

I. Interféromètre de Michelson

A. Introduction.

L'interféromètre de Michelson est un appareil permettant l'observation d'interférences entre deux ondes obtenues par division d'amplitude. Il a été mis au point par le physicien A. A. Michelson à la fin du XIX^e siècle.

L'interféromètre de Michelson permet d'obtenir des mesures extrêmement précises d'indices, et de longueurs. Il peut être utilisé pour effectuer des contrôles de grande précision de planéité des surfaces. Lorsqu'on l'associe à un calculateur performant on réalise un spectromètre à transformée de Fourier. C'est un appareil qui permet l'analyse spectrale fine de rayonnements électromagnétiques et donc la mesure de coefficients de réflexion ou de transmission d'un corps, sur une gamme de longueurs d'ondes qui va de l'infrarouge lointain au domaine du visible.

B. Description de l'interféromètre.

1. Principe.

On utilise une source de lumière étendue. Un faisceau incident qui arrive sur une lame séparatrice L_s (semi-réfléchissante) inclinée à 45° est divisé en deux. Avant d'atteindre le détecteur (ou l'écran) l'un des faisceaux est réfléchi par le miroir M_1 , l'autre par le miroir M_2 . Une lame de compensation C parallèle à la séparatrice permet de réaliser l'égalité des chemins optiques entre les deux ondes lorsque M_1 et M_2 sont à la même distance du point I. Les deux faisceaux traversent ainsi des épaisseurs de verre égales. Le miroir M_2 est mobile suivant un axe x situé à 45° de la normale à la séparatrice L_s .

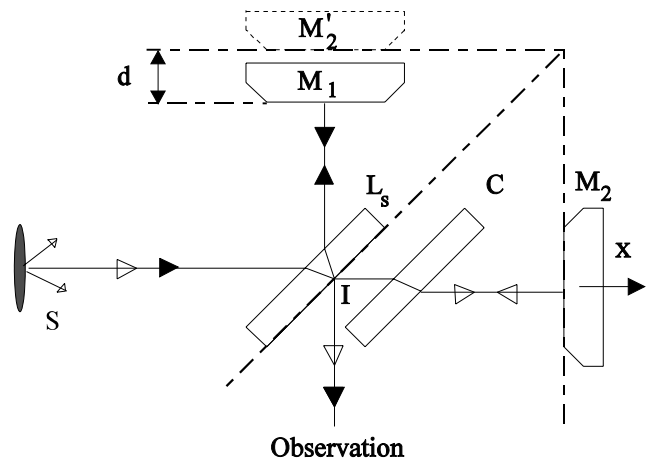


Figure 1 Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson

2. Lame d'air.

Lorsque les miroirs sont parfaitement perpendiculaires, la différence de chemin optique entre deux rayons est identique à celle introduite par une lame d'air d'épaisseur d , d représentant la distance entre M_1 et l'image de M_2 : M'_2 .

La différence de marche entre deux rayons est :

$$\delta = 2.d.\cos i$$

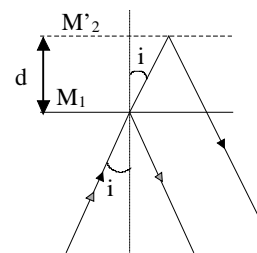


Figure 2 Lame d'air

L'ensemble des points d'égale intensité est défini par $\delta = \text{Cte}$, et donc par $i = \text{Cte}$ car l'épaisseur de la lame ne varie pas. On obtient des anneaux (franges d'égale inclinaison) localisés à l'infini. Les anneaux peuvent donc être observés dans le plan focal d'une lentille.

3. Coin d'air.

Si les miroirs M_1 et M_2 ne sont pas tout à fait perpendiculaires, l'interféromètre de Michelson réalise un coin d'air d'angle α . α représente le très petit angle entre M_1 et M'_2 .

La différence de marche s'écrit alors :

$$\delta = 2.e.\cos i$$

avec $e = \alpha.X$, X étant la distance OA .

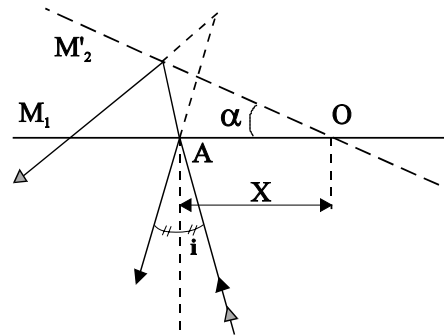


Figure 3 Coin d'air d'angle α

L'ensemble des points d'égale différence de marche est constitué par des droites parallèles à l'arête du coin d'air.

