

## Devoir test de physique n° 4

Cet énoncé comporte deux problèmes. Durée : quatre heures. L'utilisation d'une calculatrice est autorisée.

### Problème A Des oiseaux hauts en couleur

L'extraordinaire diversité des motifs colorés des oiseaux résulte de phénomènes physiques tels que l'absorption de la lumière, la diffusion, les interférences ou encore la diffraction.

Certains motifs peuvent être expliqués soit par une répartition organisée du plumage, on parle alors de couleurs structurales, soit par la présence de pigments dans le plumage, on parle alors de couleurs pigmentaires. Si le jaune du canari est par exemple pigmentaire, le bleu de la perruche est lui structural. Certains oiseaux bénéficient des deux types de colorations comme le perroquet Ara qui présente ainsi un plumage très coloré (**photo 1**).



**Photo 1** - Perroquets Ara (rouge vert bleu à gauche, bleu jaune à droite)

Pour ce **problème 1**, les intervalles de longueurs d'onde de quelques couleurs sont fournis dans le tableau ci-dessous :

Couleurs	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet
$\lambda$ en nm	620 - 780	590 - 620	580 - 590	500 - 580	450 - 500	380 - 450

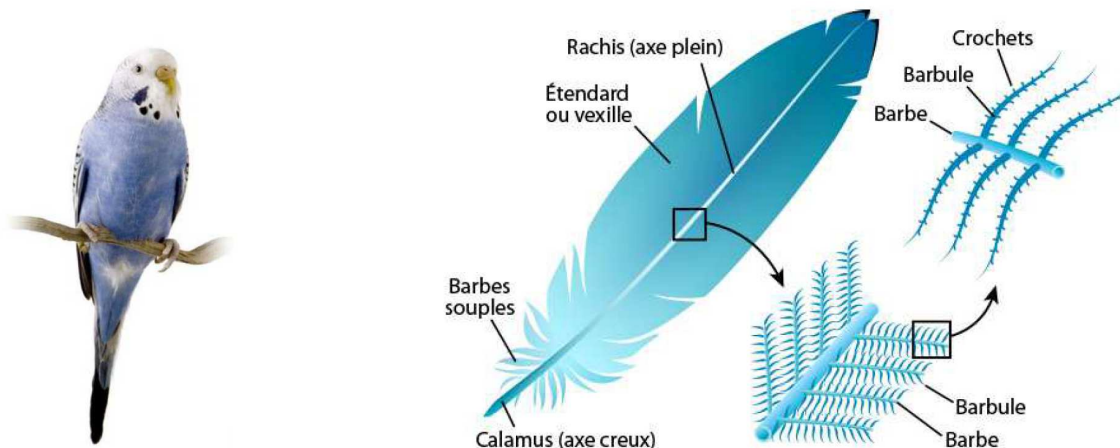
On donne, pour une lentille conjuguant un objet  $A$  et une image  $A'$ , la relation de conjugaison avec origine aux foyers  $F$  et  $F'$  :

$$\overline{FA} \cdot \overline{F'A'} = -f'^2.$$

#### I.1 - Le bleu de la perruche

À l'origine, la couleur des perruches à l'état sauvage est verte, mais la captivité chez cet oiseau, souvent élevé en nombre, a permis l'émergence de nouvelles couleurs, comme le bleu (**photo 2**). C'est notamment l'appauvrissement en pigments jaunes dans son plumage qui est indirectement responsable de cette coloration si particulière et rare dans le domaine animal.

De façon schématique, une plume est constituée essentiellement d'un rachis sur lequel pousse les barbes sur lesquelles naissent des barbules (**figure 1**). Le long des barbules prennent naissance à leur tour des crochets.



