

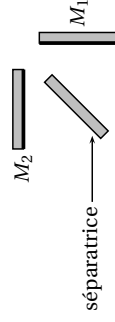
Optique ondulatoire

L'interféromètre de Michelson

1 L'appareil

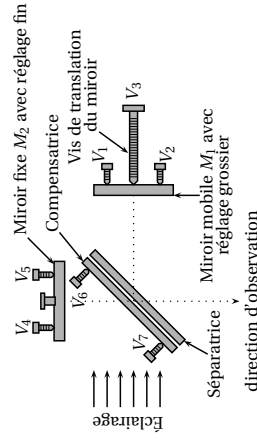
1) Schéma de principe

Dans son schéma de principe, l'interféromètre de Michelson est constitué de deux miroirs approximativement perpendiculaire et d'une lame séparatrice semi-réfléchissante faisant un angle d'environ 45° avec les miroirs :



2) Schéma réel

Vue de dessus de l'interféromètre de Michelson :



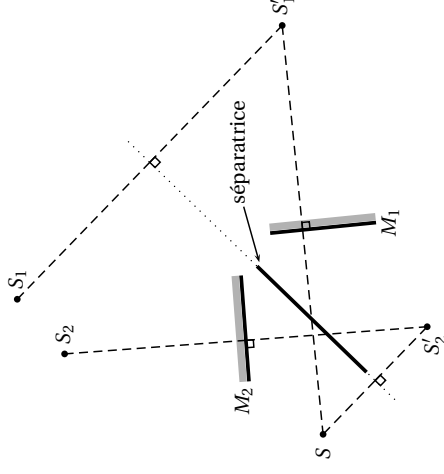
2 Utilisation avec une source ponctuelle

1) Sources secondaires

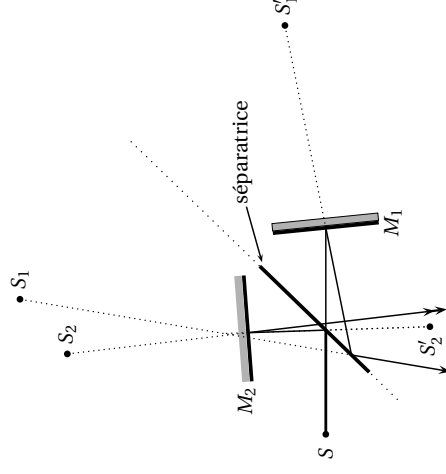
Voie 1 : L'image de la source S par le miroir M_1 est S'_1 ; l'image de S_1 par la séparatrice est S_1 .

Voie 2 : L'image de la source S par la séparatrice est S'_2 ; l'image de S'_2 par le miroir M_2 est S_2 .

Éclairé par une source ponctuelle S , le Michelson peut donc se ramener à deux sources secondaires cohérentes S_1 et S_2 dont la construction est indiquée sur le schéma suivant.



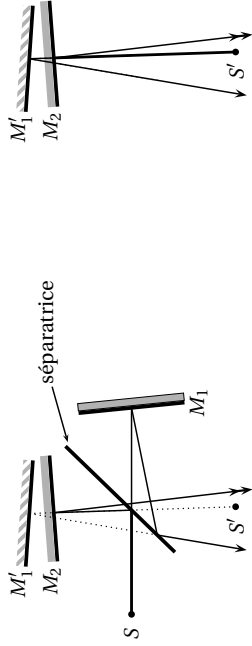
On peut alors tracer la marche d'un rayon lumineux à travers le dispositif :



2) Schéma équivalent

On raisonne usuellement sur un schéma simplifié équivalent du Michelson : on considère le symétrique M'_1 du miroir M_1 par rapport à la séparatrice. Le dispositif est alors équivalent à l'ensemble des deux « miroirs » M_2 et M'_1 , éclairés par la source ponctuelle S , symétrique de S par rapport à la séparatrice¹ :

1. Que nous ayons appelé S'_2 dans la construction précédente.



Deux modes de fonctionnement du Michelson sont à distinguer :

Lame d'air : les deux miroirs M_2 et M_1' sont parallèles ; les deux sources secondaires S_1 et S_2 sont perpendiculaires au plan des miroirs ;

Coin d'air : les deux miroirs M_2 et M_1' ne sont pas parallèles.