On obtient des franges d'égale épaisseur localisées au voisinage de M_1 et M'_2 . L'interfrange κ correspond à une variation de différence de marche $\Delta\delta = \lambda$ donc :

$$\kappa = \Delta X = \lambda / (2\alpha \cos i)$$

4. Notion de cohérence temporelle.

Lorsqu'un système interférentiel à deux ondes est éclairé par une source qui n'est pas monochromatique, on observe pour certaines valeurs de la différence de marche un brouillage du système de franges. Les différentes composantes monochromatiques sont incohérentes et produisent chacune leur propre système de franges.

La répartition de l'intensité lumineuse dans le plan d'observation s'obtient en ajoutant les intensités produites par chaque radiation monochromatique.

a) Cas d'un doublet.

Considérons une source lumineuse qui émet deux raies monochromatiques d'intensités et de longueurs d'ondes voisines : $\lambda_1 = c/v_1$ et $\lambda_2 = c/v_2$. Ces deux radiations sont incohérentes. En un point M du plan d'observation ou la différence de marche est δ , l'intensité $I(\delta)$ s'écrit :

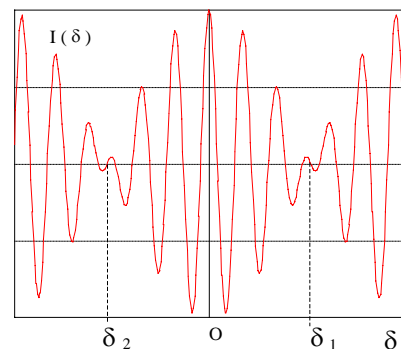


Figure 4 $I = f(\delta)$ pour un doublet

$$I(\delta) = I_1 + I_2 = 2I_0 [1 + \cos(2\pi\delta/\lambda_1)] + 2I_0 [1 + \cos(2\pi\delta/\lambda_2)] = 4 I_0 \{ 1 + \gamma \cos[\pi(v_1 + v_2) \delta/c] \}$$

avec $\gamma = \cos[\pi(v_1 - v_2)\delta/c]$

On remarque que la partie variable de l'éclairement est la somme de deux sinusoïdes et lorsque la différence de marche varie, on observe une succession régulière de brouillages des franges pour $\gamma = 0$. La périodicité du brouillage est :

$$\delta_1 - \delta_2 = c/(v_1 - v_2) = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) \approx \lambda_0^2 / (\lambda_2 - \lambda_1).$$

λ_0 est la longueur d'onde moyenne du doublet, puisque les longueurs d'ondes sont voisines : $\lambda_1 \lambda_2 \approx \lambda_0^2$.

La mesure expérimentale de $\delta_1 - \delta_2$ permet donc de calculer l'écart en longueur d'onde du doublet : $\lambda_2 - \lambda_1$.

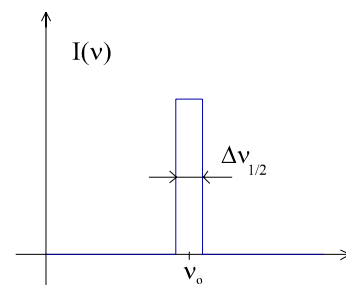


Figure 5 Raie à profil rectangulaire

b) Cas d'une raie à profil rectangulaire.

L'onde émise par une source n'est jamais purement monochromatique. L'énergie d'une bande spectrale comprise entre v et $v + dv$ est proportionnelle à l'intensité spectrale de la source : $I(v)$. En supposant que l'intensité spectrale peut-être assimilée à une distribution rectangulaire dont la largeur à mi-hauteur est : $\Delta v_{1/2}$, l'intensité en un point M où la différence de marche est δ s'écrit :

$$I(\delta) = I' \{ 1 + \gamma \cos(2\pi v_0 \delta / c) \}$$

$$\text{avec } \gamma = \sin(\pi \Delta v_{1/2} \delta / c) / (\pi \Delta v_{1/2} \delta / c)$$

