

TP 10C&D – Interféromètre de Michelson

Problématiques :

A l'aide du vernier d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air ou en coin d'air, comment mesurer des longueurs de l'ordre de 10^{-10} m (écart d'un doublet de raies ou largeur spectrale d'une raie) ou comment mesurer un indice optique ?

Compétences expérimentales au programme :

Mesure de longueurs	Mesurer le déplacement du miroir mobile d'un interféromètre de Michelson.
Etude de la cohérence temporelle d'une source	Régler un interféromètre de Michelson pour une observation en lame d'air avec une source étendue à l'aide d'un protocole proposé. Mettre en œuvre un protocole pour accéder au profil spectral d'une raie (obtenir une estimation de la longueur de cohérence) ou pour obtenir l'écart spectral d'un doublet à l'aide d'un interféromètre de Michelson en lame d'air.
Etude expérimentale de l'interféromètre de Michelson en coin d'air	Caractériser la géométrie d'un objet ou l'indice d'un milieu à l'aide d'un interféromètre de Michelson. Interpréter qualitativement les observations en lumière blanche.

Objectifs :

- TP C : Régler un interféromètre de Michelson pour obtenir le contact optique et les configurations lame et coin d'air.
- TP C & D : Confronter résultats théoriques (Ch.O3) et expérimentaux.
- TP D : Réaliser des mesures interférométriques : écart spectral du doublet de la lampe spectrale au Sodium, largeur spectrale de la raie verte de la lampe spectrale au Mercure, indice optique d'une lame de verre.

A faire pour la séance de TP :

Lire entièrement le sujet et répondre aux questions ✍.

CONSIGNES

♦ Les pièces optiques, miroirs, lames séparatrice et compensatrice sont de qualité interférométrique, ce qui impose une planéité et un polissage très précis.

D'autre part, les déplacements doivent être inférieurs à une longueur d'onde du domaine optique (typiquement 100 nm) ; le Michelson est donc doté d'une mécanique de précision.

Il ressort de ces considérations que l'interféromètre de Michelson est un appareil fragile et coûteux (premier prix de l'ordre de 2000 €) :

- on manipulera les vis de réglage avec soin
- on ne touchera jamais les surfaces optiques !

