

Physique : DS5

IMPORTANT : La **présentation**, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la **rédaction**, la **clarté et la précision** des raisonnements entreront pour une **part importante** dans l'**appréciation des copies**. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats littéraux, et à souligner les applications numériques.

Partie I – Le microscope

A – Le microscope optique

A.1. Le microscope classique

Le microscope est modélisé sur la figure 1, par un système de deux lentilles minces convergentes, l'une constituant l'objectif (lentille L_1 de centre O_1 et de distance focale image $f'_1=5$ mm), et l'autre constituant l'oculaire (lentille L_2 de centre O_2 et de distance focale image $f'_2= 15$ mm).

On fixe $\overline{O_1O_2} = D_0 = 120$ mm . On choisit le sens positif dans le sens de propagation de la lumière.

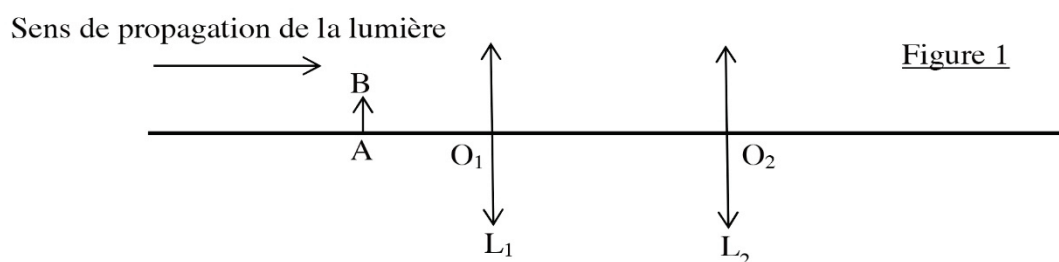


Figure 1

On rappelle la relation de conjugaison d'une lentille et l'expression du grandissement γ :

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

A.1.1 Les relations précédentes sont valables à condition que les rayons lumineux satisfassent les conditions de Gauss. Donner ces 2 conditions.

A.1.2 Si F'_1 est le foyer image de L_1 et F_2 le foyer objet de L_2 , on définit l'intervalle optique par la grandeur algébrique $\Delta = \overline{F'_1F_2}$. Exprimer Δ en fonction de f'_1 , f'_2 , D_0 , puis calculer sa valeur.

A.1.3 Un objet réel AB perpendiculaire à l'axe optique est éclairé et placé à une distance d de L_1 , à sa gauche, de façon à ce que l'image A'B' donnée par l'objectif, appelée image intermédiaire se trouve dans le plan focal objet de l'oculaire. L'observation se fait à l'œil placé au contact de l'oculaire.

A.1.3.1 Exprimer d en fonction de f'_1 et Δ , puis calculer sa valeur.

A.1.3.2 Exprimer le grandissement γ_1 induit par l'objectif en fonction de f'_1 et Δ , puis calculer sa valeur.

A.1.3.3 Quel est l'intérêt pour l'observateur de cette position de l'objet ?

A.1.3.4 Faire une construction géométrique faisant apparaître l'objet, l'image intermédiaire, ainsi que l'angle α' sous lequel est observée l'image finale à travers le microscope.

A.1.4 Le grossissement commercial du microscope est défini par $G = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right|$ où α est l'angle sous lequel serait vu l'objet à l'œil nu placé à une distance $D = 250$ mm.

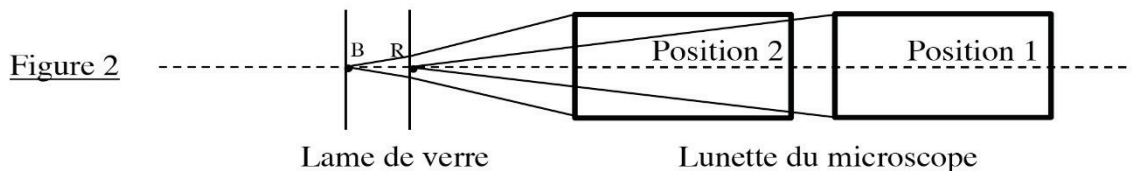
L'objet étant de très petite taille, ces deux angles seront bien sûr très faibles.

Exprimer G en fonction de Δ , D , f'_1 et f'_2 , puis calculer sa valeur.

A.1.5 On utilise ce microscope pour mesurer l'épaisseur e d'une mince lame de verre à faces parallèles, d'indice $n=1.5$.

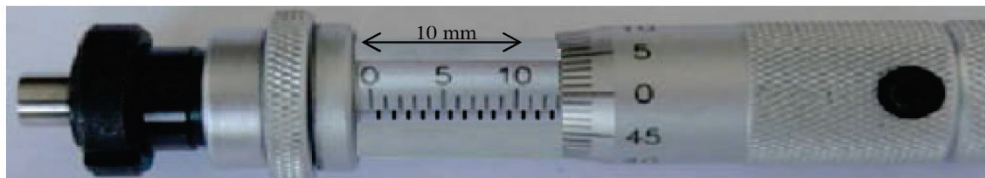
On colle une petite pastille bleue (B) sur la face gauche de la lame et une petite pastille rouge (R) sur sa face droite.