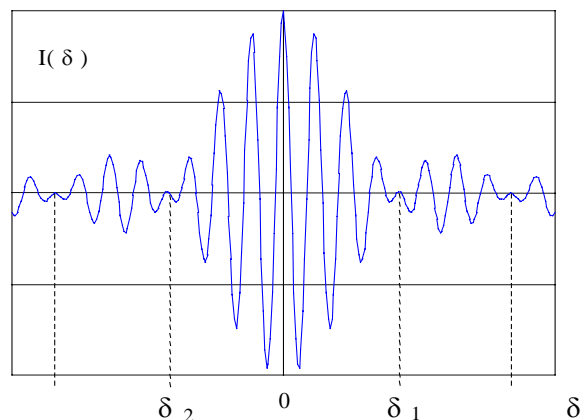


Figure 6 $I = f(\delta)$ pour une distribution spectrale rectangulaire

En se plaçant au point où δ annule pour la première fois γ : $\Delta v_{1/2} = c / \delta$.

C. Manipulations.

1. Schéma de l'appareil.

M_1, M_2 : miroirs

S : séparatrice

C : compensatrice

A_1, A_2 : réglage fin de l'orientation du miroir M_1 .

B_2 : réglage du parallélisme de la compensatrice

C_1, C_2 : réglage (très) rapide de l'orientation du miroir M_2

C_3 : réglage en translation du miroir M_2 (par déplacement du chariot)

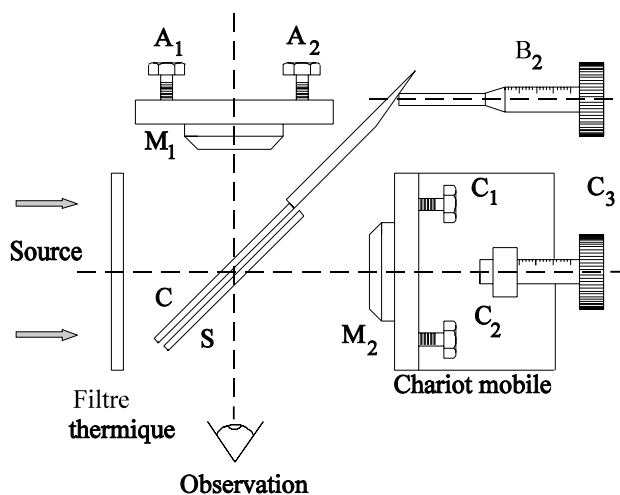


Figure 7 Réglages du Michelson

2. Parallélisme de la compensatrice et coin d'air.

Vérifier que les vis A_1 et A_2 du miroir M_1 sont en position moyenne.

Déplacer le chariot à l'aide de C_3 pour que les miroirs M_1 et M_2 soient approximativement symétriques par rapport à la séparatrice.

A l'aide d'une source de lumière blanche, d'un diaphragme placé dans le plan focal objet d'une lentille de focale 20 cm, réaliser une source «ponctuelle» S de lumière blanche située à l'infini.

Pour placer le diaphragme dans le plan focal de la lentille, utiliser la méthode d'autocollimation avec les miroirs du Michelson. Sur le diaphragme observer les images multiples de S, et régler le miroir M_2 (vis C_1, C_2) puis la séparatrice (vis B_2) afin d'obtenir une seule image de la source S. Cela permet un réglage du parallélisme de la séparatrice et de la compensatrice et l'obtention d'un coin d'air.

Eteindre la source de lumière blanche. A ce niveau là le miroir M_1 et l'image de M_2 forment entre eux un angle assez petit, ils réalisent un coin d'air.

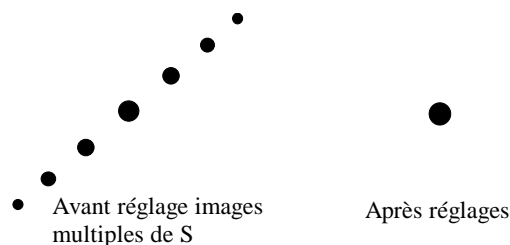


Figure 8 Images multiples de S

3. Observation des franges du coin d'air

a) Angle du coin d'air.

