

TP5a - Réglage et exploitation de l'interféromètre de Michelson

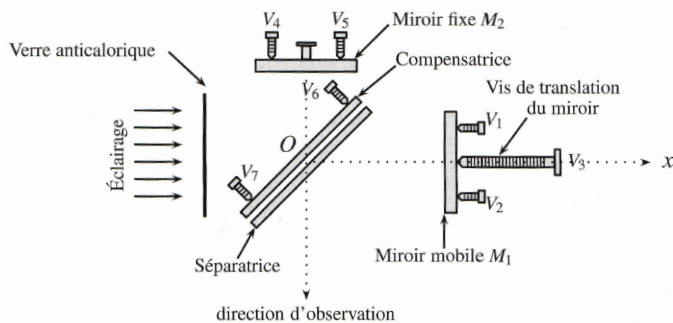
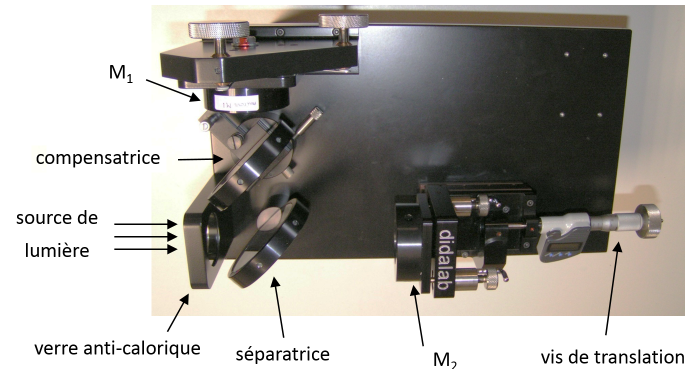
Objectifs : ★ Régler un interféromètre de Michelson.

★ Réaliser des mesures et interpréter les observations avec un interféromètre de Michelson réglé.

Présentation de l'interféromètre

L'interféromètre de Michelson est principalement constitué de :

- ★ Une lame séparatrice (et une lame compensatrice),
- ★ Deux miroirs M_1 et M_2 inclinables centrés sur deux axes orthogonaux. Le miroir M_1 peut être translaté sur son axe x .



★ Les différentes vis de réglage :

- La vis V_3 de chariotage de M_1 en translation rectiligne le long de la direction Ox .
- Les vis de réglage grossier de l'orientation de M_1 : V_1 et V_2 .
- Les vis de réglage précis de l'orientation de M_2 : V_4 et V_5 .
- Les vis de réglage du parallélisme des lames compensatrice et séparatrice : V_6 et V_7 .

L'interféromètre de Michelson est un appareil d'une grande précision optique et mécanique.

★ Il est donc **FRAGILE** et **CHER** : ne toucher à aucune lame ni miroir.

★ Le réglage étant précis, pour effectuer une mesure, il faut donc tourner une seule vis à la fois, et suffisamment lentement pour ne pas perdre de vue la zone réglée.

→ Dans ce TP, l'interféromètre n'est pas réglé, l'objectif principal est d'apprendre à le régler pour mettre en œuvre les mesures vues au 1er TP sur le Michelson. CHAQUE membre du binôme doit s'entraîner au réglage. Une fois celui-ci assimilé, vous pourrez vous concentrer à utiliser le Michelson pour effectuer des mesures.

1 Réglage de l'interféromètre

Le protocole présenté ici utilise une lampe à vapeur de mercure qui permet de faire différentes parties du réglage sans changer de lampe.

1.1 Réglage initial

1.1.1 Éclairage en faisceau parallèle

Rappel : en optique, toujours penser à ajuster la hauteur d'un élément dès son ajout sur le dispositif, et à aligner les axes optiques !

1. *Éclairer l'interféromètre par un faisceau parallèle :*

★ Placer la lampe à vapeur de mercure sur le banc d'optique. Placer le condenseur (une lentille de courte focale et large diamètre) un peu après : le faisceau doit converger.

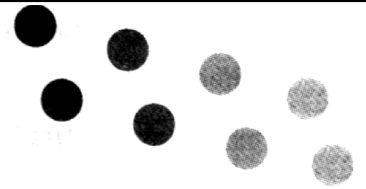
★ Placer un diaphragme proche vers où le faisceau est le plus condensé. Le fermer au minimum.