On positionne d'abord la lunette (ensemble objectif+oculaire) du microscope de façon à faire la mise au point sur la pastille rouge (Figure 2, Position 1). Puis, grâce à une vis micrométrique, on translate la lunette d'une distance ε , de façon à faire la mise au point sur l'image de la pastille bleue (Figure 2, Position 2) :



La figure 3 ci-dessous montre la position 2 de la vis micrométrique, la position 1 correspondant à la graduation 40 de la partie mobile.

Figure 3



A.1.5.1 Déterminer la valeur mesurée de ε en mm, avec une estimation de l'incertitude de mesure.

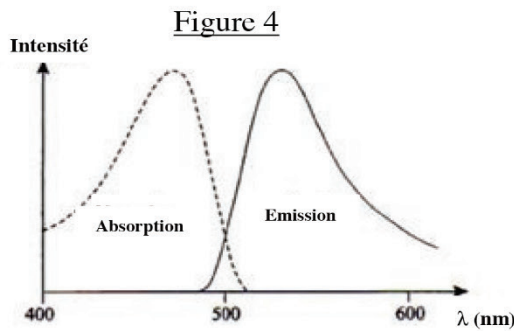
A.1.5.2 En tenant compte du phénomène de réfraction et en considérant les rayons lumineux très peu inclinés par rapport à l'axe optique, exprimer e en fonction de n et ε , puis calculer sa valeur.

A.2 Le microscope confocal

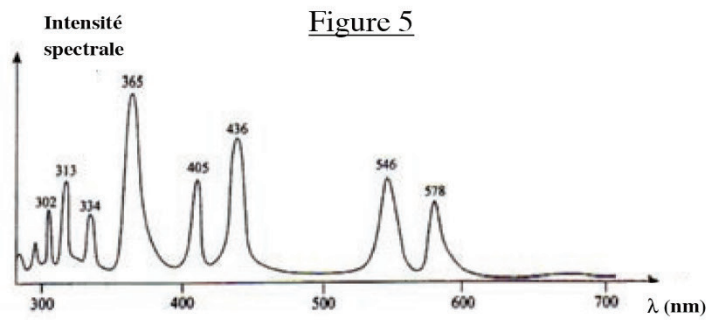
On envisage ici une amélioration du microscope classique. La microscopie confocale a été initiée par Marvin Minsky en 1957 et mise en application 30 ans plus tard.

A.2.1 Le microscope confocal peut être utilisé pour réaliser une image d'un échantillon marqué par des fluorophores ; ces molécules ont la propriété d'absorber la lumière dans un certain domaine spectral et de la réémettre dans un domaine différent.

Par exemple, l'isothiocyanate de fluorescéine (FITC) possède les profils spectraux de la figure 4. L'échantillon est éclairé par une lampe à vapeur de mercure dont le profil spectral est donné sur la figure 5 :



Profils spectraux du FITC

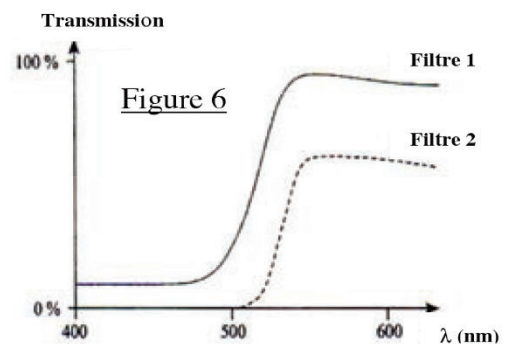


Profil d'intensité spectrale d'une lampe à vapeur de mercure

A.2.1.1 Préciser les deux domaines d'émission électromagnétique de la lampe.

A.2.1.2 On place un filtre devant le détecteur. On propose ci-contre (Figure 6) deux profils spectraux de transmission pour ce filtre, appelé filtre barrière. Lequel semble le plus adapté ?

A.2.1.3 On place également un filtre devant la lampe spectrale. Proposer un profil pour ce filtre, appelé filtre d'excitation.



A.2.1.4 En microscopie confocale, on peut utiliser également un laser comme source d'excitation. Citer une différence entre ce rayonnement et celui d'une lampe spectrale.

A.2.2 Un faisceau laser émet, dans le vide, une onde électromagnétique dont le champ électrique associé s'écrit, dans un repère cartésien orthonormé direct :

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kz) \vec{u}_x \quad \text{où } E_0, \omega \text{ et } k \text{ sont des constantes positives.}$$

A.2.2.1 Préciser la direction et le sens de propagation de cette onde progressive, ainsi que la nature de sa polarisation.

A.2.2.2 On donne en unités du système international (S.I.) la permittivité électrique et la perméabilité magnétique du vide :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \text{ S.I.} \quad \text{et} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ S.I.} \approx 1,25 \cdot 10^{-6} \text{ S.I.}$$

Exprimer la célérité c de l'onde dans le vide en fonction de ϵ_0 et μ_0 , puis donner sa valeur.

A.2.2.3 La longueur d'onde dans le vide étant $\lambda = 628 \text{ nm}$, déterminer les valeurs de ω et k .

A.2.2.4 Exprimer le champ magnétique associé à l'onde.

A.2.2.5 Le faisceau laser est cylindrique de section $s=0,75 \text{ mm}^2$, et sa puissance moyenne temporelle est $P=0,1 \text{ W}$.

Exprimer E_0 en fonction de P , s , c et μ_0 , puis calculer sa valeur.

