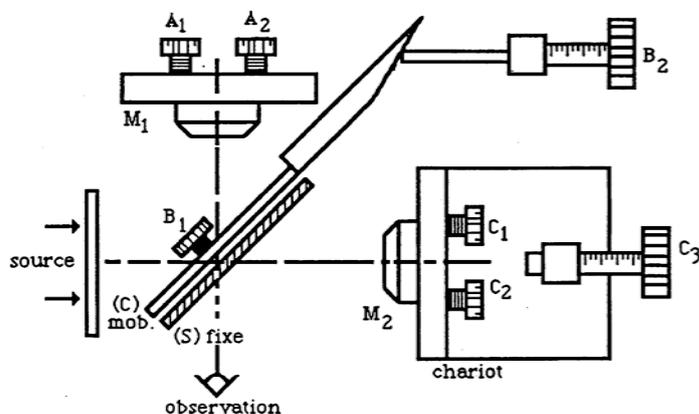


TP n°14 : Interféromètre de Michelson

But : *Savoir régler un interféromètre de Michelson et savoir l'utiliser en spectroscopie interférentielle.*



- B₁ fait basculer la compensatrice autour d'un axe horizontal
- B₂ fait tourner la compensatrice autour d'un axe vertical
- C₁ et C₂ réglage grossier (donc rapide) de l'orientation du miroir M₂
- A₁ et A₂ réglage fin de l'orientation du miroir M₁
- C₃ réglage de translation du miroir M₂ ("chariot")

Note : dans un interféromètre de Michelson réel, il y a une lame compensatrice L_C parallèle à la lame séparatrice L_S . Son rôle est d'égaliser les chemins optiques des deux voies lorsque l'interféromètre est réglé au contact optique, c'est à dire lorsque : $e = |d_2 - d_1| = 0$.

I. RÉGLAGES

1) Réglages préliminaires

- Placer les vis de réglages fins A_1 et A_2 à mi-course à fin de ne pas risquer d'arriver en butée lors des réglages ultérieurs.
- Régler la vis C_3 de telle sorte que les deux bras de l'interféromètre soient approximativement égaux : vérifier à la règle que $e < 0,2$ cm. **Noter** la position de C_3 afin de pouvoir y revenir en cas de "déréglage" de l'appareil.
- Régler la hauteur des supports et lampes de telle sorte qu'ils soient centrés sur le même axe que les centres des miroirs du Michelson.

2) Réglage du parallélisme compensatrice séparatrice

a) Réglage "à vue d'oeil"

Commencer par rendre L_S et L_C aussi parallèles que possible "à vue d'oeil" en agissant sur les vis B_1 et B_2 .

b) Affinage des réglages

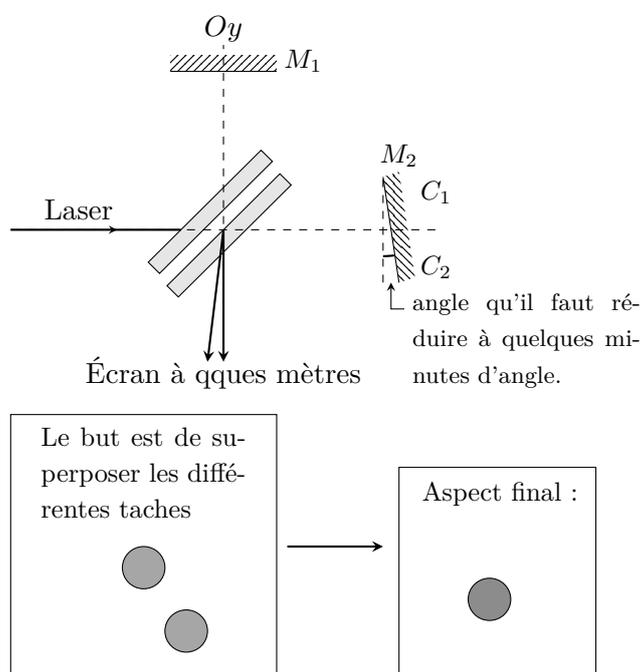
Le réglage précédent est encore trop grossier et il faut l'affiner. Le réglage se fait avec un laser, ce qui est très précis.

Règle de sécurité : il ne faut jamais observer directement le faisceau laser

Faire passer un faisceau laser très fin à travers la compensatrice et la séparatrice en veillant à l'orienter le plus possible orthogonalement à $L_C L_S$. Le faisceau doit traverser la séparatrice et la compensatrice mais ne doit frapper aucun miroir. Agir sur les vis de réglage B_1 et B_2 pour faire coïncider sur un écran placé à quelques mètres les deux systèmes de taches dus aux réflexions multiples sur L_S ou L_C .

