

DS 3 de physique

Le sujet comprend trois exercices indépendants à traiter dans l'ordre de votre choix. Il est demandé de numéroter les pages au format i/N où N est le nombre total de pages et i le numéro de la page.

Tout résultat doit être justifié et il est demandé de prendre soin de la présentation et de la rédaction.

I. Vélométrie optique

La vitesse d'un fluide peut se mesurer par une méthode interférentielle. En faisant traverser un fluide contenant des particules réfléchissantes à travers un système de franges, celles-ci passent alternativement par les franges brillantes et sombres. La lumière réfléchie est alors captée par un photodétecteur permettant la mesure de la durée mise par une particule réfléchissante pour parcourir un interfrange. On a alors accès à la vitesse du fluide.

Utilisation de fentes d'Young

Dans le montage des fentes d'Young, chaque fente fine diffracte le faisceau de lumière incident. En sortie, le faisceau diverge avec un demi-angle au sommet θ identique pour les deux trous. On place un écran au foyer image d'une lentille L_2 .

1. Représenter sur le document réponse annexe 0 les rayons émergents atteignant l'écran et issus des rayons incidents (1), (2), (3) et (4). Faire alors apparaître sur ce schéma la largeur l du champ d'interférences sur l'écran. Exprimer cette largeur en fonction de θ et f'_2 .

Pour produire le faisceau de lumière incident, on place une source ponctuelle S sur le foyer objet d'une lentille convergente L_1 . Un point M sur l'écran sera repéré par son abscisse x .

2. Compléter le document réponse en annexe 1 en traçant deux rayons lumineux partant de S pour aller à M , l'un passant par S_1 et l'autre par S_2 .

Faire apparaître sur le schéma précédent l'allure d'au moins deux surfaces d'onde :

- entre S et L_1
- entre L_1 et les fentes d'Young
- entre les fentes d'Young et L_2
- entre L_2 et M

Quel théorème est utilisé ici pour tracer ces surfaces d'onde ?

Dans le vide, l'onde émise par la source est monochromatique de longueur d'onde λ_0 .

3. Déterminer la différence de marche $\delta(M) = (SS_2M) - (SS_1M)$. En déduire l'expression de l'ordre d'interférences $p(M)$ en fonction de a , x , λ_0 et f'_2 .

4. Définir et déterminer l'expression de l'interfrange i

Les fentes d'Young ont pour largeur $b = 10 \mu\text{m}$ et sont espacées d'une distance de $a = S_1S_2 = 50 \mu\text{m}$. Données: $f'_2 = 50 \text{ cm}$ et $\lambda_0 = 632 \text{ nm}$.

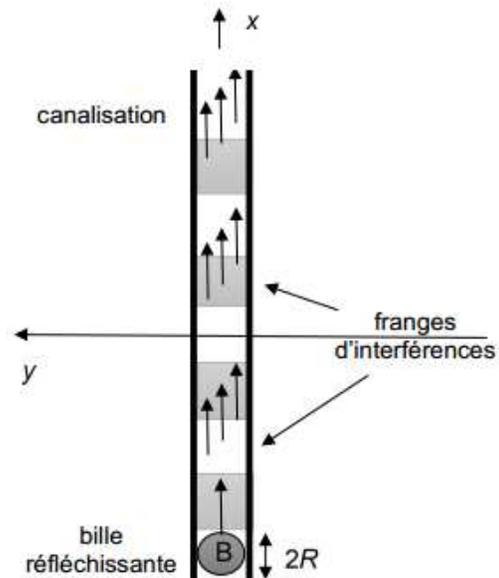
5. Déterminer le nombre de franges brillantes visibles dans le champ d'interférences de largeur l .

Un fluide, dont on souhaite mesurer la vitesse, circule dans une canalisation transparente le long de l'axe F'_2x , perpendiculairement au système de franges. On insère dans la canalisation une bille réfléchissante qui réfléchit une partie de la lumière sur un détecteur (non représenté ici). Ce détecteur enregistre ainsi une intensité $I' = KI(B)$ avec $I(B)$ l'intensité lumineuse au niveau de la bille B .

La bille B se déplace avec le fluide à la vitesse constante $\vec{v}_B = v\vec{e}_x$. On admet que l'expression de l'interfrange reste la même malgré la présence du fluide.

