

# LP2021 : Spectroscopies

16 mai 2021

Clément Gidel & Pascal Wang

**Niveau : L2**

**Commentaires du jury**

**Bibliographie**

**Prérequis**

➤ prérequis

**Expériences**

☞ Biréfringence du quartz

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Utilisation de réseaux dans la visible</b>	<b>3</b>
1.1	Réseau en transmission . . . . .	3
1.1.1	Amplitude diffractée . . . . .	3
1.1.2	Pouvoir de résolution . . . . .	4
1.2	Réseau en réflexion : réseau blazé . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Utilisation de techniques interférométriques</b>	<b>6</b>
2.1	Interféromètre de Fabry Perot . . . . .	6
2.1.1	Description . . . . .	6
2.1.2	Finesse et applications . . . . .	7
2.1.3	Applications . . . . .	7
2.2	Spectroscopie par TF . . . . .	8

## Préparation

Biblio : LP 36 de Pascal pour le réseau et réseau Blazé. <https://femto-physique.fr/optique/pdf/book-optond.pdf> pour un cours bien, <http://clea-astro.eu/lunap/Spectres> pour un peu d'histoire, <https://www.polyml.ca/phys/lsmn/phs3210/exercices/ex2.pdf> pour les ODGs

Plan : On peut aller assez vite sur les exemples et def en partie I et faire des considérations sur les modèles menant à cette dispersion / absorption en partie II. En partie III on peut s'attarder plus longtemps sur des exemples. Je pense qu'il aurait été pas mal de faire plutôt la partie sur la force de Lorentz en partie III car c'est moins crucial.

Manip : Prisme : dire qu'on veut séparer les longueurs d'ondes ?

Passage : Il est crucial de donner des ODGs et des messages clés dans cette leçon. C'est une leçon très physique qui mérite d'être nourrie de commentaires et d'analyses précises sur les exemples proposés. Un fil rouge intéressant peut être développé tout au long de la leçon pour donner plusieurs techniques autour du même thème.

## Introduction

**Spectroscopie** : Etude expérimentale du spectre d'un phénomène physique, c'est-à-dire de sa décomposition sur une échelle d'énergie, ou toute autre grandeur se ramenant à une énergie. Newton a été le 1er à rendre compte que la lumière blanche est une décomposition de plusieurs couleurs avec l'expérience du prisme qu'on peut refaire en live.

**Expérience du prisme** : On envie une lumière blanche sur un prisme à vision direct pour plus de confort. L'idée est de dire alors qu'on a ici un moyen rudimentaire mais visuel de séparer les différentes longueurs d'onde de la lumière blanche car le milieu est dispersif (1er ingrédient). De plus on peut introduire avec les mains l'idée du pouvoir de résolution en disant que plus mon spectre va être étalé, plus on va avoir un pouvoir de résolution important.

On peut donner comme motivation un exemple concret qui sera le fil rouge sur toute la leçon : comment historiquement on est parvenu à obtenir le spectre du Soleil? On peut mentionner les raies d'absorptions de Fraunhofer qui sont dues aux éléments chimiques présents dans le soleil. Comment réussir à mesurer précisément ces raies, plus précisément à les distinguer comme dans le cas du Sodium par exemple ou bien avoir leur largeur caractéristique.

**Objectif : Clément** Mon idée de plan c'est plutôt de partir du problème posé en introduction et de faire une approche un peu historique des techniques utilisées en spectroscopies. Ce n'est pas rigoureusement chronologique mais on peut augmenter en puissance en présentant des techniques de plus en plus performante et on peut alors dire qu'on explore plus en détail la structure du spectre du soleil.

## 1 Utilisation de réseaux dans la visible

### 1.1 Réseau en transmission

Les premiers réseaux inventés par Fraunhofer étaient constitués par des fils fins équidistants tendus entre deux supports. On peut considérer de tels réseaux comme une série de fentes parallèles et équidistantes.

**Présentation** Un réseau plan est constitué de  $N$  "traits" semblables parallèles d'épaisseur  $e$  distants d'un pas  $a$ . On montre un schéma C'est en quelque sorte l'extension des fentes de Young à  $N$  objets diffractants.

**Fabrication d'un réseau par transmission** Un réseau d'amplitude par transmission s'obtient en gravant des traits à l'aide d'un pointe de diamant sur une lame de verre recouverte d'un dépôt métallique opaque (aluminium). On obtient une alternance de traits transparents ( $t=1$ ) et de bandes opaques ( $t=0$ ). On trace un graphe avec les notations.