★ Par autocollimation, placer une lentille de focale de l'ordre de 15 cm après le diaphragme. (Astuce non exigible¹ : placer si possible le côté le plus plat de la lentille vers le diaphragme.)

1. Astuce non exigible : « plus plat-plus près ». L'image d'un objet par une lentille convergente présente moins d'aberrations quand le côté le plus plat de la lentille est du côté de l'élément (image ou objet) qui est le plus proche.

2. Faire l'image du diaphragme sur l'écran :

- ★ Placer en sortie de l'interféromètre une lentille de focale de l'ordre de 1 m.
- ★ Placer l'écran au plan focal image de la lentille. On doit voir net plusieurs images du diaphragme de différentes intensités, voir schéma ci-contre.

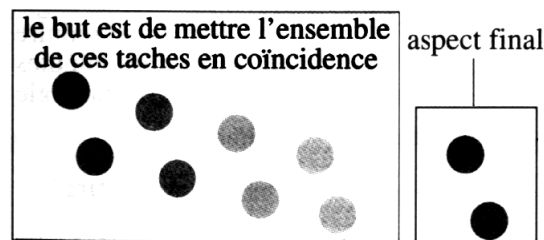


1.1.2 Parallélisme compensatrice/séparatrice

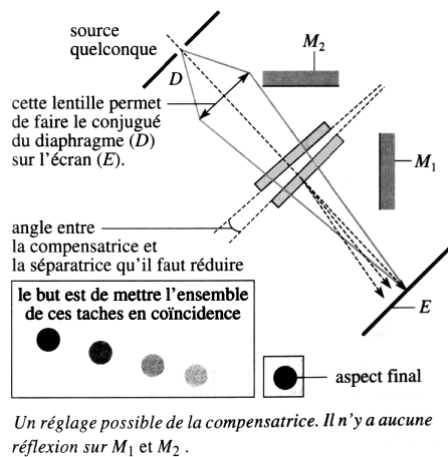
ATTENTION : ce réglage n'est pas forcément possible sur tous les interféromètres que nous avons ici, voir au cas par cas avec les techniciens et professeurs.

3. Réglage du parallélisme compensatrice/séparatrice :

- ★ Utiliser les vis V_6 et V_7 pour faire coïncider ces taches en seulement deux taches :



rq : Il existe une autre méthode plus rapide pour régler le parallélisme compensatrice/séparatrice, et qui permet de s'affranchir de réflexions par les miroirs. Mais elle n'est pas utilisable avec tous les interféromètres donc autant apprendre la méthode précédente qui fonctionne toujours. Le principe est d'éclairer perpendiculairement aux lames à régler :

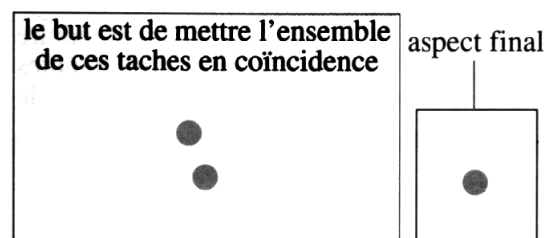


1.1.3 Parallélisme grossier des miroirs

rq : on parle de « parallélisme » des miroirs alors qu'ils sont orthogonaux. Cet abus de langage signifie que pour interpréter le fonctionnement du Michelson, on considère en général un miroir et le symétrique de l'autre miroir, qui doivent donc être parallèles entre eux.

4. Régler grossièrement le parallélisme des miroirs :

- ★ Utiliser les vis V_1 et V_2 pour faire coïncider ces deux taches en seulement une seule :



1.2 Recherche du contact optique

L'objectif est d'arriver à atteindre le contact optique (distance $e = 0$ entre miroirs) pour des miroirs parallèles (angle $\alpha = 0$). Cette configuration permettra de passer facilement aux deux configurations typiques : coin d'air et lame d'air.

On commencera par observer les franges rectilignes pour annuler l'angle entre miroirs, avant d'observer les anneaux pour diminuer l'épaisseur de la lame d'air.