Utiliser une lampe à vapeur de cadmium (ou de mercure) et une lentille L_1 de focale 15 cm pour obtenir un faisceau légèrement convergent qui éclaire toute la surface des miroirs. Les franges étant localisées au voisinage du coin d'air formé par les miroirs, on les observera sur un écran translucide en formant avec une lentille L_2 ($f_2 = 15$ cm ou 20 cm) l'image du miroir M_1 . L'observation des franges est possible en regardant directement le miroir M_1 mais cette solution est très mauvaise, voire dangereuse pour l'œil lorsque la source spectrale est trop intense ou émet des rayonnements ultraviolet.

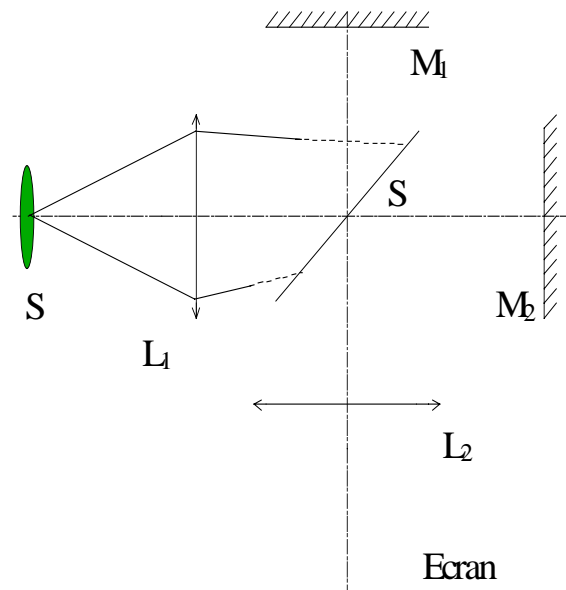


Figure 9 observation des franges

Si les franges ne sont pas assez contrastées agir sur la vis C_3 . En jouant **très délicatement** sur les vis C_1 et C_2 , faire varier l'écartement des franges de façon à ce qu'elles soient suffisamment larges pour une observation aisée (attention une action trop franche sur C_1 et C_2 peut entraîner la disparition des franges, l'effet de ces vis est très rapide). Si les franges sont perdues recommencer le réglage avec la source ponctuelle de lumière blanche.

Faire apparaître dans le champ d'observation une dizaine de franges et rechercher les franges les plus contrastées par action sur C_3 .

On peut mettre en évidence la sensibilité des méthodes de mesures interférométriques en envoyant devant l'un des bras du Michelson le jet de gaz d'un briquet. Observer la déformation des franges et interpréter. En utilisant les graduations de la vis micrométrique C_3 relever les positions limites du miroir M_2 qui permettent d'obtenir les franges les plus contrastées. Essayer de repérer la frange centrale la plus contrastée.

(1) Quel est l'ordre d'interférence pour la frange la plus contrastée ?

(2) Pourquoi lorsque l'ordre d'interférence augmente, les franges du coin d'air semblent moins contrastées et finissent par se brouiller ?

b) Franges d'égale épaisseur en lumière blanche.

Les positions du miroir M_2 qui permettent de localiser la frange centrale étant notées, remplacer la lampe spectrale par une source de lumière blanche (alimenter sous une tension de 6 V). Utiliser le moteur du Michelson pour entraîner la vis C_3 et déplacer lentement le miroir entre les positions qui donnent les franges les plus contrastées. Regarder sur l'écran translucide l'image du miroir M_1 , au bout de 1 à 2 minutes des franges colorées doivent apparaître; couper alors le moteur et agir sur la vis C_3 pour positionner la frange d'ordre zéro au centre de l'écran.

Pourquoi la frange centrale est-elle blanche ? Commenter la succession des couleurs.

c) Application à la mesure de l'indice de réfraction d'une lame.

Lorsque la frange centrale en lumière blanche est bien au centre de l'écran, noter avec précision la position du miroir M_2 . Introduire avec soin une lame de verre d'épaisseur e et d'indice n parallèlement au miroir M_1 .

(1) Quelle est, en fonction de e et n , l'expression de la différence de marche δ introduite par la lame ?

(2) Dans quel sens faut-il déplacer le miroir M_2 pour que les franges irisées réapparaissent ?

(3) En tournant très doucement la vis C_3 , trouver la position du miroir M_2 qui fait réapparaître les franges irisées. Connaissant l'épaisseur de la lame, en déduire avec incertitudes l'indice de réfraction de la lame. Pourquoi les franges irisées ne sont plus rectilignes ?