**Ordre de grandeur** Les réseaux usuels comportent 50 à 600 traits par mm sur une largeur de 5 cm. Les plus performants jusqu'à 5000 traits par mm sur une largeur de 10 cm.

**Bonus : réseau par réflexion** Un réseau de phase par transmission s'obtient en traçant des traits sur une lame de verre avec un diamant. Les réseaux par réflexion sont gravés sur une surface métallique et induisent une variation périodique du coefficient de réflexion. Les avantages des réseaux par réflexion sont : pas de verre donc utilisables dans l'UV et l'IR où le verre est absorbant et pas de défauts du verre qui entraîne des inhomogénéités d'indice, moins de réflexions parasites et de diffusion ; pas de dispersion, système plus compact. Ce sont eux qu'on utilise dans les spectromètres à réseau.

**Bonus : réseaux holographiques** Les réseaux holographiques sont obtenus par impression de franges d'interférences : on obtient un réseau sinusoidal.

**Réseaux au quotidien** On trouve des réseaux au quotidien : les sillons des CD, les pixels de l'écran, les ailes de papillons/paon qui donnent tous des bandes colorées lorsqu'elles sont éclairées par une lumière blanche.

#### 1.1.1 Amplitude diffractée

**Diffraction par un réseau**

<https://youtu.be/ieoeY5naNQ4?t=68> Lorsqu'on intercale un réseau, on voit plusieurs taches, qu'on va identifier comme des ordres. On va l'expliquer. Dans la vidéo, le réseau utilisé a 140 traits/mm, soit  $a = 7.1\mu\text{m}$ , une épaisseur  $e = 2\mu\text{m}$  et une longueur d'onde  $633\text{nm}$ . Cela donne  $e/\lambda = 3.1$ ,  $a/\lambda = 11.2$  Ce sont les valeurs par défaut de geogebra.

**Cadre : modèle 1D** On suppose que les fentes sont très allongées dans la direction verticale : on se place en géométrie unidimensionnelle.

**Facteur de forme, facteur de structure** On utilise le formalisme précédent. On calcule le facteur de forme et le facteur de structure. Dans le cadre de cette leçon on peut juste donner directement le résultat du calcul de l'amplitude et passer du temps à interpréter plutôt. On peut mentionner qu'on a un facteur de forme et structure mais ce n'est pas l'objectif de la leçon d'insister beaucoup dessus.

**Analyse graphique des paramètres**

On a ici une animation Geogebra ou éventuellement un code Python sur la Page de Vincent Barths.

**Analyse de la vidéo** On trace la courbe pour les valeurs de la vidéo, tout est en unités de  $\lambda$ . On observe bien 5 pics principaux comme sur la vidéo! On a trouvé nos taches.

**Enveloppe : facteur de forme** Le facteur de forme est la figure de diffraction d'une fente simple. Ici, c'est l'enveloppe.

**Oscillations : facteur de structure** Le facteur de structure donne les pics d'intensité, qu'on va commenter.

**Analyse graphique des paramètres** On trace la formule pour différentes valeurs de  $N$ ,  $e$ ,  $a$ . On regarde l'influence.

**Commentaires de la figure de diffraction**

- *maxima et interférences constructives, formule des réseaux* La figure de diffraction présente des maxima. On fait le calcul. On les interprète comme des interférences constructives : la différence de marche est un multiple de la longueur d'onde. Cela se résume avec la formule des réseaux que l'on donne. 🚫 Garder en tête l'interprétation géométrique, on trace un cercle unite, la direction  $\theta_0$ , l'intersection avec le cercle donne une horizontale. On trace les horizontales espacées de  $\lambda/a$  et la formule des réseaux donne que les intersections des horizontales avec le cercle donne les directions des vecteurs de résonance  $\vec{k}$ .
- *dispersion pour les petits angles* Pour des petits angles la dispersion est linéaire en la longueur d'onde, contrairement à un prisme. On fait le lien avec la vidéo : à grande distance et pour des petits angles, les maxima sont régulièrement espacés.
- *Cas  $N=2$*  le facteur de structure est alors en  $1 + \cos$ , ce sont les fentes de Young!
- *Limite  $N \rightarrow \infty$*  : on aurait des pics infiniment fins et les petits maxima secondaires disparaissent. Pour un réseau de TP, c'est le cas : dans le vidéo, on ne voyait que les maxima principaux.

**1.1.2 Pouvoir de résolution**

Ici on fait le calcul car c'est ce qui est au coeur de la leçon.