3 Les réglages

1) Réglage de la compensatrice

Dans un premier temps, il faut régler le parallélisme entre la séparatrice et la compensatrice. L'idée est d'observer les images d'un point lumineux à travers les deux lames, dues aux réflexions successives sur ces lames. Quand la séparatrice et la compensatrice sont parallèles, ces images se superposent.

Observation directe : l'objet est un petit diaphragme éclairé en lumière blanche. On l'observe à l'œil nu à travers la séparatrice et la compensatrice. On agit sur les vis V_6 et V_7 jusqu'à ce que les images successives du diaphragme se superposent.

Observation indirecte : on utilise un laser, et on observe les images successives sur un écran.

Si on ne peut pas observer directement à travers les deux lames ; on place alors la source « à gauche » de l'interféromètre, et les rayons se réfléchissent sur les miroirs. À cause des réflexions sur les miroirs, on a deux séries d'images ; on joue sur les vis V_6 et V_7 jusqu'à obtenir deux images.

2) Réglage grossier du parallélisme des deux miroirs

Les miroirs ne sont *a priori* pas parallèles. On devrait observer les franges du coin d'air. Il est cependant déconseillé de se lancer tout de suite dans cette observation : l'angle du coin d'air peut être trop important ; l'interfrange est alors très petit, ce qui rend la figure d'interférence inobservable.

La source est un diaphragme éclairé en lumière blanche. On observe à l'œil nu à la sortie de l'interféromètre. On observe deux images : ce sont les images S_1 et S_2 de la source S par M_1 et M_2 . Quand elles sont « l'une derrière l'autre »², on observe les anneaux d'égalé inclinaison ; quand elles sont décalées, on observe les franges d'égalé épaisseur.

Jouer sur les vis V_1 et V_2 (réglage grossier) jusqu'à ce que les deux images se superposent. Les deux sources S_1 et S_2 sont approximativement l'une derrière l'autre ; le miroir M_2 et le symétrique M_1' de M_1 par rapport à la séparatrice sont approximativement parallèles.

Ce réglage peut se faire avec un laser, en observant sur un écran : les taches doivent se superposer.

4 Observations

1) Choix de la source

La très faible cohérence temporelle d'une source de lumière blanche en fait un mauvais candidat pour observer des figures d'interférences. Nous pouvons utiliser des lampes spectrales (à vapeur de mercure haute pression, très lumineuse, ou à vapeur de sodium, qui a une plus grande longueur de cohérence temporelle, mais qui est nettement moins lumineuse), ou le laser muni d'un objectif de microscope afin d'élargir son faisceau.

Dans un premier temps, nous utilisons la lampe à vapeur de mercure haute pression.

2) Réglage en lame d'air : anneaux d'égalé épaisseur

2.1) Du coin d'air à la lame d'air

Le parallélisme ayant été réglé grossièrement, nous devons avoir un coin d'air d'angle faible, ce qui permet d'observer des franges confortablement (grand interfrange). Nous allons observer ces franges, pour pouvoir transformer le coin d'air en lame d'air.

Montage pour observer les franges du coin d'air :

La source : le coin d'air doit être éclairé sous incidence quasi-normale. On obtient un faisceau de lumière parallèle en plaçant une source ponctuelle au foyer d'une lentille convergente.

Observation des franges localisées : nous utilisons une source spatialement étendue (un faisceau large) pour une meilleure visibilité du phénomène. Les franges du coin d'air sont alors localisées au voisinage du coin d'air, c'est-à-dire du miroir M_2 . Pour observer la figure d'interférence sur un écran, il faut donc faire l'image du miroir M_2 sur cet écran.

Nous observons alors des franges rectilignes.

► La longueur des trains d'onde (cohérence temporelle de la source) n'étant pas extraordinaire, les franges sont brouillées si on est trop loin de l'arête du coin d'air. On peut les retrouver en translantant le miroir M_1 avec la vis V_3 .

Il faut maintenant affiner le parallélisme des miroirs pour s'approcher de la lame d'air. Jouer lentement sur les vis V_4 et V_5 de façon à augmenter l'interfrange. On arrive à une teinte relativement uniforme lorsque les miroirs sont parallèles.

Montage pour observer les anneaux de la lame d'air :

La source : on doit éclairer les miroirs sous une large plage d'angles d'indidence. À l'aide d'un condenseur (lentille convergente de courte focale), on fait l'image de la source sur le miroir M_1 .

Observation des anneaux à l'infini : La source étant étendue, les anneaux sont localisés à l'infini. On placera l'écran d'observation dans le plan focal d'une lentille convergente.