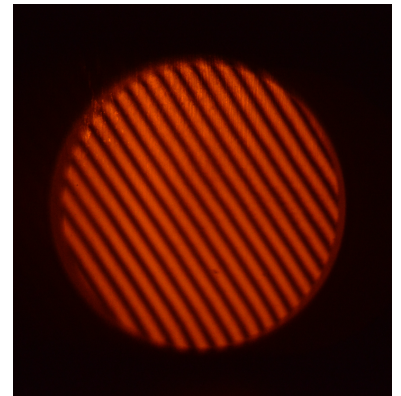
1.2.1 Obtenir des franges rectilignes

5. *Éclairer l'interféromètre en faisceau parallèle : c'est déjà le cas si vous venez de faire le réglage précédent.*
6. *Faire l'image des miroirs sur l'écran (rappel, les franges rectilignes du coin d'air sont localisées sur les miroirs) :*
 - ★ Retirer la lentille de 1 m qui faisait l'image du diaphragme. La remplacer par une lentille de focale de l'ordre de 20 cm. (Astuce non exigible : placer si possible le côté plat de la lentille vers l'interféromètre.)
 - ★ Ouvrir le diaphragme pour éclairer une plus grande partie des miroirs.
 - ★ Si le faisceau éclaire suffisamment le bord des miroirs², ajuster la position de la lentille de manière à voir net ce bord.
7. *Obtenir des franges. Si vous voyez déjà des franges, vous êtes chanceux! Sinon, c'est qu'on est trop éloigné du contact optique. Dans ce cas :*

★ Charioter (vis V_3) de manière à ce que les miroirs semblent à égale distance de la séparatrice. ATTENTION : ne surtout pas toucher les lames ou miroirs avec une règle!

★ Si vous ne voyez pas encore de franges, charioter légèrement en regardant attentivement l'écran. Les franges peuvent être très fines et parfois difficile à voir.

★ Et si vraiment vous ne voyez toujours pas de franges, placer un verre dépoli (matériau non transparent qui diffuse beaucoup la lumière et donc atténue la lumière transmise) à l'entrée de l'interféromètre, et observer directement à l'œil dans la sortie de l'interféromètre. On distingue plus facilement les franges très fines à l'œil nu.



1.2.2 Obtenir des anneaux

8. *Se rapprocher de la teinte plate des franges rectilignes (angle $\alpha = 0$) :*
 - ★ Charioter pour maximiser le contraste des franges. Ajuster les vis de réglage grossier des angles (V_1 et V_2) pour augmenter le plus possible l'interfrange (et donc réduire l'angle entre miroirs).
 - ★ Si V_1 et V_2 ne suffisent pas à avoir une teinte quasi uniforme, ajuster les vis de réglage fin des angles (V_4 et V_5) pour augmenter l'interfrange.
 - On se trouve à la teinte plate pour les franges rectilignes, donc les miroirs sont quasi parallèles, soit $\alpha \simeq 0$. Mais on n'est pas encore au contact optique : $e \neq 0$.

Le contact optique n'est pas atteint, mais il est proche. Lire sur le vernier et noter la position du miroir mobile. Cela sera utile en cas de problème dans le réglage suivant.

9. *Éclairer avec un faisceau très convergent :*
 - ★ Retirer le diaphragme et la lentille placées en entrée du Michelson.
 - ★ Avancer le condenseur au plus près du Michelson. Placer la lampe de manière à faire son image la plus condensée possible sur les miroirs.

2. Sinon, méthode à ne pas utiliser aux concours : placer un morceau de papier contre un miroir et ajuster la position de la lentille pour voir net le bord du papier. ATTENTION : ne surtout pas toucher le miroir avec ses doigts!

10. *Obtenir des anneaux :*

★ Retirer la lentille de sortie du Michelson. L'écran est probablement un peu coloré, voire déjà décoré d'anneaux. Éventuellement charioter légèrement pour faire apparaître les anneaux.

★ Placer en sortie du Michelson une lentille de focale de 1 m à 1 m de l'écran. Les anneaux doivent être un peu plus nets, au prix d'une restriction du champ sur l'écran.

1.2.3 Le contact optique

À partir de la configuration lame d'air ($e \neq 0$, $\alpha = 0$ donc anneaux) :

11. *Atteindre la teinte plate :*

★ Charioter de manière à faire défiler les anneaux vers le centre. Le rayon moyen des anneaux visibles doit augmenter. On finit par arriver à la teinte plate, qui correspond à des miroirs proche du contact optique $e = 0$.