**Def :**  $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda_{min}}$ . Avec  $\delta\lambda_{min}$  le plus petit écart qu'on peut séparer en longueur d'onde. On prendra le critère de Rayleigh (Prérequis ou on le rappelle avec un schéma? : on peut montrer <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/rayleigh.html>).

Calculons, le pouvoir de resolution théorique d'un reseau éclairé en incidence normale. Une raie spectrale  $a$  longueur d'onde  $\lambda$  est déviée d'un angle  $\theta_p$  telle que

$$\sin \theta_p = p \frac{\lambda}{a}$$

Aussi, pour une variation  $\delta\lambda$  de  $\lambda$ , l'angle de dispersion varie de

$$\theta_p^{\lambda+\delta\lambda} - \theta_p^\lambda = p \frac{\delta\lambda}{a \cos \theta_p}$$

Adoptons le critère de Rayleigh : les deux raies sont résolues si

$$\theta_p^{\lambda+\delta\lambda} - \theta_p^\lambda > \frac{\delta\theta}{2} = \frac{\lambda}{Na \cos \theta_p}$$

ce qui donne

$$\delta\lambda > \frac{\lambda}{pN} = \delta\lambda_{\min}$$

d'où un pouvoir de résolution théorique :

$$\boxed{R = Np} \quad (1)$$

On peut alors montrer la simulation de fempto physique où on arrive à séparer le doublet du sodium à partir de l'ordre 4. <https://femto-physique.fr/optique/interference-a-N-ondes.php>

**Pouvoir de résolution** On considère, par exemple, que deux pics de diffraction, correspondant à deux longueurs d'onde distinctes, sont distinguables quand le maximum de l'un coïncide avec la première annulation de l'autre : critère de Rayleigh. Après [On fait le calcul](#), on aboutit au pouvoir de résolution du réseau. **ODG**: On peut séparer le doublet du sodium  $\lambda_1 = 589.0\text{nm}$  et  $\lambda_2 = 589.6\text{nm}$  au premier ordre avec un réseau 1000 traits éclairés. *La difficulté est d'avoir beaucoup de traits/mm et un faisceau cohérent sur un grand diamètre.*

**Explication du pouvoir dispersif** Chaque longueur d'onde conduit à sa propre figure d'interférence. [On change  \$\lambda\$  sur geogebra : les maxima se déplacent](#). Comme les maxima ne sont pas au même endroit *i.e.* la condition d'interférences constructives est vérifiée pour des angles différents, le réseau est dispersif.

**Bonus : limitation en ordre** La résolution monte avec l'ordre. Cependant, c'est dur de monter en ordre à cause de la luminosité. De plus, à une ordre infini, on aurait recouvrement des ordres.

**Compromis dispersion-luminosité** Le pouvoir de résolution d'un réseau est d'autant plus important que l'ordre de diffraction est élevé, ou que le nombre de figures diffractantes éclairées est important. En spectroscopie, il faut donc augmenter le nombre de fentes éclairées. Le facteur limitant est la fente d'entrée. (???)

↓ *On a vu que la lumière était maximum dans la direction de l'optique géométrique, là où on est pas dispersif. Si on mesure le spectre du soleil, on aura une luminosité parfois faible. Possible rendre la luminosité max dans un ordre dispersif ?*

## 1.2 Réseau en réflexion : réseau blazé

On peut soit faire le calcul soit donner l'idée et interpréter physiquement. Je préfère cette seconde approche.

**Réseaux blazés** ↗ Lien simulations <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/optiondu/blaze.html>. \*Revoir les calculs si on le présente. On remarque toutefois, d'après l'expression trouvée pour  $I$ , que plus l'ordre  $p$  est élevé, plus l'intensité du maximum de diffraction est faible, à cause du facteur de forme  $F$ . On utilise en pratique des réseaux dits blazés qui permettent de déplacer le maximum d'intensité (maximum du facteur de forme  $F$ ) sur un ordre de diffraction non nul ( $p = 1$  en général). Since this condition can only exactly be achieved for one wavelength, it is specified for which blaze wavelength the grating is optimized (or blazed). The direction in which maximum efficiency is achieved is called the blaze angle and is the third crucial characteristic of a blazed grating directly depending on blaze wavelength and diffraction order. Pour construire un réseau blazé, on module périodiquement la transparence du réseau. [Montrer une photo ou un schéma](#). Par propriété de modulation-transformation de la TF, cela décale spatialement le maximum du facteur de forme, sur un ordre plus élevé. Cela permet donc d'augmenter le pouvoir de résolution.