A.2.3 Quel phénomène limite généralement la résolution d'un instrument d'optique, et en particulier celle du microscope ?

D – Mesure d'épaisseur par interférométrie

Frits Zernike, qui a obtenu le prix Nobel en 1953 pour son microscope à contraste de phase, a dans un premier temps utilisé un montage interférentiel à trois fentes, pour contrôler ou mesurer l'épaisseur d'une fine lame transparente à faces parallèles.



Frits Zernike
(1888-1966)

Dans cette partie, on suppose tous les rayons lumineux très peu inclinés par rapport à l'axe horizontal.

D.1 Système interférentiel à deux fentes

On considère d'abord un système de deux fentes F_1 et F_2 très fines perpendiculaires au plan de la figure 15. Elles sont distantes de $2a$ et de grande longueur. L'ensemble est éclairé par une source S ponctuelle et monochromatique de longueur d'onde λ , placée au foyer objet d'une lentille convergente. L'observation de la figure d'interférences se fait sur un écran placé dans le plan focal image d'une lentille convergente de distance focale image f' .

On s'intéresse aux ondes reçues au point M d'ordonnée z sur l'écran et on suppose z et a très petits devant f' : $x, a \ll f'$.

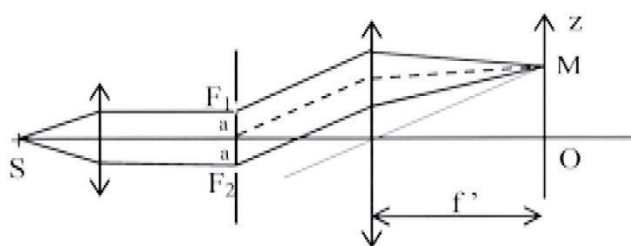


Figure 15

On adopte le modèle scalaire de la lumière et on note s_0 l'amplitude associée au rayon fictif (en pointillés sur la figure) provenant du milieu des deux fentes. Les amplitudes complexes des deux rayons issus de F_1 et F_2 et déphasés d'un angle 2φ sont alors : $\underline{s}_1 = s_0 e^{+j\varphi}$ et $\underline{s}_2 = s_0 e^{-j\varphi}$.

Réécriture pour meilleure lisibilité :

$$\underline{s}_1 = s_0 e^{j\varphi} \text{ et } \underline{s}_2 = s_0 e^{-j\varphi}$$

On note $E_0 = \underline{s_1} \cdot \underline{s_1}^* = \underline{s_2} \cdot \underline{s_2}^* = s_0^2$ l'éclairement (ou intensité lumineuse) émis par chacune des deux fentes. s_0 est une constante liée à l'intensité de la source.

D.1.1 Après avoir cité le théorème utile, exprimer φ en fonction de a , f' , λ et z .

D.1.2 Exprimer l'éclairement E résultant de l'interférence des deux ondes en fonction de E_0 et φ . Tracer l'allure de la courbe E en fonction de φ .

D.2 Système interférentiel à trois fentes

On ajoute une troisième fente F_0 au milieu des deux autres et identique à celles-ci.

D.2.1.1 Montrer que le nouvel éclairement peut se mettre sous la forme : $E = E_0 (1 + 2 \cos(\varphi))^2$.

On rappelle la formule trigonométrique : $\cos(2\varphi) = 2 \cos^2 \varphi - 1$.

D.2.1.2 Reproduire et compléter le tableau de valeurs suivant :

φ en rad	0	$2\pi/3$	π	$4\pi/3$	2π
E/E_0					

D.2.1.3 Tracer l'allure de la courbe E/E_0 en fonction de φ .

D.2.2 A partir du montage à trois fentes, on ajoute devant la fente centrale F_0 et parallèlement au plan des fentes, une lame de verre à faces parallèles d'épaisseur e et d'indice $n=1,5$.

e étant très faible, on considérera que le rayon lumineux qui traverse la lame, parcourt une distance e dans le verre, sans être dévié.

D.2.2.1 Montrer que si l'épaisseur de la lame est telle qu'elle induit un retard de phase de $\pi/2$ pour le rayon central, on retrouve une alternance régulière de franges brillantes et de franges sombres (pas nécessairement noires), contrairement à la question précédente.

D.2.2.2 Si on veut contrôler par cette méthode que la lame a bien l'épaisseur souhaitée $e=0,3 \mu\text{m}$, quelle valeur faut-il choisir pour λ ?

D.2.2.3 Si on veut mesurer l'épaisseur e , on peut déplacer l'écran d'une distance $x = \overline{OO'}$, de façon à retrouver la même figure d'interférences que celle qu'on avait en l'absence de lame.

Le point O' de la figure 16 est tel que les trois rayons issus des trois fentes sont à nouveau en phase (comme en O sans la lame).

Exprimer x en fonction de n , e et de l'angle $\alpha \approx \frac{a}{f'}$.

On donne $a=0,1 \text{ mm}$, $f'=10 \text{ cm}$ et $n=1,5$ et on mesure à l'aide d'un microscope viseur : $x = -1 \text{ cm}$.

