

A – Formation des images

Exercice A – 1 Angle de Brewster

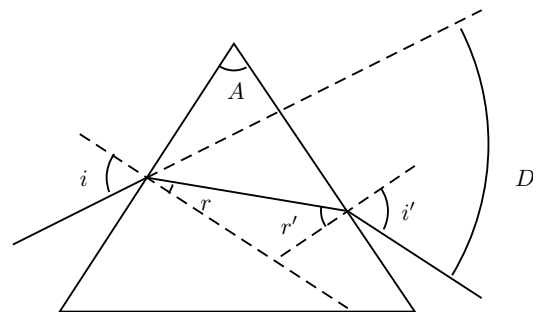
Un rayon incident donne, au point d'incidence I de l'interface air-eau, un rayon réfléchi et un rayon réfracté.

1. Faire un schéma où figurent les trois rayons ainsi que le dioptre. Placer correctement les angles d'incidence i_1 , de réflexion i'_1 et de réfraction i_2 .
2. Pour quelles valeurs i_{1B} de l'angle i_1 trouve-t-on un rayon réfracté orthogonal au rayon réfléchi ? Cette incidence est appelée incidence de Brewster.

Données : $n_{air} = 1,00$; $n_{eau} = 1,33$.

Exercice A – 2 Prisme

On considère un prisme transparent d'indice n et d'angle au sommet A . On envisage le parcours d'un rayon lumineux à travers ce prisme comme sur le schéma ci-contre :



1. Écrire les lois de la réfraction reliant les angles i , i' , r et r' (relation (1) et (2)).
2. Le milieu transparent du prisme est dispersif et vérifie la formule de Cauchy : $n(\lambda) = a + b/\lambda^2$ où a et b sont des constantes positives. Pourquoi un tel prisme permet-il de décomposer la lumière blanche ?
3. Dans la suite de l'exercice, on considère un rayonnement monochromatique. L'indice optique est donc parfaitement défini pour la longueur d'onde utilisée.
 - (a) Exprimer A en fonction de r et r' (relation (3)).
 - (b) Exprimer la déviation D du rayon en fonction de i , i' , A (relation (4)).
 - (c) On suppose à présent que l'angle d'incidence i peut varier. En différenciant les relations (1) à (4), montrer qu'il existe un extrémum de déviation correspondant à l'égalité $r = r'$.
 - (d) Représenter graphiquement cette configuration. On admettra que cet extrémum de déviation correspond en fait à un minimum noté D_m ; montrer la relation :

$$n = \frac{\sin\left(\frac{D_m + A}{2}\right)}{\sin\left(\frac{A}{2}\right)}$$

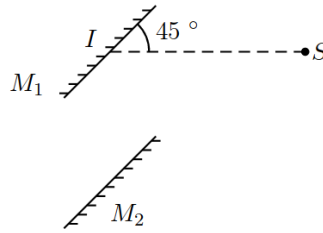
Nous verrons en T.P. que la mesure du minimum de déviation donne une mesure très précise de l'indice optique et permet de déterminer les constantes a et b de la formule de Cauchy en étudiant différentes longueurs d'onde.

Exercice A – 3 Étude d'un périscope simple

Le périscope est un instrument d'optique permettant de voir au-dessus d'un obstacle. On étudie dans cet exercice le principe des périscope les plus simples, formés de deux miroirs M_1 et M_2 .

1. Rappeler la formule de conjugaison du miroir plan puis l'établir.

2. Construire l'image d'un point objet virtuel par un miroir plan. La caractériser.
On étudie le périscope représenté ci-dessous :

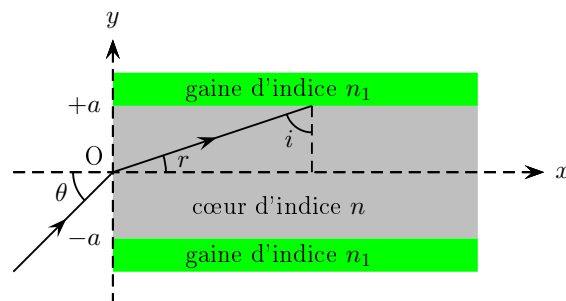


- Le miroir M_1 fait un angle de 45° avec l'horizontale. Un objet lumineux ponctuel S se trouve sur la droite horizontale (SI). Construire l'image S_1 de S par le miroir M_1 .
- Dessiner un rayon lumineux issu de S et se réfléchissant en I sur M_1 .
- Un second miroir M_2 est disposé parallèlement à M_1 , les deux faces réfléchissantes étant dirigées l'une vers l'autre. Construire l'image S_2 de S_1 par M_2 .
- S_2 est l'image de S par un système optique. Lequel? Dessiner la marche du rayon lumineux de la question 2 après réflexion sur M_2 .
- On considère maintenant un objet modélisé par un segment AB vertical. Construire l'image de AB par le périscope.

Exercice A – 4 Fibre à saut d'indice

Une fibre optique à saut d'indice, représentée ci-dessous, est formée d'un cœur cylindrique d'axe Ox , de diamètre $2a$ et d'indice n entouré d'une gaine optique d'indice n_1 légèrement inférieur à n . Les deux milieux sont supposés homogènes, isotropes et transparents.

Un rayon situé dans le plan xOy entre dans la fibre au point O avec un angle d'incidence θ . Avant son entrée dans la fibre, le rayon lumineux est dans l'air.



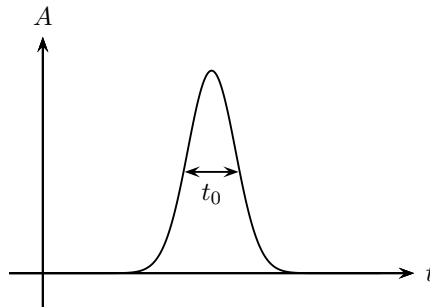
Les rayons lumineux sont supposés issus d'une source monochromatique de fréquence ν . La longueur d'onde dans le cœur est notée λ .