**Bonus : réseau blazé, formalisation** Le profil est donné sur la figure. Il s'agit tout simplement d'une lame d'épaisseur variable périodique, l'équivalent d'une rampe en électronique. On va donc décrire le motif par une fonction de transmission

$$t_f(x, y) = e^{i(\phi_0 + 2\pi n_v x \tan(\alpha))}$$

où  $\phi_0$  est la phase accumulée par le point en  $x = 0$ , liée à la traversée d'une certaine épaisseur de lame,  $n_v$  est l'indice optique de la lame. Cette fonction est définie pour une seule période, donc pour  $x \in [0, a]$ . Encore une fois, on va supposer une invariance selon  $y$ . On cherche, comme précédemment, la transformée de Fourier de cette fonction de transmission  $t_f(x, y)$

Cette TF correspond à la TF d'une porte fois une exponentielle complexe. On va donc trouver le même résultat que pour une fente de largeur  $a$ , mais avec un centre translaté vers la valeur  $n_v \tan(\alpha)$ . Dans la limite de petits angles, le centre de la figure va donc se retrouver au niveau de l'angle de réfraction standard de ce système optique, c'est-à-dire en  $x$  tel que  $\sin(\theta) = n_v \sin(\alpha)$ . En changeant l'angle, on peut donc mettre le maximum un peu où on le souhaite. Or, il faut se rappeler que cette partie de l'amplitude ( $A_f$ ) n'est que l'enveloppe de la figure finale, et qu'on va ensuite sélectionner certains points bien précis à l'aide du peigne piqué venant du côté "réseau". Notre but est d'avoir l'essentiel de l'énergie au niveau d'un ordre supérieur du réseau, par exemple le premier. C'est pas très dur, il suffit d'avoir  $\sin(\theta) = n_v \sin(\alpha) = \lambda/a$ . Donc on peut avoir l'essentiel de la lumière envoyé dans le premier ordre, ce qui donne une image très lumineuse, et évite d'en perdre beaucoup dans l'ordre 0 qui ne donne pas d'information (cf figure). On va donc faire mieux qu'avec un réseau de fente (du point de vue de l'info qu'on cherche en tout cas).

On trouve alors un pouvoir de résolution typique 10 fois plus important que pour le réseau par transmission. On va pouvoir alors résoudre plus précisément (**0.01 nm ça correspond à quoi ???**)

Tableau récapitulatif

Instrument	Pouvoir de résolution typique	Résolution $\delta\lambda_{\min}$ (à 500nm )
Prisme	500	1nm
Réseau	5000	0,1nm
Réseau blazé	50000	0,01nm

**Remarque :** Par rapport au réseau par transmission, le réseau blazé permet un travail dans un ordre d'interférence élevé, assurant un pouvoir de résolution théorique élevé. Mais, à lui seul, le réseau blazé n'assure pas une dispersion optimale : les ordres restent superposés, aboutissant à la confusion des couleurs si chèrement dispersées. Il faut adjoindre au réseau blazé un deuxième élément dispersif, assurant une dispersion dans une direction perpendiculaire, qui permet de distinguer les différents ordres.

Avec 2 dispersions à angle droit, la source doit nécessairement être ponctuelle (en pratique, souvent une fibre).

↓ *On arrive à résoudre différentes raies, mais on peut toujours pas résoudre la largeur d'une raie. Comment augmenter encore le pouvoir de résolution ?*

## 2 Utilisation de techniques interférométriques

### 2.1 Interféromètre de Fabry Perot

**Objectif** On peut annoncer dès à présent que le but est d'augmenter la résolution. On peut d'ailleurs donner très tôt des valeurs pour les coefficients de réflexions et transmission en justifiant que plus  $r$  est grand, plus on a d'ondes qui interfèrent.

#### 2.1.1 Description

Dans une certaine mesure, l'interféromètre de Fabry-Pérot est à l'interféromètre de Michelson ce que le réseau est aux fentes de Young. C'est interféromètre à N ondes, N étant fixé par l'angle d'incidence et la taille des miroirs.