**Photo 2** - Perruche bleue

**Figure 1** - Constitution d'une plume

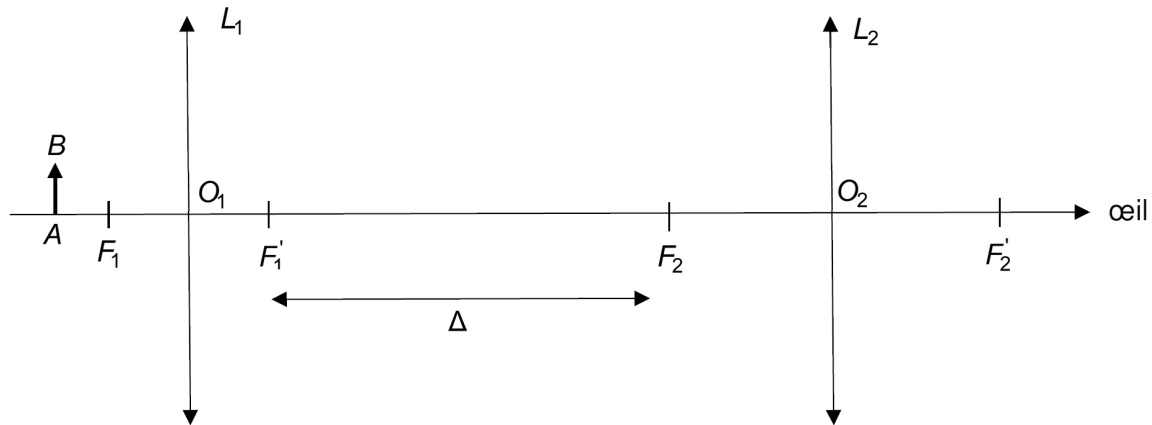
Afin de déterminer l'origine physique de cette couleur bleue, on observe une partie  $AB$  d'une plume de perruche à l'aide d'un microscope optique.

Pour cela, on dispose :

- d'une première lentille,  $L_1$  (centre  $O_1$ , distance focale  $f_1' = 1,2 \text{ cm}$ ), qui porte le nom d'objectif ;
- d'une deuxième lentille,  $L_2$  (centre  $O_2$ , distance focale  $f_2' = 2,0 \text{ cm}$ ), qui porte le nom d'oculaire.

La distance qui sépare le foyer image  $F_1'$  de l'objectif et le foyer objet  $F_2$  de l'oculaire est appelée intervalle optique, noté  $\Delta$ , avec ici  $\Delta = 16 \text{ cm}$  (**figure 2**).

L'observation se fait à l'aide d'un œil emmétrope (œil à vision normale) situé derrière l'oculaire.



**Figure 2** - Schéma du microscope

On se placera pour toute la suite dans les conditions de Gauss et dans l'approximation des petits angles. On note  $h$  la taille de l'objet  $AB$  observé.

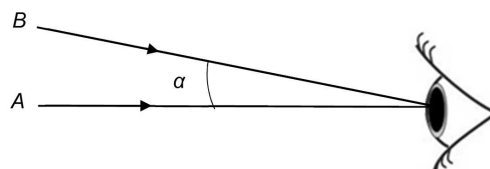
- Q1.** Afin que l'observation puisse s'effectuer sans fatigue visuelle pour l'œil emmétrope, où doit être située l'image finale  $A_2$  en sortie de  $L_2$  ? Dans quel plan se situe donc l'image intermédiaire  $A_1B_1$  ?
- Q2.** Reproduire sur la copie le schéma du microscope et tracer le chemin de deux rayons lumineux passant par l'extrémité  $B$  de l'objet, l'un parallèle à l'axe et l'autre passant par  $O_1$ . Faire apparaître sur ce schéma :
- l'image intermédiaire  $A_1B_1$  ;
  - le diamètre angulaire  $\alpha'$  de l'image finale vue par l'œil.
- Q3.** Montrer que la grandeur  $\gamma_1 = \frac{\overline{A_1B_1}}{\overline{AB}}$ , appelée grandissement transversal de l'objectif, s'écrit :

$$\gamma_1 = -\frac{\Delta}{f_1'}$$

- Q4.** En déduire l'expression du diamètre angulaire  $\alpha'$  de l'image vue par l'observateur au travers du microscope en fonction de  $f_1'$ ,  $f_2'$ ,  $h$  et de  $\Delta$ .

En l'absence de dispositif, l'œil voit net un objet situé à une distance comprise entre  $d_m$  et  $d_M$ , avec  $d_m < d_M$ .

- Q5.** Quels noms donne-t-on aux points objets correspondant à ces distances ? Donner une valeur à  $d_m$  et  $d_M$  pour un œil emmétrope.
- Q6.** Déterminer le diamètre angulaire  $\alpha$  de l'objet  $AB$  vu sans instrument et situé à une distance  $d_m$  de l'œil (**figure 3**).



