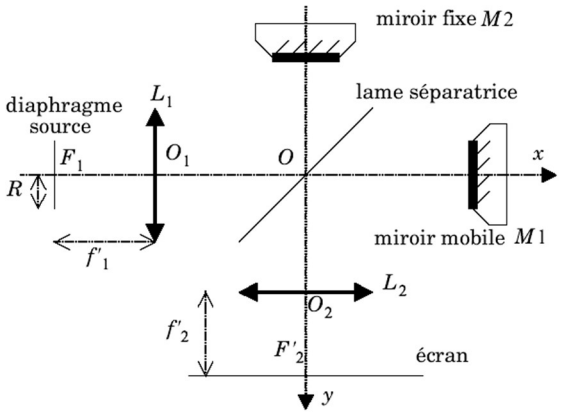
Interférence 2 : interféromètres

Exercice 1 : interféromètre de Michelson. Applications directes du cours.

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

A- 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 $\lambda = 550$ nm. Il est placé dans le plan focal objet d'une lentille mince convergente L_1 de focale $f'_1 = 10$ 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 $f'_2 = 50$ 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 $R' = 5$ cm. Que vaut R ?

3- On chariote le miroir M1 (translation dans la direction Ox) jusqu'à l'obtention d'un éclairement uniforme sur l'écran. Comment s'appelle cette situation ?

4- À partir de la position précédente, on chariote 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 1er anneau sombre à partir du centre de la figure : $r_1 = 1{,}5$ cm et celui du 9me anneau sombre : $r_9 = 4{,}8$ cm. Calculer numériquement e.

4c- Quel est le rayon du 2ème 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 M1 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.

B- 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 chariote 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).

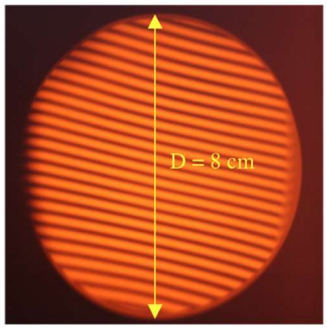


Figure 1

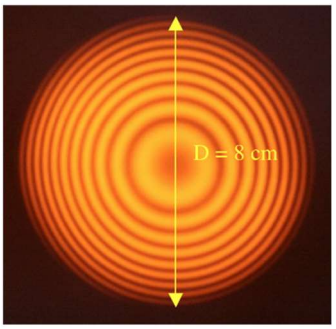


Figure 2

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. L'expérimentateur a placé un briquet devant un des deux miroirs et envoyé un jet de gaz, que l'on suppose de forme conique. Une photo d'écran a été prise (figure 3). Quelles sont les mesures pertinentes à effectuer afin de déterminer l'indice du gaz ?

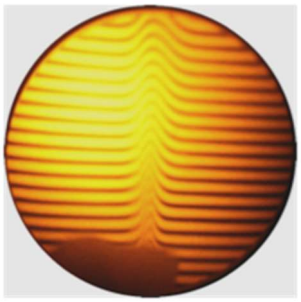


Figure 3

Exercice 2 : Mesures d'indice optique et de position 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.

Proposer une expression du signal mesuré au cours du temps par la photodiode dans les deux cas suivants, et représenter graphiquement :

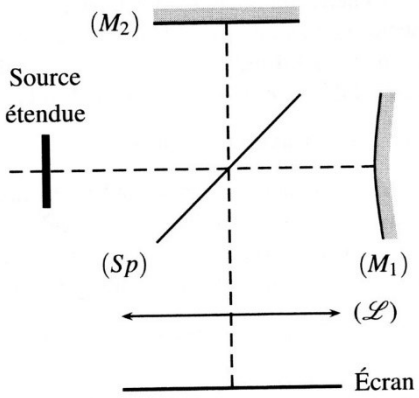
1- On introduit dans l'un des bras de l'interféromètre une lame cristalline de faible épaisseur e, fabriquée dans un matériau non linéaire transparent dont l'indice optique $n(t)$ varie sous l'effet d'une tension $V(t)$ appliquée à ses bornes, selon la loi : $n(t) = n_0 + \alpha V(t)$; α est un coefficient « électro-optique » caractéristique du matériau (on parle d'effet Pockels). Lors de l'expérience, la tension appliquée est de période T, d'amplitude A et de forme triangulaire. On discutera l'effet observé en fonction de T, A, e, λ et du coefficient α.

2- Les deux bras de l'interféromètres étant vides, on suppose que l'un des miroirs vibre sinusoïdalement avec une fréquence f et une amplitude a. On discutera l'effet observé en fonction de a, λ et f.

Exercice 3 : Défaut de planéité d'un miroir.

On considère un interféromètre de Michelson comportant un miroir non parfaitement plan et assimilé à un miroir sphérique convexe (M_1) de rayon de courbure $R = 10{,}0\,\text{m}$. L'image (M'_1) de ce mi roir par la séparatrice est tangent au miroir plan (M_2), conformément au schéma ci-après. L'interféromètre est éclairé par une source étendue monochromatique de longueur d'onde $\lambda_0 = 630\,\text{nm}$.

