

M08 : Interférences lumineuse

Antoine Allard / Pascal Neveu

Rapport de jury 2014 :

A propos des expériences d'optique

Le jury voit encore souvent des dispositifs mal alignés, avec des images présentant des aberrations, ainsi que des éléments optiques prétendument éclairés en incidence normale mais qui ne le sont pas en réalité ; rappelons que de nombreux bancs d'optique peuvent être trouvés dans la collection et que l'éclairage d'un réseau en incidence normale ne s'effectue pas «à l'œil»... Ces remarques s'appliquent à tous les montages dans lesquels l'optique est utilisée et pas seulement à ceux qui ont spécifiquement trait à l'optique.

D'autre part, il convient de savoir tirer parti des propriétés spécifiques des diodes laser : longueur de cohérence plus petite que celle des lasers He-Ne, accordabilité, ouverture numérique, effet de seuil (fonctionnement en LED, fonctionnement en laser). Il faut enfin faire attention aux lasers dits «non polarisés», dont la polarisation est en fait partielle et fluctuante, ce qui peut conduire à des signaux très fluctuants en particulier pour des expériences quantitatives.

A propos du montage

Certains candidats ne font pas le rapport entre leurs connaissances théoriques sur les cohérences spatiale et temporelle, et leurs observations expérimentales. Il en résulte alors des montages mal réglés ou mal utilisés. Pourtant ce montage peut fournir des résultats quantitatifs précis. Il est en particulier intéressant de se placer dans des cas limites où la cohérence spatiale ou la cohérence temporelle peuvent être étudiées indépendamment. Enfin, il n'est pas raisonnable d'envisager d'apprendre à régler un interféromètre de Michelson devant le jury.

Bilan de la session 2014 :

(Note = 17)

Plan du montage :

I/ Cohérence

a/ Cohérence spatiale

Je me suis servi de la caméra Caliens. Montage classique avec les fentes d'Young et une fente source dont on fait varier la largeur. Attention aux problèmes de compatibilité entre le matériel de Lyon et celui de Cachan (les hauteurs de pied sont différentes). Tracer le sinus cardinal commenter.

b/ Cohérence temporelle

Se servir d'une lampe à vapeur de mercure haute pression, d'un filtre interférentiel pour la raie verte du mercure et d'un Michelson réglé en lame d'air. Attention, quand la lampe est allumée depuis longtemps elle devient trop lumineuse et on ne voit plus rien. Se placer au contact optique puis charioter jusqu'à annuler le contraste. On remonte ainsi à la longueur de cohérence temporelle. J'ai parlé de la longueur finie des trains d'onde pour expliquer tout ça avec les mains. On peut aussi remonter à la largeur spectrale de la raie verte du mercure.

II/ Application : mesure de l'épaisseur d'une lame couvre objet

Partir de la configuration précédente du Michelson et faire le passage lame d'air coin d'air : on utilise une lampe blanche, un filtre anticalorique et on collimate le faisceau en entrée du Michelson. Il faut déjà avoir réalisé un contact optique approximatif avec la lampe à vapeur de mercure. Ensuite essayer de trouver les teintes de Newton puis avec un PVD déterminer précisément le contact optique. Tourner alors le miroir (réglage fin) jusqu'à obtenir les franges de coin d'air. Introduire une lamelle de microscope sur un des bras. Retrouver la frange achromatique et en déduire le contact optique.

III/ Interférences à onde multiples : application à la détermination de la constante de Rydberg

Le faire avec le goniomètre.

Questions :

Pour la première expérience :

-Est-on dans les conditions pour appliquer la formule donnant le contraste ? Pas vraiment à cause du fait que ce n'est pas rigoureusement de la diffraction de Fraunhofer que l'on observe.

Pour la seconde expérience :

-Pourquoi les bords de la figure d'interférence étaient-ils moins contrastés que le centre. J'ai dit que le problème devait venir de la lentille de projection qui ne fonctionnait pas dans les conditions de Gauss pour les rayons paraxiaux.

-Quel est l'ordre de grandeur de la finesse spectrale de la raie verte du mercure ?

Pour la troisième expérience :

-Ils m'ont fait dire que j'avais oublié de collimater le faisceau et de faire l'image du miroir sur l'écran d'observation avec une lentille. Connaître le théorème de localisation des franges et son application dans ce cas particulier.

-Influence de la position de la lame au niveau du bras ?

-Incertitude ? Comment faire des mesures plus précises ?

-Quel est l'ordre de grandeur de l'incertitude, par quoi est-il donné ? J'ai dit qu'il était donné par la longueur de cohérence temporelle de la lampe blanche.

-Que lit-on sur le vernier ? La moitié de la différence de chemin optique (piège)

Pour la quatrième expérience :

-Comment aurait-on pu rendre la mesure plus précise ? Mesure l'angle de chaque côté et diviser par deux l'écart angulaire ainsi trouvé ?

-Aurait-on pu observer l'ordre 2 ? Pour quelles raisons ne peut-on pas observer le deuxième ordre ?