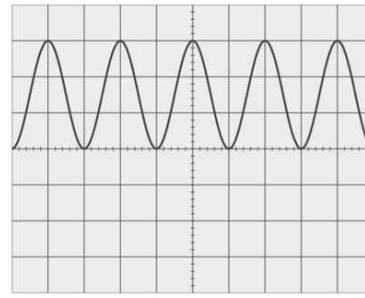
6. À quelle condition sur le rayon R de la bille l'intensité reçue par le détecteur reflète-t-elle fidèlement la figure d'interférences ? On donnera une inégalité en fonction de l'interfrange i .

7. Déterminer l'expression de la position $x_B(t)$ de la bille en fonction de v , t et de sa position initiale x_0 .



8. Montrer, à l'aide de la formule de Fresnel, que l'intensité reçue par le détecteur est de la forme $I' = \frac{I_{max}}{2}(1 + \cos(2\pi ft + \phi))$ avec I_{max} l'intensité maximale enregistrée par le détecteur. On donnera l'expression de la fréquence f en fonction de v et de i . Le signal enregistré par le détecteur est donné ci-contre.

À l'aide de l'oscillogramme et de l'expression de l'interfrange, déterminer la valeur numérique de la vitesse v de l'écoulement sachant que pour l'expérience $\lambda_0 = 632 \text{ nm}$, $a = 50 \mu\text{m}$ et $f'_2 = 50 \text{ cm}$.



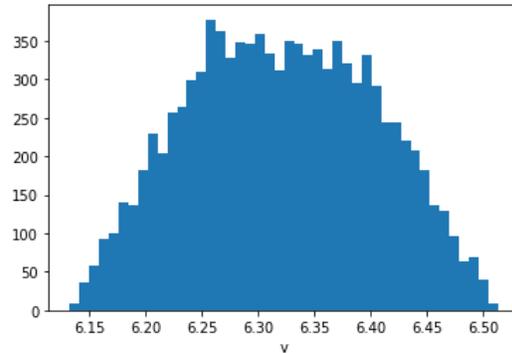
en X: 0,5 ms/div en Y: 2 V/div

On évalue la dispersion des mesures due à l'incertitude sur les valeurs de a , f'_2 et de f à l'aide de l'algorithme suivant et on donne le résultat de son exécution:

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 f2,a,lambda0,f=[instruction 1]
5
6 u_f2,u_a,u_f=0.5e-2,1e-6,0.6
7
8 N=10000 #nombre de tirages
9 v=[]
10 for i in range(N):
11     f2_MC=f2+u_f2*np.random.uniform(-1,+1)
12     a_MC=a+u_a*np.random.uniform(-1,+1)
13     f_MC=f+u_f*np.random.uniform(-1,+1)
14     v.append([instruction 2])
15
16 plt.hist(v, bins='rice') #histogramme
17 plt.xlabel('v')
18 plt.show()
19
20 print(np.mean(v), 'm/s')
21 print(np.std(v), 'm/s')

```



6.321322270039085 m/s
0.08212274929689695 m/s

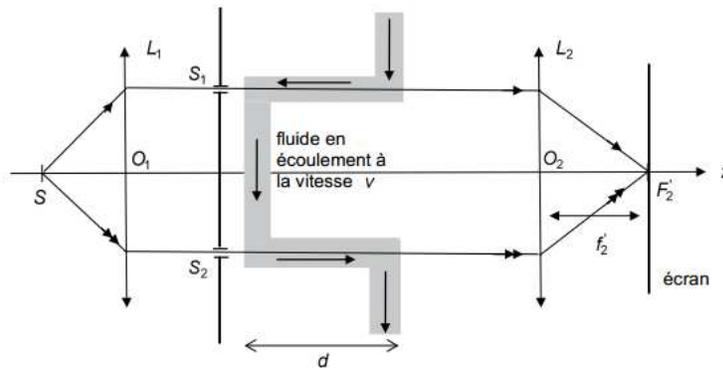
9. Quel nom porte un tel algorithme pour mesurer la dispersion d'une mesure?

Extraire du code les incertitudes-types associées à f'_2 , a et f , fréquence du signal électrique observé.

Compléter les instructions 1 et 2 (lignes 4 et 14).

Donner le résultat de la vitesse du fluide v sous la forme $v = \dots \pm \dots \text{ m/s}$.

En 1851, Fizeau avait mesuré la vitesse d'un fluide sans la contrainte de l'introduction de particules réfléchissantes. Son montage consistait à faire parcourir directement l'écoulement entre les trous et la lentille L_2 et de mesurer le décalage de la figure d'interférences en F'_2 .



On admet que la vitesse de la lumière suit la loi relativiste de composition des vitesses, c'est-à-dire que sa vitesse le long du trajet de distance d est :

$$v_1 = \frac{c}{n} \frac{1 - \frac{nv}{c}}{1 - \frac{v}{nc}} \text{ pour le rayon passant par } S_1 \text{ et } v_2 = \frac{c}{n} \frac{1 + \frac{nv}{c}}{1 + \frac{v}{nc}} \text{ pour le rayon passant par } S_2$$

avec n l'indice du fluide en écoulement, c la célérité de la lumière dans le vide et v la vitesse du fluide en écoulement ($v \ll c$).

On admet que la différence de temps de parcours pour atteindre F'_2 , notée $\Delta t = t_1 - t_2$, entre les deux trajets, celui passant par S_1 et celui passant par S_2 s'écrit : $\Delta t \approx \frac{2vd}{c^2}(n^2 - 1)$.

10. En déduire la différence de marche $\delta(F'_2)$ (on rappelle qu'un chemin optique correspond à la distance qu'aurait parcourue la lumière si elle se propageait dans le vide pendant le même temps).