**Figure 3** - Diamètre ou distance angulaire

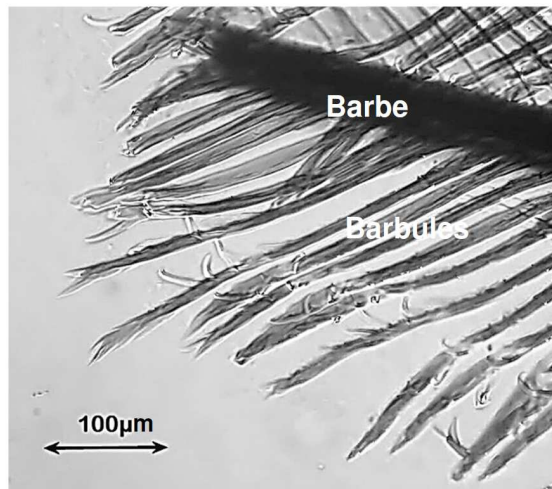
**Q7.** En déduire que la grandeur  $G_C = \frac{\alpha'}{\alpha}$ , appelée grossissement commercial du microscope, s'écrit :

$$G_C = \frac{d_m \Delta}{f_1' f_2'}.$$

Faire l'application numérique avec  $d_m = 25 \text{ cm}$ .

**Q8.** Un œil peut distinguer deux images ou deux objets si la distance angulaire les séparant est supérieure à la limite de résolution angulaire de l'œil  $\varepsilon = 1'$  (une minute d'arc). Déterminer quelle sera la distance angulaire minimale  $\alpha_m$  entre deux objets vus au travers de ce microscope.

L'image d'une partie d'une plume est donnée ci-après (**photo 3**) :

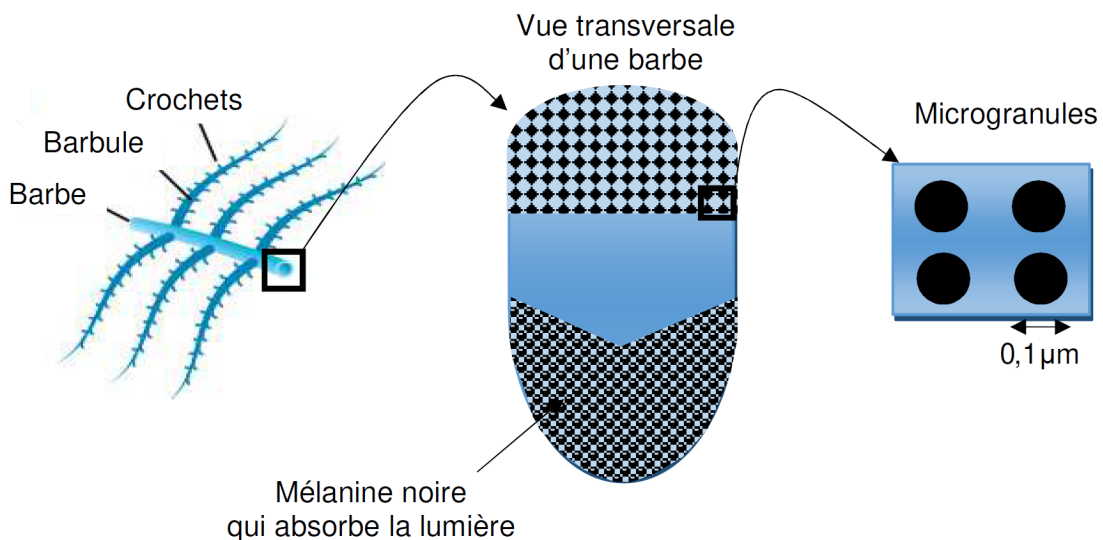


**Photo 3** - Image d'une plume de perruche à l'aide d'un dispositif non précisé

**Q9.** Par mesure sur la **photo 3**, donner une estimation de la distance entre deux crochets situés au bout des barbules.

**Q10.** On rappelle que la résolution angulaire de l'œil nu est  $\varepsilon = 1'$ . Ces crochets peuvent-ils être distingués directement sans instruments ? Pourront-ils être distingués avec le microscope utilisé précédemment ?