**Présentation** Conçu par Fabry et Pérot à la fin du XIXe siècle, l'interféromètre de Fabry-Pérot est constitué de deux miroirs semi-réfléchissants parallèles, à hauts coefficients de réflexion. L'espace entre les deux lames de verre constitue une lame d'air. **ODG:** qqes mm d'épaisseur. **On montre un schéma+photo.**

**Bonus : lame à transmission contrôlée** Une lame à transmission contrôlée (faible pour un Fabry-Pérot, moitié pour la séparatrice d'un Michelson) est faite par dépôt métallique, typiquement de l'aluminium d'épaisseur contrôlée sur une lame de verre. 🌟 **On se méfiera des coefficients en amplitude  $t$  et  $r$ , et en énergie  $T$  et  $R$  : on a bien  $R = |r|^2$ , mais comme  $R + T = 1$   $T \neq |t|^2$**

**Bonus : Localisation** Chaque rayon émis par un point source  $S$  sous un angle  $i$  donne après réflexion et transmission multiples sur les faces internes des lames, une infinité de rayons qui émergent parallèle dans la direction d'incidence

et donnent des ondes qui interfèrent à l'infini. La figure d'interférence est donc localisée à l'infini.

**Figure d'interférence** Comme dans l'interféromètre de Michelson réglé en lames d'air, la figure d'interférence est des anneaux d'égal inclinaison. [On fait le calcul du profil d'intensité? Pas vraiment dans cette leçon, on fera plutôt le calcul de résolution.](#)

### Influence du coefficient de réflexion, comparaison avec l'interféromètre de Michelson

[On sort le code python ou l'animation geogebra qui est plus pédagogique.](#)

**Différence avec l'interféromètre de Michelson** Donc pour des bons miroirs la figure d'interférence obtenue pour un rayonnement monochromatique est constituée de pics très fins. Si on utilise alors un rayonnement non-monochromatique, on va voir apparaître plusieurs pics, et non plus sommer des sinus comme pour l'interféromètre de Michelson. [On peut montrer le doublet du sodium à ce moment.](#)

#### 2.1.2 Finesse et applications

**Finesse** On donne la définition de la finesse  $\mathcal{F} = \Delta\phi/\delta\phi$  qui est le rapport de l'écart entre deux pics ( $2\pi$ ) et la largeur à mi-hauteur de ces pics. On ne fait pas le calcul (on préfère faire le calcul du PR), mais on peut montrer que

$$\mathcal{F} = \pi\sqrt{R}/(1 - R) = \pi\sqrt{m}/2$$

. Avec les graphes précédents, on voit que plus la finesse est grande, plus les pics sont fins. **ODG:** Pour  $R=0.8$ ,  $\mathcal{F} = 14$ , et pour  $R=0.99$ ,  $\mathcal{F} = 313$ . Une faible augmentation de  $R$  permet ainsi un fort gain en finesse. On notera que la finesse des meilleures cavités Fabry-Pérot est actuellement de l'ordre de  $10^5$ . On peut également comparer cette finesse à celle qu'on pourrait définir pour le Michelson, qui serait de 2. Mais pour apprécier véritablement le sens de la finesse, on va calculer le pouvoir de résolution.

**Pouvoir de résolution** Le facteur de qualité, ou pouvoir de résolution, est défini comme l'inverse de la variation relative minimale de fréquence ou de longueur d'onde détectable par l'interféromètre. [Le calcul est sur fiche LP34](#)

$$PR = \lambda/\Delta\lambda = p\mathcal{F}$$

. Il est d'autant plus grand que la finesse est grande et que l'ordre d'interférence est élevé. Contrairement à la finesse, sa valeur dépend donc de la façon dont on se sert de l'interféromètre!

Réflexivité	0,9	0,95	0,99
Finesse	30	61	313
Pouvoir de résolution ( $\times 10^6$ )	1,2	2,4	12,5
$\delta\lambda_{\min}$	400fm	200fm	40fm

TABLE 1 – Résolution d'un Fabry-Pérot avec  $ne = 1cm$ ,  $\lambda = 500nm$  et  $p = 40000$

**Remarque :** Comme on peut le voir, le pouvoir de résolution est phénoménal. Cette qualité a cependant un revers. En effet, par définition, le nombre de raies que l'on peut résoudre entre deux pics d'ordre  $p$  et  $p + 1$  est égal à la finesse  $\mathcal{F}$ , ce qui correspond à une étroite fenêtre spectrale ( $\mathcal{F}\delta\lambda_{\min}$ ) qu'on appelle intervalle spectral libre. Par conséquent, le Fabry-Pérot est un spectromètre aux performances exceptionnelles tant que le spectre à étudier est peu étendu sans quoi les différents ordres se mélangent (comme dans un réseau de diffraction).

