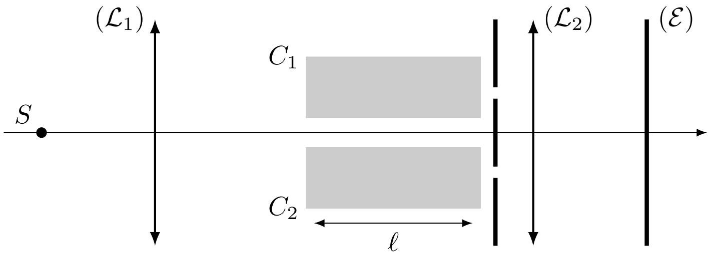
OP 3/4/5 - TD

Interférences lumineuses

- ▶ Généralités : 01, 08, 12 ;
- ▶ Montage interférométrique à deux ondes cohérentes : 04, 06, 07, 09, 10, 11 ;
- ▶ Superposition incohérente de deux motifs d'interférence : 02, 03, 05.

OP3 — 01 Mesure de l'indice d'un gaz

On considère le montage des trous d'Young ci-dessous. La source est monochromatique ($\lambda_0 = 589$ nm).



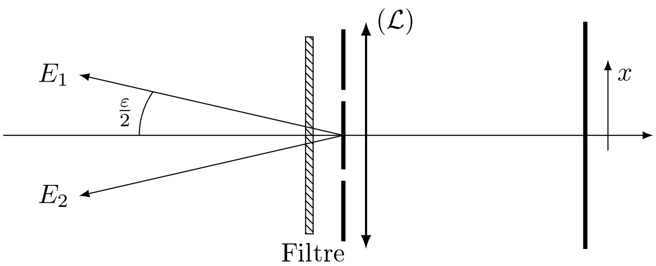
S est au foyer objet de $\mathcal{L}_1$, et l'écran $\mathcal{E}$ au foyer image de $\mathcal{L}_2$. C_1 et C_2 sont deux cuves identiques transparentes de même longueur $\ell = 10$ cm. Initialement, elles sont remplies d'air dans les mêmes conditions.

1) On vide la cuve C_2. Dans quel sens se déplacent les franges sur l'écran ?

2) On remplit de nouveau C_2, cette fois avec du gaz ammoniac. Le déplacement total des franges (par rapport à la situation initiale où les deux cuves étaient remplies d'air) est de 17 franges vers le bas. Déterminer la différence d'indice entre l'air et l'ammoniac.

OP3 — 02 Mesure de l'écart angulaire d'une étoile double

On pointe un téléscope, assimilé à une lentille mince de distance focale f', en direction d'une étoile double symétrique. Celle-ci est constituée de deux sources primaires incohérentes E_1 et E_2 de même intensité situées à l'infini dans des directions symétriques par rapport à l'axe du téléscope et faisant un angle ε entre elles. Un système de fentes d'Young espacées d'une distance a et un filtre interférentiel permettant d'isoler une seule longueur d'onde λ_0 sont placés devant le téléscope. Le plan d'observation est dans le plan focal image du téléscope.



1) Établir l'expression des éclairements sur l'écran venant de chacune des deux étoiles. On note $\mathcal{E}_0$ l'éclairement observé lorsque l'une des fentes est occultée.

2) Justifier sans calcul qu'on a des pertes de contraste lorsque la distance entre les deux fentes prend des valeurs particulières qu'on ne cherchera pas à expliciter pour l'instant.

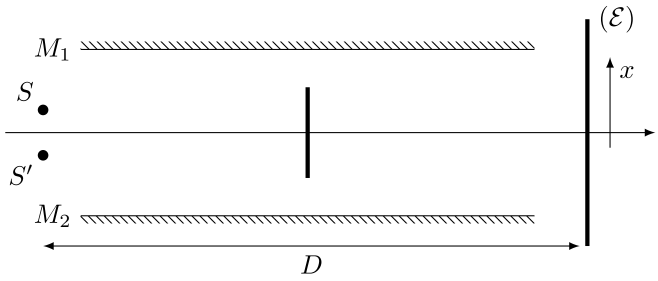
3) Exprimer l'éclairement résultant de la contribution des deux étoiles, et établir le contraste des interférences. Retrouver alors le résultat anticipé à la question précédente.

4) Pour un filtre laissant passer $\lambda_0 = 635$ nm, on trouve une première extinction du contraste pour une distance inter-fentes $a_0 = 116{,}5$ cm. En déduire la valeur de l'angle ε.

Remarque. Cette méthode de mesure de l'écart angulaire d'une étoile double est due à Michelson.

OP3 — 03 Interférences avec deux miroirs parallèles

M_1 et M_2 sont deux miroirs plans distants de $2\,\ell$. S et S' sont des sources ponctuelles monochromatiques, distantes de $2\,a$, de même longueur d'onde λ_0 et de même intensité. Le cache central supprime la lumière directe.



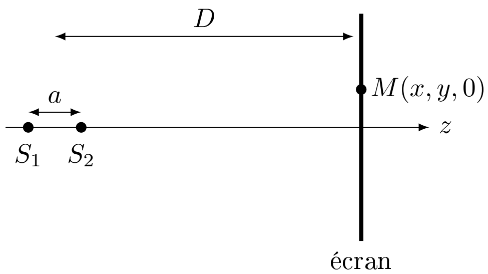
On admet qu'à la réflexion sur un miroir, la phase de l'onde lumineuse augmente de π, ce qui est équivalent à dire que le chemin optique est rallongé de $\lambda/2$ à la réflexion.

1) Déterminer l'intensité lumineuse $I(x)$ sur l'écran et donner l'espacement minimal entre S et S' donnant lieu à un brouillage complet des interférences.

2) `[Nécessite le chapitre OP4]` Comparer ce résultat à celui donné par le critère semi-quantitatif de brouillage des franges.

OP3 — 04 Autre montage interférentiel : sources alignées

On étudie la configuration suivante. Les deux sources S_1 et S_2 sont cohérentes entre elles. Elles sont séparées d'une distance a et le point milieu entre les deux sources est à une distance D de l'écran. On suppose que $a \ll D$, ainsi que $x, y \ll D$.



1) Justifier qu'on observe des interférences à l'écran. En vous basant sur les symétries de la configuration, pouvez-vous deviner la forme des franges d'interférence ? En déduire le meilleur système de coordonnés à utiliser pour repérer M sur l'écran.

2) Calculer l'éclairement sur l'écran et en déduire l'interfrange. Quelle propriété possède-t-elle, par rapport au cas des trous d'Young ?

3) On souhaite observer les interférences « à l'infini ». Comment faire en pratique ? Obtenir la nouvelle interfrange.

2) Indice : il faut pousser le développement limité à l'ordre 3 !

OP3 — 08 Contraste d'une figure d'interférence

On considère une figure d'interférence obtenue par la superposition de deux ondes cohérentes de même pulsation, qui chacune donne séparément un éclairement $\mathcal{E}_1$ et $\mathcal{E}_2$.

1) Quel doit être le rapport de leurs éclairement $\mathcal{E}_1/\mathcal{E}_2$ pour que le contraste soit égal à 0,5 ?

2) Quel est alors le rapport $\mathcal{E}_{\max}/\mathcal{E}_{\min}$ entre les éclairements maximal et minimal de la figure d'interférence ? Commenter.

OP3 — 05 Calcul exact de l'éclairement pour une source non monochromatique

Les exercices OP3-02 et OP3-03 proposent d'aboutir au calcul exact de l'éclairement à l'écran dans le cas où il y a deux sources primaires ponctuelles monochromatiques incohérentes. On propose dans cet exercice d'obtenir l'éclairement à l'écran dans le cas où la source n'est pas monochromatique mais émet deux longueurs d'onde λ_1 et λ_2.

1) On considère le montage des trous d'Young, où la source est sur l'axe (Oz). Cette source émet deux ondes lumineuses, l'une à λ_1 et l'autre à λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$). On note λ_m la valeur moyenne des longueurs d'onde et $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. On suppose $\Delta\lambda \ll \lambda_m$. Obtenir l'éclairement à l'écran en supposant que les éclairements $\mathcal{E}_{\lambda_1}$ et $\mathcal{E}_{\lambda_2}$ des deux longueurs d'onde identiques.

2) En utilisant la formule de trigonométrie

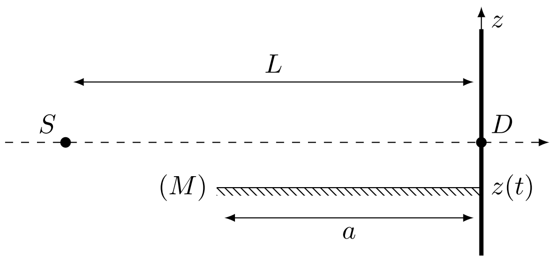
$$\cos a + \cos b = 2\,\cos\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)$$

montrer qu'on observe à l'écran des zones de contraste fort (coïncidence) et des zones de contraste faible (anti-coïncidence) qui s'alternent. On parle de « battements ».