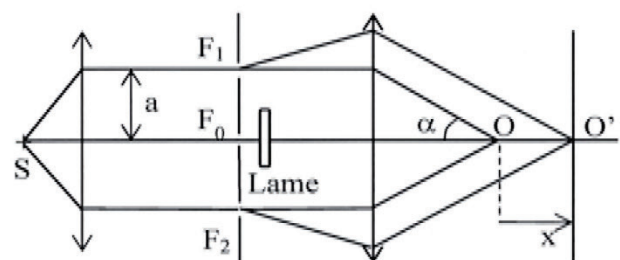


Figure 16

Sachant que $\cos \alpha \approx 1 - \alpha^2 / 2$, en déduire l'ordre de grandeur de l'épaisseur e .

D.2.3 A quel âge Monsieur Zernike a-t-il obtenu son prix Nobel ?

Partie II – Résolution interférométrique

Les moyens spectroscopiques conventionnels (spectroscopie à prisme ou à réseau) peuvent se révéler insuffisants quand il s'agit de résoudre un doublet à très faible écart spectral. On peut alors avoir recours à des méthodes interférométriques. Il est question dans cette partie de l'utilisation de l'interféromètre de Michelson.

Le **schéma 1** de principe d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air est donné page 8. On note Ox et Oy deux axes perpendiculaires définissant les directions des deux bras de l'interféromètre. S est une source lumineuse ponctuelle située sur Ox . M_1 et M_2 sont deux miroirs plans parfaitement réfléchissants, disposés perpendiculairement à Ox en H_1 et respectivement à Oy en H_2 . Le trait incliné à 45° , noté L_s , schématise un groupe de deux lames semi-réfléchissantes à faces parallèles. Ce groupe est supposé n'introduire aucune différence de marche sur les trajets lumineux. L_p désigne une lentille mince convergente placée à la sortie de l'interféromètre de manière à ce que son axe optique soit confondu avec l'axe Oy . Un écran E est placé dans le plan focal image de L_p . On note C le foyer image de L_p .

- Q21.** Nommer les lames qui composent L_s . Qu'est-ce qui les distingue ? Expliquer la nécessité pratique d'utiliser deux lames.
- Q22.** Un rayon lumineux, noté (r) , émis par S , a été représenté. Reproduire le schéma ci-dessous sur la copie avec $SO = OH_1 = 2 OH_2$ et le compléter en faisant un tracé soigné des deux rayons (r_1) et (r_2) qui émergent de l'interféromètre après division de (r) . On laissera apparent tout élément de construction (traits, prolongements de rayons, points remarquables, etc.) justifiant d'un tracé raisonné sans utilisation d'aucun rapporteur d'angle. Tout élément explicatif (noms, positions des points, constructions réalisées...) sera également mentionné.
- Q23.** Sur ce même schéma positionner le miroir fictif M'_1 justifiant de la dénomination « lame d'air » en faisant apparaître le point Q_1 intersection de M'_1 avec les deux prolongements fictifs ad hoc de (r_1) et de (r_2) .
Enfin, terminer le tracé des rayons (r_1) et (r_2) après la lentille L_p jusqu'à l'écran E (on demande comme ci-dessus un tracé raisonné).

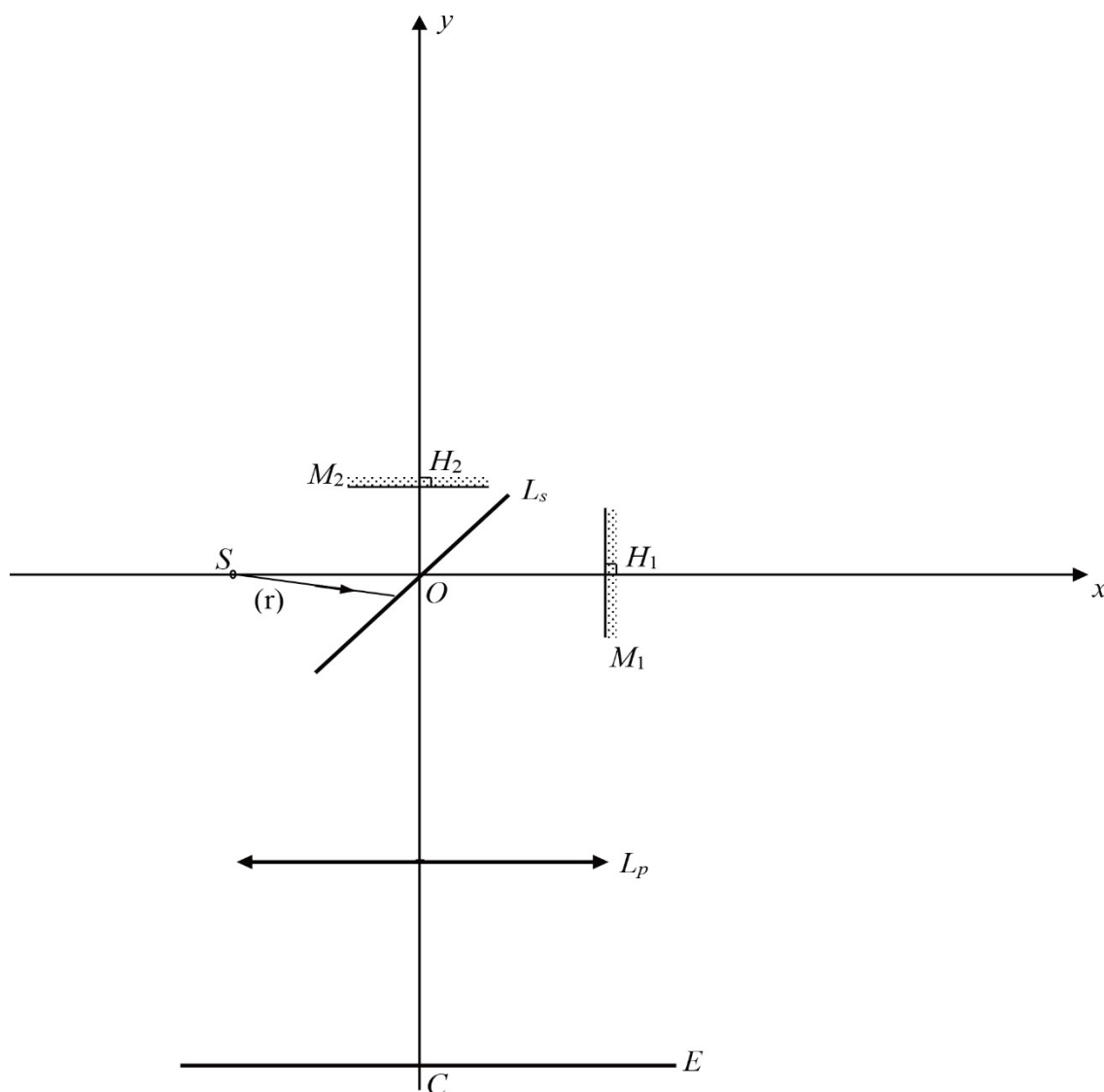


Schéma 1 – Interféromètre de Michelson

- Q24.** Indiquer quelle est la forme des franges d'interférences observées sur l'écran (aucune justification n'est demandée). Comment nomme-t-on ces franges ?
- Q25.** En appelant e l'épaisseur de la lame d'air et en prenant l'indice optique de l'air égal à 1, exprimer la différence de marche δ au centre C de l'écran.
- Q26.** On étudie le cas où la source de lumière utilisée présente un doublet spectral de nombres d'ondes σ_1 et σ_2 . Donner l'expression des ordres d'interférence p_1 et p_2 en C pour chaque radiation du doublet en fonction de δ , σ_1 et σ_2 .
- Q27.** Pour quelles valeurs de la différence $p_1 - p_2$ y-a-t-il brouillage en C ?
En pratique la totalité de la figure d'interférences est affectée et on perd la visibilité des franges partout sur l'écran. En déduire, en fonction de l'écart spectral $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$, la variation D_δ de la différence de marche entre deux situations consécutives de brouillage. Comment nomme-t-on ces situations ?

Application numérique : dans le cas du doublet H_α (écart spectral $\Delta\sigma_{\text{exp}} = 0,360 \text{ cm}^{-1}$), calculer la variation D_e de l'épaisseur de la lame d'air pour passer d'une situation de brouillage à la situation de brouillage directement consécutive.

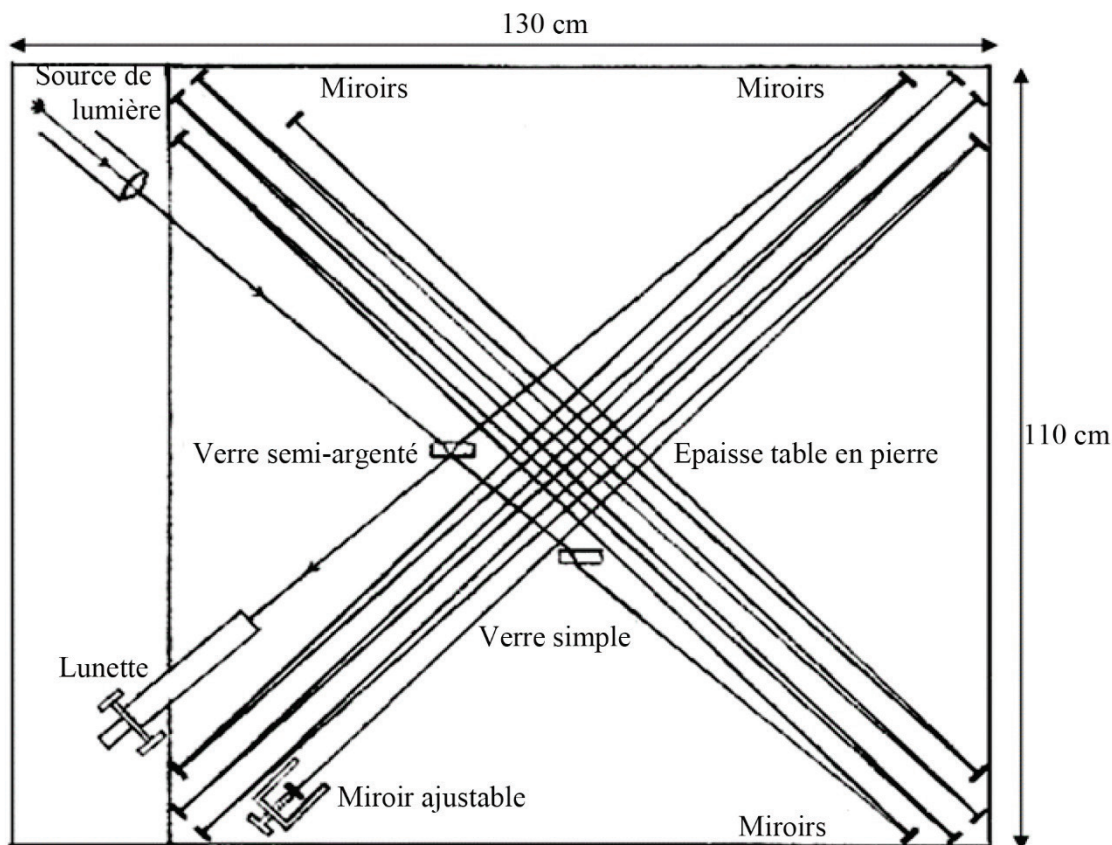


Figure 3 – Schéma des trajets lumineux dans l'interféromètre de Michelson et Morley de 1887
(source : http://ondes-relativite.info/DominiqueCabala/chap4_histo.htm)

Q28. À l'entrée de leur interféromètre historique de 1887, Michelson et Morley ont utilisé un dispositif à prismes muni d'une fente pour sélectionner la raie H_α présente dans le spectre solaire. Ils ont observé des brouillages périodiques lors de la translation du miroir mobile de leur interféromètre. Partant du contact optique (bras de longueurs rigoureusement égales à L_0), ils ont compté un total de 6 brouillages de part et d'autre du contact optique (3 de chaque côté) pour un déplacement du miroir égal à $1/160^\circ$ de la longueur L_0 .
Calculer la valeur de L_0 pour l'interféromètre de Michelson de 1887.

Q29. L'interféromètre, construit dans un sous-sol du campus de l'Université de Cleveland aux Etats-Unis, était monté sur une table en granite rectangulaire posée sur un cylindre de bois flottant dans du mercure.
La table faisait environ $130\text{ cm} \times 110\text{ cm}$ de cotés. La longueur L_0 des bras de l'interféromètre était synthétisée grâce à deux groupes de miroirs permettant plusieurs allers-retours du faisceau sur chaque voie, comme représenté sur la **figure 3** (page 9).

À partir de la **figure 3** (page 9), donner, en expliquant votre calcul, une estimation grossière de la longueur d'un bras de l'interféromètre. L'ordre de grandeur obtenu est-il en accord avec la valeur L_0 trouvée à la question **Q28** ?

Partie III – Couche antireflet

Le traitement antireflet d'un verre de lunette permet d'améliorer la netteté, le contraste, la vision des couleurs et présente également de nombreux autres avantages, y compris esthétiques. La partie I consiste en une étude descriptive du phénomène ; la partie II proposant quant à elle une étude plus théorique.

La modulation d'amplitude permet la transmission de signaux de faibles fréquences par ondes électromagnétiques. Pour ce faire un signal modulé est transformé en onde électromagnétique au moyen d'une antenne émettrice. L'onde électromagnétique est ensuite captée par une antenne réceptrice, laquelle restitue le signal électrique modulé. La démodulation consiste ensuite à extraire le signal d'origine du signal modulé par un dispositif *ad hoc*. La partie III traite du principe de fonctionnement d'une diode à l'échelle microscopique (sous-partie III.A), puis de l'emploi de celle-ci dans un montage de démodulation d'amplitude (sous-partie III.B).

Le silicium est un élément utilisé comme semi-conducteur dans de nombreux composants électroniques (diodes, transistor, ALI, etc.) mais il est également employé comme réducteur en chimie, intervenant notamment dans l'obtention du magnésium. Dans la partie IV nous nous intéressons à un procédé d'obtention de magnésium à partir du carbonate de magnésium avant d'en étudier quelques propriétés.

Dans tout le problème, c désigne la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide et j le nombre imaginaire pur tel que $j^2 = -1$. L'indice de l'air sera pris à un et λ désigne la longueur d'onde, dans l'air, d'une radiation monochromatique.

Un formulaire et différentes données numériques sont fournis en fin d'énoncé.

I Principe d'un traitement antireflet

I.A – Intensités lumineuses transmises et réfléchies pour un verre simple

Considérons un rayon incident arrivant sur une lame de verre d'indice $n = 1,5$ baignée dans l'air. Le tableau figure 1 indique les pourcentages des intensités des rayons considérés par rapport au rayon incident, noté **0**. D'autres rayons existent mais n'ont pas été représentés.

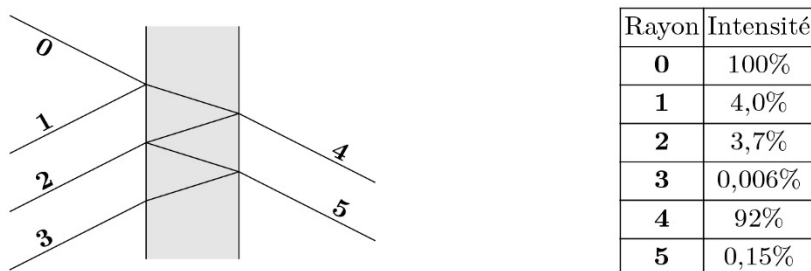


Figure 1

À l'aide de la figure 1, indiquer quelle est l'intensité lumineuse réfléchie sur le verre de lunette et comparer celle-ci à l'intensité transmise.