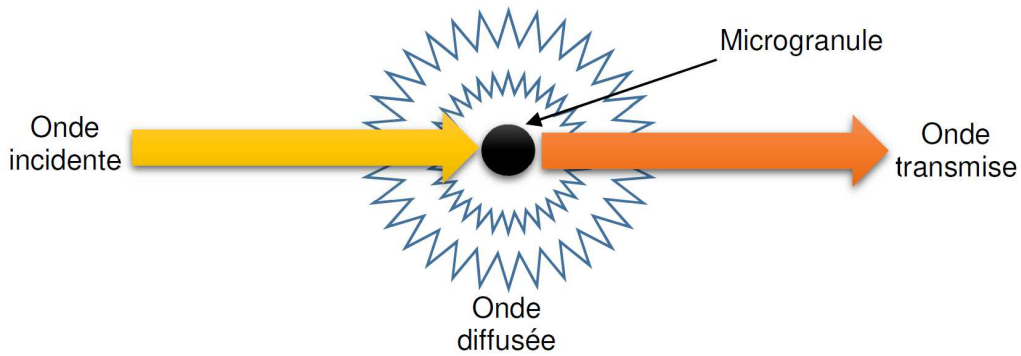
En explorant davantage la plume, on découvre qu'à l'intérieur des barbes apparaissent des couches fines parallèles et empilées de petits grains appelés microgranules (**figure 4**).



**Figure 4** - Coupe transversale d'une barbe



Ces microgranules de petite taille sont responsables d'une diffusion de la lumière incidente (**figure 5**) :



**Figure 5** - Diffusion de la lumière par une microgranule

La puissance moyenne diffusée à travers une sphère, de centre une microgranule, est donnée par la formule :

$$\langle P \rangle = \alpha \omega^4$$

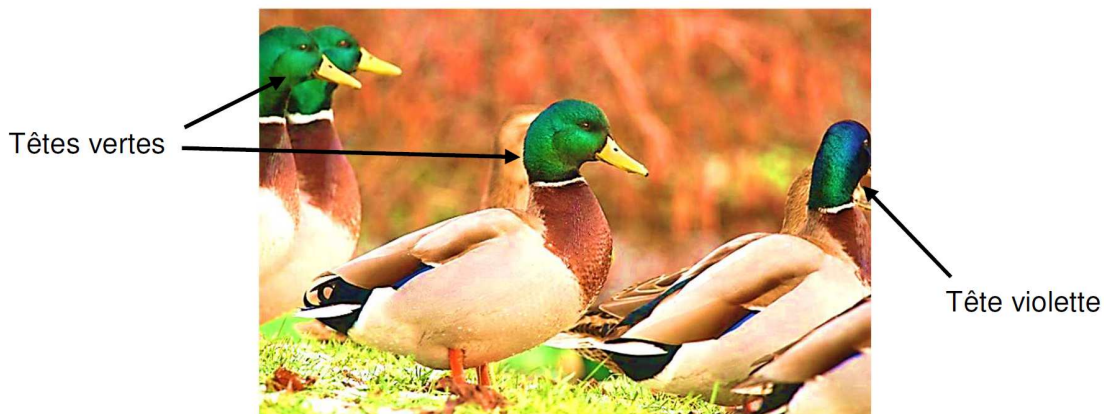
avec  $\alpha$  une constante de proportionnalité et  $\omega$  la pulsation du rayonnement incident.

**Q11.** Expliquer alors la couleur bleue prise par le plumage de la perruche lorsqu'elle est éclairée en lumière blanche. Que deviennent les radiations non diffusées ?

**Q12.** Par analogie avec un autre domaine de la physique, justifier que le premier étage de la barbe se comporte comme un filtre passe-bas en transmission.

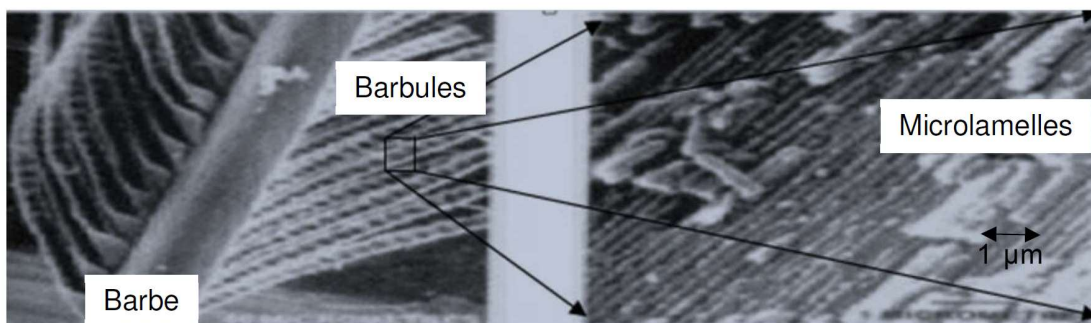
## I.2 - Du vert clair au violet pour le canard colvert

