

Interféromètres

Exercice 1 : Intéféromètre de Michelson. Application directe du cours

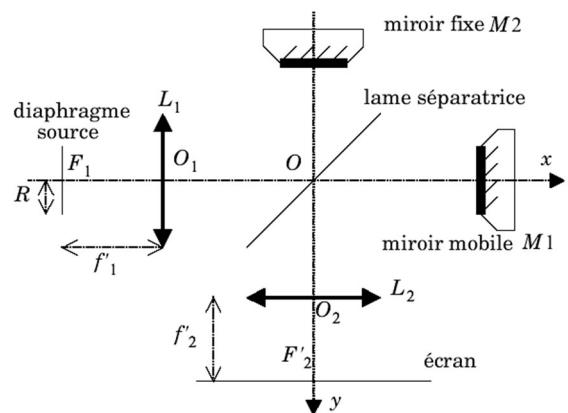
Les 2 exercices A et B sont indépendants et très proches du cours (sauf qu.B.4) et seront corrigés rapidement.

Exercice 1A

On étudie un interféromètre de Michelson éclairé par une source étendue réalisée à l'aide d'un diaphragme ayant la forme d'un disque de rayon R et d'axe Ox . Le diaphragme intercepte une lumière monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 550 \text{ nm}$. Il est placé dans le plan focal objet d'une lentille mince convergente L_1 de focale $f'_1 = 10 \text{ cm}$ et d'axe Ox .

On observe la figure d'interférence sur un écran situé dans le plan focal image d'une lentille mince convergente L_2 de focale $f'_2 = 50 \text{ cm}$ et d'axe Oy . L'ensemble est placé dans l'air, dont l'indice est pris égal à 1.

- 1- On observe des anneaux sur l'écran. En déduire l'orientation relative des deux miroirs. Pourquoi faut-il placer l'écran dans le plan focal de la lentille ?
- 2- La zone éclairée de l'écran est un disque de rayon $R' = 5 \text{ cm}$. Que vaut R ?
- 3- On charioite le miroir M_1 (translation dans la direction Ox) jusqu'à l'obtention d'un éclairage uniforme sur l'écran. Comment s'appelle cette situation ?
- 4- À partir de la position précédente, on charioite maintenant d'une distance e dans le sens des x croissants. On observe à nouveau des anneaux.
 - 4a- Établir l'expression de la différence de marche δ entre les deux ondes qui interfèrent en un point M de l'écran, repéré par l'angle i que fait O_2M avec l'axe Oy . On exprimera le résultat à l'aide de e et de i .
 - 4b- On relève le rayon du 1^{er} anneau sombre à partir du centre de la figure : $r_1 = 1,5 \text{ cm}$ et celui du 9^{me} anneau sombre : $r_9 = 4,8 \text{ cm}$. Calculer numériquement e .
 - 4c- Quel est le rayon du 2^{ème} anneau sombre ?
 - 4d- On constate que l'intervalle entre les anneaux successifs se resserre quand on passe du centre au bord de la figure d'interférences. Expliquer ce phénomène.
- 5- On translate progressivement le miroir M_1 en accroissant e .
 - 5a- Prévoir en l'expliquant le sens de défilement des anneaux.
 - 5b- Expliquer comment évolue le nombre d'anneaux observables sur l'écran.



Exercice 1B

Un interféromètre de Michelson est éclairé avec une lampe à vapeur de sodium assimilable à une source monochromatique de longueur d'onde 589 nm.

- 1- Le réglage initial est le suivant : l'éclairage est convergent sur les miroirs, les deux miroirs forment un angle de 90° , et l'on observe dans le plan focal image d'une lentille. Qu'observe-t-on ?
- 2- On chariole le miroir M2 jusqu'à ce qu'il soit exactement symétrique de M1 par rapport à la séparatrice, puis on fait tourner M2 d'un angle α faible autour de l'axe vertical. Qu'observe-t-on sur l'écran ? Pourquoi ?
- 3- On éclaire maintenant en lumière parallèle et on fait l'image des miroirs sur l'écran à l'aide d'une lentille convergente. Les deux miroirs ont un diamètre de 20 mm, l'écran est parallèle à l'un des deux miroirs et situé à 1,25 m de celui-ci. On prend une photo de l'écran (figure 1 ou 2).
 - 3a- Laquelle de ces deux photos d'écran correspond au réglage effectué ?
 - 3b- Quelle est la focale de la lentille de projection ? Quelle est sa position ?
 - 3c- En exploitant la photo, évaluer l'angle α .
- 4- Une autre expérience est réalisée avec le même interféromètre et la même source mais des réglages *a priori* différents. Dans cette expérience, l'expérimentateur a remplacé l'un des deux miroirs de l'appareil par un miroir ayant subi une déformation locale (à cause d'un impact laser très puissant par exemple) et a pris une photo du système de franges (figure 3). Expliquer la forme des franges observées puis détailler les mesures pertinentes à effectuer afin de déterminer la taille, la forme et l'amplitude maximale de la déformation.

