Diminuer alors la résistance de charge de la photodiode ou la fréquence de balayage de la cale piezo électrique.

**Procédure de réglage fin (si besoin, mais rarement nécessaire) :** Repérer les deux vis correspondant au réglage horizontal des miroirs M1 et M2. On veut optimiser un réglage par rapport à deux paramètres. On commence par tourner une des deux vis (dans un sens qu'on mémorise) de façon à perdre 50% du pic. On essaie ensuite de rattraper avec la seconde vis. Si le maximum obtenu est plus haut que le précédent, c'est que le premier réglage allait dans le bon sens. Dans ce cas, continuer dans le même sens, sinon revenir en arrière. Et rattraper de nouveau avec le second réglage. Et recommencer. On fait ensuite de même pour le réglage vertical, puis on reprend le réglage horizontal...

## 5.4 Mesure de l'écart entre modes longitudinaux du laser

On cherche maintenant à mesurer l'intensité des modes laser transmis par la cavité Fabry-Perot. Comme expliqué plus haut, la cavité Fabry-Perot ne transmettra les modes laser que quand ils y résonnent. Visualiser deux blocs successifs de résonances (penser à vérifier sur l'oscilloscope la tension de modulation pour vérifier que les deux blocs correspondent bien à deux valeurs différentes de la longueur de la cavité, et ne sont pas dus à la variation en dents de scie de la modulation) et repérer l'écart temporel  $dt$  correspondant. Repérer au sein de chaque bloc l'écart temporel  $DT$  entre deux pics successifs. En déduire l'écart de fréquence  $df$  entre deux modes longitudinaux du laser ( $dt/DT = df/ISL_{FP}$ ). En obtenir une estimation de la longueur de la cavité laser ( $df = ISL_{Laser}$ )

## 5.5 Mesure de la finesse

Faire ensuite un zoom sur un des pics et mesurer sa largeur (temporelle) à mi-hauteur. Le rapport entre la largeur d'un mode et l'écart entre deux reproductions sur deux blocs successifs du même mode donne la finesse de la cavité, de l'ordre de 100 ici. Vérifier que la finesse est la même pour les différents modes.

## 5.6 Utilisation d'un laser vert de faible longueur de cavité.

On dispose dans la collection de diodes laser vertes à 531,9 nm. Visualiser les modes du laser sur le Fabry-Perot. L'écart entre modes verts est de 0.11 nm environ, correspondant à un écart entre modes longitudinaux de  $\Delta\nu = 117\text{GHz} > ISL$  du Fabry-Perot. Peut-on mesurer directement l'écart entre modes du laser dans cette situation ?

# 6 Données spectroscopiques

Élément	Longueur d'onde (nm)	Couleur	Transition
Hydrogène moléculaire (H I) (série de Balmer)	410,173	Violet	$2 \rightarrow 6$ ( $H_\delta$ )
	434,046	Indigo	$2 \rightarrow 5$ ( $H_\gamma$ )
	486,136	Cyan	$2 \rightarrow 5$ ( $H_\beta$ )
	656,285	Rouge	$2 \rightarrow 5$ ( $H_\alpha$ )
Oxygène moléculaire (O I) (impuretés air & eau)	436,8	Indigo	
	533,0	Vert	
	615,7	Orange	
	645,6	Orange	
	700,2	Rouge	
	777,4	Proche infra-rouge	
Sodium moléculaire (Na I)	844,6	Proche infra-rouge	
Mercure moléculaire (Hg I)	589,00	} Doublet jaune	
	589,59		
	365,02	Ultraviolet	
	404,66	Violet	
	435,83	Violet	
	546,07	Vert	
	576,96	} Doublet jaune	
	579,07		
Cadmium moléculaire (Cd I)	479,99	Bleu	
	643,85	Rouge	
Zinc moléculaire (Zn I)	468,01	Bleu	
	472,22	Bleu	
	481,05	Cyan	
	636,23	Rouge	

FIGURE 10 –