Dans certains cas, la couleur d'un plumage varie selon l'angle d'observation. C'est le cas du canard colvert mâle qui possède autour de son cou et de sa tête un plumage dont la teinte varie selon la direction (**photo 4**).



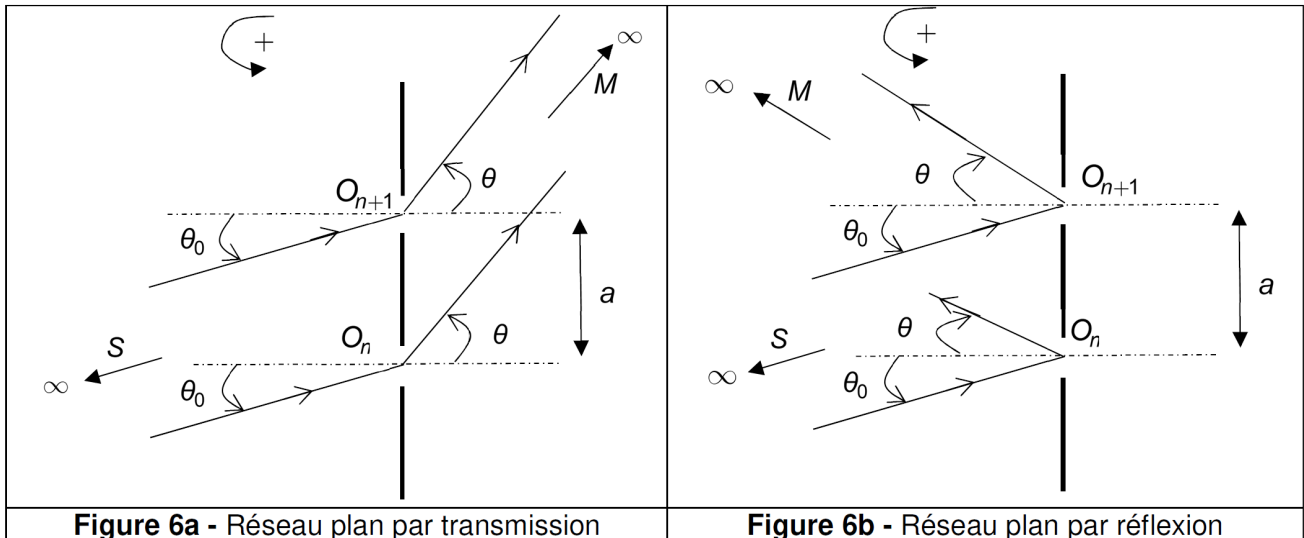
**Photo 4** - Teinte variable sur les cous des canards colvert

Pour expliquer ce phénomène, il faut étudier l'intérieur des barbules, constituées notamment de petites cavités dans lesquelles on trouve de minces lamelles parallèles appelées microlamelles (**photo 5**).



**Photo 5** - Observation des microlamelles au microscope électronique

Chaque microlamelle se comporte comme un petit miroir réfléchissant la lumière. Entre deux lamelles se situe de la mélanine absorbant la lumière. Ainsi ces microlamelles s'apparentent aux traits d'un réseau plan qui peut être modélisé soit par la **figure 6a**, soit par la **figure 6b** :



La distance entre deux lamelles est notée  $a$ . On donne  $a = 0,56 \mu\text{m}$ .