♦ **Attention au trajet direct et aux réflexions du faisceau LASER !**

♦ **TP D : La lampe spectrale au Sodium sera allumée à 14h et éteinte à 18h.**

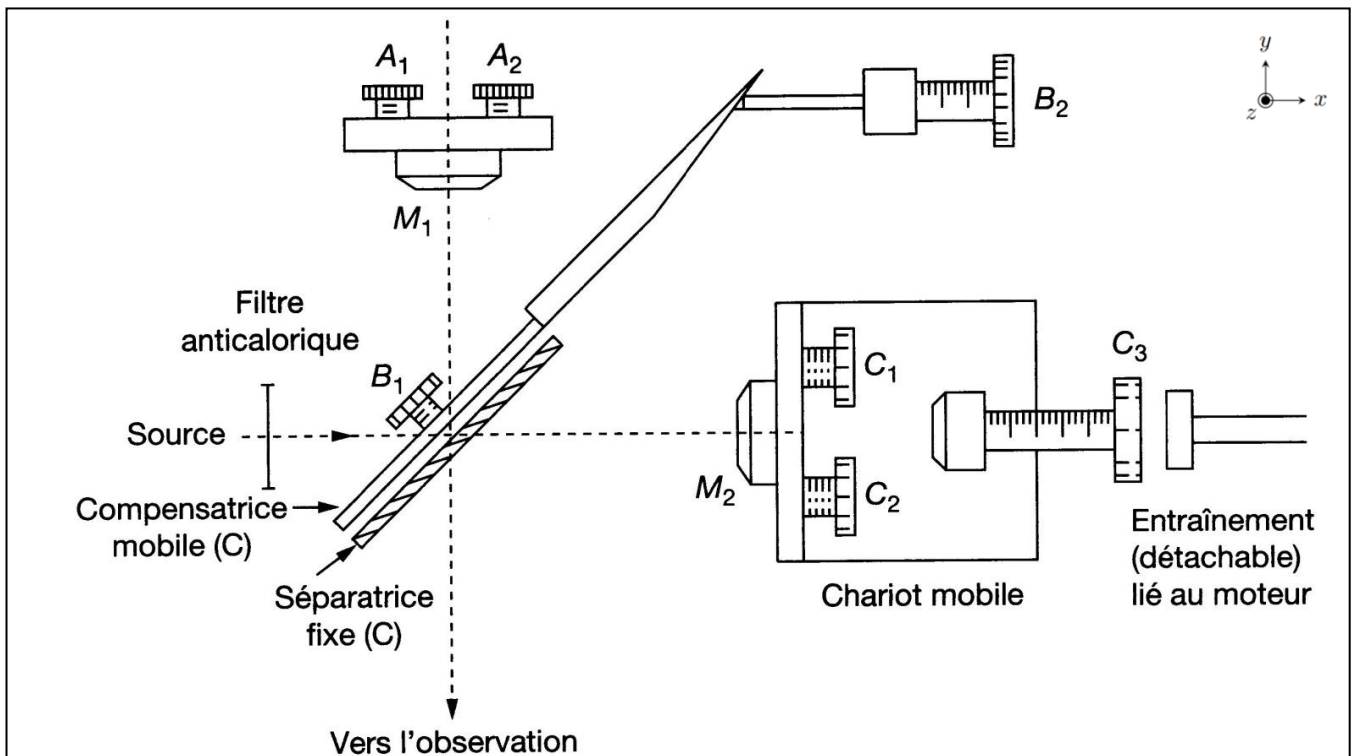
♦ **Une fois allumée, la lampe spectrale au Mercure sera éteinte à 18h. Eviter la lumière directe de cette lampe (riche en UV).**

1^e partie. Présentation de l'interféromètre de Michelson (rappels ChO3)

1) Constitution

L'interféromètre de Michelson est constitué d'éléments de haute qualité. Différentes vis de réglages permettent de modifier l'état de l'interféromètre.

- **miroir** (M_2) mobile en translation (vis C_3) et en inclinaison (vis C_1 et C_2) ;
- **miroir** (M_1) fixe en translation et mobile en inclinaison (vis A_1 et A_2) ;
- **lame séparatrice** dont la face d'entrée est semi-réfléchissante, inclinée de 45° par rapport aux axes des miroirs ;
- **lame compensatrice**, de même épaisseur et de même indice que la précédente mais non traitée, mobile en inclinaison (vis B_1 et B_2) ;
- **verre anti-calorique** placé à l'entrée de l'interféromètre ; il a pour rôle d'absorber le rayonnement infra-rouge qui pourrait chauffer et endommager les éléments décrits ci-dessus.



👉 Observer l'appareil, identifier ses différents éléments et les différentes vis. Tourner les vis $A_{1/2}$ et $C_{1/2}$ de réglage de l'inclinaison des miroirs pour qu'elles soient à peu près à mi-course. Vérifier que les 2 bras ont approximativement la même longueur. Avant tout réglage, s'assurer que les vis de réglage d'inclinaison des miroirs sont bien en appui sur les lames.

2) Interféromètre à division d'amplitude

L'interféromètre de Michelson est un interféromètre à division d'amplitude.

La séparatrice (= lame semi-réfléchissante) est traitée de manière à partager un rayon incident issu de la source S en deux rayons d'égale intensité :

- l'un ressort de la lame sans être dévié (il se réfléchit ensuite sur M_2)
- l'autre est réfléchi selon les lois de Snell-Descartes (il se réfléchit ensuite sur M_1).

La séparatrice fait un angle d'environ 45° avec chaque miroir.