On observe alors les anneaux d'égalé inclinaison. On constate que les anneaux se resserrent quand on s'éloigne du centre.

2.2) Vers la teinte plate

Agir sur la vis V_3 de façon à ce que les anneaux se resserrent ; on augmente alors l'épaisseur de la lame d'air. Si on augmente trop l'épaisseur, les franges se brouillent, car la différence de chemin optique introduite dépasse la longueur de cohérence de la source³.

Agir sur la vis V_3 dans le sens inverse. Les anneaux deviennent de plus en plus grands, jusqu'à ce que l'on n'observe que le centre d'un anneau. Le système est au voisinage du contact optique (lame d'air d'épaisseur nulle) ; on se rapproche de la teinte plate.

2. Pour l'observateur.

3. Ce n'est pas observable avec un laser!

► On peut affiner le réglage du parallélisme entre la séparatrice et la compensatrice : si au voisinage de la teinte plate, les anneaux se déforment, on peut modifier le réglage de la compensatrice de façon à rendre les anneaux circulaires.

2.3) Passage en lumière blanche

L'interféromètre étant réglé à la teinte plate, on remplace la lampe spectrale par une source de lumière blanche. On observe alors des couleurs (on n'est jamais rigoureusement au contact optique), appelée *teintes de Newton*.

► On peut alors visualiser le jet de gaz d'un briquet en l'envoyant devant un des miroirs. La variation d'indice due au gaz donne une figure colorée.

Quand on translate très légèrement le miroir M_1 (vis V_3), on voit défilier les teintes de Newton. Très vite, on ne voit plus qu'une teinte blanchâtre uniforme, appelée *blanc d'ordre supérieur*; c'est une lumière blanche à laquelle il manque certaines longueurs d'onde.

► Le spectre du blanc d'ordre supérieur est un *spectre cannelé* : des raies (ou cannelures) noires, correspondant aux longueurs d'onde absentes, sont visibles sur le spectre de la lumière blanche.

3) Réglage en coin d'air : frange d'égalé inclinaison

3.1) De la lame d'air au coin d'air

On part de la lame d'air, observée en lumière blanche, au voisinage du contact optique. Il suffit de tourner légèrement la vis V_4 ou la vis V_5 pour obtenir un coin d'air. Il faut modifier le montage pour observer les franges du coin d'air (voir page 4).

Si on a de la chance, on voit une frange centrale blanche, puis quelques franges colorées, et très rapidement une teinte uniforme. La frange blanche correspond à l'arrêt du coin (différence de marche nulle). Si on ne voit rien, on traduira lentement le miroir M_1 (vis V_3) jusqu'à l'apparition de cette figure d'interférences.

3.2) Cohérence temporelle des sources

Remplacer la source de lumière blanche par une lampe spectrale à vapeur de mercure haute pression. On observe beaucoup plus de franges, même en traduisant le miroir M_1 . Si on tourne plus longtemps la vis V_3 , les franges finissent néanmoins par disparaître. Remplacer la lampe spectrale par un laser⁴. Les franges sont toujours visibles.

5 Testez vos connaissances

- 1) À quoi sert la compensatrice ?
- 2) On éclaire la lame d'air avec une source ponctuelle (on utilise un diaphragme pour rendre la source ponctuelle). Où peut-on voir les anneaux ? On élargit la source en ouvrant le diaphragme ; où peut-on voir les anneaux ?
- 3) On éclaire le coin d'air avec une source ponctuelle. Où peut-on voir les franges ? On élargit la source ; où peut-on voir les franges ?
- 4) Expliquer comment on règle le parallélisme entre la compensatrice et la séparatrice.
- 5) Expliquer le montage pour observer les franges du coin d'air.

4. On élargira le faisceau du laser à l'aide d'un objectif de microscope.

L'interféromètre de Michelson

- 6) Pourquoi utilise-t-on une lampe spectrale plutôt qu'une source de lumière blanche ? Quel est le principe de fonctionnement (au niveau de l'émission de la lumière) d'une lampe spectrale ? Quel est son spectre ?
- 7) On observe les franges du coin d'air avec une lampe spectrale. Si on translate le miroir M_1 , elle finissent par disparaître. Expliquer.
- 8) On observe les franges du coin d'air avec une lampe spectrale. On remplace la source par de la lumière blanche : les franges ne sont plus visibles. Expliquer.
- 9) Pourquoi parle-t-on de « franges d'égalé inclinaison » ?
- 10) Pourquoi parle-t-on de « franges d'égalé épaisseur » ?
- 11) À l'aide d'un dispositif, on observe des franges circulaires. Peut-on en conclure que ce sont des franges d'égalé inclinaison ? Si non, donner un contre-exemple.