On observe la figure d'interférence dans le plan conjugué de (M_2) par rapport à la lentille (L) de courte focale. Ce plan est situé loin de la lentille (ce que ne montre pas la figure ci-contre pour des raisons d'encombrement) et le grandissement transversal est $\gamma = 5$



1- Obtient-on des franges d'égales épaisseur ou d'égale inclinaison ? Comment doit-on placer la source étendue ?

2- Déterminer les rayons des franges brillantes successives observées sur l'écran.

3- Si les miroirs ont un diamètre de 2 cm, quelle est la valeur maximale du rayon de courbure que l'on peut détecter ?

Exercice 4 : étude d'un lambdamètre.

Préliminaire : un résultat important sur les miroirs plans.

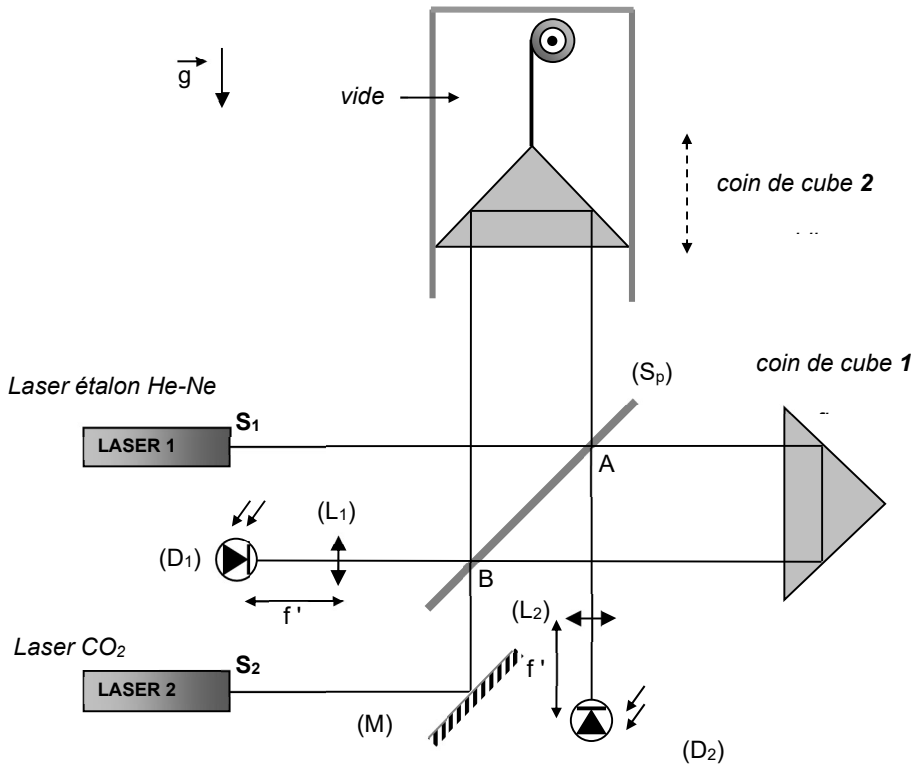
Trois miroirs plans sont associés pour former un trièdre rectangle *Oxyz* en forme de « coin de cube ». Un rayon de vecteur directeur unitaire $\vec{u} = (\alpha, \beta, \gamma)$ se réfléchit successivement sur chacun des trois miroirs. Exprimer, en fonction des composantes de $\vec{u}$, les vecteurs 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.

———

Le lambdamètre a été élaboré pour mesurer rapidement la longueur d'onde d'un laser stabilisé. Il se présente comme un double interféromètre de Michelson qui compare la longueur d'onde λ_2 inconnue du laser étudié (ici un laser CO_2) avec la longueur d'onde connue λ_1 d'un laser de référence (ici un laser Hélium-Néon stabilisé sur la raie d'absorption "i" de l'iode : $\lambda_1 = 632{,}8$ nm). Il se compose d'une séparatrice (S_p), deux coins de cube identiques et un miroir réglable (M) (figure ci-dessous). Tous les angles de réflexion sont égaux à $\pi/4$.

Le coin de cube 2 est mobile, il se déplace verticalement dans une enceinte où le vide est réalisé. Il est suffisamment lourd pour rendre les frottements négligeables lors de la translation. Il est attaché à la poulie d'un moteur pas à pas par l'intermédiaire d'un fil et guidé dans un tube en inox. Les concepteurs ont cherché à se rapprocher le plus possible de la chute libre. Lors de la chute du coin de cube 2, un compteur évalue à $N_1 = 3\,160\,556$ le nombre de scintillements d'intensité détectés par la photodiode (D_1) et, dans le même temps, $N_2 = 188\,679$ scintillements sont détectés par la photodiode (D_2).

Expliquer l'existence de ces scintillements puis, à l'aide des valeurs de N_1 et N_2 mesurées, évaluer λ_2 ainsi que l'incertitude-type associée. A quelle hauteur de chute cette mesure correspond-elle ? Commenter.