3) Réglage de l'orthogonalité des deux miroirs M_1 et M_2

Il faut ensuite rendre M_1 et M_2 quasiment orthogonaux (l'orthogonalité stricte ne pourra être obtenue qu'à la section 4)).



- Éclairer l'interféromètre par un faisceau laser très fin comme indiqué sur le schéma ci-dessus et placer un écran dans l'espace de sortie, à quelques mètres de distance.
- On observe sur l'écran deux systèmes de taches dues aux réflexions dans les voies 1 et 2 de l'interféromètre. Agir sur C_1 et C_2 pour superposer au mieux ces deux systèmes de tache.

On a alors M_1 et M_2 qui sont presque orthogonaux.

4) Réglage fin des miroirs en lame d'air : obtention des anneaux

Il s'agit maintenant d'obtenir l'orthogonalité parfaite des miroirs, afin d'observer les anneaux d'égalé inclinaison. Remplacer le laser par une **lampe au sodium** (qui est plus cohérente)¹ et placer celle-ci à environ 20 cm de l'entrée de l'interféromètre. Intercaler un écran dépoli (dont la fonction est de diffuser la lumière) entre la source et l'interféromètre.

1. On peut aussi utiliser une lampe au mercure mais il faut alors placer un filtre interférentiel vert devant la source pour la rendre plus monochromatique.

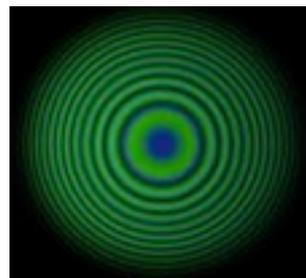
- Observer directement sans accommoder la surface du miroir M_1 dans l'interféromètre : on doit voir des franges ou des anneaux circulaires ou encore des portions d'anneau circulaires.
- Si ce n'est pas le cas, "chariotter", c'est à dire agir sur C_3 pour modifier l'épaisseur optique e jusqu'à observer les franges.²
- Une fois les franges observées (on observe souvent des franges fines, serrées et courbées), retoucher *très doucement* C_1 et C_2 pour bien arrondir et centrer les anneaux, *sans les perdre* : vous devez voir de beaux anneaux, bien circulaires et dont le centre est sur l'axe Oy de l'interféromètre.
- Agir sur C_3 (vis de "chariotage") pour faire rentrer les anneaux et obtenir au final une petite dizaine d'anneaux.

Projection des franges d'égal inclinaison et réglage fin des miroirs

Supprimer le dépoli, le remplacer par un condenseur (lentille de courte focale) et concentrer la lumière de la source sur le miroir M_2 .

- Commencer par observer les anneaux sur un écran éloigné. Améliorer le contraste en jouant *finement* sur C_1 et C_2 .³
- Interposer une lentille de grande focale ($f' = 1$ m) et observer les anneaux bien contrastés dans son plan focal image.

L'interféromètre de Michelson est maintenant réglé en "lame d'air" : on observe les "anneaux d'égal inclinaison" localisés à l'infini.



II. APPLICATIONS

1) Observation des anneaux

Régler avec la vis de "chariotage" C_3 l'épaisseur de la lame d'air de façon à obtenir un dizaine d'anneaux sur l'écran. Soit p_0 l'ordre d'interférence au centre et $E(p_0)$ sa partie entière. On posera donc : $p_0 = E(p_0) + \varepsilon$ où ε est l'excédent fractionnaire et $E(p_0)$ la partie entière de p_0 .

- Sachant que le rayon du $n^{\text{ème}}$ anneau brillant est donné par : $\rho_n^2 = f'^2 \frac{\lambda}{e} (\varepsilon + n - 1)$. Mesurer le rayon ρ_1 du premier anneau brillant puis les rayons ρ_2, ρ_3, \dots des anneaux brillants suivants.
- Tracer un graphe ρ_n^2 en fonction de n et vérifier la loi attendue.
- Déduire de cette courbe l'épaisseur optique e et l'excédent fractionnaire ε .

2) Spectroscopie interférentielle : mesure de l'écart du doublet du sodium

Dans cette partie, vous utiliserez la lampe à vapeur de Sodium : sa raie jaune est en fait un doublet de deux raies très voisines de longueurs d'onde λ_a et λ_b dont les contributions s'ajoutent

2. Cette manipulation a pour but de réduire l'épaisseur optique e , de sorte à rendre la différence de marche δ inférieure à la longueur de cohérence ℓ_c de la source.