L'expérience réalisée par Fizeau consistait à observer les franges avec un fluide immobile, puis avec le fluide en mouvement.

11. Montrer que la variation de l'ordre d'interférences avec et sans écoulement s'écrit : $p_{mobile} - p_{immobile} = \frac{2vd}{\lambda_0 c}(n^2 - 1)$

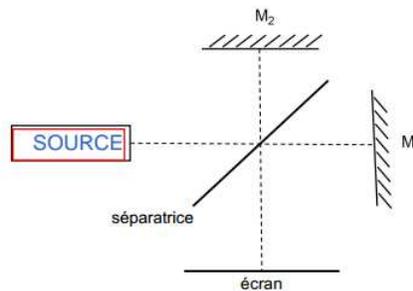
Le décalage des franges étant trop petit, Fizeau a doublé l'effet en renversant le sens de déplacement du fluide et a alors observé un décalage total d'un quart de frange.

12. En déduire la valeur de la vitesse de l'écoulement dans l'expérience de Fizeau dans laquelle les paramètres avaient pour valeur $d = 1,5 \text{ m}$, $n^2 - 1 \approx \frac{3}{4}$ et $\lambda_0 = 540 \text{ nm}$.

L'ordre de grandeur de la vitesse obtenue est-il cohérent avec celui de l'expérience menée avec la bille réfléchissante ?

II. Interféromètre de Michelson modifié

On étudie l'interféromètre de Michelson qui se présente comme sur le schéma ci-dessous:



1. Pour une source étendue spatialement, où sont localisées les franges d'interférences dans le cas d'un réglage en lame d'air? Même question pour un réglage coin d'un interféromètre éclairé en incidence normale? Comment fait-on dans chaque cas pour observer les franges sur un écran?

2. On donne les photos de l'écran pour le Michelson réglé en coin d'air et en lame d'air. Dans chacun des cas on a utilisé une lentille convergente pour pouvoir observer ces franges sur l'écran.

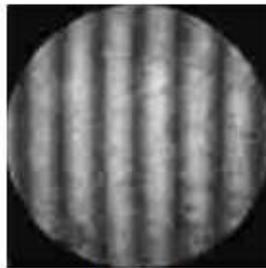


Image A

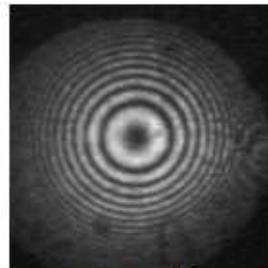
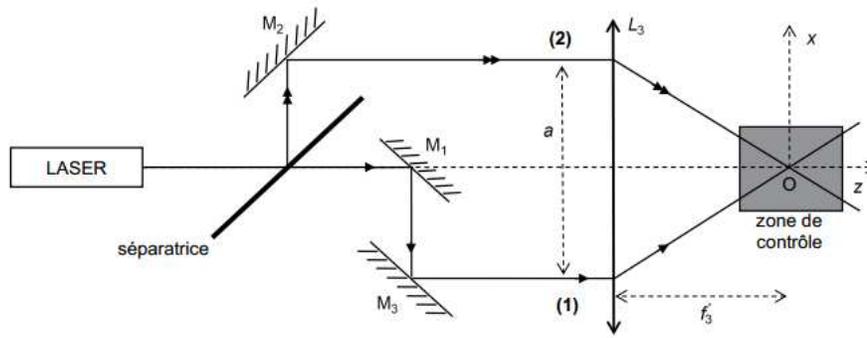


Image B

2.a. Préciser l'image sur laquelle on observe les franges du coin d'air. Déduire de la photo de l'écran la valeur numérique de l'angle α du coin d'air en radian puis en minute d'arc. Donnée: $\lambda = 589 \text{ nm}$ et les miroirs du Michelson ont un diamètre $d = 1,5 \text{ cm}$.