**Considérations pratiques** En réalité, la finesse est différente de celle théorique à cause du parallélisme des miroirs, il faut que l'épaisseur varie sur une distance inférieure à la longueur d'onde. On le fait manuellement avec des vis micrométrique ou électroniquement avec des quartz piézoélectriques. On utilise aussi le Fabry-Pérot en mode balayage, on fait varier  $e$  plutôt que l'angle d'incidence et on récupère le signal sur un capteur au foyer d'une lentille.

#### 2.1.3 Applications

Dans cette partie on peut simplement se contenter de donner rapidement des ODGs sur des applications à ce nouveau système avec une résolution importante. L'exemple de la largeur du mercure me paraît le plus pertinente.

**Laser** Les lasers sont des résonateurs optiques et comportent une cavité optique constituée de miroirs en regard. La cavité permet de sélectionner un ou plusieurs modes de largeur spectrale fine

**Filtre interférentiel** Un filtre interférentiel est une lame diélectrique à faces parallèles partiellement réfléchissante. Les longueurs d'ondes transmises sont celles qui réalisent les conditions d'interférence à ondes multiples. La fonction de transfert est celle d'une cavité Fabry-Pérot. *La longueur d'onde sélectionnées par le filtre interférentiel dépend de l'angle d'incidence. En toute rigueur, les filtres interférentiels doivent donc être éclairés en lumière parallèle. Plus précisément, ils sont calibrés (c'est-à-dire que la valeur annoncée pour le filtre est prévue) pour une incidence normale.*

**Largeur d'une raie au mercure (cf Sextant p255).** On isole la raie verte en utilisant un filtre interférentiel. Utiliser, dans un premier temps, une lampe à vapeur de mercure basse pression. Observer que les anneaux sont encore nets pour une épaisseur  $e$  de 5 mm. Sans changer l'épaisseur, remplacer la lampe basse pression par une lampe haute pression que l'on vient juste d'allumer. La figure d'interférence est toujours bien contrastée. Après quelques minutes de fonctionnement, la figure se brouille complètement. Réduire alors l'épaisseur de la lame d'air. Observer que les anneaux réapparaissent progressivement lorsque  $e$  devient inférieur au millimètre, devenant d'autant plus fins que l'épaisseur est faible.

Pour interpréter ces résultats, on rappelle que l'intervalle spectral libre, soit  $\Delta\lambda_{\text{libre}} = \lambda^2 \Delta\sigma_{\text{libre}} = \lambda^2/2e$  diminue lorsque l'épaisseur augmente. À très faible épaisseur les anneaux, très fins, n'occupent que la fraction  $1/F$  de l'intervalle entre deux anneaux consécutifs. Quand l'épaisseur augmente, la largeur de raie  $\Delta\lambda$  devient supérieure à  $\Delta\lambda_{\text{libre}}/F$ . La largeur relative des anneaux n'est plus donnée par l'inverse de la finesse de l'interféromètre, mais par le rapport  $\Delta\lambda/\Delta\lambda_{\text{libre}}$ . Les anneaux s'élargissent, jusqu'à devenir pratiquement en contact avec leurs voisins lorsque  $\Delta\lambda_{\text{libre}}$  devient comparable à  $\Delta\lambda$ . Le contraste s'annule pour des épaisseurs encore supérieures.

Pour la lampe haute pression chaude, le contraste s'annule pour une épaisseur de l'ordre de 1 mm. La largeur de la raie verte est donc de l'ordre de 0,2 nm pour cette lampe haute pression.

Pour la lampe basse pression, les anneaux sont encore bien contrastés pour une épaisseur de 5 mm. La raie verte est donc de largeur inférieure à 0,04 nm dans cette lampe basse pression.

↓ *Pourquoi n'utilise-t-on plus tellement les interféromètres de Fabry Pérot ? La résolution des spectroscopes à transformée de Fourier, reposant sur le fonctionnement de l'interféromètre de Michelson, est limitée non pas par les caractéristiques de l'interféromètre mais par des paramètres d'acquisition - durée, stabilité du moteur, échantillonnage - qui permettent avec l'informatique moderne d'obtenir des résultats plus précis et plus faciles à interpréter*

## 2.2 Spectroscopie par TF

Source : [https://media4.obspm.fr/public/ressources\\_lu/pages\\_fourier/impression.html](https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_fourier/impression.html)

**Présentation :** Un spectromètre par transformée de Fourier correspond à un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air : les 2 miroirs sont, à une image via la séparatrice près, parallèles, séparés de la différence de marche. **Bien insister sur le fait qu'ici on cherche à caractériser la source, ainsi on contrôle au mieux les paramètres de l'interféromètre.**

**Interférences à 2 ondes :** On note  $\delta$  la différence de marche entre les 2 faisceaux monochromatiques interférant à l'infini, et  $\varphi$  le déphasage. La relation entre  $\varphi$  et  $\delta$  s'exprime, à la longueur d'onde  $\lambda$  :  $\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\delta}{\lambda}$ .