I.B – Un traitement antireflet monocouche consiste à recouvrir la surface du dioptre par une couche d'un matériau sur une épaisseur e comme indiqué sur le schéma de principe figure 2. La lumière incidente est supposée monochromatique de longueur d'onde dans l'air λ .

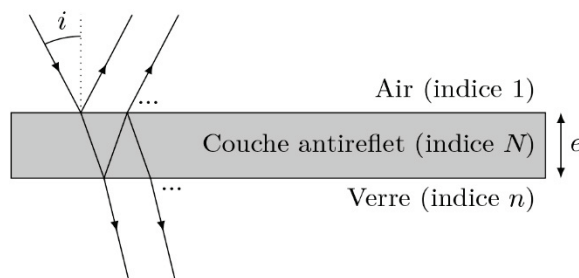


Figure 2

Le principe du traitement est d'utiliser un système interférentiel. L'épaisseur choisie pour la couche est $e = \frac{\lambda}{4N}$.

I.B.1) Préciser pourquoi les différentes ondes réfléchies peuvent interférer entre elles.

I.B.2) En considérant un éclairage sous incidence normale ($i = 0^\circ$) et en traduisant la condition d'interférence destructive entre les ondes 1 et 2, justifier l'expression de e . Quelles autres valeurs pourraient éventuellement être choisies ?

I.B.3) Quelle longueur d'onde va-t-on choisir pour calculer e ?

I.B.4) Citez un autre paramètre ayant une influence sur l'épaisseur choisie à N et λ fixés ?

I.C – Courbes de ZEISS

Les courbes de ZEISS fournissent en fonction de la longueur d'onde de la radiation incidente les pourcentages des intensités lumineuses réfléchies.

La figure 3 fournit les courbes de ZEISS pour un verre minéral avec et sans traitement monocouche.

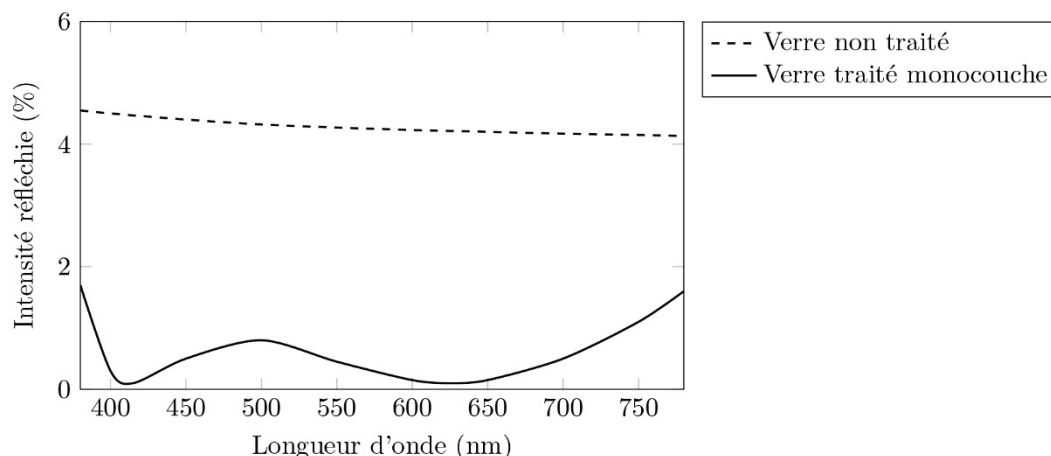


Figure 3

I.C.1) Que remarque-t-on dans le cas non traité ?

I.C.2) Que peut-on dire de la radiation 625 nm ?

I.C.3) Proposer une explication pour le fait qu'il y a deux minima sur la courbe. La tester quantitativement et conclure.

II Étude de la réflexion d'une onde électromagnétique

Dans cette partie nous allons nous intéresser à des milieux isolants non chargés, transparents et non absorbants. On admet que les propriétés de ces milieux sont semblables à celles du vide en remplaçant la permittivité ϵ_0 par $\epsilon_0\epsilon_r$, ϵ_r désignant la permittivité relative du milieu.

II.A – Propagation d'une onde électromagnétique dans un matériau isolant non chargé

II.A.1) Écrire les équations de Maxwell dans le milieu considéré en précisant leur nom.

II.A.2) Établir l'équation de propagation du vecteur champ électrique dans le milieu.

II.A.3) Exprimer la célérité de propagation de l'onde électromagnétique dans le milieu et montrer que son indice est alors $n = \sqrt{\epsilon_r}$.

II.A.4) On considère une onde plane progressive monochromatique se propageant vers les x croissants de la forme

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - kx) \vec{u}_y$$

a) L'onde plane progressive est-elle polarisée rectilignement ? Si oui, dans quelle direction ?

b) Déterminer l'expression du vecteur d'onde \vec{k} . On montrera en particulier que $k = n \frac{\omega}{c}$.

c) Déterminer l'expression du vecteur champ magnétique associé.

II.B – Coefficients de transmission et réflexion en énergie à l'interface entre deux milieux

On s'intéresse à l'interface suivante entre deux milieux d'indices n_1 et n_2 , séparés par le plan $x = 0$.