3) Quelle est la période à l'écran de ces battements ? Dans une configuration où $D = 1$ m, $a = 100\,\mu$m et en utilisant le doublet jaune du sodium $\lambda_m = 589$ nm et $\Delta\lambda = 0{,}6$ nm, calculer la distance entre deux anticoïncidences et conclure.

OP3 — 06 Mesure de l'accélération de la pesanteur

On dispose une source ponctuelle monochromatique S à une distance horizontale L d'un détecteur D. Initialement, un miroir de longueur a se trouve en $z = 0$ (même cote que S et D). On lâche ce miroir à $t = 0$ sans vitesse initiale. Il ne subit que les effets de la pesanteur. On donne $\lambda = 650$ nm, $L = 45$ cm, et $a < L$.



En annexe est fourni le tableau des instants t_k (en millisecondes) correspondants aux maxima d'intensité lumineuse reçue par D.

k	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_k	7,42	9,77	11,11	12,08	12,86	13,53	14,10	14,62	15,08	15,51

1) Montrer que le système est équivalent à des trous d'Young, dont on précisera les caractéristiques.

2) Décrire physiquement les phénomènes observés.

3) Trouver une estimation de g avec les valeurs données.

OP3 — 07 Ondes

Un bateau se situe à 10 km de la côte. Il reçoit sur un récepteur un faisceau d'ondes cohérentes parallèles arrivant avec un angle θ au niveau de la mer. On donne $c = 3 \times 10^8$ m $\cdot$ s^{-1}, $f = 100$ MHz et $n_{\text{air}} = 1$.

Le récepteur est sensible à l'intensité moyenne reçue. Par ailleurs, pour une mer calme, on considèrera l'interface comme un miroir parfait.

1) Quel phénomène physique apparaît au niveau du récepteur en M ? Expliquer.

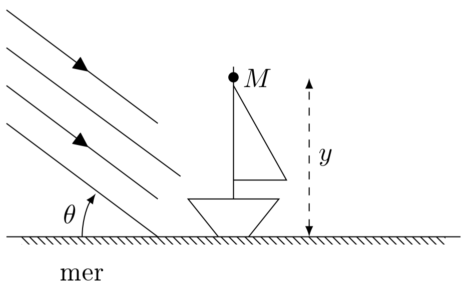
2) Calculer la différence de marche $\Delta\mathcal{L}(M)$, sous la forme $\Delta\mathcal{L}(M) = f(y) \sin\theta$. Expliciter $f(y)$.

3) Lors de la réflexion sur la mer, on observe un déphasage de $+\pi$. Calculer la différence de phase.

4) Soit I_0 l'intensité reçue si un seul des deux chemins était présent. Déterminer l'intensité en M.

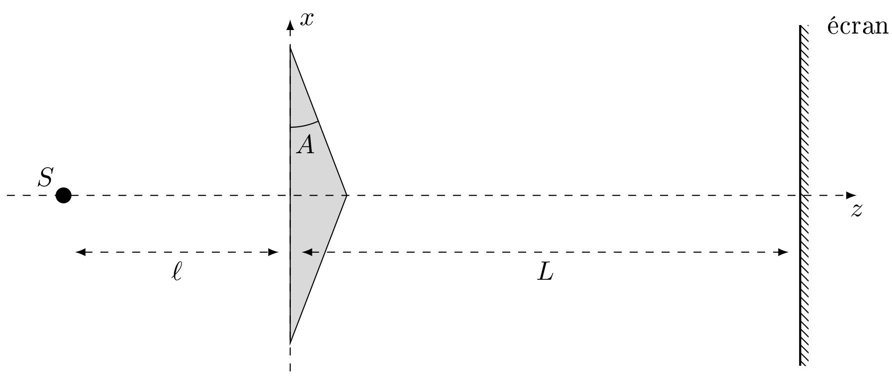
5) Calculer l'interfrange en fonction de λ et θ.

6) Calculer l'interfrange pour les 2 positions suivantes de l'émetteur : colline à 700 m de hauteur, et immeuble à 10 m de hauteur. Commenter.



OP3 — 09 Biprisme de Fresnel

On considère le biprisme d'indice n représenté sur la figure ci-dessous. L'angle A est supposé petit ($A \ll 1$). Ce biprisme est éclairé par source ponctuelle monochromatique située à une distance ℓ du biprisme. L'écran est orthogonal à l'axe (Oz) et situé à une distance L du biprisme. On supposera que l'épaisseur du biprisme est négligeable devant les autres distances.



1) En ne considérant que le prisme du haut, calculer l'angle de déviation D d'un rayon lumineux (on se placera dans l'approximation des petits angles).

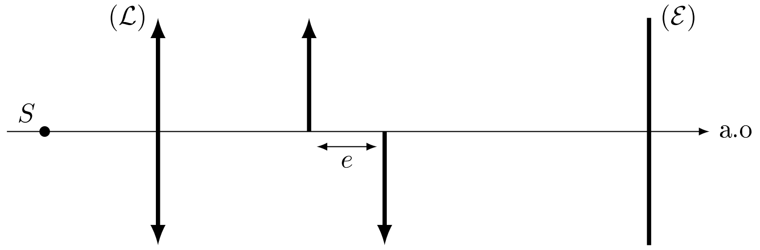
2) Toujours sur le prisme du haut, tracer les rayons passant par la pointe du prisme et par sa base. En déduire que tout se passe comme si les rayons lumineux arrivant sur l'écran provenaient d'une source secondaire S_1.

3) En considérant le prisme du bas, montrer de même que tout se passe comme si les rayons provenaient d'une source secondaire S_2.

4) Calculer alors la figure d'interférence à l'écran.

OP3 — 10 Bilentilles de Meslin

Une lentille de focale f' est sciée en deux le long d'un de ses diamètres. Les deux moitiés sont espacées horizontalement d'une distance $e < f'$. On place ensuite une source ponctuelle monochromatique S au foyer objet d'une lentille convergente $(\mathcal{L})$.



Remarque. Le fait que la lentille soit coupée en deux ne l'empêche pas de « fonctionner ». Notamment, les règles de construction des rayons sont toujours utilisables.

1) Déterminer les images S_1 et S_2 de la source S par chacun des deux bouts de lentilles.

2) Déterminer graphiquement le champ d'interférence en traçant le rayon passant par le point le plus bas et le plus haut de chacun des deux bouts de lentille

3) On place un écran $(\mathcal{E})$ dans le champ d'interférence, orthogonalement à l'axe optique. Calculer l'éclairement à l'écran.

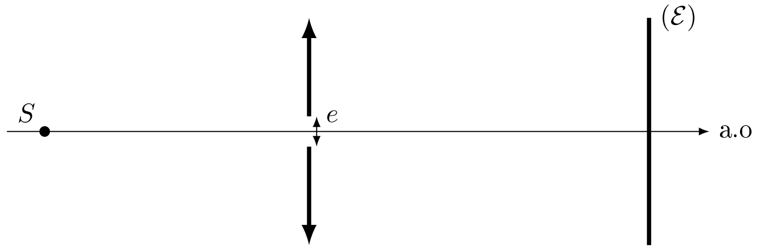
Donnée 1. On admettra qu'au passage par un foyer, les ondes lumineuses subissent un déphasage de π.

Donnée 2. Formule de conjugaison de Descartes pour les lentilles minces

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

OP3 — 11 Bilentilles de Billet

Une lentille de focale f' est sciée en deux le long d'un de ses diamètres. Les deux moitiés sont espacées verticalement d'une distance e. On place ensuite une source ponctuelle monochromatique à une distance $d > f'$ des deux bouts de lentilles. Un cache empêche la lumière de passer entre les deux bouts de lentille.



Remarque. Le fait que la lentille soit coupée en deux ne l'empêche pas de « fonctionner ». Notamment, les règles de construction des rayons sont toujours utilisables.

1) Déterminer les images S_1 et S_2 de la source S par chacun des deux bouts de lentilles.

2) Déterminer graphiquement le champ d'interférence en traçant le rayon passant par le point le plus bas et le plus haut de chacun des deux bouts de lentille

3) On place un écran $(\mathcal{E})$ dans le champ d'interférence, orthogonal à l'axe optique. Calculer l'éclairement à l'écran.

Donnée 1. On admettra qu'au passage par un foyer, les ondes lumineuses subissent un déphasage de π.