On notera par la suite, en fonction du nombre d'onde :  $\varphi = 2\pi\sigma\delta$  Issus de la même source, ces faisceaux sont cohérents, et leurs amplitudes vont s'additionner. En notation complexe :  $A = A_1 + A_2 = A_0(1 + \exp i\varphi)$

**Interférogramme** L'intensité diffractée, pour une différence de marche  $\delta$  entre les 2 miroirs, sur l'axe, c'est-à-dire dans l'anneau central, constitue l'interférogramme. En lumière monochromatique de nombre d'onde  $\sigma$ , le signal d'interférence s'écrit à la différence de marche  $\delta$  :  $I(\delta) = |A|^2 = I_0(1 + \cos 2\pi\sigma\delta)$  Les unités couramment employées sont, pour le spectre, les nombres d'onde, comptés en  $\text{cm}^{-1}$  et la différence de marche, comptée en cm. La période spatiale de l'interférogramme est  $1/\sigma$ , soit tout simplement la longueur d'onde  $\lambda$ .

**Interférences et transformée de Fourier** Pour une source non-monochromatique de densité spectrale  $\mathcal{F}(\sigma)$ , dans la bande spectrale  $[\sigma_1, \sigma_2]$ , l'interférogramme prend la valeur :  $I(\delta) = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \mathcal{F}(\sigma)[1 + \cos 2\pi\sigma\delta]d\sigma$  Sans cohérence temporelle entre les différentes couleurs, il y a sommation des intensités spectrales  $\mathcal{F} = dI/d\sigma$ . La partie modulée (c'est-à-dire qui dépend de la différence de marche  $\delta$ ) de l'interférogramme, correspond à la partie réelle de la TF de la densité spectrale :  $I'(\delta) = \text{Re} \left\{ \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \mathcal{F}(\sigma) \exp(i2\pi\sigma\delta) d\sigma \right\} \simeq \text{Re}\{\text{TF}(\mathcal{F}(\sigma))\}$  En fait, l'interférogramme réalise la TF de la distribution spectrale de la source. Il s'ensuit que la TF inverse de l'interférogramme permet de remonter au spectre :

$\mathcal{F}(\sigma) \simeq \text{TF}^{-1}\{I(\delta)\}$ . On montre différents interférogrammes pour certains spectres.

En conclusion, on peut extraire, à partir de l'interférogramme, trois types d'informations simples :

- les variations à petite échelle en  $\delta$  renseignent sur la longueur d'onde moyenne du spectre ; il suffit pour cela d'examiner le voisinage de  $\delta = 0$
- une modulation périodique (battement) à plus grande échelle en  $\delta$  révèle l'existence de deux raies voisines dans le spectre
- enfin, la façon dont l'interférogramme se rétrécit pour les grandes valeurs de  $\delta$  permet d'estimer la largeur des raies constituant le spectre.

**Bonus : Résolution spectrale :** La résolution spectrale varie en fonction de la différence de marche maximale  $D$  explorée. Elle s'exprime simplement :  $\delta\sigma = \frac{1}{D}$ . Exemple : pour une raie à  $20000 \text{ cm}^{-1}$  et  $D = 2 \text{ cm}$ ,  $\delta\sigma = 0.5 \text{ cm}^{-1}$  et le pouvoir de résolution vaut donc  $R = \sigma/\delta\sigma = 40000$ .

**Bonus : Intervalle spectral libre** L'interférogramme, obtenu par pas de différences de marche équidistants de  $d$ , admet une fréquence de coupure  $\sigma_c = 1/2d$ . La valeur de cette fréquence, donc la valeur de  $d$ , ne peuvent pas être prises au hasard.

Le spectre étant recalculé à partir de l'interférogramme par transformée de Fourier rapide (fft), la validité du principe suppose que les bornes de l'intervalle spectral libre, multiples entiers consécutifs de  $\sigma_c$ , encadrent entièrement le domaine spectral défini par le filtre d'entrée.

**Application (Sextant p 241) :** Avec cette méthode on observe une décroissance monotone du contraste de la source.  $L = 2\delta = 1/\Delta\sigma = \lambda^2/\Delta\lambda$  on en déduit alors  $\Delta\lambda \simeq 0.2nm$ . Commentaire : ODG seulement car évaluation à l'oeil, ouverture possible sur les paramètres d'acquisition pour optimiser le spectre.

**Message :** Avec la spectro par TF on a pas forcément une résolution beaucoup plus élevée mais on peut mieux contrôler la résolution du spectre via la durée d'acquisition. De plus, c'est plus visuel.

## Conclusion

Dans cette leçon on a pu caractérisé plusieurs techniques pour mesurer un spectre : dans la continuité du premier spectromètre (le prisme) on a le réseau avec lequel on peut résoudre un double de raies spectrales. Encore plus puissant on a les spectromètres interférométriques comme Fabry Perot qui permet encore d'augmenter la résolution. Cependant aujourd'hui on a tendance à davantage utiliser des méthodes numériques donc la spectroscopie par TF est privilégiée.

**Ouverture :** Spectroscopie IR (utilisation en chimie), RMN, ...

### questions :

- C'est quoi la définition d'un spectre ?
- A quelle grandeur est associé le spectre ? A l'énergie.
- Pourquoi on étudie le spectre du soleil ? On remarque des absorption.
- Dans quelle domaine la spectroscopie du soleil est importante ? Astrophysique, atmosphere, etc...
- Si on met le jumeaux du soleil très loin, est ce qu'on aurait le même spectre ?
- C'est quoi l'effet Doppler sur le spectre ? Red Shift.
- Ca veut dire quoi l'expression corps noir ? On peut mesurer la temperature a partir du spectre du soleil ?
- C'est quoi la différence entre le soleil et la terre ?
- Est ce qu'il y a toute les couleurs dans le spectre ? Non il y a aussi les synthese additive faite par notre cerveau.
- C'est quoi un prisme à vision directe ? C'est un accollement de trois prismes.
- Pourquoi on utilise pas un prisme pour mesurer des longueurs d'onde ? Parce que ce n'est pas forcement linéaire en dispersion (loi de Cauchy).
- Sur quoi repose la dispersion de la lumière dans le prisme ? Différence d'indice optique dans le verre.

- Tu peux nous faire la demo du théorème de Malus? On part de la transmission d'une onde plane d'un milieu plan 1 a 2 et le principe de retour inverse de la lumiere.
- Tu nous a dit que l'on avait un rapport de sinus, comment on le définit?
- Tu nous a précisé des ordres de grandeurs, mais tu n'a pas précisé la taille des fentes, la longueur d'onde, le mieux aurait été d'utiliser les mêmes paramètres que ceux de l'animation.
- Sur le critère de Rayleigh, est-ce que c'est un critère optimiste ou pessimiste? Sur deux tâches de taille différente, cela dépend aussi de l'intensité relative. C'est avant tout un critère subjectif pour comparer toujours avec le même critère.
- Pour le delta du sodium c'est bon à partir de combien de traits par mm? À partir de 300 traits.
- Réseau blazé cf la leçon docteur dessus.
- Sur le Fabry Perot, pourquoi on a des anneaux? Parce que l'intensité est fonction uniquement de l'angle. Il faudrait mettre une photo des anneaux.
- Est-ce qu'on peut résoudre le delta du sodium au Fabry Perot? Quelles sont les précautions à prendre? Cela marche bien pour ça presque tout.
- Avec le Fabry Perot tu nous a dit qu'il y avait le facteur de réflexion R, comment on fait un très bon miroir? Précision sur la planéité, c'est une réflexion métallique, qui dépend de l'angle.
- Qu'est-ce qu'il fait que sur un Michelson on peut faire la résolution du delta du sodium? Il y a une notion de cohérence et de brouillage du contraste.
- Dans ta partie sur la spectroscopie par TF, qu'est-ce qu'il faudrait prendre par précaution avant d'utiliser le moteur? Il faut étalonner le moteur, il doit tourner à vitesse constante, pas trop rapide.
- Sur ta CCL on aurait pu faire quelle ouverture? Parler d'autre spectroscopie, IR, RMN, etc... D'autre domaine autres que de l'optique également.
- Ta leçon se tient, mais on pourrait parler d'autres choses que de l'optique : RMN, spectroscopie de l'hydrogène. On peut commencer avec un fil conducteur de type chimie où il faut identifier les composants, et faire de la RMN, de l'IR. On peut parler de spectre à partir du moment où l'on parle d'énergie, en électricité par exemple pour des résonances.
- Il y a aussi une MP spectroscopie, mais il ne faut pas faire l'un dans l'autre.