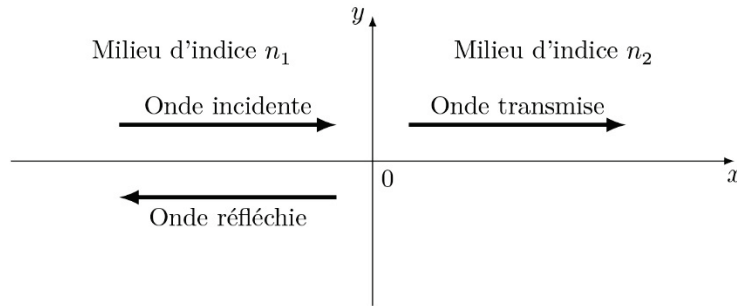


Figure 4

On considère une onde électromagnétique incidente, le vecteur champ électrique étant $\vec{E}_{\text{incident}} = \vec{E}_1 = E_0 \cos(\omega t - k_1 x) \vec{u}_y$. On note $\vec{E}_{\text{réfléchi}} = \vec{E}_2 = \rho E_0 \cos(\omega t + k_2 x) \vec{u}_y$ le champ électrique réfléchi et $\vec{E}_{\text{transmis}} = \vec{E}_3 = \tau E_0 \cos(\omega t - k_3 x) \vec{u}_y$ où ρ et τ désignent respectivement les coefficients de réflexion et de transmission en amplitude.

II.B.1) Justifier les formes des champs réfléchi et transmis fournis.

II.B.2) Quelle relation existe entre k_1 et k_2 ainsi qu'entre k_2 et k_3 ? Justifier.

II.B.3) Déterminer les expressions des champs magnétiques associés $\vec{B}_{\text{incident}}$, $\vec{B}_{\text{réfléchi}}$ et $\vec{B}_{\text{transmis}}$, notés respectivement \vec{B}_1 , \vec{B}_2 et \vec{B}_3 .

II.B.4) Les champs électriques et magnétiques doivent vérifier des relations dites de passage à l'interface entre les deux milieux. Compte tenu des propriétés des deux milieux, on admet que les champs électrique et magnétique sont continus à l'interface.

Traduire ces deux relations et en déduire que $\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$ et $\tau = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}$.

II.B.5) Déterminer les expressions des vecteurs de Poynting pour les ondes incidente, réfléchi et transmise.

II.B.6) À l'aide d'un bilan énergétique clairement défini, déterminer les expressions des coefficients de réflexion et de transmission en énergie à l'interface, notés respectivement R et T . L'énergie est-elle conservée ? Justifier.

II.C – Condition sur l'indice de la couche antireflet

Un rayon incident arrive sous incidence normale sur une couche antireflet d'épaisseur e et d'indice N ; celle-ci recouvrant un matériau d'indice n .

Compte tenu des différentes interfaces, plusieurs rayons vont être réfléchis et transmis comme indiqué figure 5. On supposera $1 < N < n$.

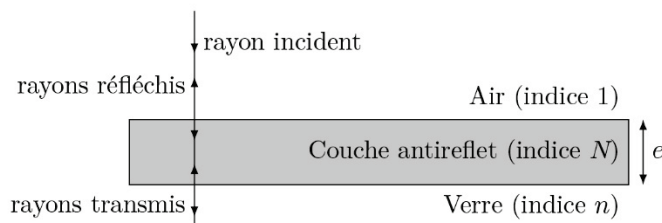


Figure 5

On note respectivement $\rho_{n_1 \rightarrow n_2}$ et $\tau_{n_1 \rightarrow n_2}$ les coefficients de réflexion et de transmission en amplitude pour une interface de type $n_1 \rightarrow n_2$, n_1 étant l'indice du milieu associé à l'onde incidente.

II.C.1) Donner les expressions des coefficients $\rho_{1 \rightarrow N}$, $\rho_{N \rightarrow n}$, $\tau_{1 \rightarrow N}$ et $\tau_{N \rightarrow 1}$.

II.C.2) Soit \underline{E}_0 l'amplitude complexe du champ électrique associée à l'onde incidente.

L'amplitude complexe de la première onde réfléchi s'écrit alors $\rho_{1 \rightarrow N} \underline{E}_0$.

a) Justifier que l'amplitude complexe de la seconde onde réfléchi est $\underline{E}_0 \tau_{1 \rightarrow N} \rho_{N \rightarrow n} \tau_{N \rightarrow 1} e^{j\varphi} = \underline{a}$ avec $\varphi = \frac{4\pi N e}{\lambda}$ où λ est la longueur d'onde dans le vide.

b) Exprimer alors les amplitudes complexes des ondes réfléchis suivantes en fonction de \underline{a} , φ et des différents coefficients de réflexion et de transmission.

c) En remarquant que $\tau_{1 \rightarrow N} \tau_{N \rightarrow 1} = 1 - \rho_{1 \rightarrow N}^2$, montrer que l'amplitude complexe résultante pour les ondes réfléchis est : $\underline{A} = \underline{E}_0 \frac{\rho_{1 \rightarrow N} + \rho_{N \rightarrow n} e^{j\varphi}}{1 + \rho_{1 \rightarrow N} \rho_{N \rightarrow n} e^{j\varphi}}$

d) Quelles sont les valeurs possibles de φ permettant des interférences destructives ?

e) Montrer que l'intensité réfléchi peut s'annuler pour une valeur particulière de N . Commenter.