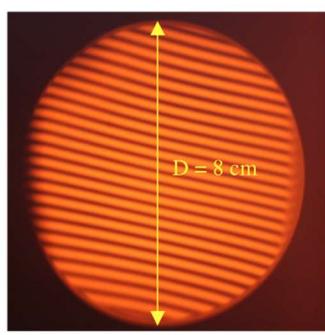


Figure 1

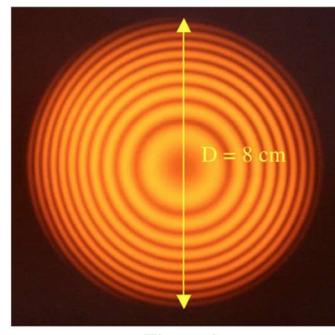


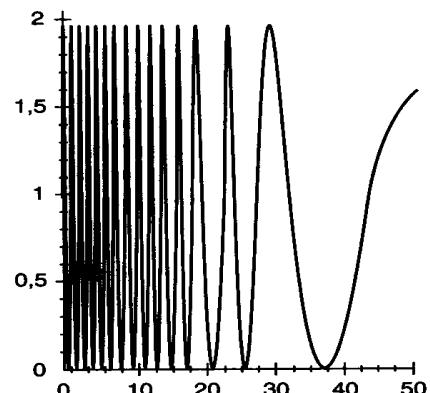
Figure 2



Figure 3

Exercice 2 : Mesure d'un indice optique grâce au Michelson réglé en lame d'air.

On considère un interféromètre de Michelson monté en lame d'air, éclairé en lumière parallèle par une source quasi monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 638$ nm. A la sortie de l'interféromètre, on place une lentille convergente et, au foyer image de cette lentille, une photodiode.



1- On introduit dans l'un des bras de l'interféromètre une cellule d'épaisseur 1,6 cm traversée par la lumière sous incidence normale. La cellule étant initialement vide, on y perce un trou et on laisse l'air extérieur entrer progressivement. Le signal de la photodiode présente alors l'allure ci-contre.

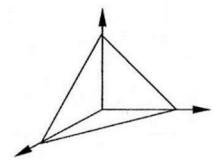
Interpréter l'allure du graphe : pourquoi observe-t-on une oscillation de l'éclairement ? Que voit-on lorsqu'on regarde l'ensemble du système de franges ? Comment l'indice optique varie-t-il dans la cellule et pourquoi l'oscillation de l'éclairement ralentit-elle avec le temps ? Déduire de cette expérience une mesure de l'indice de l'air, en évaluant l'incertitude-type associée.

2- On ne place plus de cellule au sein du dispositif mais on suppose que l'un des miroirs vibre sinusoïdalement avec une fréquence f et une amplitude a . Discuter l'effet observé en fonction de a , λ et f .

Exercice 3 : gravimètre à chute libre

Préliminaire : un résultat important sur les miroirs plans.

Trois miroirs plans sont associés pour former un trièdre rectangle $Oxyz$ en forme de « coin de cube ». Un rayon de vecteur directeur unitaire $\bar{u} = (\alpha, \beta, \gamma)$ se réfléchit successivement sur chacun des trois miroirs. Exprimer, en fonction des composantes de \bar{u} , les vecteurs unitaires directeurs des trois rayons successivement réfléchis sur chacun des miroirs. En déduire que le rayon émergeant du coin de cube se propage dans la même direction que celle du rayon incident mais en sens inverse, quelle que soit cette direction.



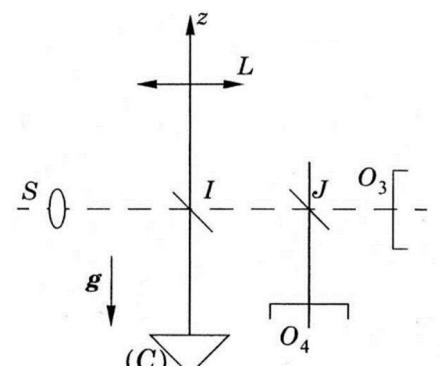
La gravimétrie est la détermination de l'accélération de la pesanteur g , avec la meilleure précision possible. Une des méthodes utilisées repose sur la mesure d'intervalles de temps nécessaires à un corps tombant dans le vide pour parcourir une distance donnée. Elle consiste à fixer deux plans horizontaux séparés d'une hauteur h et à lancer un point matériel vers le haut ; celui-ci traverse deux fois chacun de ces plans (une fois en montant et une fois en descendant) et on mesure Δt_{inf} et Δt_{sup} , Δt_{inf} [resp. Δt_{sup}] étant l'intervalle de temps entre les deux traversées du plan inférieur [resp. du plan supérieur]. On déduit alors g assez simplement à partir de h , Δt_{inf} et Δt_{sup} (calcul non demandé).

D'un point de vue pratique, l'expérience peut être réalisée à l'aide d'un interféromètre de Michelson modifié, réglé en lame d'air, éclairé en lumière parallèle par une source S de lumière blanche, avec à sa sortie une lentille convergente L et, au foyer image de cette lentille, une photodiode. La modification apportée à l'interféromètre est la suivante, illustrée sur la figure ci-dessous où le point I désigne le centre de la lame séparatrice de l'interféromètre :

- Le miroir mobile M_1 est remplacé par un coin de cube réfléchissant (C), susceptible de se déplacer verticalement dans une enceinte où règne un vide poussé.
- Le miroir M_2 est remplacé par un ensemble de deux miroirs fixes, M_3 de centre O_3 et M_4 de centre O_4 , et une lame semi-réfléchissante centrée en J , telle que : $|O_3J - O_4J| = d \gg \bar{\lambda}$ où $\bar{\lambda}$ est la longueur d'onde moyenne du spectre visible.

A l'instant $t = 0$, le réflecteur (C) est catapulté vers le haut.

Montrer que la photodiode enregistre alors quatre maxima d'intensité lumineuse (on notera t_1 , t_2 , t_3 et t_4 ces instants successifs), expliquer quelles grandeurs du problème jouent respectivement le rôle de h , Δt_{inf} et Δt_{sup} , et conclure quant à l'intérêt du dispositif ; expliquer en particulier pourquoi on a utilisé une source de lumière blanche plutôt qu'une source monochromatique. Comment mesurer la distance d avec un maximum de précision ?



Exercice supplémentaire

Détection de très faibles variations spatiales d'indice optique.

Un interféromètre de Michelson est réglé en coin d'air d'angle $\alpha \simeq 10^{-3}$ rad et éclairé en lumière monochromatique, de longueur d'onde $\lambda_0 = 590$ nm, avec une source **modérément étendue** en éclairage quasi-parallèle. On rappelle que les franges obtenues sont alors **localisées** au voisinage des miroirs et qu'il s'agit de franges d'égale épaisseur pour lesquelles la différence de marche au point M vaut $\delta = 2\alpha x$ (voir figure 1).

Dans l'un des bras de l'interféromètre, on intercale une cuve parallélépipédique de longueur c selon la verticale \vec{u}_z et de section rectangulaire de cotés $a = 1$ cm et b respectivement selon \vec{u}_x et \vec{u}_y . Cette cuve contient un solvant d'indice n_0 et des cristaux d'une substance soluble ; du fait que la concentration en soluté varie selon la verticale l'indice optique du liquide dans le tube varie légèrement avec z selon une loi de la forme $n(z) = n_0 + n_1 \exp\left(-\frac{z^2}{d^2}\right)$, où $n_1 \simeq 10^{-4}$ est une constante et d une distance augmentant lentement au cours du temps. Dans l'autre bras on intercale un cuve compensatrice identique contenant uniquement le solvant. On admettra que les rayons lumineux traversent les cuves sous incidence normale sur une épaisseur a et que les dimensions b et c sont suffisantes couvrir tout le champ d'observation.

1. Étudier de manière qualitative l'effet de la présence de la cuve compensatrice sur le contraste de la figure d'interférence.
2. Établir l'expression de la différence de marche δ en fonction de x , α , $n(z) - n_0$ et a .
3. On fait l'image du coin d'air sur un écran le grossissement est $\gamma = -10$.
 - a. Donner l'équation de la frange brillante d'ordre m en notant x' et z' les coordonnées du point courant M' de l'écran.
 - b. On appelle interfrange i la distance entre deux franges brillantes successives lorsque $z' \gg |\gamma|d$. Évaluer numériquement i . Quel est, en interfrange, la déviation maximale des franges parallèlement à \vec{u}_x ?
 - c. Représenter les franges observées :
 - en début d'expérience, lorsque $d \ll c$;
 - en milieu d'expérience, lorsque $d \simeq c$;
 - en fin d'expérience, lorsque $d \gg c$.

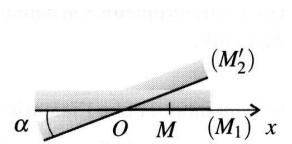


Figure 1

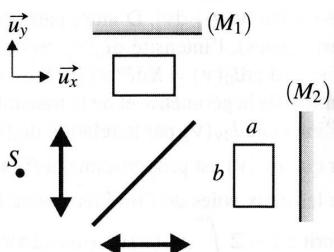


Figure 2