Félicitation ! Il est temps de noter la position du miroir mobile pour retrouver plus facilement plus tard le contact optique !

1.3 Choix de la configuration à partir du contact optique

12. *Configuration coin d'air :*

★ À partir du contact optique $e = 0$ à angle $\alpha = 0$, placer l'éclairage adéquat (faisceau parallèle donc lampe, condenseur, diaphragme, lentille) et la lentille de sortie adéquate (faire l'image des miroirs).

★ Puis seulement tourner une vis de réglage de l'angle des miroirs (V_1 ou V_2), les franges rectilignes doivent apparaître (ne surtout pas charioter).

★ Pour revenir au réglage initial, utiliser les vis de réglage d'angle pour augmenter l'interfrange jusque la teinte plate.

13. *Configuration lame d'air :*

★ À partir du contact optique $e = 0$ à angle $\alpha = 0$, placer l'éclairage adéquat (éclairage condensé sur les miroirs) et la lentille de sortie adéquate (focale 1 m ou alors sans lentille).

★ Puis seulement tourner la vis de chariotage, les anneaux doivent apparaître (ne surtout pas toucher aux vis de réglage d'angle).

★ Pour revenir au réglage initial, utiliser la vis de chariotage pour faire défiler les anneaux vers le centre jusque la teinte plate.

1.4 Passage en lumière blanche - détermination précise du contact optique

L'objectif est d'observer les franges rectilignes peu nombreuses pour un éclairage en lumière blanche. Le spectre d'une lampe blanche est très large, sa longueur de cohérence est donc très petite. Les franges sont ainsi brouillées très rapidement quand on s'éloigne du contact optique. Elles sont donc délicates à trouver.

14. *Se placer le plus près possible du contact optique en coin d'air avec une lampe spectrale :*

★ Cf réglages précédent pour atteindre le contact optique.

★ Donner un angle non nul pour observer des franges rectilignes.

15. *Obtenir les franges en lumière blanche :*

★ Remplacer la lampe spectrale par une lampe blanche (avec notre lampe blanche, pas besoin de condenseur et diaphragme).

★ Si vous voyez déjà des franges : charioter pour les centrer, puis augmenter l'interfrange à l'aide des vis d'orientation des miroirs. Éventuellement itérer plusieurs fois si les franges se décentrent. Vous voilà arrivés à la méthode la plus précise pour mesurer la position correspondant au contact optique !

★ Si vous ne voyez pas de franges : charioter TRÈS doucement autour de la valeur initiale. Si cela ne suffit pas, placer un filtre interférentiel avant l'interféromètre. Vous devriez voir des franges.

Félicitation ! Vous avez la mesure la plus précise du contact optique !

2 Mesure du doublet du sodium

- objectif : mesurer l'écart $\Delta\lambda$ entre les deux raies du doublet du sodium de longueur d'onde moyenne $\lambda_m = 589,3 \text{ nm}$.
- dispositif : interféromètre de Michelson réglé en lame d'air d'épaisseur e , éclairé par une lampe à vapeur de sodium.
- manipulation autorisée : tourner la vis V_3 de chariotage de M_1 (modifie e).
- donnée : expression de la distance Δe entre coïncidences ou anticoïncidences successives : $\Delta e = \lambda_m^2 / (2\Delta\lambda)$.
 1. Remarquer l'évolution du contraste quand on fait varier e . Repérer l'évolution des anneaux avec e .
 2. Mesurer le plus précisément possible l'intervalle Δe entre deux anticoïncidences successives en prenant en compte l'incertitude de mesure. En déduire $\Delta\lambda$ avec son incertitude. [*Astuce : quelle est la meilleure manière d'être certain qu'on n'a pas sauté d'anticoïncidence en les dénombrant ?*]
 3. Pourquoi demande-t-on de repérer les anticoïncidences plutôt que les coïncidences ?
 4. (🏠) Démontrer la formule fournie en donnée.

3 Mesure du coin d'air

- objectif : mesurer l'interfrange des franges d'égale épaisseur. En déduire l'angle α du coin d'air.
- dispositif : interféromètre de Michelson réglé en coin d'air d'angle α , éclairé par la raie verte d'une lampe à vapeur de mercure à $\lambda = 546,1 \text{ nm}$.
- manipulation autorisée : vis de réglage grossier V_1 et V_2 du miroir M_1 , et vis V_4 et V_5 de l'orientation du miroir M_2 permettant de modifier α .
- donnée : l'interfrange i_m sur les miroirs vaut $i_m = \lambda / (2\alpha)$.
 1. Décrire comment sont modifiées les franges quand on fait varier α .
 2. Pour une valeur fixée de α , mesurer précisément l'interfrange i_e sur l'écran avec son incertitude. En déduire une mesure de α .
 3. (🏠) Démontrer la formule fournie en donnée.

4 Mesure de l'épaisseur d'une lame

- objectif : mesurer l'épaisseur d'une lame d'indice connue.
- dispositif : interféromètre de Michelson réglé en coin d'air d'angle α , éclairé par une lampe blanche
- manipulation autorisée : pour modifier l'interfrange, vis de réglage grossier V_1 et V_2 du miroir M_1 , et vis V_4 et V_5 de l'orientation du miroir M_2 permettant de modifier α . Pour effectuer la mesure, tourner légèrement la vis V_3 de chariotage de M_1 .
- donnée : l'épaisseur e de la lame vaut $e = \Delta x / (n - 1)$, avec l'indice de la lame $n = 1,58$ et la différence de position du miroir Δx pour retrouver les franges.
 1. Noter la position initiale du vernier du miroir M_1 .
 2. Décrire comment sont modifiées les franges quand on fait varier doucement α .
 3. En insérant la lame, les franges disparaissent. Déterminer dans quel sens charioter pour les retrouver.
 4. Mesurer la différence de position du miroir Δx pour retrouver les franges, en déduire e . Remettre le miroir en position initiale pour le groupe d'après !
 5. (🏠) Démontrer la formule fournie en donnée.

5 Spectre cannelé

- objectif : observer les franges/anueaux colorés (teintes de Newton) et le spectre cannelé du blanc d'ordre supérieur. En déduire l'épaisseur de la lame d'air.
- dispositif : interféromètre de Michelson réglé en lame d'air d'épaisseur e , éclairé par une lampe blanche. Spectromètre.
- manipulation autorisée : tourner légèrement la vis V_3 de chariotage de M_1 (modifie e).
- donnée : Pour une lame d'air éclairée par un spectre $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, le nombre de cannelure N vérifie $N + 1 > 2e(1/\lambda_{\min} - 1/\lambda_{\max}) \geq N - 1$. Et la longueur d'onde d'une cannelure vérifie $\lambda_k = 2e/(k + 1/2)$.
 1. Observer le spectre en chariotant légèrement.
 2. En comptant le nombre de cannelure à position fixée du spectromètre, en déduire l'épaisseur e de la lame d'air.
 3. Plus précis : en traçant k (à une constante près) en fonction de $1/\lambda_k$, en déduire e .
 4. (🏠) Démontrer les formules fournies en donnée.

6 Mesure du rayon des anneaux

- objectif : vérifier la loi donnant le rayon des anneaux d'égale inclinaison. En déduire une mesure de e .
- configuration de départ : interféromètre de Michelson réglé en lame d'air d'épaisseur e , éclairé par la raie verte d'une lampe à vapeur de mercure à $\lambda = 546,1 \text{ nm}$.
- manipulation utile : tourner la vis V_3 de chariotage de M_1 (modifie e).
- donnée : le rayon r_k du k ème anneau brillant est

$$r_k = f' \sqrt{\frac{\lambda}{e}(k - 1 + \epsilon)} \quad \text{avec } \epsilon \text{ la partie non-entière de } 2e/\lambda$$

1. Décrire l'évolution des anneaux quand on fait varier e . Repérer notamment la teinte plate.
2. Pour une valeur fixée de e donnant au moins 4 anneaux brillants, mesurer le rayon r_k des anneaux brillants. Proposer une représentation graphique appropriée permettant de visualiser une droite si l'expression fournie est vérifiée. En déduire une mesure de e .
3. (🏠) Démontrer la formule fournie en donnée.