- À quelle condition sur i , angle d'incidence à l'interface cœur/gaine, le rayon reste-t-il confiné à l'intérieur du cœur? On note i_ℓ l'angle d'incidence limite.
- Montrer que la condition précédente est vérifiée si l'angle d'incidence θ est **inférieur** à un angle limite θ_ℓ dont on exprimera le sinus en fonction de n et i_ℓ . En déduire l'expression de l'ouverture numérique $ON = \sin \theta_\ell$ de la fibre en fonction de n et n_1 uniquement.
- Donner la valeur numérique de ON pour $n = 1,500$ et $n_1 = 1,470$.

On considère une fibre optique de longueur L . Le rayon entre dans la fibre avec un angle d'incidence θ variable compris entre 0 et θ_ℓ . On note c la vitesse de la lumière dans le vide.

- Quel est le rayon qui traverse le plus rapidement la fibre? Quel est le rayon qui met le plus de temps à traverser la fibre? Exprimer alors l'intervalle de temps δt entre le temps de parcours maximal et minimal en fonction de L , c , n et n_1 .

5. On pose $2\Delta = 1 - \frac{n_1^2}{n^2}$, avec $\Delta \ll 1$ pour les fibres optiques. Donner dans ce cas l'expression approchée de δt en fonction de L , c , n et Δ (en utilisant l'approximation $(1+x)^\alpha \simeq 1 + \alpha x$ au voisinage de zéro). On conservera cette expression de δt dans la suite.



On injecte à l'entrée de la fibre une impulsion lumineuse de durée t_0 formée par un faisceau de rayons ayant un angle d'incidence compris entre 0 et θ_ℓ . La figure ci-dessous représente l'allure de l'amplitude A du signal lumineux en fonction du temps t .

6. Reproduire la figure ci-dessus en ajoutant à la suite l'allure du signal lumineux à la sortie de la fibre. Quelle durée t'_0 a approximativement l'impulsion lumineuse en sortie de fibre ?

Le codage binaire de l'information consiste à envoyer des impulsions lumineuses (ou $\ddot{\text{ii}}$ bits $\dot{\text{ll}}$) périodiquement avec une fréquence d'émission F .

7. En supposant t_0 négligeable devant δt , quelle condition portant sur la fréquence d'émission F exprime le non-recouvrement des impulsions à la sortie de la fibre optique ?

Soit L_{\max} la longueur maximale de la fibre optique permettant d'éviter le phénomène de recouvrement des impulsions. On appelle bande passante de la fibre le produit $B = L_{\max} \cdot F$.

8. Exprimer la bande passante B en fonction de c , n et Δ .
9. Calculer la valeur numérique de Δ et de la bande passante B (exprimée en $\text{MHz} \cdot \text{km}$) avec les valeurs de n et n_1 données dans la question 3. Pour un débit d'information de $F = 100 \text{ Mbits} \cdot \text{s}^{-1} = 100 \text{ MHz}$, quelle longueur maximale de fibre optique peut-on utiliser pour transmettre le signal ? Commenter la valeur de L_{\max} obtenue.

Exercice A – 5 Lentille plate de Veselago

En 1968, le physicien russe Victor Veselago a conduit des études théoriques dans le cadre d'une optique de Descartes où les milieux pourraient être d'indice négatif. Il a montré qu'avec de tels milieux, il était possible de réaliser une lentille convergente parfaitement plate. En 2000, le premier matériau possédant un indice négatif a été créé, on parle de métamatériau. Ce matériau est un diélectrique classique (verre de silice) dans lequel on a inséré des fils conducteurs selon une structure périodique, voir la photographie de la figure 2. Ce matériau s'est montré efficace pour des longueurs d'onde $\lambda \simeq 1 \text{ cm}$. Son indice de réfraction a été mesuré à $n = -2,7$.

À l'heure actuelle, aucun métamatériau n'a été réalisé pour le domaine visible $\lambda \simeq 0,5 \mu\text{m}$. Seul un matériau d'indice $n = -0,3$ a été obtenu pour $\lambda \simeq 2 \mu\text{m}$.

On considère le schéma de la figure 3 où un objet AB est placé à la distance d d'une lame à faces parallèles d'épaisseur e , d'indice $n < 0$ avec $|n| > 1$. La lame de métamatériau possède une hauteur très grande devant son épaisseur. On considère un rayon lumineux qui aborde ce milieu depuis A sous l'angle d'incidence i_1 .

- La loi de la réfraction de Descartes étant toujours valable, quelle est la particularité du rayon réfracté par le dioptre plan $\mathcal{P}_{1,n}$ lorsque le milieu est d'indice négatif ?
- On suppose que l'image A' de A par le dioptre plan $\mathcal{P}_{1,n}$ est située dans le milieu d'indice $n < 0$. Déterminer la distance OA' en fonction de d , n et i_1 .
En déduire que le dioptre plan $\mathcal{P}_{1,n}$ n'est pas stigmatique.
- Montrer qu'en se plaçant dans les conditions de Gauss, le stigmatisme est assuré. Que vaut alors la distance OA' ? Où se situe l'image B' de B ?

Quelle propriété présente donc le dioptre plan $\mathcal{P}_{1,n}$?

Dans la suite, on se place dans les conditions de Gauss.

4. À quelle condition sur l'épaisseur e de la lentille de Veselago, l'image $A'B'$ se situe-t-elle dans le métamatériau ?
On suppose pour la suite que cette condition est aussi réalisée pour un objet A_1B_1 situé à la distance $d_1 > d$ (par conséquent en arrière de AB). Où se situe l'image de A_1B_1 par rapport à $A'B'$?
On considère maintenant un objet constitué par A_1B_1AB . Que peut-on dire de son image dans le métamatériau ?
5. Pour une épaisseur e respectant la condition vue à la question précédente, déterminer la position de l'image définitive $A''B''$ de AB par la lentille de Veselago. A-t-on bien réalisé l'équivalent d'une lentille convergente traditionnelle ?

