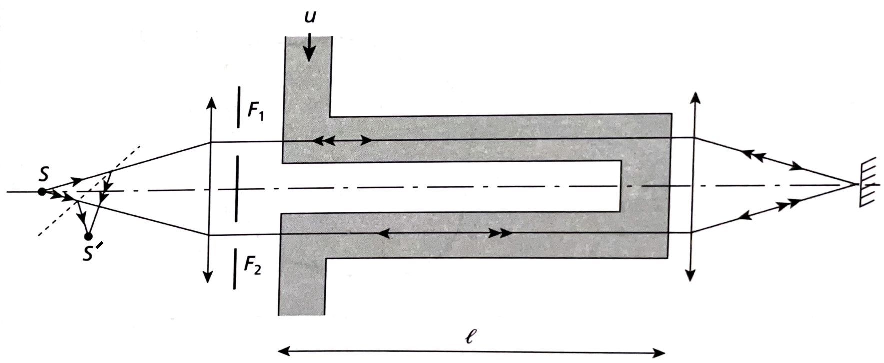
Colle n° 13 : Optique 3

Exercice 1 - Expérience de Fizeau : La figure ci-dessous représente le schéma de l'expérience de Fizeau réalisée en 1851 (soit 54 ans avant l'avènement de la relativité restreinte). Son premier but était de démontrer l'existence de « l'éther », support matériel hypothétique de la lumière dans les théories du 19ème siècle.

S' est l'image de S et les fentes F_1 et F_2 sont finalement des trous d'Young. Soit ℓ la longueur de chaque portion de tube traversée ; ce tube coudé, fermé par des fenêtres transparentes, contient de l'eau d'indice $n = 1.3$ qu'une pompe permet d'animer d'une vitesse $u \ll c$ par rapport au laboratoire (c la vitesse de la lumière). On considère le référentiel du laboratoire comme galiléen. Par rapport au liquide, la lumière se propage à la vitesse c/n. On remarquera, sur la figure, que le rayon marqué d'une flèche se propage, dans chaque portion du tube, dans le même sens que le liquide, alors que celui marqué de deux flèches se propage en sens inverse.



1. Calculer la différence de temps Δt des temps de parcours de de la lumière sur ces deux trajets entre S et S' en adoptant la loi classique d'addition des vitesses $v_2 = v_1 + v_\mathrm{e}$ avec v_e la vitesse d'entraînement du fluide.
2. En déduire la différence de marche correspondante.
3. Expérimentalement, pour $\ell = 1.5\,\mathrm{m}$, $u = 7\,\mathrm{m/s}$ et $\lambda = 540\,\mathrm{nm}$, Fizeau a mesuré un déplacement de 0.23 ± 0.05 interfranges entre le fluide au repos et le fluide en mouvement. Conclure.
4. Un des premiers résultats de la théorie restreinte a été d'expliquer le résultat de cette expérience. Cette théorie prévoie que la composition des vitesses vaut $v_2 = \dfrac{v_1 + v_\mathrm{e}}{1 + v_1 v_\mathrm{e}/c^2}$. Refaire le raisonnement précédent et conclure.

Exercice 2 - Lame à face parallèle : On considère une lame de verre d'indice $n = 1.5$ et d'épaisseur e. On considère un rayon incident faisant un angle d'incidence i avec la normale à la lame.

1. Réaliser un schéma du dispositif et indiquer pourquoi il s'agit d'une interférence à N ondes.
2. Montrer que la différence de marche entre deux rayons vaut $\delta = 2ne\cos r$ avec r l'angle de réfraction du rayon dans la lame.

L'amplitude d'une onde incidente est divisée entre l'onde réfléchie et l'onde transmise. On note ρ le coefficient de réflexion de l'amplitude de l'onde et on admet qu'il vaut $\rho = \dfrac{n-1}{n+1}$ pour une lame dans l'air avec n l'indice optique du verre. On note τ le coefficient de transmission de l'amplitude de l'onde.