Donnée 2. Formule de conjugaison de Descartes pour les lentilles minces

$$\frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} = \frac{1}{f'}$$

OP3 — 12 Expériences avec des trous d'Young

(extrait d'un oral CCINP 2022)

Une source S de longueur d'onde dans le vide $\lambda = 480$ nm est placée sur le foyer objet d'une lentille $\mathcal{L}_1$.

On a un dispositif de trous d'Young centré sur l'axe optique avec les trous S_1 et S_2 distants de a. On place sur le foyer image d'une lentille $\mathcal{L}_2$ de focale $f_2 = 100$ cm un écran dont le centre est situé en O sur l'axe optique et sur lequel on place un capteur permettant de calculer l'intensité $I(y)$. On pose M un point de l'écran.

1) Faire le schéma de la situation et tracer les rayons qui interfèrent en M.

2) Calculer l'intensité I en M en supposant que $y \ll f_2$ (M proche de l'axe optique) en posant I_0 l'intensité de la source S_1 et S_2 et tracer l'intensité en fonction de y.

3) On se place à un minimum d'intensité lumineuse et on bouge de $\Delta y = 2{,}1$ cm pour arriver à la 10ème frange d'intensité maximale. Déterminer a.

4) On place devant S_2 une plaque en verre d'épaisseur $e = 0{,}0150$ mm et d'indice n. Calculer la nouvelle différence de marche. Que se passe-t-il au niveau de la figure d'interférence ?

5) On a un minimum en O. Déterminer l'indice optique n en sachant que $1{,}490 < n < 1{,}500$.

OP3 — 13 Expériences avec des trous d'Young en lumière blanche

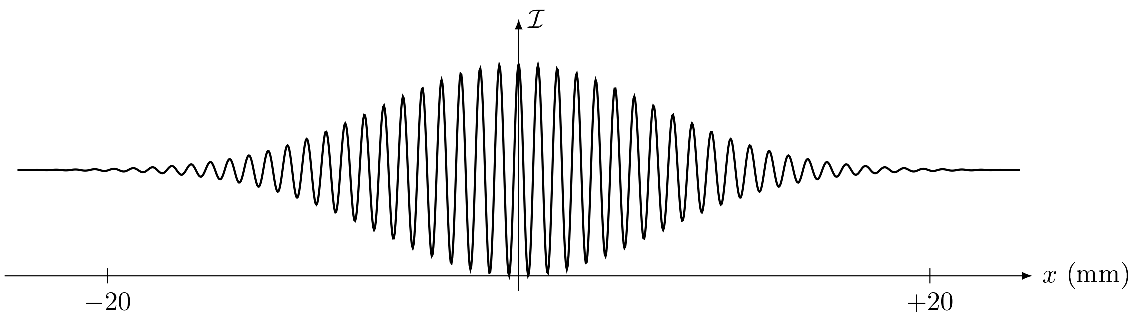
(extrait d'un oral CCINP 2022)

On a un dispositif de deux trous d'Young distants de $a = 1{,}2$ mm. La distance trous-écran est $D = 1$ m. On place en amont des trous une source S sur l'axe central.

1) Faire le schéma de la situation et calculer la différence de marche $\delta = \mathcal{L}(SS_2M) - \mathcal{L}(SS_1M)$ pour un point M de l'écran d'ordonnée x.

2) La source S est **monochromatique**, de longueur d'onde λ_0. Dessiner ce que l'on voit à l'écran et tracer le graphique de l'éclairement en fonction de x. Quelle est l'expression de la distance interfrange ?

3) La source S est désormais polychromatique. Son **spectre contient une raie fine** de longueur d'onde λ_0 et de largeur $\Delta\lambda \ll \lambda_0$. L'intensité $\mathcal{I}$ relevée sur l'écran est donnée ci-dessous :



Quel est le contraste en $x = 0$? Et en $x = 23$ mm ?

4) Déduire de la figure la longueur d'onde λ_0.

5) Déduire du critère semi-quantitatif de brouillage des franges la largeur spectrale $\Delta\lambda$.

6) Quelle est la longueur de cohérence temporelle de la source ?

7) La source est désormais une **lumière blanche**. Son spectre contient toutes les longueurs d'onde du visible. Quelles sont les longueurs d'onde éteintes en $x = 1$ mm ? Que voit-on à l'écran à cet endroit ?

8) Quelles sont les longueurs d'onde éteintes en $x = 25$ mm ? Que voit-on à l'écran ? Représenter le spectre de la lumière à cet endroit. Comment qualifie-t-on ce spectre ?