S'il reste du temps :

Exercice 5 : Couche anti reflet.

Les questions importantes sont les questions 4 à 7

Les panneaux solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse provenant du Soleil en énergie électrique. Le rendement énergétique d'un panneau solaire va typiquement de 10 à 25 % suivant la technologie utilisée et peut être optimisé en utilisant un couche anti-reflet.

On considère une toiture équipée de panneaux solaires ayant un rendement de 20 % sur une surface totale $S = 30\,m^2$. On estime que la puissance solaire surfacique maximale reçue dans cette région vaut $600\,W.m^{-2}$.

1- Evaluer la puissance électrique maximale produite par cette installation. Comment faudrait-il orienter les panneaux solaires pour optimiser cette production ?

2- Estimer l'énergie électrique produite en un an. Avec un taux de rachat de l'électricité de $0{,}30\,€ / kWh$, en déduire le montant de la facture annuelle de rachat.

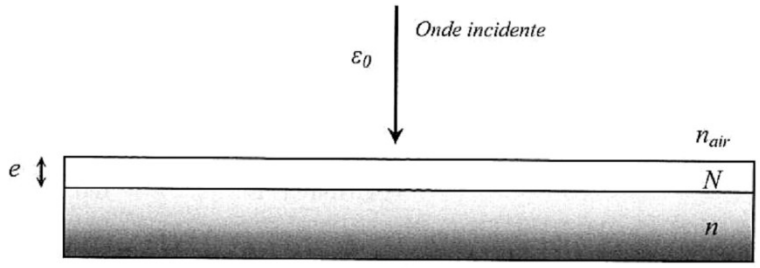
Les cellules photovoltaïques sont en réalité protégées par une plaque de verre d'indice de réfraction $n = 1{,}50$. On donne les coefficients de réflexion R et de transmission T en puissance

à l'interface entre deux milieux transparents d'indices respectifs n_1 et n_2 en incidence normale : $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$ et $T = \frac{4n_1n_2}{(n_2 + n_1)^2}$

3- Déterminer les pertes par réflexion à l'interface entre l'air (assimilé au vide) d'indice $n_{air} = 1$ et le verre. Commenter.

On réalise une couche anti-reflet sur la plaque de verre précédente en déposant une mince couche d'épaisseur e d'un matériau diélectrique transparent d'indice de réfraction N (compris entre n_{air} et n). Une onde incidente monochromatique de longueur d'onde dans le vide $\lambda_0 = 600\,nm$ arrive en incidence normale avec un éclairement ε_0.

Couche anti-reflet sur une plaque de verre



4- Faire un schéma faisant apparaître les ondes (1) et (2) issues de la première réflexion à chaque interface air-milieu diélectrique et milieu diélectrique-verre. On négligera l'effet des autres réflexions sur l'onde totale.

5- Déterminer la différence de marche δ entre ces deux ondes.

6- Exprimer l'éclairement ε_1 et ε_2 des ondes (1) et (2) en fonction de l'éclairement ε_0 de l'onde incidente et des indices n_{air}, N et n.

7- Etablir *deux* conditions permettant d'annuler l'onde totale réfléchie à la longueur d'onde λ_0. En déduire l'expression de l'indice N et de l'épaisseur e la plus faible permettant de réaliser cette couche anti-reflet. Calculer numériquement N et e. Commenter.

8- Expliquer qualitativement ce qu'il se passe se l'onde incidente n'arrive plus normalement sur les panneaux solaires.

Ce qui suit ne pourra être traité que lorsque le § IV du chapitre 3 aura été traité.

En réalité, il faut tenir compte de toutes les longueurs d'onde contenues dans la lumière blanches incidente. Le spectre de la lumière blanche s'étend, en pulsation, entre $\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}$ et $\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}$, où $\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$ et $\Delta\omega$ est la largeur spectrale du domaine visible. L'éclairement de l'onde totale réfléchie à la pulsation ω dans la fenêtre spectrale de largeur dω peut alors s'écrire :

$$d\varepsilon = 2\varepsilon_{0\omega}\left(1+\cos\left(\frac{\omega\delta}{c}\right)\right)d\omega$$

où δ est la différence de marche et $\varepsilon_{0\omega}d\omega$ l'éclairement de chaque onde réfléchir dans la bande spectrale de largeur $d\omega$.

9- Quelle serait la couleur de la lumière réfléchie en incidence normale avec l'épaisseur e trouvée précédemment ?

10- En intégrant sur tout le domaine visible, déterminer l'éclairement totale ε_r de l'onde réfléchie. On supposera que $\varepsilon_{0\omega}$ est indépendant de la pulsation.

11- Tracer l'allure de cet éclairement en fonction de l'épaisseur e de la couche diélectrique. Comment faut-il choisir l'épaisseur e pour réaliser la couche anti-reflet la plus efficace ?

12- En déduire la valeur du coefficient de réflexion minimal $R' = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0}$ qu'il est possible