-Incertitudes ?

-Pour déterminer le Rydberg vous auriez aussi pu utiliser l'ordonnée à l'origine. Qu'est ce qui est le plus précis : la détermination de la pente ou de l'ordonnée à l'origine ?

Ressenti personnel et commentaires du jury : Bon montage mais il manquait un traitement correct des incertitudes (notamment pour le gonio). Pour la première manip, il faut mettre la fente source au plan focal objet d'une lentille pour pouvoir comparer à la formule donnant l'évolution du contraste????

Attention ! Le montage s'appelait précédemment : "Interférences lumineuses ; conditions d'obtention"

Rapport de jury 2013 :

Idem 2014

Bilan de la session 2013 :

Personne de Cachan n'a choisi ce montage.

Rapport de jury 2012 :

Les dispositifs d'interférences sont très divers. En choisir deux bien maîtrisés permet des présentations de qualité sur les cohérences spatiale et temporelle, et une analyse du lien entre les considérations théoriques et les observations expérimentales. Des montages bien réglés et bien utilisés fournissent des résultats quantitatifs précis si le candidat s'y prend bien.

Il ne faut pas confondre les annulations périodiques de contraste obtenues avec un doublet (souvent le doublet jaune du sodium) et la teinte plate de fin de cohérence temporelle due à une trop grande différence de marche. Les battements de contraste donnent des informations sur l'écart de longueurs d'onde entre les deux raies du doublet, mais ne donnent pas d'information sur la longueur de cohérence de la source lumineuse.

Bilan de la session 2012 :

Personne de Cachan n'a choisi ce montage.

Rapport de jury 2011 :

Idem 2013 et 2014

Bilan de la session 2011 :

Personne de Cachan n'a choisi ce montage.

Rapport de jury 2010 :

Idem 2011, 2013 et 2014

Bilan de la session 2010 :

3 personne de Cachan on choisit ce montage :

- (Note = 15)

Plan personnel :

1 Phénomènes d'interférences

1.1 Condition de monochromaticité

Exp : Fabry-Pérot avec lampe Hg et anneaux très larges

1.2 Condition de phase

Pas de manip mais j'en ai parlé

1.3 Figure d'interférences

Exp : fentes d'Young avec Hg pour fit de la figure d'interférences et remonter à l'écartement des fentes et à leur largeur

Transition : on élargit la source : brouillage

2 Etude de la cohérence spatiale

2.1 Largeur de la fente source pour inversion de contraste

Exp : Montage lampe+filtre+fente source+bifente d'Young+CCD

2.2 Localisation des anneaux avec un dispositif à division d'amplitude

Exp : localisation des franges en coin d'air du Michelson suivant la largeur de la source

3 Etude de la cohérence temporelle

Exp : Mesure de la largeur du doublet du sodium par les anticoincidence

4 Etude de la cohérence de polarisation

Exp : on place un polariseur sur un bras du Michelson précédent

Remarques :

Les préparateurs étaient très sympas. Ils semblaient même impressionnés par la débauche de matériel que je leur demandais. J'adore l'optique alors je ne me suis pas gêné pour montrer que je savais bien régler tout un tas d'appareils rapidement. Cependant, il a été très difficile de faire le noir dans la salle ce qui m'a beaucoup gêné pour l'expérience des fentes d'Young, et bizarrement il y avait assez peu de lampes disponibles (quartz-iode ou Hg).

Je me suis pas mal dispersé au début, mais au final 10 minutes avant le début j'étais prêt. Là j'ai fait l'erreur de vouloir affiner ma mesure sur les fentes d'Young, alors que j'aurais dû préparer mon discours, car il a fallu commencer je n'avais pas vraiment prévu mon intro ni prévu ce que j'allais dire sur le phénomène d'interférences en général. J'ai donc écrit et dit des erreurs grossières sur la physique de base au début, et ai du mal à expliquer ma première expérience qui pourtant étaient très jolie et nouvelle puisqu'improvisée le jour J.

Ensuite, ma figure d'interférences pour les fentes d'Young n'était pas très jolie, j'ai dû la réajuster en direct, et la mesure n'était pas très bonne. Pour la suite tout c'est très bien passé, à part que j'ai dû refaire en direct et en 2 minutes le réglage du Michelson suite à une fausse manip entre 2.2 et 3. Au moins cet incident m'a fait manipuler devant le jury.

Les questions ont été je trouve assez difficiles. Déjà il a fallu justifier les écarts entre les valeurs théoriques et mesurées, corriger mes erreurs de l'intro, puis parler des champs d'interférences du Michelson en coin d'air. Enfin le jury m'a coincé sur comment retrouver des interférences en lumière polarisée avec le montage de 4. Une question dont je n'ai pas compris la portée a été de justifier pourquoi j'avais utilisé un Fabry-Pérot comme première manipulation. J'ai répondu que c'était juste pour montrer les interférences par couleur, mais apparemment le jury aurait voulu me voir commencer par un dispositif plus simple.

- (Note : 9)

J'avais préparé 4 manips en préparation et je n'ai pu en présenter que 3. J'avais l'impression de bien présenter, conformément à ce que j'avais prévu mais le jury n'a pas eu l'air d'être aussi enthousiaste que moi. La première manip' était la condition de polarisation avec le séparateur de faisceau. J'avais fait un schéma au tableau et j'avais bien introduit le matériel et son utilisation. Toutefois, le jury n'a pas eu l'air de saisir le principe. En effet, les 3 membres du jury sont venus voir la manip lorsque je la présentais mais ils sont aussi venus à tour de rôle la regarder et en discuter quand j'étais sur la manip suivante. De plus ils m'ont redemandé des précisions sur son fonctionnement lors des questions. Bref, elle les a beaucoup perturbé et a parasité leur attention. Les questions ont donc porté essentiellement sur des précisions sur la réalisation des manips. Et s'est terminée sur l'erreur importante que j'avais sur le calcul de l'écart du doublet du sodium... jusqu'à ce qu'un des membres du jury se rendent compte que j'avais mal rentré mes chiffres dans la calculatrice que je tombais en fait pile sur la bonne valeur...

- Comment fonctionne la manip sur la condition de polarisation ?

- Comment aurait-on pu améliorer la visualisation des franges sur la caméra Caliens pour la manip sur la cohérence spatiale avec les trous d'Young et la lampe au Mercure ? (en éloignant la CCD des trous d'Young)

- Comment aurait-on pu améliorer la précision de la mesure des anti-coïncidences avec le doublet du sodium ? (en en considérant une dizaine au lieu d'une seule) Sentiment final : aucun !
Entretien avec le jury : ils ont compris que je n'ai pas éloigné la CCD des trous à cause des problèmes de luminosité et de matériel (pas de tiges adaptées pour maintenir la distance CCD/trous constante), ils ont également compris que je n'ai pas pris le temps d'améliorer le contraste de mon Michelson à la fin du montage (il s'était dégradé pendant la présentation). Le plan choisi était bon (Condition de polarisation, Cohérence Spatiale, Cohérence Temporelle)

- (Note = 2)

Ca a été une catastrophe, notamment car j'ai utilisé plusieurs fois les lampes spectrales dans plusieurs expériences. Conséquence : au début de la préparation, elles n'étaient plus chaudes car je les avais débranchées et comme celle que j'avais mettait 15 minutes à chauffer, je n'ai rien pu faire pendant un moment. Le jury n'a pas tenu bon de me mettre des points sur la théorie que je connaissais très bien, j'ai effectivement parlé pour combler les trous lors de la préparation... A noter qu'on ne peut pas faire d'expérience relative à la cohérence spatiale avec un laser comme l'avait conseillé un correcteur, ça n'a pas dû jouer en ma faveur non plus, prendre une lampe blanche. Les questions ont surtout porté sur le choix des appareils optiques pour tel ou tel montage... Il me semble qu'aucun tp pendant l'année en optique a été consacré à ce montage, c'est bien dommage.

TABLEAU

MPO8 Interférences lumineuses

I] Conditions d'interférences

1) Cohérence spatiale

$\lambda = 546 \text{ nm}$
 $D = 33 \pm 1 \text{ cm}$

$I(x) = I_0 \left[1 + \underbrace{\text{sinc}^2\left(\frac{\pi ab}{\lambda D}\right)}_{\Gamma(a)} \cos\left(\frac{2\pi b x}{\lambda D}\right) \right] \underbrace{\text{sinc}^2(\alpha x)}_{\text{diffraction}}$

contraste $\Gamma(a)$

— mission de contraste

$l_{s,th} = 0,73 \pm 0,03 \text{ mm}$
 $l_{s,exp} = \dots \pm \dots \text{ mm}$

$l_s = \frac{\lambda D}{b}$

longueur de cohérence spatiale

2) Cohérence temporelle

Interféromètre de Michelson en lame d'air

$S = 2e \cos(\epsilon)$

Quartz-Iod
 filtre interférentiel
 M1
 M2
 moteur
 photodiode

longueur de cohérence temporelle telle que

$l_c \Delta\sigma \approx 1$

$(\Delta\lambda)_{th} = 10 \text{ nm}$
 $(\lambda = 546 \text{ nm})$
 $\Rightarrow l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = 30 \mu\text{m}$

$I(s) = I_0 \left[1 + \text{sinc}^2(\pi \Delta\sigma s) \cos(2\pi \sigma_0 s) \right]$

II] Exemples et applications

1) Principe

2) Détermination d'une constante fondamentale

$(l_c)_{exp} = \frac{(\lambda^2)_{exp}}{(\Delta\lambda)_{exp}} = 37,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$
 $(\Delta\lambda)_{exp} = \dots \pm \dots \text{ nm}$

$R_{K_{12}} - R_{K_{21}} = a \lambda$

$\frac{1}{\lambda} = R_{K_{12}} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda} \right)$

$R_{K_{12}} = 13,6 \text{ eV}$
 $R_{K_{21}} = \dots \pm \dots \text{ eV}$

$(\lambda_{K_{12}})_{th} = 656,28 \text{ nm}$
 $(\lambda_{K_{21}})_{exp} = \dots \pm \dots \text{ nm}$

a est déterminé avec une référence laser $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

$n=4$ Série de Galun
 $n=3$
 $n=2$
 filtre interférentiel
 lame H-De
 $\lambda = 632,8 \text{ nm}$
 M1
 M2
 camera R

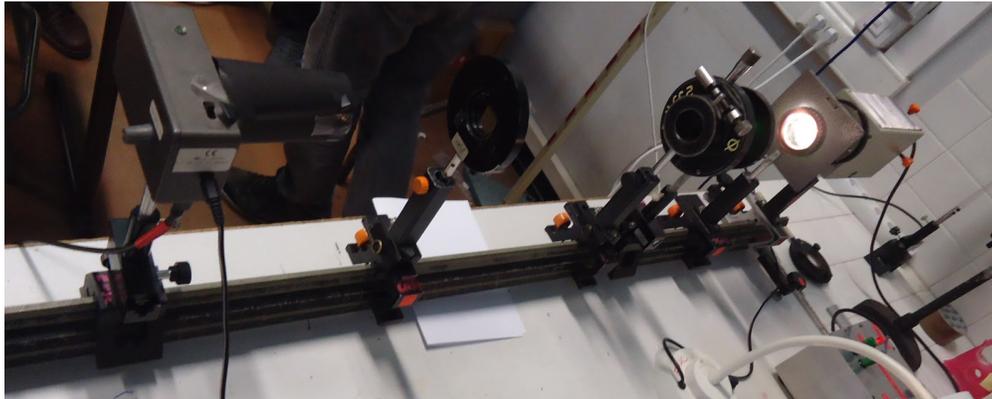
I/ Conditions d'obtention d'interférences lumineuses

1) Cohérence spatiale : expérience des Bifentes d'Young

- Principe et montage

L'idée est d'illustrer la cohérence spatiale, donc il faut une **source incohérente spatialement**. Le montage se résume à

lumière blanche -> filtre anticalorique (pour ne pas abîmer le filtre qui suis) -> filtre interférentiel (pour éviter d'avoir des problèmes de cohérence temporelle.) -> **fente source de largeur réglable** -> bifente de Young ($a=230\mu\text{m}$) -> barrette CCD en USB (un cache est mis pour avoir moins de bruits)



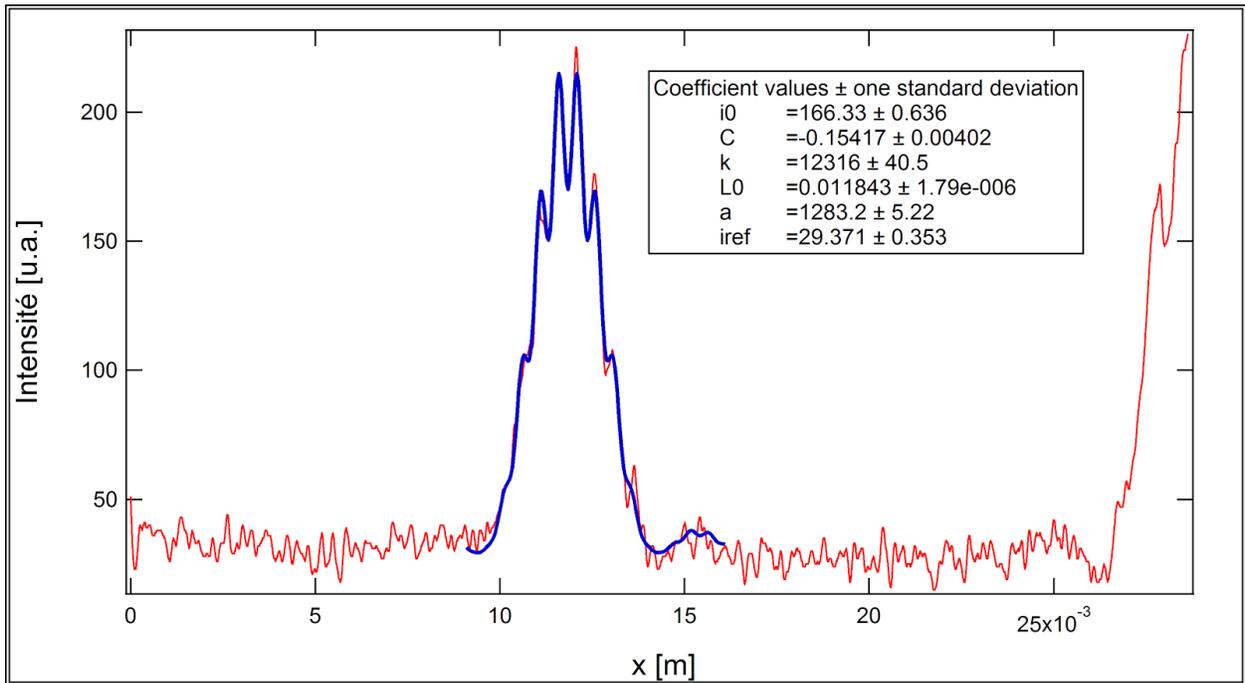
Plusieurs fentes sources sont disponibles, on a choisi celle avec sa courbe d'étalonnage directement scotché dessus, le vernier y est précis à 0.05 mm, largement suffisant.

Pour que l'on puisse avoir une belle courbe de contraste correspondant à la plage de largeur de fente disponible, il faut placer la bifente à environ 30cm de la fente source.

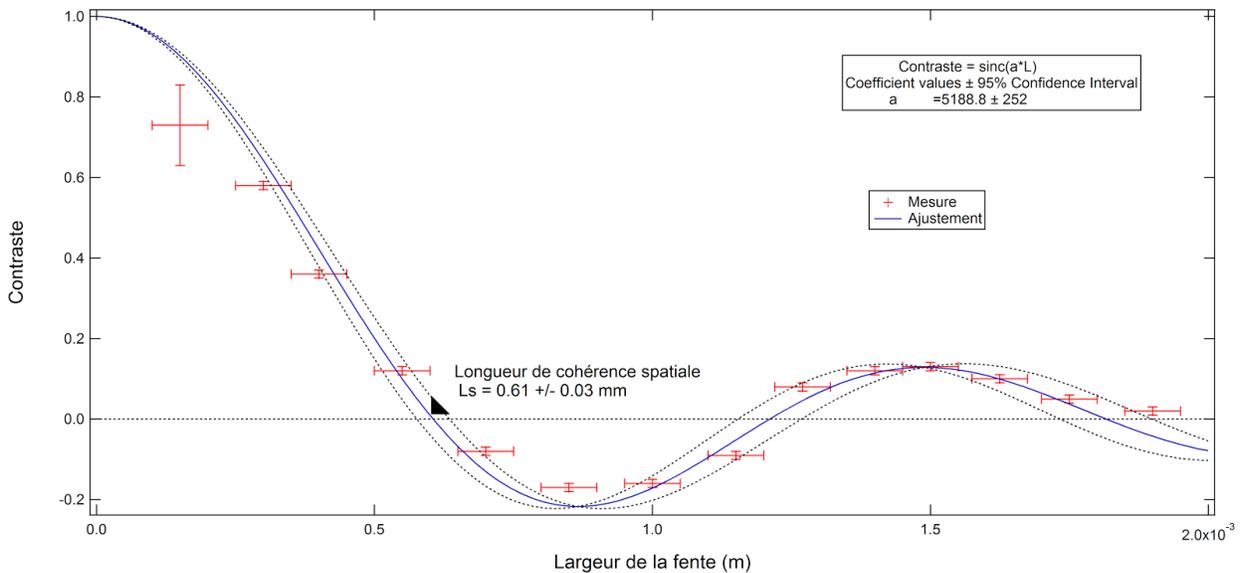
- Resultats

Concernant l'analyse, pour une largeur de fente donnée, on exporte la figure d'interférence jusqu'Igor, et on ajuste en $I_0(1 + C \cdot \cos(k(x - L_0))) \cdot \text{sinc}(a \cdot (x - L_0)) + I_{ref}$. C est le contraste, x_0 la position de la frange centrale et le sinc provient de la largeur non nulle des bifentes d'Young. **Ça fait beaucoup de paramètres de fit et Igor peut avoir du mal à converger, la convergence marche bien si on impose une valeur initiale de x_0 très proche de la valeur lue directement sur le graphe.**

Voilà un exemple de graphe, avec son ajustement.



Et voilà notre résultat pour le contraste, en bleu l'ajustement en sinc avec ses barres d'erreurs à 95% en pointillés :



Il ne faut pas s'attendre à pouvoir superposer la courbe théorique et expérimentale, car celle-ci suppose un éclairage parfaitement cohérent de la bifente (on est dans le cône de diffraction mais quand même) et un éclairage homogène de la fente source. On trouve donc une longueur de cohérence spatiale plus courte que prévu.

2) Cohérence temporelle : mesure de la largeur spectrale d'un filtre interférentiel avec un interféromètre de Michelson

- **Principe et montage**

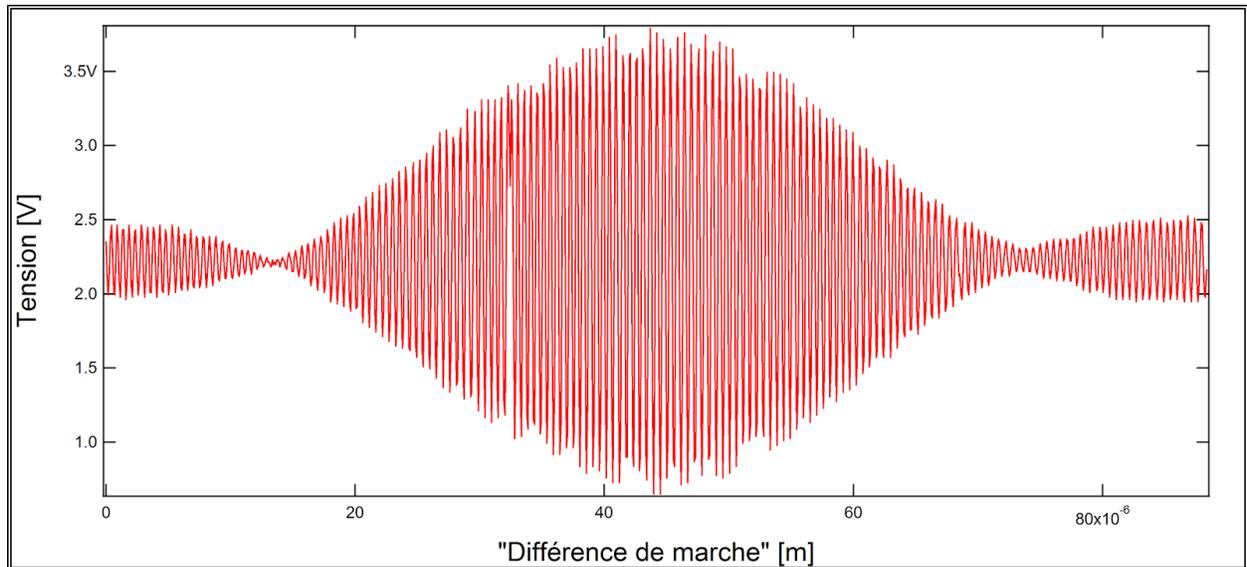
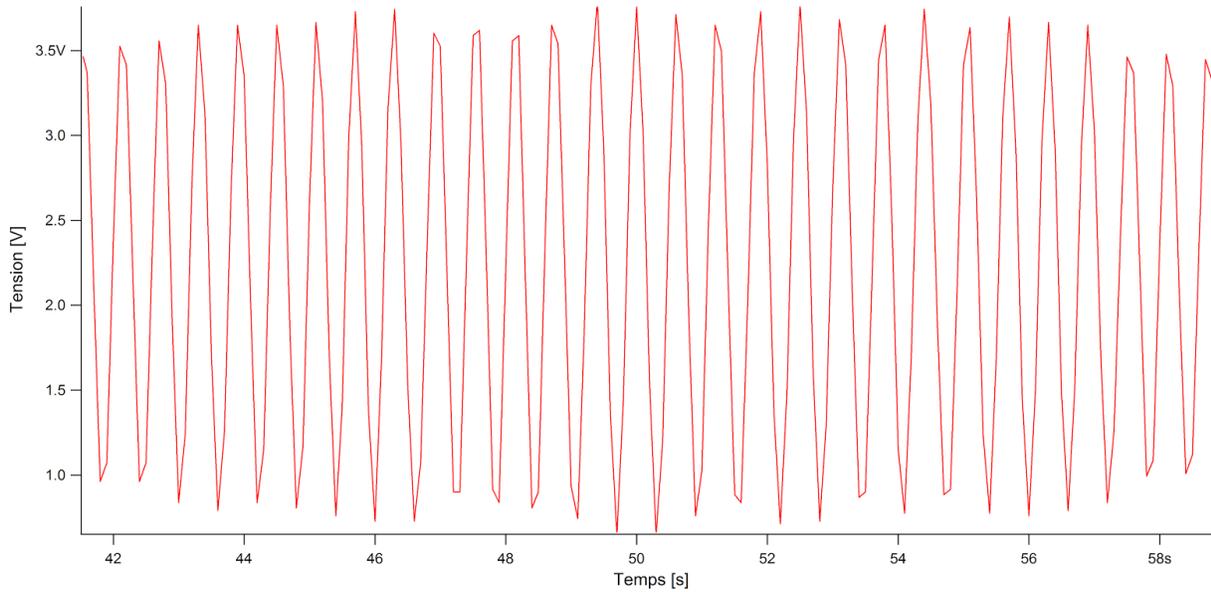
Au début on voulait mesurer la largeur spectrale de la raie verte du mercure, dans une lampe haute pression (0.2 nm). Mais attention à prendre un moteur qui va bien, pas un trop lent (celui qui fait du 2 minutes par tour conviendrait, avec une durée de chariotage de l'ordre de 4-5 min pour arriver à l'annulation). Ne l'ayant pas trouvé plus tôt, on s'est orienté vers la largeur spectrale d'un filtre interférentiel, avec le moteur qui est directement monté sur le Michelson aux gros miroirs (30min par tour)

En sortie de Michelson, on place une petite focale (50-100mm) qui converge sur une photodiode (on a pris celle avec l'espèce de cible dessinée dessus). On est assez proche du contact optique pour voir les franges avec un filtre interférentiel (largeur de $\sim 10\text{nm}$) donc attention à bien régler le Michelson proprement pour avoir des anneaux qui restent circulaires et centrés sur la photodiode.