3. Quelle est la relation entre τ et ρ ?
4. Numériquement, que vaut ρ ? Que peut-on en déduire ?
5. Montrer que, dans ce cas, l'amplitude totale de l'onde en sortie de lame vaut

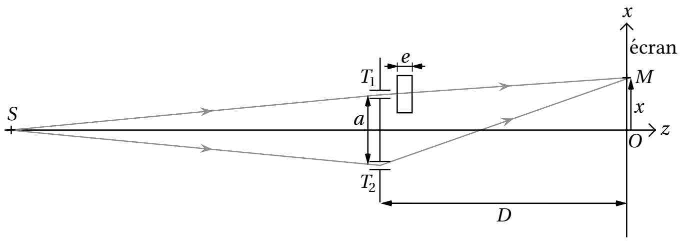
$$I(\Delta\varphi) = \frac{I_0}{1 + F\sin^2\left(\dfrac{\Delta\varphi}{2}\right)}$$

avec $\Delta\varphi$ le déphasage entre deux ondes transmises, I_0 une constante à déterminer en fonction de ρ et a_1 l'amplitude de la première onde et F une constante à déterminer en fonction de ρ. Donner la valeur numérique de F.

On place maintenant une lentille convergente de focale f' derrière la lame et on place l'écran sur le plan focal image de celle-ci.

6. Justifier que la figure d'interférences est constituée d'anneaux concentriques.
7. Donner le rayon de l'anneau d'ordre k.

Exercice 3 - Mesure de l'épaisseur d'une lame de verre : On considère un dispositif de trous de Young composé de deux trous T_1 et T_2 séparés d'une distance $a = 100\,\mu\text{m}$. Ce dispositif est éclairé par une source ponctuelle S monochromatique de longueur d'onde $\lambda = 532\,\text{nm}$ située sur l'axe optique. La figure d'interférence est observée sur un écran situé à une distance $D = 1.00\,\text{m}$ du plan des trous. Une lame de verre à faces parallèles d'épaisseur e inconnue et d'indice $n_v = 1.57$ est positionnée en sortie du trou T_1. L'indice optique de l'air est supposé égal à 1. Dans toute la suite, on se place dans l'approximation paraxiale $x, a \ll D$ et on suppose que $e \ll D$ si bien qu'en première approximation, on considère que le rayon lumineux traverse la lame perpendiculairement à ses faces.



1. Montrer que la différence de marche δ_M en un point M de l'écran s'écrit $\delta_M = \dfrac{ax}{D} - (n_v - 1)e$.
2. Déterminer la position x_c sur l'écran de la frange centrale correspondant à $\delta_M = 0$. De quelle distance s'est déplacée cette frange par rapport au cas où la lame est absente ?
3. Exprimer l'épaisseur e de la lame en fonction de x_c, a, n_v et D.
4. Calculer e pour $x_c = 28.5\,\text{cm}$.
5. Expliquer pourquoi en réalité la position de la frange centrale ne peut être connue que modulo l'interfrange i. Qu'est-ce que cela implique sur e ? L'expérience vous paraît-elle réalisable ?

Exercice 4 - Étoiles et fentes d'Young : On considère deux étoiles à l'infini faisant entre elles un angle α très faible, de même éclairement E_0, de même longueur d'onde. La lumière est diffractée par deux fentes S_1 et S_2 identiques, distantes de a et très fines. Un écran est placé dans le plan focal d'une lentille convergente de distance focale f' située après les fentes d'Young. Le dispositif de Michelson et Pease permet de faire varier la distance a.

1. Faire un schéma du problème.
2. Calculer l'éclairement dû à chaque étoile en un point M de l'écran puis en déduire l'éclairement total.
3. Déterminer le contraste de la figure d'interférences et en déduire pour quelles valeurs de a on observe le brouillage de la figure d'interférences.
4. Dans le cas de Capella, pour $\lambda_0 = 635\,\text{nm}$, la plus petite valeur de a annulant le contraste vaut $116.5\,\text{cm}$. En déduire l'écart angulaire α entre les deux étoiles du système.