2^e partie. Réglages pour obtenir le contact optique

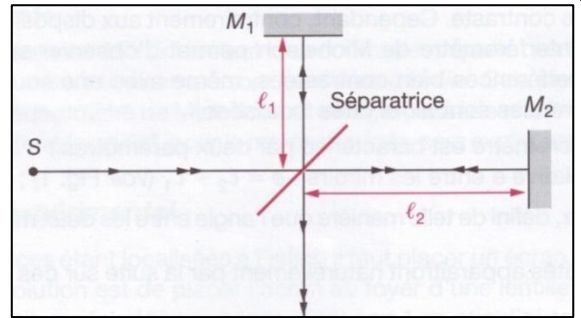
Avant de faire des mesures avec le Michelson, on doit obtenir le **contact optique**.

C'est le cas lorsque les miroirs M_1 et M_2 sont :

- perpendiculaires entre eux ;
- et situés à égale distance de la séparatrice : $\ell_1 = \ell_2$.

Alors, en tout point M , $\delta(M) = 0$: on observe alors la **teinte plate**.

On notera (M_2^*) image de (M_2) par la séparatrice. Au contact optique, le **miroir fictif (M_2^*) et le miroir (M_1) sont confondus**.



Le réglage se décompose en trois étapes :

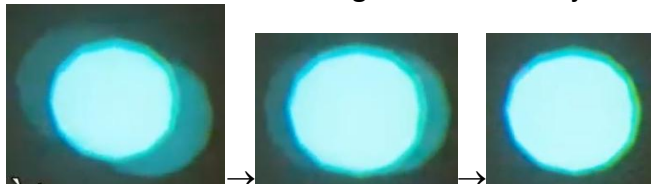
- ① réglage grossier (géométrique) du parallélisme entre compensatrice et séparatrice ●*●*
- ② réglage grossier (géométrique) du parallélisme entre (M_1) et (M_2^*)
- ③ réglage fin (interférométrique) du parallélisme entre (M_1) et (M_2^*)

1) Etape ① : Réglage géométrique du parallélisme des lames compensatrice et séparatrice → vis B1 et B2

☠☠☠ **Sauf mention contraire, vous ne réaliserez pas ce réglage ! Vous passerez directement à l'étape ② !**

✋ Avant de l'allumer, **fixer sur le LASER un objectif de microscope**. Placer une lentille (L1) devant le filtre anti-calorique et placer un diaphragme dans le plan focal objet de (L1). En sortie de l'interféromètre, placer une lentille (L2) et un écran dans le plan focal image de (L2). Allumer le LASER. Masquer le miroir (M_2).

✋ Observer les taches images sur l'écran. Ajuster B1 et B2 pour former un unique disque image.



2) Etape ② : Réglage géométrique du parallélisme des miroirs (M_1) et (M_2^*) → vis C1 et C2

a) Réglage au LASER avec faisceau de rayons parallèles

- Placer le **LASER** en incidence normale sur le verre anti-calorique.
- Observer les différentes taches lumineuses sur un écran **placé loin des miroirs**. Ajuster C1 et C2 de manière à minimiser le nombre de taches.

A l'issue de ces réglages géométriques, le parallélisme des miroirs est suffisamment bon pour que des interférences apparaissent ; en effet, le laser est une source possédant une grande longueur de cohérence (un train d'onde dure longtemps \Leftrightarrow la raie est quasi-monochromatique),... on peut donc être encore loin du contact optique.

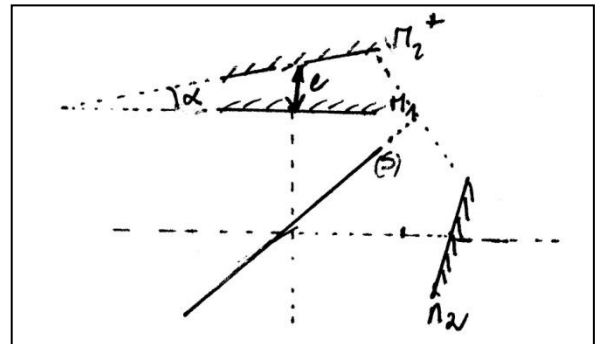
b) Réglage au LASER avec faisceau élargi

- Après l'avoir éteint, **fixer sur le LASER un objectif de microscope** (on obtient ainsi différents angles d'incidence). Eclairer à nouveau l'interféromètre avec le LASER. Vous devez observer des anneaux verts sur l'écran.
- A nouveau, ajuster doucement C1 et C2 pour que le centre de la figure corresponde au centre des anneaux.

L'état du Michelson est caractérisé par 2 paramètres :

- la distance e entre le miroir fictif (M_2^*) et le miroir (M_1) ;
- l'angle α entre ces deux miroirs.

La figure ci-contre représente les miroirs (M_1) et (M_2^*) à l'issue de ces étapes : le Michelson n'est ni vraiment en lame d'air, ni vraiment en coin d'air.



3) Etape ③ : Réglage interférométrique du parallélisme de (M_1) et (M_2^*) → vis A1, A2 et C3

Afin de se rapprocher du contact optique, on cherche donc à (cf Ch.03) :

- diminuer e donc un anneau d'ordre p doit voir son rayon diminuer : les anneaux rentrent^{*}. On veut ramener l'anneau d'ordre 0 au centre.
- diminuer α donc augmenter l'interfrange : les franges s'éloignent les unes des autres.

Plus le réglage devient précis, plus on utilise une source de faible cohérence temporelle : on va donc commencer avec le LASER et on affinera les réglages avec une source blanche, de très faible longueur de cohérence temporelle. Si des interférences sont visibles avec cette source, alors on sait que la différence de marche est très faible ; on repère ainsi aisément le contact optique.

a) Diminution de e : observation des anneaux d'égale inclinaison → vis C3 (et C1 – C2)

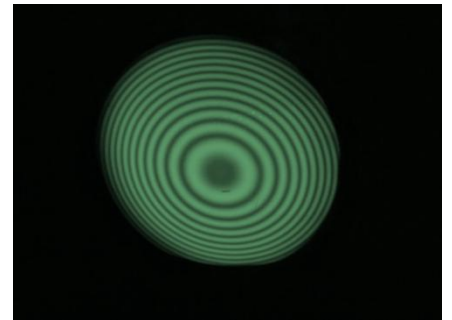
✋ Eclairer l'interféromètre avec le LASER muni de l'objectif de microscope.

✋ Charioter (avec la vis C3) le miroir M_2 de façon à faire « rentrer » les anneaux^{*} et à diminuer le nombre d'anneaux visibles : on se rapproche ainsi du contact optique.

✋ Eventuellement, ajuster avec la plus grande précaution C1 et C2 pour augmenter le contraste des anneaux ou pour les recentrer.

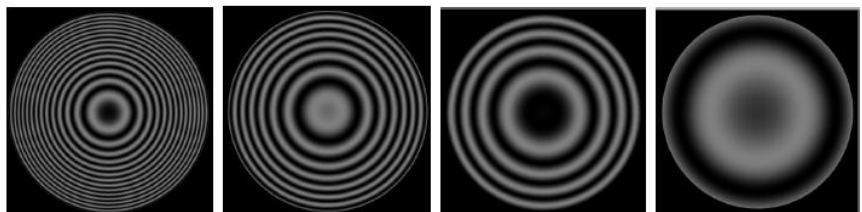
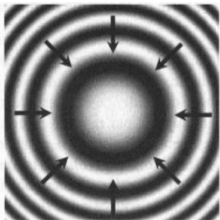
Pour améliorer le contraste, on pourra également projeter la figure d'interférences dans le plan focal image d'une lentille (cf ci-dessous « condition d'observation »).

✋ Continuer à faire rentrer les anneaux jusqu'à leur disparition (quasi teinte plate). En continuant à chariotter dans le même sens, les anneaux réapparaissent et défilent vers l'extérieur (on a dépassé le contact optique et on s'en éloigne). Revenir au quasi contact optique ($e \approx 0$).

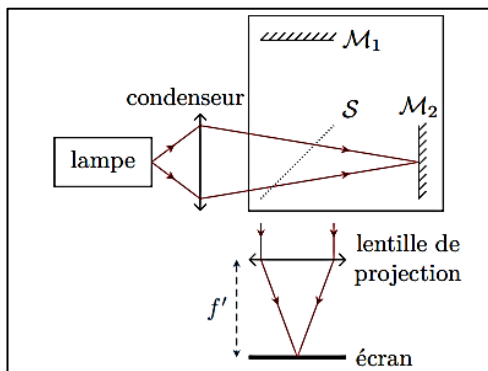


➡ 1. Noter la position x_0 du miroir M_2 à l'aide du vernier (cf DOC 1).

* Evolution de la figure en diminuant l'épaisseur de la lame d'air :



NB : si l'on souhaite utiliser l'interféromètre de Michelson en **configuration lame d'air** en l'éclairant par une **lampe spectrale**, il faut réaliser le montage suivant, en prenant soin de bien positionner les lentilles :

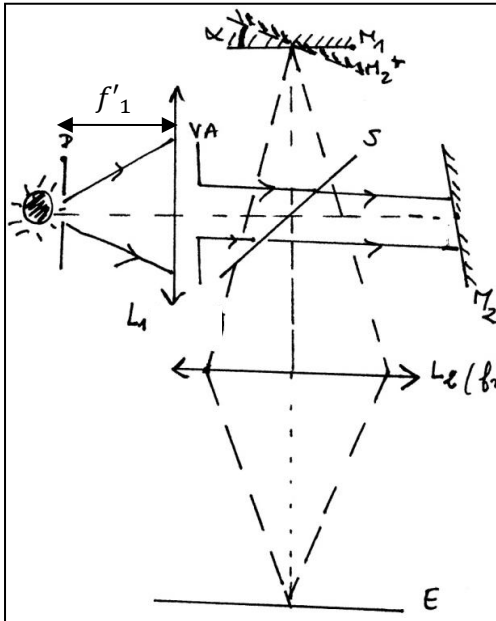


♦ Condition d'éclairage : On fixe le condenseur sur la lampe spectrale et on fait converger le faisceau sur M_2 .

♦ Condition d'observation : On place un écran dans le plan focal image d'une lentille convergente (L_2), ici telle que $f' = 20 \text{ cm}$.
→ observation des anneaux localisés à l'infini.

SCHEMA du MONTAGE pour observer les **ANNEAUX** d'égale inclinaison : configuration lame d'air

b) Diminution de α : observation des franges rectilignes d'égal épaisseur → vis A1, A2 puis C3



- ♦ Condition d'éclairage : On place la source (trou du diaphragme) au foyer objet d'une lentille convergente (L_1) → éclairage des miroirs avec un faisceau de rayons parallèles en incidence quasi normale
- ♦ Condition d'observation : On fait l'image du miroir (M_1) par une lentille convergente (L_2) → observation des franges localisées près de (M_1).

L_2 ($f'_2 = 20\text{ cm}$) : La distance Miroir (M_1) - E doit être supérieure à $(L_2 f'_2)$!

En pratique, on se placera dans une configuration proche de celle de Silbermann, cf TP10A.

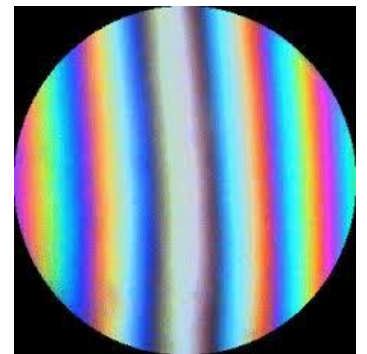
SCHEMA du MONTAGE pour observer les **FRANGES rectilignes** d'égal épaisseur : configuration coin d'air

On éclaire avec la **source de lumière blanche**. Réaliser le montage ci-dessus, en prenant soin de bien positionner les lentilles, la lentille (L_1) correspond au condenseur de la lampe : jouer sur le tirage du condenseur pour respecter les conditions d'éclairage.

Charioter (avec la vis C3) **très lentement** le miroir M2 (on conservera les doigts sur la vis C3 et on chariotera au maximum sur 1 mm autour de la position x_0) jusqu'à faire apparaître des franges irisées dans la zone éclairée en lumière blanche (cf figure ci-contre) : il s'agit des teintes de Newton.

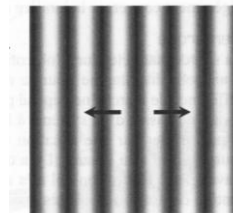
Eventuellement, agir sur A1 et A2 pour modifier l'allure et le nombre de franges.

Pour obtenir le contact optique ($e \approx 0$ et $\alpha \approx 0$) : centrer la frange blanche sur l'écran en chariotant M2 et agir sur les vis A1 et A2 afin d'augmenter l'interfrange jusqu'à obtenir la **teinte plate** (cf ChO3*).



2. Noter la position x_0 du miroir M2 correspondant véritablement au contact optique.

* Evolution de la figure en diminuant l'angle du coin d'air :



NB : si l'on souhaite utiliser l'interféromètre de Michelson en **configuration coin d'air** en l'éclairant par la **lampe au Mercure**, on réalisera le montage précédent avec une lentille (L_1) telle que $f' = 15\text{ cm}$.

A partir du contact optique on peut se placer en configuration :

- **Coin d'air** en modifiant l'inclinaison de M1 avec les vis A1 et A2 : $e \approx 0$ et $\alpha \neq 0$
→ observation des **franges rectilignes** en respectant les conditions d'éclairage et d'observation, cf p. 6.
- **Lame d'air** en chariotant M2 avec la vis C3 : $e \neq 0$ et $\alpha \approx 0$
→ observation des **anneaux** en respectant les conditions d'éclairage et d'observation, cf p. 5.

TOUJOURS REVENIR AU CONTACT OPTIQUE pour passer d'une configuration à l'autre.

3^e partie. Mesures interférométriques

NB : Les expériences qui suivent nécessitent d'avoir réglé l'interféromètre de Michelson selon le protocole décrit dans la 2^e partie.

1) Spectre cannelé et Indice optique d'une lame de verre

✎ Avec la **lampe blanche**, se placer dans la configuration permettant d'observer les **franges rectilignes** irisées sur l'écran.

✎ A la place de l'écran, placer l'extrémité de la fibre optique reliée au **spectromètre**. Ouvrir le logiciel Multispectro et observer le spectre de la lumière collectée au niveau de la fibre. Noter les différences selon que la fibre est située sur une teinte de Newton ou sur le blanc d'ordre supérieur (charioter lentement M2 pour passer d'une situation à l'autre).

✎ Remplacer la fibre par l'écran et centrer la frange blanche sur l'écran en chariotant M2. Noter x_{sans} la position du chariot correspondante.

♦ **Etude théorique** → cf ChO3 et TDO3 à savoir refaire

Sur l'un des trajets, on insère une lamelle de microscope d'épaisseur ℓ et d'indice optique n . Les teintes irisées ne sont plus observables à l'écran ($\delta > L_c$) au niveau de la lame. On translate le miroir M₂ jusqu'à les observer à nouveau, on note x_{avec} la position du chariot correspondante. L'indice optique de la lamelle de microscope vérifie :

$$n = 1 + \frac{|x_{sans} - x_{avec}|}{\ell}$$

♦ **Mise en œuvre expérimentale**

✎ Mesurer l'épaisseur de la lamelle avec un palmer (pied à coulisse de précision).

✎ Insérer la lamelle sur le bras n°1 de l'interféromètre : attention aux optiques ! Observer en chariotant M2 avec la vis C3 (dans le bon sens !) lentement que l'on retrouve les franges colorées.

➡ 6. Déterminer l'indice optique n de la lamelle de microscope. Estimer l'incertitude sur le résultat et analyser ce résultat.

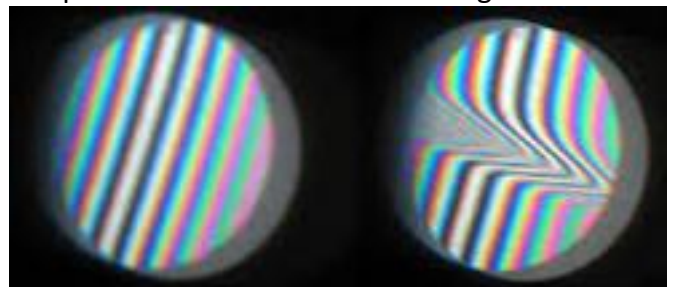
Rq : Vous pouvez observer que les franges colorées apparaissent sur le bord de l'image de la lamelle pour une position $x \in [x_{sans}, x_{avec}]$. Que vaut cette position ? Proposer une explication.

2) Influence de l'indice du milieu (expérience qualitative n°1)

✎ Avec la lampe blanche, se placer dans la configuration permettant d'observer les franges irisées sur l'écran.

➡ 7. Interpréter l'effet d'un jet de briquet sur les franges d'interférences irisées obtenues en lumière blanche.

A gauche : sans jet ; à droite : avec.



3) Largeur spectrale de la raie verte de la lampe spectrale au Mercure

✎ Placer un **filtre interférentiel vert** devant la **lampe au Mercure** et se placer dans la configuration permettant d'observer les **anneaux** sur l'écran.

♦ **Etude théorique** → cf ChO3 et TDO3 à savoir refaire

A partir du contact optique, on translate dans un sens puis dans l'autre le miroir M_2 jusqu'à la disparition de la figure d'interférences. Soit d et d' , les deux positions du chariot correspondant à la disparition de la figure d'interférences. La longueur de cohérence temporelle et la largeur spectrale vérifient :

$$L_c = |d - d'| \quad \text{et} \quad \Delta\lambda \approx \frac{\lambda_m^2}{L_c}$$

♦ **Mise en œuvre expérimentale**

✎ Observer en chariotant M_2 (avec la vis C3) autour du contact optique la perte (définitive *et non périodique*) de contraste.

➡ 5. Déterminer la longueur de cohérence temporelle L_c et la largeur spectrale $\Delta\lambda$ de la raie verte du mercure. Estimer l'incertitude sur les résultats et analyser ces résultats.

4) Ecart spectral du doublet de la lampe spectrale au Sodium

✎ Avec la **lampe au Sodium**, se placer dans la configuration permettant d'observer les **anneaux** sur l'écran.

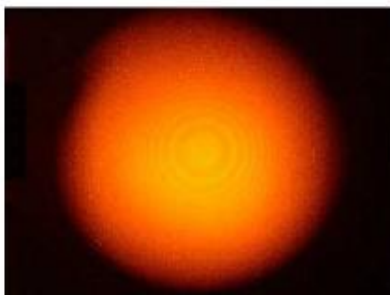
♦ **Etude théorique** → cf ChO3 et TDO3 à savoir refaire

Le déplacement du miroir mobile Δe entre deux anti-coïncidences (perte de contraste) successives donne accès à l'écart spectral du doublet :

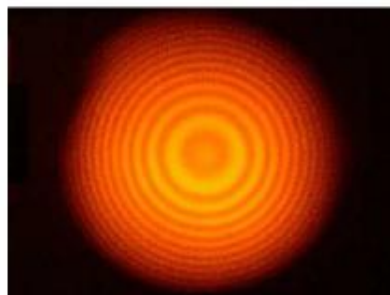
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_m^2}{2\Delta e}$$