- **Mesures**

La mesure de la période du signal donne le lien entre chariotage d'une longueur d'onde et durée. En mesurant ensuite l'écart entre les deux annulations (considérant une vitesse constante pour le moteur) on a ainsi directement accès à la largeur spectrale du filtre interférentiel.



On mesure une largeur spectrale de 8.5nm contre 10 donné par la doc. Néanmoins la doc ne donne pas un profil bien précis pour la largeur spectrale du filtre.

II/ Applications

1) Principe de mesures avec un interféromètre de Michelson

Ici, c'est purement qualitatif. On repasse le Michelson avec une lampe à vapeur de sodium et on montre les variations d'indice détectées en mettant un briquet dans l'un des bras. On illustre ainsi comment les mesures peuvent être réalisées avec ce type d'interféromètre.

2) Mesure de la constante de Rydberg avec un interféromètre de Fabry-Perot.

- **Principe et montage**

L'idée de la manip c'est de mesurer la longueur d'onde de la raie rouge à 656nm de l'hydrogène et d'utiliser la formule de Rydberg $\frac{1}{\lambda_{mn}} = Ry \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right)$ pour remonter à la constante de Rydberg. La raie rouge correspond à la m=3ème raie de la série de Balmer n=2 (au cas où c'est oublié, c'est écrit dans la doc de la lampe à hydrogène.)

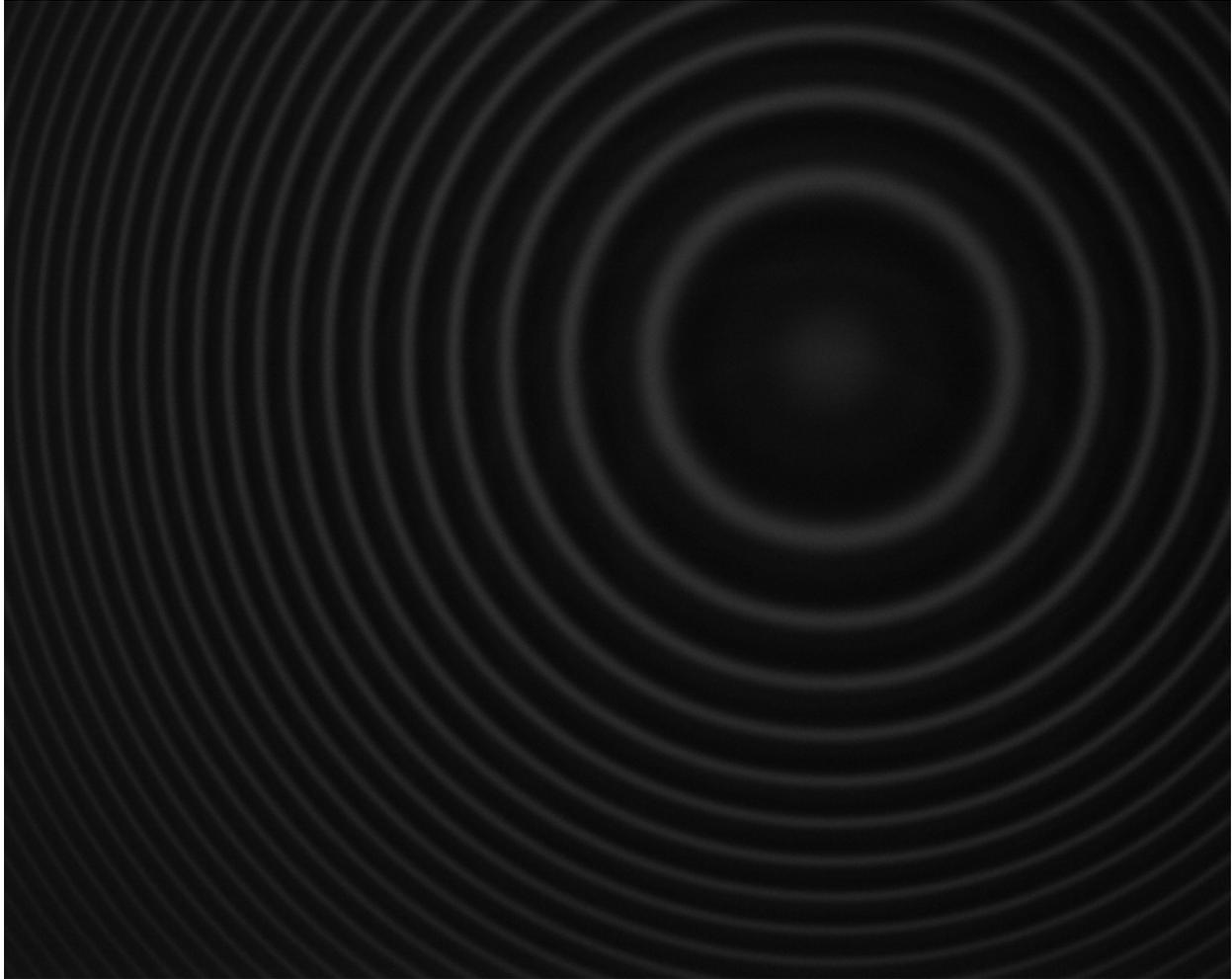
Le montage : lampe à hydrogène -> filtre sélectionnant la raie rouge -> diffuseur -> condenseur -> Fabry-Perot -> camera (à utiliser avec Ueye).