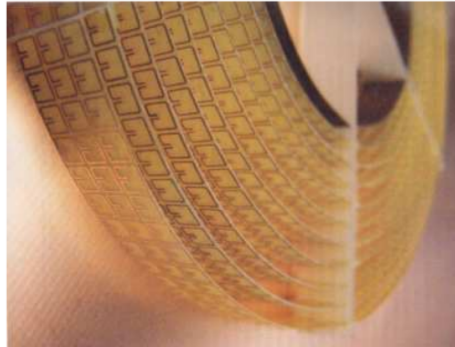


FIGURE 2 – Métamatériau

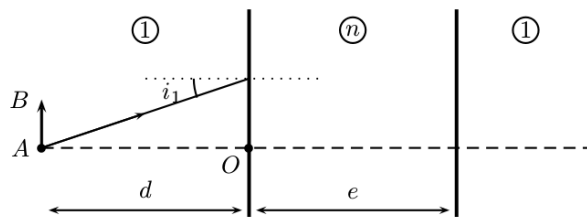


FIGURE 3 – Lentille plate de VESELAGO

Exercice A – 6 Détecteur de pluie

La première voiture française à avoir été vendue avec le détecteur de pluie en série est la Peugeot 406 en 1997. Cette dernière est en général commercialisée avec l'option allumage automatique des phares. On recense essentiellement deux technologies de détection de pluie :

- le capteur électro-optique, qui repose sur un phénomène de réflexion totale,
- le capteur capacitif qui repose sur la variation de la capacité d'un condensateur.

Le capteur électro-optique contient un émetteur E d'impulsion lumineuse et un récepteur R . Le récepteur reçoit le signal après quelques réflexions. L'intensité lumineuse reçue dépend du nombre de réflexions et de la géométrie du capteur mais aussi de la présence ou non d'eau à l'extérieur du pare-brise.

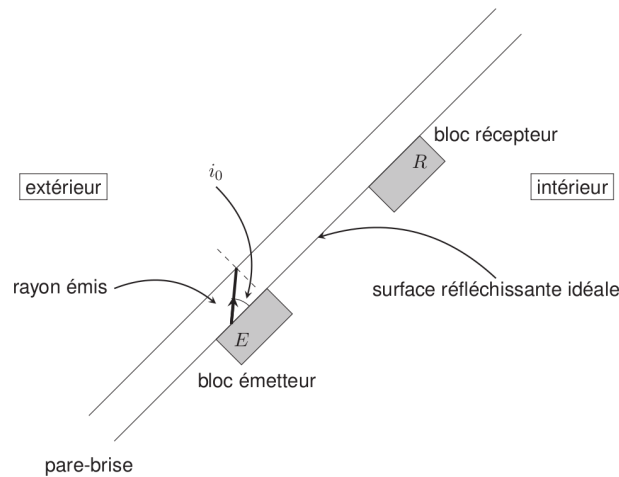


FIGURE 1 – Schéma du détecteur de pluie

Les indices optiques de quelques milieux transparents à la lumière sont donnés dans le tableau suivant :

Milieu	Indice de réfraction
Eau	1,33
Graisse	1,52
Éthanol	1,36
Verre du pare-brise	1,50
Cristal	1,60

- L'émetteur est une diode qui envoie un rayon lumineux de longueur d'onde $\lambda_0 = 700 \text{ nm}$ dans le vide. Quelle est la longueur d'onde de ce rayon dans le verre du pare-brise et dans l'eau ?
- Exprimer puis calculer les angles d'incidence limites de réflexion totale dans le cas d'une interface verre/air et verre/eau.
- Justifier le choix d'un angle $i_0 = 40^\circ$ tel que défini sur le schéma.
- Expliquer à l'aide de deux schémas, comment évolue l'intensité lumineuse perçue par le récepteur selon la présence ou l'absence d'eau sur le pare-brise ?
- Le rayon incident est envoyé avec l'angle i_0 défini précédemment. La distance entre l'émetteur et le récepteur (considérés ponctuels) est $ER = 20 \text{ cm}$. L'épaisseur du pare-brise est $e = 3,0 \text{ mm}$. Exprimer puis calculer le nombre p de réflexions sur la face externe du pare-brise. Justifier l'intérêt d'un grand nombre de réflexions.

Exercice A – 7 Étude d'un doublet

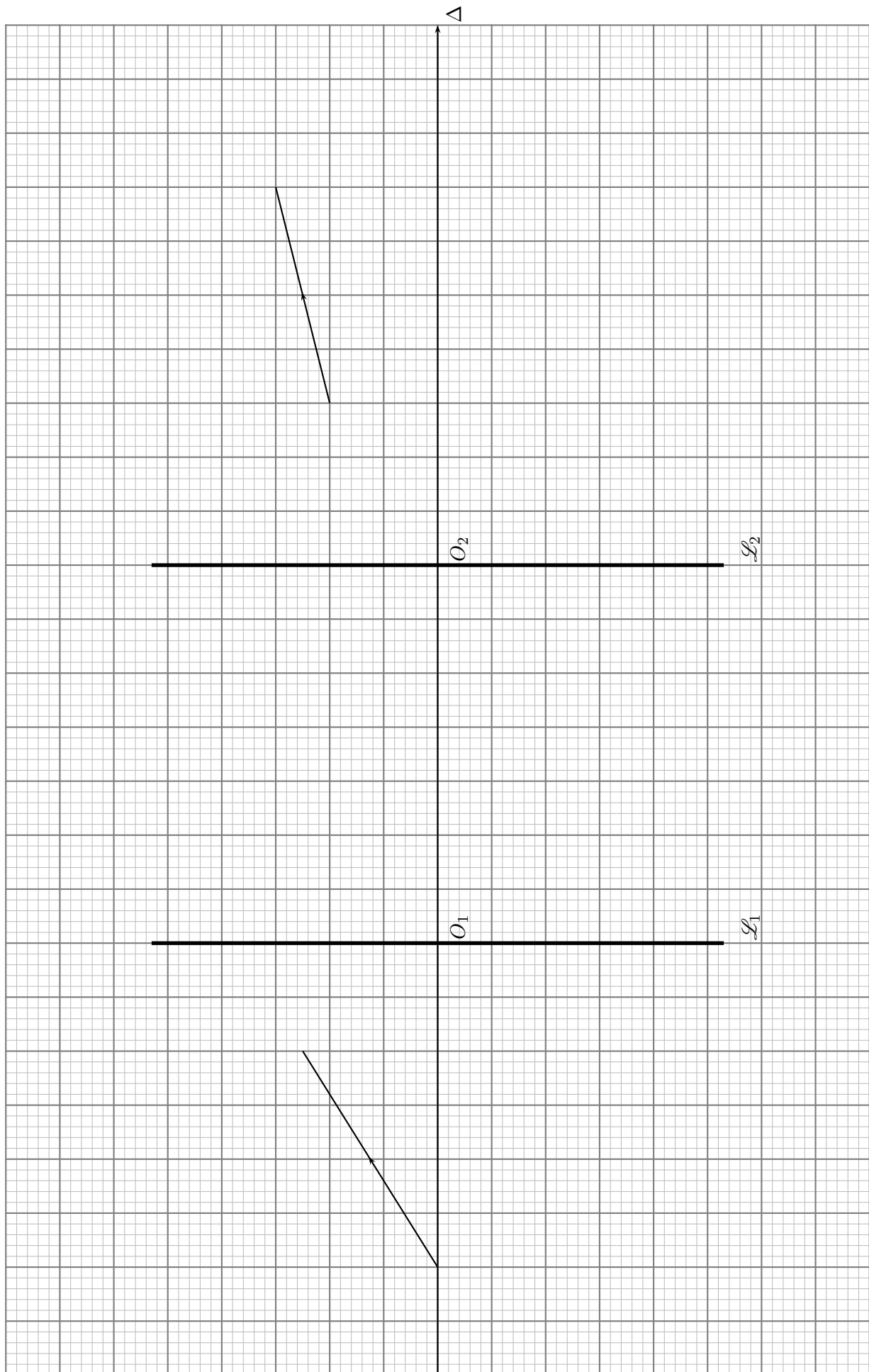
- Étude d'un doublet comportant deux lentilles L_1 et L_2 , de centres O_1 et O_2 représenté sur la feuille suivante. Sur la gauche un rayon incident pénètre dans le système et émerge sur la partie droite, comme indiqué sur la figure.
Un carreau correspond à un centimètre.
 - Ce système est-il globalement convergent ou divergent ? (Justifier rapidement votre réponse)
 - Compléter sur la feuille 1 le trajet du rayon lumineux.
 - En déduire la nature de chacune des deux lentilles (convergente ou divergente ?).
 - Soient F_1 et F'_1 les foyers objet et image de la lentille L_1 , F_2 et F'_2 les foyers objet et image de la lentille L_2 . Trouver graphiquement la position de ces foyers. Préciser les valeurs algébriques $\overline{O_1F'_1}$ et $\overline{O_2F'_2}$
 - Qu'appelle-t-on foyer objet F , foyer image F' d'un système optique ? Trouver graphiquement la position de ces foyers.
Préciser les valeurs algébriques $\overline{O_1F}$ et $\overline{O_1F'}$.
On choisira une couleur pour chaque trajet réel des rayons lumineux.
 - Si $\overline{O_1F'_1} = +4 \text{ cm}$, $\overline{O_2F'_2} = -2 \text{ cm}$ et $\overline{O_1O_2} = +7 \text{ cm}$, déterminer par le calcul les valeurs algébriques $\overline{O_1F}$ et $\overline{O_1F'}$.

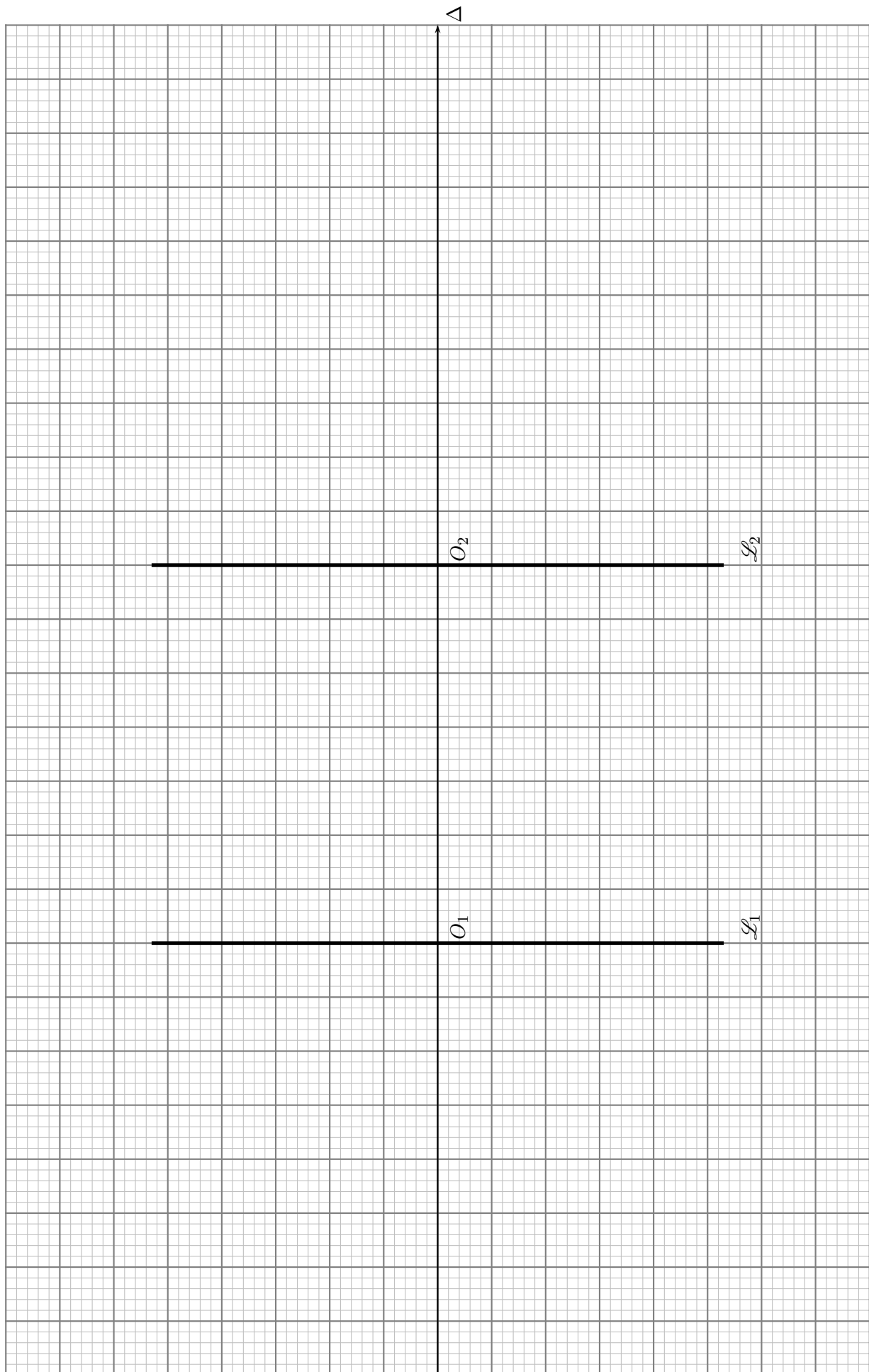
2. Étude d'un doublet comportant une lentille L_3 de centre O_3 et un miroir M_4 de sommet S_4 représenté sur la feuille 2.

Sur la gauche un rayon incident pénètre dans le système et après réflexion sur le miroir il se déplace comme indiqué sur la figure.

Un carreau correspond à un centimètre.

- (a) Compléter sur la feuille le trajet du rayon lumineux entre la lentille et le miroir.
- (b) Soient F_3 et F'_3 les foyers objet et image de la lentille L_3 , F_4 le foyer objet-image du miroir M_4 et C_4 le centre de ce même miroir.
Trouver graphiquement la position des points F_3 , F'_3 , F_4 et C_4 . Préciser les valeurs algébriques $\overline{O_3F'_3}$ et $\overline{S_4F_4}$.
- (c) En déduire le trajet du rayon émergent du système. Ce système est-il globalement convergent ou divergent ?
- (d) La lentille L_3 est-elle convergente ou divergente ?
Le miroir M_4 est-il convergent ou divergent ?
- (e) Si le point C_4 est confondu avec le point O_3 , où se situe le point B' image finale de B par L_3 , M_4 et L_3 ?





B – Modèle scalaire et superposition d'ondes lumineuse

C – Trous d'Young

Exercice C – 1 Mesures interférométriques

I - Trou d'Young

Un Laser envoie, sur un trou circulaire de faible diamètre d percé dans un plan Π_0 , un faisceau de lumière parallèle monochromatique, de longueur d'onde dans le vide λ_0 (Fig 0). On observe la figure 1 sur écran Π_E placé à la distance D de Π_0 (Π_E et Π_0 sont parallèles).

Le faisceau incident se propage dans l'air (indice absolu N_a) dans la direction (XX') perpendiculaire aux plans.

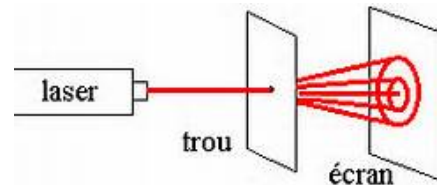
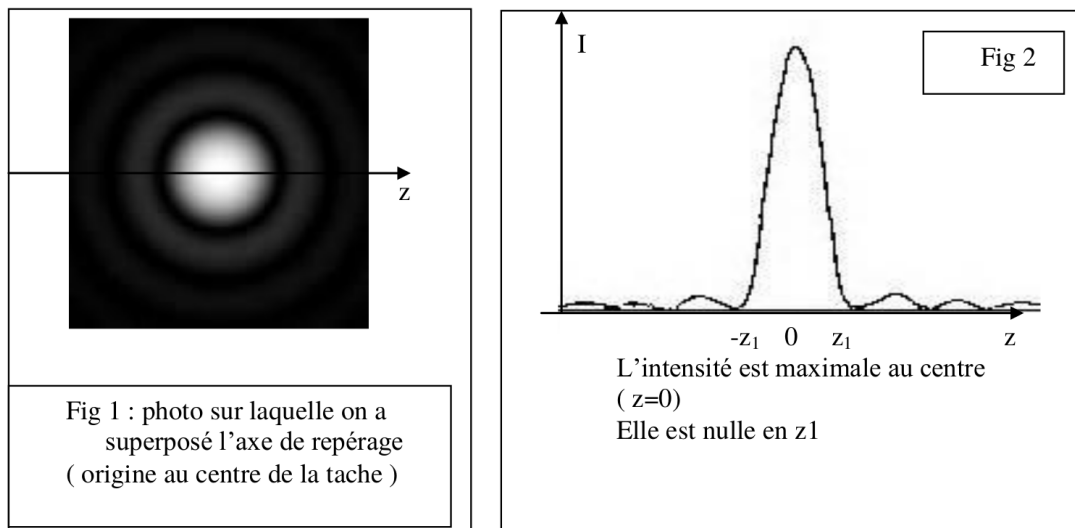


Figure 0

On associe au plan Π_E un repère $(Y'Y, Z'Z)$.

La figure 2 donne, en fonction de z , l'intensité lumineuse I observée sur Π_E .



1. (a) Quel est le phénomène physique mis en jeu ?
- (b) Le rayon R de la tache centrale, supposé égal à z_1 , est donné par une des relations suivantes :

$$\kappa \frac{\lambda_0 D}{N_a d} \quad \text{ou} \quad \kappa \frac{\lambda_0 D}{N_a d^2} \quad \text{ou} \quad \kappa \frac{\lambda_0 d}{N_a D}$$

Écrire la bonne réponse en justifiant brièvement les raisons de votre choix. (κ est une constante sans dimension dépendant de la géométrie et dont la valeur approchée est $\kappa = 1, 2$ pour un trou circulaire).

2. On peut considérer que le trou d'Young se comporte comme une source lumineuse, notée S , quasi ponctuelle, émettant de la lumière dans un cône d'ouverture θ correspondant à la tache centrale de la figure 1.
 - (a) Évaluer θ littéralement.
 - (b) Tracer, en fonction de z , le profil de l'intensité lumineuse sur Π_E en supposant que la zone éclairée l'est uniformément.
 - (c) Comparer ce profil et la figure 2. Conclure en 5 lignes maximum sur la validité de ce modèle.

Dans toute la suite, les trous d'Young seront assimilés à une telle source ponctuelle.

II - Dispositif interférentiel à deux trous d'Young

Le dispositif est le même qu'en I, mais le faisceau arrive sur deux trous d'Young percés dans le plan Π_0 (Fig 3). Ces trous d'Young, éclairés par un faisceau incident parallèle se propageant dans la direction OX , se comportent comme deux sources lumineuses S_1, S_2 ponctuelles, monochromatiques, synchrones, cohérentes, distantes de b (fig 3a); ces deux sources émettent une même lumière de longueur d'onde dans le vide λ_0 . Elles sont symétriques par rapport à l'axe OX .

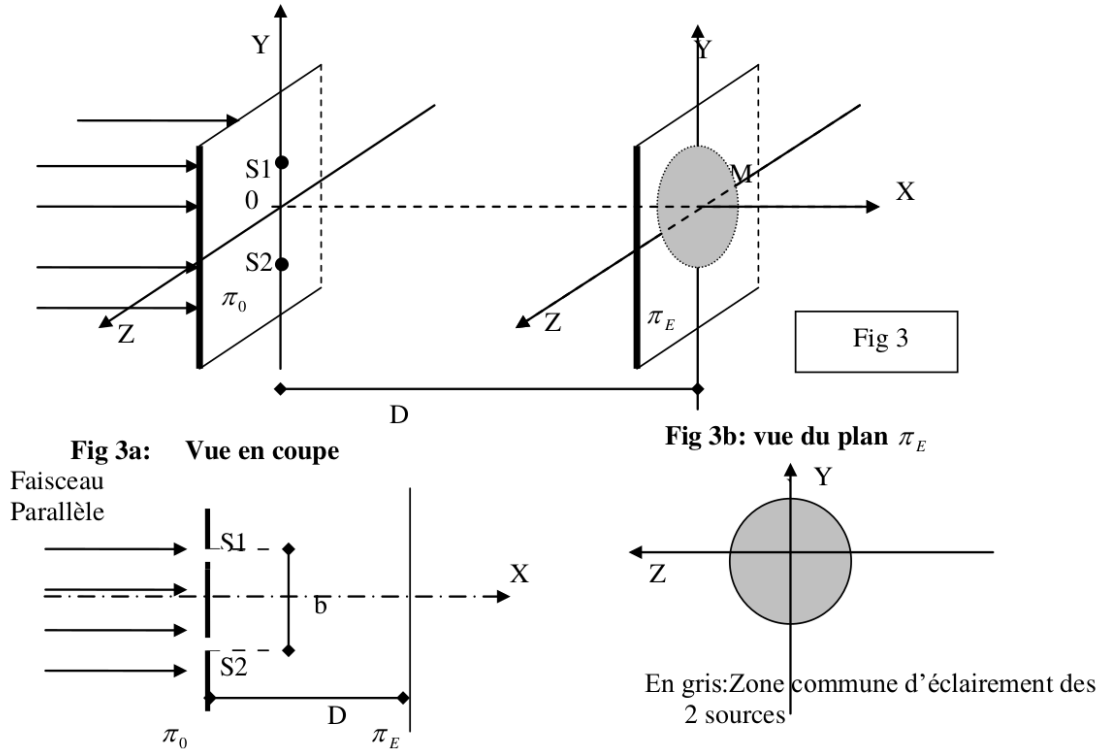
Ces ondes se propagent dans l'air d'indice optique absolu N_a .

On utilise le repère $OXYZ$, l'origine O étant au milieu de S_1S_2 (Fig3).

On observe des interférences dans la zone commune d'éclairement du plan Π_E .

Cette zone est sensiblement un disque de rayon $R = 1$ cm (Fig 3 et 3b).

On s'intéresse aux phénomènes en un point $M(x = D, y, z)$ du plan Π_E .



1. Préciser la signification des termes synchrone et cohérent.
2. Les distances séparant les sources du point M (de coordonnées D, y, z) sont notées respectivement $d_1 = S_1M$ et $d_2 = S_2M$.
 - (a) Évaluer d_2, d_1 en fonction de y, z, D et b .
 - (b) En déduire la différence de marche $\Delta = d_2 - d_1$ lorsque y, z et b sont très petits devant D .
 - (c) Relier la différence de chemin optique $\delta_{2/1}, \Delta$ et l'indice absolu de l'air N_a .
3. Montrer que l'intensité lumineuse au point M est de la forme $I = A \cdot (1 + \cos(B))$ et expliciter B en fonction de $\delta_{2/1}$ et λ_0 .
4. Reproduire et compléter la fig 3b en dessinant l'allure géométrique des franges d'intensité maximale.
5. Évaluer le nombre de franges d'intensité maximale observable avec : $\lambda_0 = 500$ nm, $b = 2$ mm, $N_a \simeq 1$; $D = 2$ m.

III - Montage expérimental

On reprend le montage précédent de II mais on observe, à présent, les phénomènes sur un écran Π situé dans le plan focal image d'une lentille convergente (L_2). Cette lentille, fonctionnant dans les conditions de Gauss, sera considérée comme parfaitement stigmatique pour ses points conjugués. Les trous d'Young sont symétriques par rapport à l'axe optique OX de la lentille L_2 .

D – Michelson

Exercice D – 1 Mesure optique de propriétés mécaniques - Mines 2022

Ce sujet comporte deux parties indépendantes présentant des méthodes de mesures fines utilisant divers dispositifs optiques. La partie I décrit une méthode interférométrique pour mesurer l'écart angulaire d'étoiles binaires. La partie II s'intéresse à la structure fine des raies d'émission de l'atome d'hydrogène et à leur mesure interférométrique. Les deux méthodes optiques présentées ici ont en commun leur premier auteur, le physicien américain Albert Michelson.

Pour toutes les applications numériques, on se contentera de deux chiffres significatifs. Les données nécessaires, accompagnées d'un formulaire utile à la simplification des relations trigonométriques, sont regroupées en fin d'énoncé.

I - Mesure de l'écartement angulaire des étoiles doubles

Lorsque deux étoiles sont très proches, elles peuvent être difficiles à distinguer. L'étude menée ici sera faite dans le domaine visible et on prendra pour longueur d'onde $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ d'un éclairage supposé ici monochromatique, avec un télescope constitué d'un miroir parabolique (dont on admettra qu'il est équivalent à une lentille mince, unique et convergente) de distance focale $f' = 33 \text{ m}$ et de diamètre d'ouverture $d = 5 \text{ m}$. On rappelle l'expression $\sin \theta \simeq \lambda_0/d$ reliant l'échelle angulaire du phénomène de diffraction et la taille caractéristique de l'ouverture diffractante.

1. En déduire la valeur du pouvoir séparateur (ou résolution angulaire) du télescope utilisé. Montrer qu'un système binaire formé de deux étoiles distantes d'une unité astronomique ne peut pas être séparé s'il est, par rapport à l'observateur, distant de $L > L_{\max}$. Déterminer la valeur de L en années-lumière.

Lorsque la distance à laquelle se trouve le système double est trop élevée pour pouvoir en offrir une image bien séparée, on peut utiliser un dispositif interférométrique comme celui installé en 1920 par Michelson et Pease devant le télescope américain Hooker (figure 3).

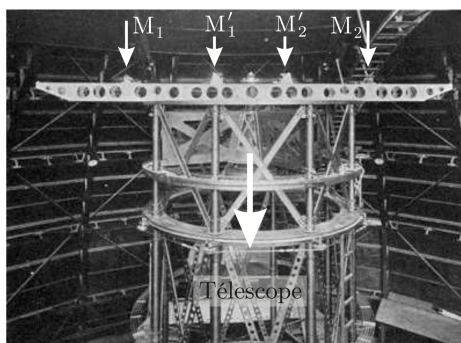


FIGURE 3 – Le dispositif interférométrique réel.

Le schéma décrivant le dispositif est proposé figure 4. On y remarquera que l'axe du télescope y est représenté horizontal pour plus de lisibilité et que ce dernier a été remplacé par une lentille équivalente.

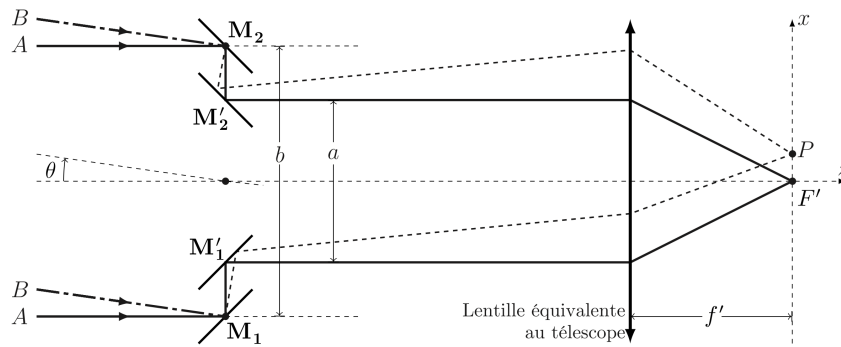


FIGURE 4 – Le schéma équivalent au dispositif interférentiel.

Le faisceau parallèle issu de l'étoile A parvient dans la direction de l'axe optique sur le système, avant d'être réfléchi et diffracté par les miroirs M_1 et M_2 . Les miroirs auxiliaires M'_1 et M'_2 renvoient ces faisceaux vers le télescope avant de converger dans son plan focal image, au point F' pour le faisceau non diffracté et en d'autres points P pour le faisceau diffracté.

- Rappeler l'énoncé du théorème de Malus (ou de Malus et Dupin).
En déduire l'expression de la différence de marche $\delta_A = (AM_1P) - (AM_2P)$ en fonction de la géométrie du dispositif et d'une coordonnée cartésienne de P .
Application Numérique : On donne $a = 2,50$ m. Calculer et commenter l'interfrange i .
- Exprimer l'intensité lumineuse (ou éclaircissement) $I_A(P)$ observée au point P en fonction de λ_0 , a , f' , x et de I_{0A} qui désigne l'intensité totale issue de A et parvenant sur l'un des miroirs M_1 ou M_2 .

On prend en compte maintenant la lumière provenant de l'étoile B , à la même longueur d'onde λ_0 mais décalée d'un angle θ . On note I_{0B} l'intensité totale issue de B . Sur la figure 4 ci-dessus on supposera $\theta > 0$.