♦ **Mise en œuvre expérimentale**

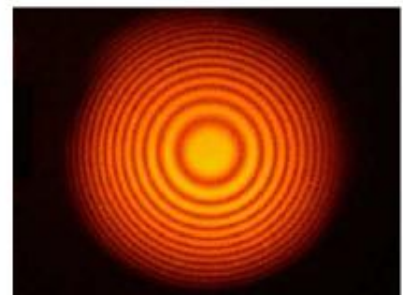
✎ Observer en chariotant dans le même sens M_2 (avec la vis C3) la perte périodique de contraste.



anti-coïncidence



intermédiaire



coïncidence

➡ 4. Déterminer l'écart spectral $\Delta\lambda$ du doublet jaune du sodium. Estimer l'incertitude sur le résultat et analyser ce résultat.

5) Influence de l'indice du milieu (expérience qualitative n°2)

Pour l'interféromètre le moins haut, sur le bras n°1, on peut disposer une cuve reliée à une pompe.

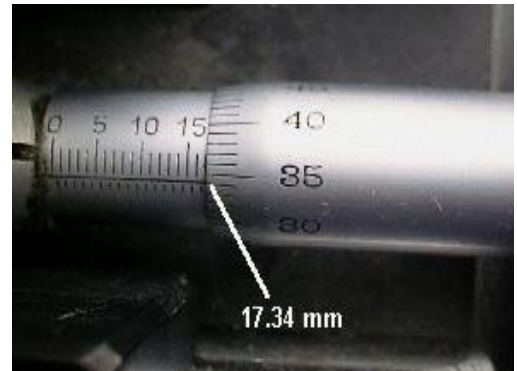
✎ Avec la **lampe au Sodium**, se placer dans la configuration permettant d'observer les **anneaux** sur l'écran.

➡ 3. Interpréter l'effet du pompage sur la figure d'interférences.

DOC 1 : Lecture du vernier

Un tour de la molette correspond à 0,5 mm.

Il faut donc lire en 1^{er} la valeur inscrite sur la partie fixe (graduations verticales) en tenant compte des demi-graduations (marques inférieures). On ajoute ensuite la valeur lue sur la partie mobile (graduations verticales).



DOC 2 : Tables des longueurs d'onde du spectre des lampes au sodium et au mercure

Longueur d'onde	Couleur de la raie
579,1 nm	Jaune (Doublet)
577,0 nm	
546,1 nm	Vert - Jaune
491,6 nm	Bleu - Vert
435,8 nm	Bleu -Violet

Tableau 1 : spectre de la lampe au mercure.

Longueur d'onde	Couleur de la raie
616,1 nm	Rouge (doublet)
615,4 nm	
589,6 nm	Jaune (doublet)
589,0 nm	
568,8 nm	Vert (doublet)
568,3 nm	

Tableau 2 : spectre de la lampe au sodium.

DOC 3 : Indices de réfraction de verres de type Crown

Dénomination	Famille	indice
FK5	Fluorocrown	1,48749
BK7	Borosilicate crown	1,51680
PSK3	Phosphate crown dense	1,55232
SK2	Baryum crown dense	1,60738
LaK10	Lanthane crown	1,72000

Rotation TP10 1^e série :

	29-janv	05-févr	26-févr		29-janv	05-févr	26-févr
Térence - Charles	A	B	C	Gaspard - Timothée	A	B	C
Bastien - Lubin -Jules	A	B	C	Natoye - Antoine	A	B	C
Zinedine - Laila	A	B	C	David - Eliott	A	B	C
Salahaddin - Baptiste	B	C	A	Elodie - Margot	B	C	A
Pauline - Nolann	B	C	A	Adelin - Nathan C.	B	C	A
Noah - Robin	B	C	A	Amine - Camille	B	C	A
Alexis - Ethan	C	A	B	Charlélie - Nathan L.	C	A	B
Mathilde - Laura	C	A	B	Maël - Robin	C	A	B
Mathis - Adrien	C	A	B	Armand - Tristan	C	A	B