4. Lames à faces parallèles.

a) Obtention de franges d'égale inclinaison.

Enlever la lame de verre, remplacer la source de lumière blanche par une lampe spectrale à vapeur de cadmium (ou de mercure). Replacer le miroir M_2 au voisinage de la position qui permettait d'obtenir la frange centrale. En regardant sur l'écran augmenter l'interfrange au maximum en agissant très **délicatement** sur les vis C_1 , C_2 du miroir M_2 de manière à observer deux ou trois franges dans le champ d'observation. A ce niveau là, le parallélisme des miroirs est approximatif. Placer l'écran dans le plan focal de la lentille, éloigner la lampe spectrale de la lentille L_1 pour obtenir un éclairage suffisamment convergent (les miroirs du Michelson sont partiellement éclairés), et observer les anneaux. Augmenter, si nécessaire le nombre d'anneaux visibles dans le champ d'observation par action sur C_3 . Si les anneaux ne sont pas parfaitement circulaires, agir sur le réglage fin de M_1 .

(1) Comment varie le rayon des anneaux et l'écart entre deux anneaux consécutifs lorsque l'épaisseur de la lame virtuelle augmente ?

(2) Chercher à accroître la taille des anneaux; lorsqu'ils deviennent trop grands on observe une teinte plate (contact optique), quelle est alors l'épaisseur de la lame d'air virtuelle ?

b) Application à la mesure d'une longueur d'onde.

C'est la diode laser qui sert de source pour cette expérience. Pour obtenir un faisceau divergent à l'entrée de l'interféromètre, placer derrière la diode une lentille divergente de focale -100 mm. Enlever l'écran d'observation et placer au point focal image de la lentille d'observation le détecteur (photodiode). Pour mesurer la longueur d'onde λ_d de la diode laser, on

réalise le comptage du nombre d'anneaux qui défilent au point focal de la lentille pour un déplacement e_{M2} connu du miroir M_2 .

(1) Etablir l'expression de la longueur d'onde λ_d en fonction du nombre d'anneaux N_a qui défilent pour un déplacement e_{M2} du miroir M_2 .

(2) Repérer la position initiale du miroir M_2 . Brancher la sortie du détecteur sur la table traçante. Enregistrer le signal du détecteur sur la table pour un déplacement du miroir M_2 du Michelson. Lorsque une centaine d'anneaux environ ont défilés, couper le moteur, noter la valeur de la position finale du miroir M_2 et calculer la valeur de λ_v avec son intervalle de confiance.

5. Cohérence temporelle.

a) Détermination de l'écart du doublet du mercure.

Isoler le doublet jaune du mercure en utilisant un filtre. Observer les anneaux d'interférences en plaçant un écran dans la plan focal de la lentille d'observation. Faire varier la différence de marche en agissant sur C_3 et repérer deux positions successives de brouillage des anneaux. Connaissant la longueur d'onde moyenne du doublet du mercure ($\lambda_s = 578,0 \text{ nm}$) en déduire l'écart $\lambda_2 - \lambda_1$ du doublet du mercure.

b) *Ordre de grandeur de la largeur de la raie verte du mercure.(facultatif)*

On peut estimer la largeur en fréquence de la raie verte du mercure en supposant que celle-ci présente une intensité spectrale approximativement rectangulaire. Isoler la raie verte du mercure, et rechercher de part et d'autre de la frange centrale les positions du miroir M_2 qui provoquent la disparition des anneaux.

(1) En déduire $\Delta\nu_{1/2}$ et $\tau_c = 1/\Delta\nu_{1/2}$ qui sont respectivement la largeur à mi-hauteur et le temps de cohérence de la raie verte du mercure.

(2) *Quelle serait la valeur du déplacement du miroir M_2 qui permettrait d'obtenir le brouillage des anneaux si la source était un laser de temps de cohérence : $\tau_c = 10^{-4} \text{ s}$.*

6. Conclusion et réflexion.

Faire une rapide synthèse des principaux résultats obtenus.

Pouvez-vous expliquer comment l'interféromètre de Michelson peut être utilisé pour contrôler la planéité d'une surface réfléchissante ?

Pourriez vous déterminer expérimentalement l'ordre de grandeur du temps de cohérence d'une lampe à vapeur de mercure ?

L'interféromètre de Michelson est-il sensible à la cohérence spatiale de la source ? Pourquoi ?