Le diffuseur est important car la lampe à hydrogène n'est pas très puissante, du coup sans diffuseur, en regardant dans la Fabry perot on voit juste le filament. De plus, il est utile pour réaliser la référence (cf principe de la mesure) en envoyant un laser en biais sur le diffuseur.

- **Principe de la mesure**

Les rayons des anneaux sont tels que $R_{k+1} - R_k = a \cdot \lambda$ avec a une constante liée à l'alignement, zoom de la caméra etc... On détermine a avec un laser de référence (on a pris un HeNe, histoire d'être dans la même gamme de longueur d'onde, celui qui tape en biais sur le diffuseur sur la photo).



Pour le relevé des rayons:

- On prend une photo sous Ueye (attention à ne pas l'enregistrer en bmp, ImageJ n'aime pas ça)
- On importe le fichier sous ImageJ:
 - On trace un trait (ou un rectangle très fin si le signal est bas) passant par le centre des anneaux.
 - On trace le profil d'intensité et on le sauve dans un fichier txt.
- On importe le fichier txt sous Igor
 - Commencer par repérer le centre des anneaux en prenant le centre du premier anneau par exemple et on rescale la wave.
 - Après il suffit de relever les rayons. On peut en voir une trentaine.
 - Le calcul de la différence quadratique des rayons donne accès à la longueur d'onde, puis à la constante de Rydberg (la manip n'a jamais raté vu qu'on peut prendre plein de rayons, on est toujours tombé sur une valeur de 13.6eV à plus ou moins 0.2 à 0.5eV selon le nombre de rayon pris)

- **Remarques**

Quand le Fabry-Perot est bien réglé, on peut normalement distinguer le système d'anneaux de l'hydrogène et du deutérium (c'est une lampe hydrogène deutérium), beaucoup moins lumineux. Les deux longueurs d'ondes correspondantes sont décalées de 0.2 angstrom (voir la doc). Attention, les systèmes d'anneaux ne sont pas forcément distinguables selon l'épaisseur du Fabry-Perot. Mais on les voit pour de faibles épaisseurs ($e \sim 1-2\text{mm}$).

Pour avoir des anneaux discernables sur tout le champ de la caméra, on s'est placé à une épaisseur de Fabry-Perot faible ($\sim 1-2\text{mm}$).

!!! : Attention à ne pas bouger la caméra entre la référence à l'HeNe et la prise de donnée à l'Hydrogène.

!!! : Lors de l'exposé, à cause de la présence (la température est vite montée) de toute la classe, le Fabry-Perot s'est vite désaligné (les anneaux étaient devenus très épais en l'espace de 30 min, alors que la prise de référence a été faite 25 min avant le début de l'exposé (voir figure ref)). Pour pallier le problème, on peut repérer précisément la position du pied de la caméra sur la table (on trace au crayon le contour du pied par exemple) afin de pouvoir l'enlever puis le remettre.

QUESTIONS:

- A quoi voit-t-on qu'un Fabry Perot est bien réglé ? *Anneaux fins, ici à cause du monde dans la salle, la température l'a dérégulé en l'espace de 30 minutes (cf descriptif de la manip)...*
- Quels théorèmes caractérisent la cohérence spatiale et temporelle ? *Zernike Van Cittert (degré de cohérence spatiale = TF de la luminance de la source) et Wiener Khintchine respectivement (fonction d'autocorrélation = TF de la densité spectrale de puissance).*
- Quelle est l'allure du champ d'interférence pour des fentes de Young ? *Hyperboloïdes.*

- Pour s'affranchir de la cohérence spatiale, faut t'il avoir des interférences localisée ou à l'infini ? Cela correspond-il à des franges d'égale épaisseur ou inclinaison ?
- Condition sur la polarisation pour interférer ?

REMARQUES :

- Le schéma du montage est bon
- On peut passer en coin d'air et montrer la localisation des anneaux sur le Michelson
- Attention à ce que le logiciel code bien sur le même nombre de bit que la caméra, et de plus, pas en RGB vu que la cellule renvoie une image en noir et blanc.
- Pour la mesure des anneaux, on peut faire intégrer ImageJ sur un petit cadre plutôt que de ne prendre qu'une seule ligne de pixel (quand les anneaux sont bien fins ça n'est pas si nécessaire...)