3. Si les anneaux apparaissent elliptiques, c'est que le réglage du parallélisme séparatrice-compensatrice n'est pas parfait. Il faut alors retoucher légèrement les vis B_1 et B_2 pour rendre les anneaux circulaires.

en intensité. Reportez-vous à l'annexe de ce TP pour des explications théoriques sur l'expression de l'intensité lumineuse produite par ce doublet. Dans la suite, on introduira les nombres d'onde $\sigma_a = 1/\lambda_a$ et $\sigma_b = 1/\lambda_b$, ainsi que la longueur d'onde moyenne $\lambda_{moy} = (\lambda_a + \lambda_b)/2$.

Déplacer le miroir M_2 et observer qu'il existe plusieurs brouillages successifs du système d'anneaux⁴. Mesurer les positions de C_3 correspondantes à ces brouillages et en déduire l'écart $\Delta e = d$ d'épaisseur optique correspondant à deux brouillages successifs. **Remarque** : 1 tour de C_3 correspond à $\Delta e = 0,5$ mm.

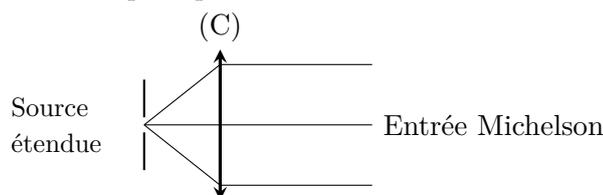
- Entre deux brouillages successifs, le miroir M_2 a été déplacé de d et la différence de marche au centre ($i = 0$) a varié de $2d$.
- On a alors (voir annexe) $\Delta\sigma = |\sigma_b - \sigma_a| = \frac{1}{2d}$. Relier $\Delta\sigma$ à $\Delta\lambda = |\lambda_b - \lambda_a|$ et à λ_{moy} (on peut simplifier l'expression car $\Delta\lambda \ll \lambda_{moy}$).
- Mesurer $\Delta\sigma$ et, sachant que $\lambda_{moy} = 589,3$ nm, calculer les deux longueurs d'onde λ_a et λ_b du doublet.

3) Coin d'air

a) Passage des franges d'égale inclinaison aux franges d'égale épaisseur

Préparation : toujours avec la lampe à vapeur de sodium, agir sur C_3 (vis de "chariotage") de façon à se placer le plus près possible du contact optique ($e = 0$). Le passage par $e = 0$ peut être difficile à voir (variations de l'intensité assez chaotiques) : on notera que le sens de défilement des anneaux s'inverse au passage par le contact optique : les anneaux "rentrent" avant, et sortent après, ce qui permet de localiser "à peu près" ce contact. **Noter la position de C_3 sur le vernier pour pouvoir y revenir éventuellement ensuite.**

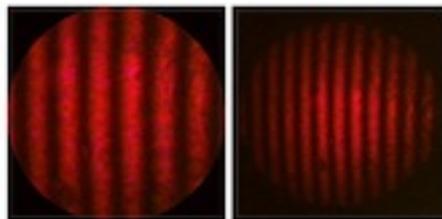
- **Changement des conditions d'éclairage** : placer la source de lumière dans le plan focal objet du condenseur (C) (procéder par autocollimation) : le but est d'obtenir un faisceau de rayons lumineux quasi-parallèles. Bien éclairer toute la surface des miroirs.



- **Passage de la lame d'air en coin d'air** : à partir de la configuration précédente, passer ensuite en configuration "coin d'air" en faisant pivoter *doucement* le miroir M_2 autour de son axe vertical avec la vis C_2 . La source étant étendue, les franges rectilignes sont localisées au voisinage de la surface des miroirs (on peut observer cette surface à l'œil directement pour s'en convaincre).
- **Changement des conditions d'observation** : afin de mieux observer ces franges, projeter l'image des miroirs sur un écran à l'aide d'une lentille convergente de distance focale $f' = 20$ cm. Bien ajuster la position de l'écran pour avoir des franges nettes.

4. Il faut se placer en dehors de la teinte plate correspondant à $e = 0$ pour observer toujours un système d'anneaux mais qui est plus ou moins contrasté.

L'interféromètre de Michelson est maintenant réglé en "coin d'air" : on observe des "franges rectilignes d'égale épaisseur localisées près des miroirs."