- Les sources A et B sont-elles cohérentes entre elles? Calculer $\delta_B = (BM_1P) - (BM_2P)$ en fonction de δ_A , θ et b .
- Exprimer l'intensité lumineuse totale $I(P)$ en utilisant la formule géométrique affirmée en annexe pour l'exprimer sous la forme :

$$I(P) = K \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{x - x_0}{\Delta x} \right) V(\theta) \right]$$

dans laquelle on explicitera uniquement les constantes K et Δx ainsi que la fonction $V(\theta)$ en fonction des données du problème.

- Quelles sont les significations physiques de x_0 et Δx ? Expliquez comment l'étude des franges permet de mesurer l'écartement angulaire des deux composantes d'une étoile double à l'instant de l'observation. Comment, à votre avis, peut-on ainsi distinguer un vrai système binaire d'une étoile double par alignement fortuit?
- Quelle valeur faut-il donner à la largeur commune ℓ des miroirs auxiliaires M'_1 et M'_2 pour pouvoir observer en tout au moins une dizaine de franges de part et d'autre de la frange centrale?

II - La raie rouge de l'hydrogène - Spectrométrie interférentielle

1 - La méthode de Michelson

L'appareil utilisé est constitué (voir la figure 5) d'une lame séparatrice S semi-réfléchissante et d'une lame dite compensatrice C , parallèle à la précédente, de même épaisseur et de même indice optique. Ces deux lames sont toutes deux parallèles au plan (Ouz) où l'axe (Ou) est la première bissectrice des axes (Oy) et (Ox) qui sont orthogonaux aux miroirs plans M_f (fixe) et M_m (mobile le long de (Ox) à la vitesse $\vec{v} = v\vec{e}_x$).

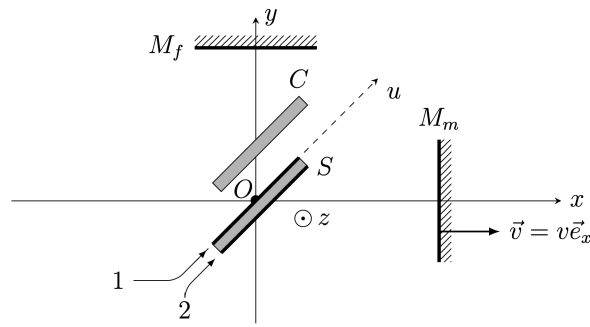


FIGURE 5 – L'interféromètre de Michelson

8. Expliquez, au moyen d'un schéma, le rôle de la lame (C). Précisez en particulier, dans le cas de la figure 5, si la face réfléchissante de la lame (S) est la face supérieure (1) ou la face inférieure (2).
9. L'appareil est éclairé par une source de lumière étendue. Quelle est la nature des franges? Où peut-on les observer?
10. On utilise une source monochromatique de longueur d'onde λ_0 . On choisit l'instant $t = 0$ au moment du contact optique et on note I_0 l'intensité lumineuse totale en sortie de l'appareil sur l'axe (Oy) lorsqu'un des deux miroirs est obstrué. Exprimer, en fonction de I_0 , λ_0 , v et t , l'intensité $I(t)$ observée sur cet axe lorsque les deux miroirs sont éclairés.

En 1892, Michelson installe, au bureau international des poids et mesures (BIPM) de Sèvres, un interféromètre identique à celui décrit ci-dessus pour rechercher parmi les lampes spectrales connues (hydrogène, cadmium, etc.), celle qui présenterait la meilleure monochromaticité et établir ainsi un étalon de longueur optique.

2 - La mesure de la structure fine de la raie rouge

On éclaire maintenant l'appareil décrit ci-dessus au moyen d'une source bichromatique émettant deux raies de longueurs d'onde voisines, de longueurs d'onde $\lambda_1 = \lambda_0$ et $\lambda_2 = \lambda_0 + \Delta\lambda$ et d'intensités I_1 et $I_2 < I_1$.

11. En admettant que $|\Delta\lambda| \ll \lambda_0$, montrer que l'expression du contraste des franges s'écrit de la manière suivante :

$$C(t) = \sqrt{1 - \frac{4I_1I_2}{(I_1 + I_2)^2} \sin^2\left(2\pi vt \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2}\right)}$$

puis calculer les contrastes maximal et minimal en fonction de I_2 et I_1 .

12. Réalisant la mesure du spectre de cette raie, Michelson a observé, en déplaçant le miroir mobile d'une longueur $x = 8,5$ mm depuis le contact optique, une diminution progressive du contraste qui atteint alors sa valeur minimale $C_{\min} \simeq 15\%$. En déduire I_2/I_1 puis la valeur de $\Delta\lambda/\lambda_0$ puis commenter l'ordre de grandeur obtenu au regard des développements mécaniques qui précèdent.

La structure fine ainsi observée n'a pu être expliquée qu'avec le développement ultérieur de la mécanique quantique pour le calcul du spectre détaillé des niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène.

Données numériques

Année-lumière	1 AL = $9,46 \cdot 10^{15}$ m
Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \cdot 10^8$ m.s ⁻¹
Unité astronomique	1 UA = $1,49 \cdot 10^{11}$ m

$$\sqrt{2} \simeq 1,41 \quad ; \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \simeq 0,71$$

Formulaire

Pour tous $a_1 > 0$, $a_2 > 0$, $\theta_1 \in \mathfrak{R}$ et $\theta_2 \in \mathfrak{R}$, on peut écrire :

$$a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2 = a \cos \left[\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + \varphi \right]$$

avec respectivement :

$$a = (a_1 + a_2) \sqrt{1 - m^2 \sin^2 \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}} \quad \text{et} \quad m = \frac{2\sqrt{a_1 a_2}}{a_1 + a_2},$$

tandis que $\varphi \in \mathfrak{R}$ est donné par :

$$\tan \varphi = \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} \tan \frac{\theta_1 - \theta_2}{2}$$