2.b. Pour les franges en lame d'air, on utilise une lentille de focale $f' = 50 \text{ cm}$ pour observer les franges sur l'écran. La lame d'air a pour épaisseur $e = 143 \mu\text{m}$, exprimer et calculer le rayon de la 3^{ème} frange brillante (ne pas utiliser la photo). Donnée: $\lambda = 589 \text{ nm}$ et $\cos i \approx 1 - \frac{i^2}{2}$ pour i petit.

On modifie le montage du Michelson en prenant pour source un laser et en inclinant les miroirs M_1 et M_2 à 45° à partir du contact optique. On ajoute un miroir M_3 afin de renvoyer le faisceau vers une lentille convergente L derrière laquelle le système de franges sera visible dans une zone de contrôle.



3. Au vu du positionnement relatif de M_1 et de M_2 , l'interféromètre est-il en configuration coin d'air ou lame d'air? Justifier en utilisant le schéma en annexe 2.

4. Les rayons qui interfèrent sur l'écran sont:

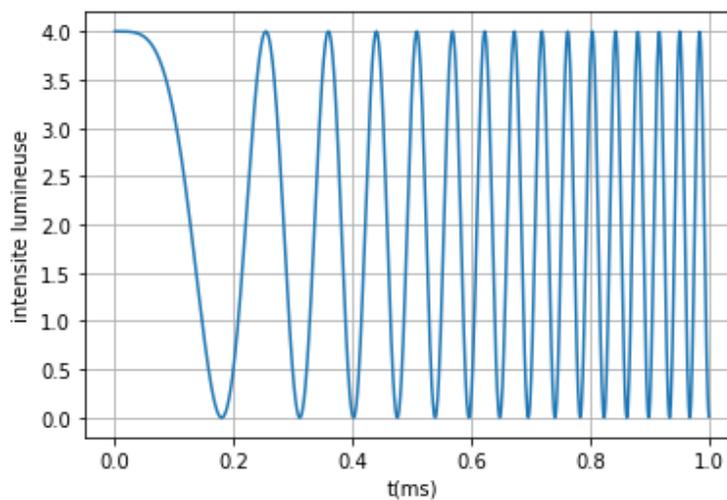
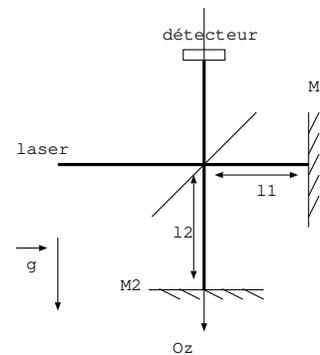
- le rayon issu de S réfléchi sur la séparatrice puis réfléchi sur le miroir M_2
- le rayon issu de S transmis par la séparatrice puis réfléchi sur les miroirs M_1 et M_3

Compléter le document réponse en annexe 3 en y positionnant les sources secondaires S_1 et S_2 issues de S d'où semblent provenir respectivement les rayons (on pourra s'aider de sources intermédiaires en les mentionnant sur le document réponse). Conclure que le dispositif est équivalent au montage de deux trous d'Young espacés d'une distance à préciser.

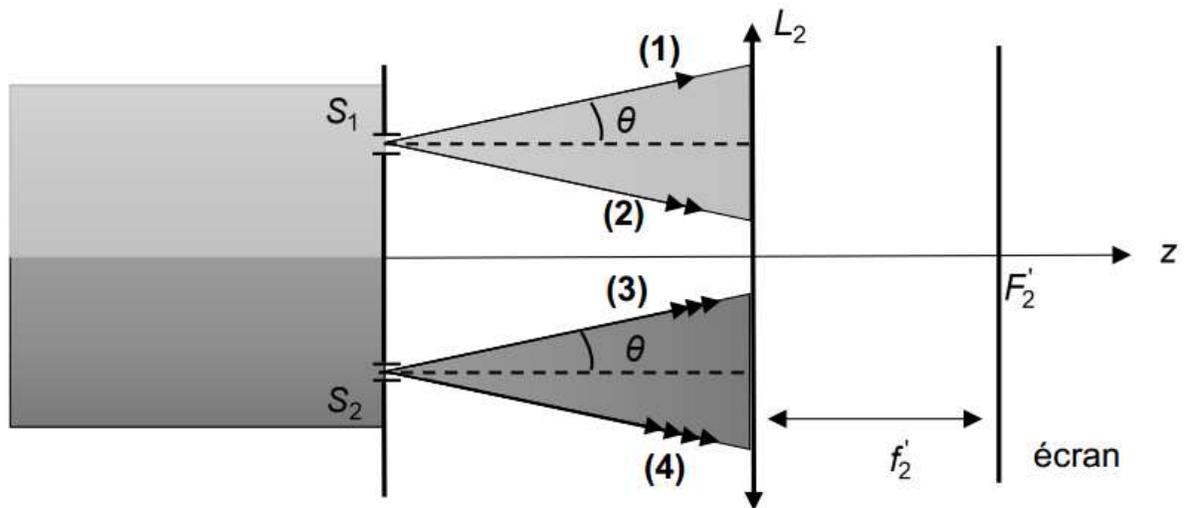
Compléter le document en annexe 3 en construisant les rayons issus de S qui interfèrent sur l'écran en utilisant les sources secondaires et les sources intermédiaires construites précédemment.

III. Problème ouvert: gravimétrie

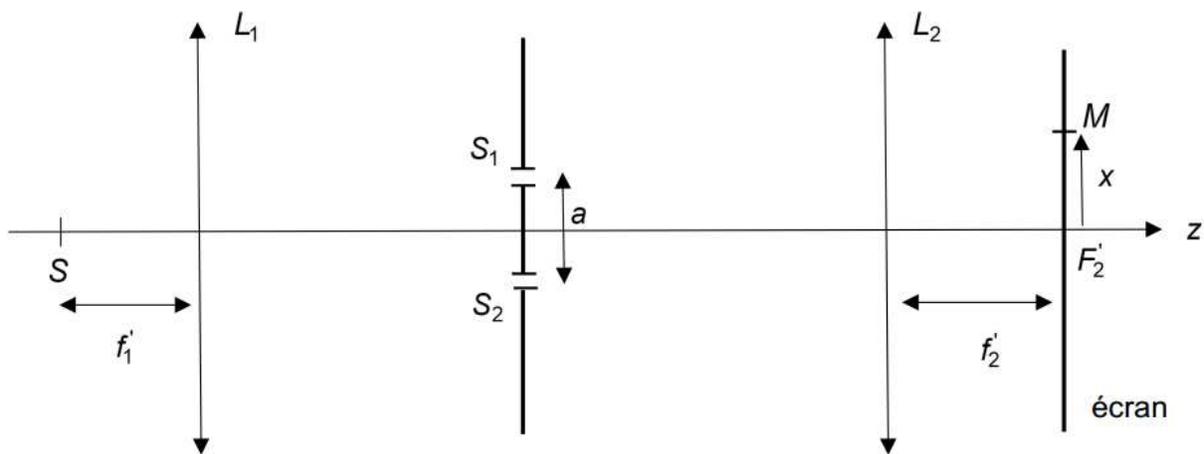
On considère un interféromètre de Michelson éclairé par un laser de longueur d'onde $\lambda = 633 \text{ nm}$. Le miroir M_1 est fixe et le miroir M_2 est en chute libre. A l'instant $t = 0$, les distances l_1 et l_2 sont égales. On donne l'enregistrement de l'éclairement reçu par le détecteur en fonction du temps. Déduire de la courbe la valeur numérique de g .



Annexe 0:



Annexe 1:



Annexe 2:

