Colle n° 13 : Optique 3

Exercice 1 - Mesure de l'indice optique de l'air : Un laser de longueur d'onde $\lambda = 532\,\text{nm}$ placé en S éclaire une lame séparatrice (SR) qui sépare le faisceau en deux de même intensité I_0 (figure 1). Un des faisceaux suit le trajet (1), il est transmis par la lame et va directement au détecteur (D) en étant transmis par la seconde lame séparatrice. Le deuxième faisceau suit le trajet (2), il est réfléchi par la lame puis est guidé par deux miroirs plans (M) avant d'être réfléchi par une autre lame séparatrice et arrive au détecteur (D). Sur les trajets (1) et (2) sont placées deux cuves C_1 et C_2, de longueur $\ell = 20.00\,\text{cm}$. L'expérience est réalisée dans l'air d'indice optique n_{air}.

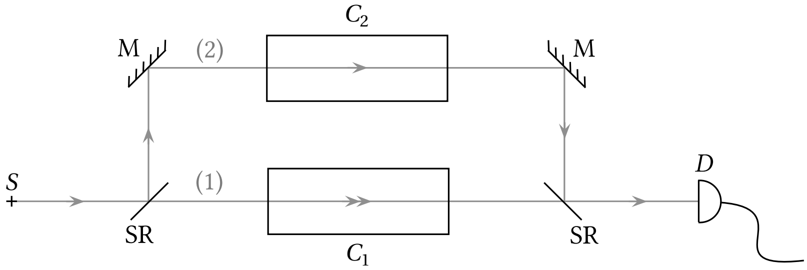


FIGURE 1 – Dispositif de mesure d'indice. M : miroir plan. SR : lame séparatrice.

Les cuves sont initialement remplies d'air à la pression atmosphérique.

1. On constate que l'intensité mesurée par le détecteur est maximale. Que peut-on dire des chemins optiques $(SD)_{1,\text{air}}$ et $(SD)_{2,\text{air}}$ correspondant respectivement aux trajets (1) et (2) ? En déduire la valeur modulo λ de la différence de marche $\delta_{D,\text{air}} = (SD)_{2,\text{air}} - (SD)_{1,\text{air}}$ entre les deux trajets lorsque les deux cuves sont remplies d'air.
   On utilise une pompe pour faire le vide dans la cuve C_1. La cuve C_2 reste remplie d'air.
2. Exprimer la variation de chemin optique $(SD)_{1,0} - (SD)_{1,\text{air}}$ sur le chemin (1) dû à mise sous vide de C_1. L'indice « 0 » indique que la cuve C_1 est vide et l'indice « air » que la cuve C_1 est remplie d'air.
3. En déduire l'expression de la différence de marche $\delta_{D,0} = (SD)_{2,\text{air}} - (SD)_{1,0}$ en fonction de $\delta_{D,\text{air}}$, ℓ et n_{air}.
   Lorsque la cuve C_1 est considérée comme vide, le détecteur a enregistré le défilement de $N = 102$ maxima d'intensité durant la phase de pompage et détecte une intensité nulle à la fin.
4. En déduire une estimation de l'indice optique de l'air.

Exercice 2 - Détermination du pas d'un réseau, mesure d'une longueur d'onde : Un réseau de pas a est un ensemble de fentes séparées de la distance a. Il est éclairé par un faisceau parallèle provenant d'une lampe au mercure. Une onde plane est incidente sur le dispositif comme représenté sur la figure ci-dessous. En arrivant sur une fente, les rayons sont diffractés dans toutes les directions. On observe l'image à l'infini, soit dans le plan focal image d'une lentille convergente. Ainsi, on ne considère que les rayons parallèles entre eux en sortie du dispositif

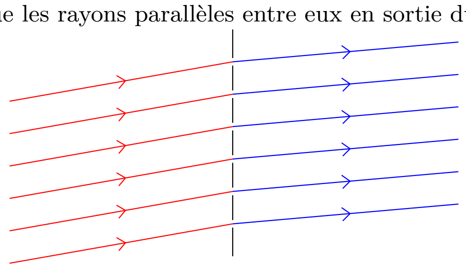


FIGURE 2 – Incidence d'une onde plane sur un réseau de fentes.

1. En notant i l'angle d'incidence et θ l'angle d'observation des rayons, montrer que la différence de marche entre deux rayons vaut $\delta = a(\sin\theta - \sin i)$. Ces angles sont évidemment définis par rapport à la normale au réseau.
2. En déduire la condition d'interférence constructive.

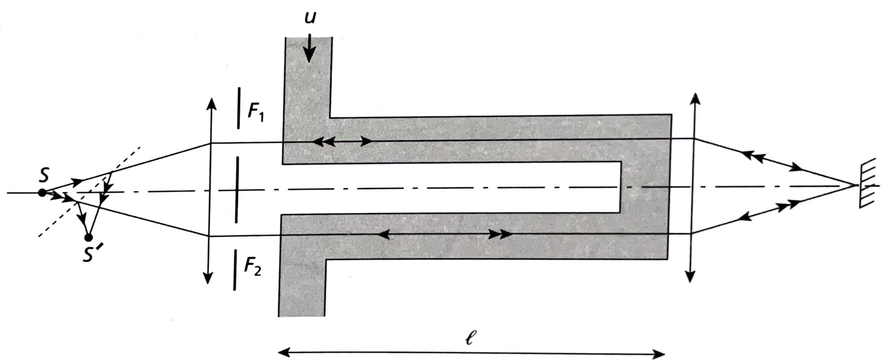
On isole tout d'abord la raie verte de longueur d'onde $\lambda_0 = 0.5461\,\mu\text{m}$. Le réseau est placé perpendiculairement au faisceau incident et l'on pointe, pour les différentes valeurs de l'ordre k du spectre, les faisceaux diffractés. On mesure la valeur centrale de l'angle. On rappelle que chaque degré est divisé en 60 minutes d'arc, notées '.

Ordre	1	2	3
θ	17° 23'	36°40'	63°39'

3. Ces mesures permettent-elles de vérifier que le réseau est bien perpendiculaire au faisceau incident ?
4. Calculer le pas du réseau puis le nombre de traits par millimètre.
5. On éclaire maintenant le réseau avec une certaine raie bleue assez intense du spectre du mercure, de longueur d'onde inconnue λ_1. Pour cette raie, pour le second ordre, on mesure $\theta_1 = 32°32'$. Calculer λ_1.
6. La mesure de l'angle est précise à deux minutes d'arc près. Pour chaque ordre, en déduire l'incertitude-type sur λ_1 en réalisant une simulation Monte Carlo.

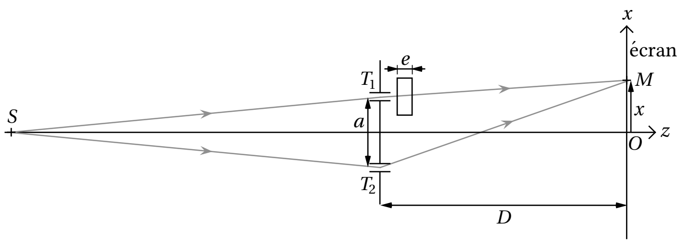
Exercice 3 - Expérience de Fizeau : La figure ci-dessous représente le schéma de l'expérience de Fizeau réalisée en 1851 (soit 54 ans avant l'avènement de la relativité restreinte). Son premier but était de démontrer l'existence de « l'éther », support matériel hypothétique de la lumière dans les théories du $19^{\text{ème}}$ 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 $v_2 = v_1 + v_\text{e}$ avec v_e la vitesse d'entraînement du fluide.
2. En déduire la différence de marche correspondante.
3. Expérimentalement, pour $\ell = 1.5\,\text{m}$, $u = 7\,\text{m/s}$ et $\lambda = 540\,\text{nm}$, 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 $v_2 = \dfrac{v_1 + v_\text{e}}{1 + v_1 v_\text{e}/c^2}$. Refaire le raisonnement précédent et conclure.

Exercice 4 - 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 5 - 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.