6 L'avis du jury

« L'interprétation des franges observées laisse à désirer, avec une confusion entre la forme et l'origine physique des franges, liée aux conditions d'observation ; l'observation de franges est toujours interprétée par l'intermédiaire de la géométrie du montage, jamais directement (le présence de franges implique une variation de la différence de marche !). »

« Les candidats sont beaucoup plus à l'aise avec les franges d'égalé inclinaison qu'avec les franges d'égalé épaisseur ; ils pensent qu'au moment précis où le coin d'air devient une lame à face parallèle, les franges d'égalé épaisseur vont miraculeusement devenir des anneaux et que les anneaux ne peuvent être que des franges d'égalé inclinaison ! »

7 Réponses aux questions

Je ne donne que des éléments de réponse, renvoyant au cours s'il le faut.

- 1) Compensation la différence de chemin optique introduite par la séparatrice (car l'indice du verre dépend de la longueur d'onde, et on veut une différence de chemin optique uniquement géométrique). Chaque faisceau traverse alors la même épaisseur de verre.
- 2) Avec une source ponctuelle, les anneaux d'égalé inclinaison ne sont pas localisés : on les voit partout (on ne travaille jamais ainsi à cause de manque de luminosité). Avec une source étendue, ils sont localisés à l'infini.
- 3) Avec une source ponctuelle, les franges ne sont pas localisées.
- Quand on élargit la source (qui devient spatialement incohérente), les frange sont localisées au voisinage du coin d'air.
- 4) Voir page 3.
- 5) Voir page 4.
- 6) Une source de lumière blanche a une longueur de cohérence temporelle très faible ; dès que la différence de marche introduite par le dispositif dépasse cette longueur, il est impossible d'observer des interférences. La longueur de cohérence spatiale d'une lampe spectrale est plus grande que celle de la lumière blanche. Lampe spectrale : émission de photon par transition électronique entre deux niveaux d'énergie. On excite le gaz par décharges électriques ; les transitions spontanées vers des états de plus basse énergie (jusqu'au fondamental) se fait avec émission de photons, à des fréquences bien déterminées. Le spectre d'une lampe spectrale est un spectre de raies.

- 7) Quand on translate M_1 , on augmente la différence de marche entre les deux rayons interférant. Les franges disparaissent quand la différence de marche dépasse la longueur de cohérence temporelle de la source.
- 8) On est « loin » de l'arête du coin d'air. On peut encore voir les franges avec la lampe spectrale cohérente, mais pas avec la lampe blanche pas cohérente.
- 9) Une frange d'interférence est le lieu des points de même différence de chemin optique (parler de « franges d'égalité de différence de marche » est un pléonasme!). Dans le cas où la différence de marche ne dépend que de l'inclinaison des rayons incidents, il est évident que « égalité de différence de marche » = « égalité d'inclinaison ».
- Pour observer de telles franges, il faut éclairer le dispositif sous un grand intervalle d'angles d'incidence, c'est-à-dire avec un faisceau très convergent.
- 10) Dans le cas où la différence de marche ne dépend que de l'épaisseur du dispositif, on a « égalité de différence de marche » = « égalité d'inclinaison ».
- La variation de la différence de marche⁵ ne devant être due qu'à la variation d'épaisseur, il faut éclairer sous un angle incident constant (en général sous incidence normale), c'est-à-dire avec un faisceau parallèle.
- 11) Anneaux d'interférence de veut pas dire franges d'égalité d'inclinaison. Exemple : les anneaux de Newton, observés avec un coin d'air formé par un plan et une calotte sphérique ; ce sont des franges d'égalité d'épaisseur, les lieux d'égalité d'épaisseur étant des cercles !

5. Un dispositif interférentiel introduit une différence de marche entre deux faisceaux, mais cette différence de marche doit varier pour pouvoir observer une figure d'interférence ! Éclairer une lame à faces parallèles par un faisceau parallèle ne donne pas de figure d'interférence : on a certes $I \neq I_1 + I_2$, mais $I = \text{cte}$: l'éclairement est uniforme.