Application : mesurer l'angle α entre les deux miroirs. La longueur d'onde moyenne du doublet jaune du sodium est $\lambda_{moy} = 589,3$ nm.

b) Franges du coin d'air en lumière blanche

Remplacer la lampe à vapeur de sodium par une lampe de lumière blanche (ajustée de manière à produire un faisceau parallèle). Si on est au contact optique on obtient des franges rectilignes irisées. Si ce n'est pas le cas, modifier *très très doucement* la différence de marche avec la vis C_3 autour de la valeur notée précédemment. Le réglage est très sensible.

Remarque : la longueur de cohérence $\ell_c = \lambda_{moy}^2 / \Delta\lambda$ de la lumière blanche est très faible, de l'ordre du μm . Comme il est nécessaire d'avoir $|\delta| \ll \ell_c$ pour observer des franges, il faut se placer au voisinage de la différence de marche nulle (c'est à dire au contact optique) pour observer quelque chose.

c) Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre

La source est toujours de la lumière blanche. Dans le montage précédent, interposer une lame de verre d'indice $n = 1,5$ devant le miroir M_2 . Proposer un protocole pour mesurer l'épaisseur d de cette lame.

d) Mesure de la longueur d'onde d'un Laser

Remplacer la source de lumière blanche et le diaphragme par un Laser muni de son objectif de microscope. Ajuster le condenseur pour avoir un faisceau de lumière bien parallèle. Proposer un protocole pour mesurer la longueur d'onde du Laser

ANNEXE : DOUBLET JAUNE DU SODIUM

Le sodium émet dans le jaune deux radiations monochromatiques très proches, de longueurs d'ondes λ_a et λ_b . Ces deux radiations étant temporellement incohérentes, il faut sommer leurs intensités. En supposant que chacune des deux radiations émises produit la même intensité I_0 , nous obtenons :

$$I(\delta) = \frac{I_0}{2} [2 + \cos(2\pi\sigma_a \delta) + \cos(2\pi\sigma_b \delta)]$$

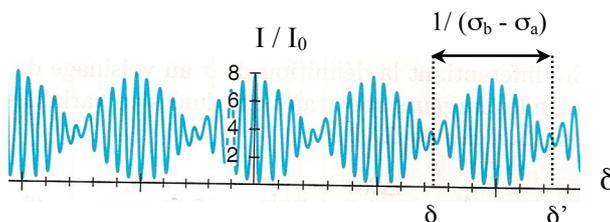
avec $\sigma_a = 1/\lambda_a$ et $\sigma_b = 1/\lambda_b$. En posant $\Delta\sigma = \sigma_b - \sigma_a$ et $\sigma_0 = \frac{\sigma_a + \sigma_b}{2}$ et en utilisant l'identité :

$$\cos(p) + \cos(q) = 2 \cos\left(\frac{p+q}{2}\right) \cos\left(\frac{p-q}{2}\right)$$

il vient :

$$I(\delta) = I_0 [1 + \cos(\pi\Delta\sigma \delta) \cos(2\pi\sigma_0 \delta)]$$

Dans le cas du doublet du sodium $\Delta\sigma \ll \sigma_0$ et donc le terme $\cos(\pi\Delta\sigma \delta)$ varie **très lentement** par rapport au terme $\cos(2\pi\sigma_0 \delta)$. Ainsi, lorsque la fonction $\delta \mapsto \cos(2\pi\sigma_0 \delta)$ varie d'une période $1/\sigma_0$, $I(\delta)/I_0$ oscille entre : $1 + \cos(\pi\Delta\sigma \delta)$ et $1 - \cos(\pi\Delta\sigma \delta)$ ce qui donne la figure ci-dessous :



Commentaires :

- Selon les valeurs de δ , il y a des zones avec un bon contraste, et des zones avec un contraste très faible. Deux zones successives de faible contraste sont caractérisées par un écart de différence de marche :

$$\delta' - \delta = \frac{1}{\Delta\sigma} = \frac{1}{\sigma_b - \sigma_a}$$

- D'un point de vue qualitatif, le contraste est faible (on dit que les franges se brouillent) parce que les franges brillantes associées à " σ_a " coïncident avec les franges sombres de " σ_b " et vice-versa : c'est *l'anti-coïncidence*.
- Avec un Michelson en lame d'air, si on déplace M_2 de d , donc si e varie de d , la variation de différence de marche (en un point M donné repéré par l'angle i) vaut :

$$\delta' - \delta = 2(e + d) \cos i - 2e \cos i = 2d \cos i \approx 2d$$

Il s'ensuit que, entre deux anti-coïncidences successives nous avons avec une très bonne approximation :

$$\frac{1}{\sigma_b - \sigma_a} \approx 2d$$