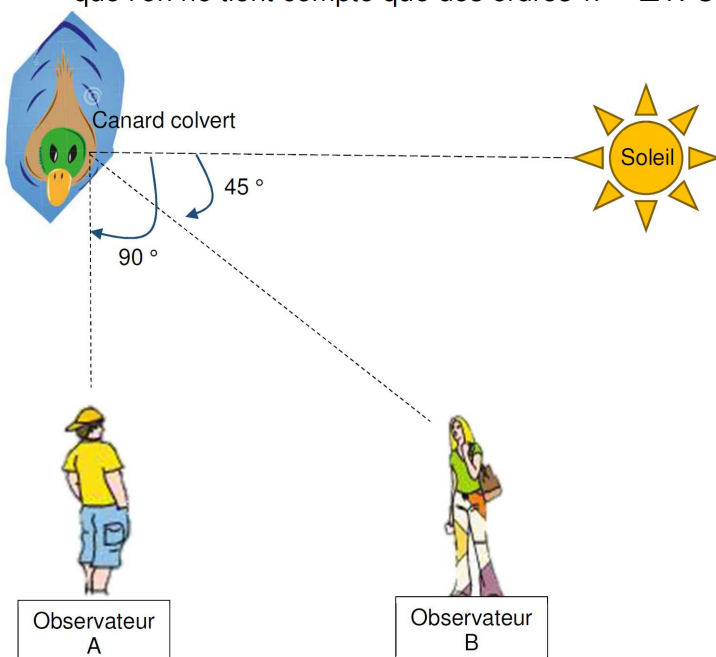
$S$  représente une source de lumière monochromatique, de longueur d'onde  $\lambda_0$ , située à l'infini, envoyant un faisceau de rayons cohérents entre eux. L'observation se fait en un point  $M$  situé à l'infini.

- Q13.** La structure en microlamelles constitue-t-elle un réseau par réflexion ou par transmission ?
- Q14.** Déterminer, dans le cas du réseau plan par transmission, la différence de marche  $\delta(M) = (SO_{n+1}M) - (SO_nM)$  entre deux rayons, l'un passant par  $O_n$ , l'autre par  $O_{n+1}$ .
- Q15.** Pour quelles valeurs de  $\delta(M)$  les ondes interfèrent entre-elles de façon totalement constructive ?
- Q16.** Dans le cas des réseaux par réflexion, montrer par analogie que les maximums d'intensité lumineuse sont donnés pour des angles  $\theta_k$  tels que :

$$\sin \theta_k + \sin \theta_0 = k \frac{\lambda_0}{a}$$

avec  $k$  un entier relatif.

- Q17.** Application : de quelle couleur apparaît la tête d'un canard colvert, dont les microlamelles sont éclairées en incidence normale par des rayons provenant du Soleil, d'une part pour l'observateur A et d'autre part pour l'observateur B supposés suffisamment éloignés (**figure 7**) ? On justifiera que l'on ne tient compte que des ordres  $k = \pm 1$ . Commenter en lien avec la **photo 4**.



**Figure 7 - Canard colvert éclairé par le soleil**

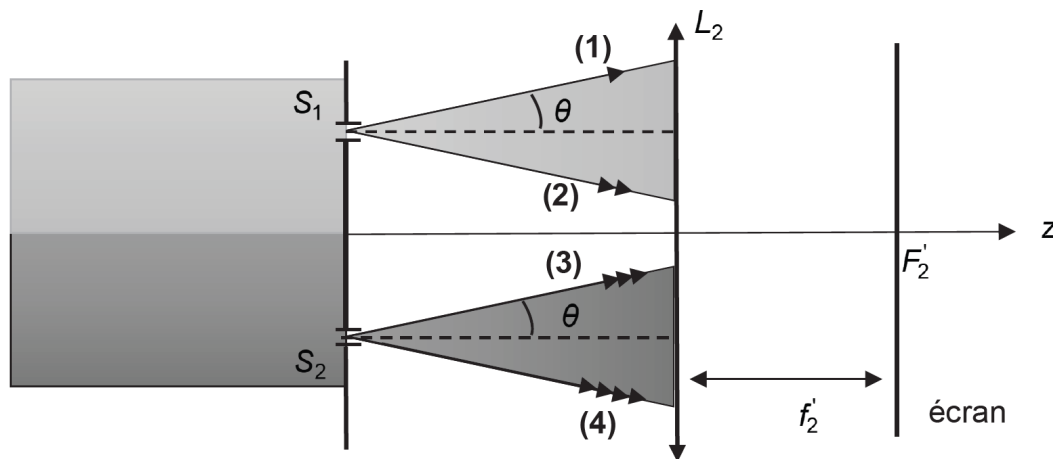
## Problème B Vélocimétrie optique

**Le sujet comporte une annexe et un document réponse (DR) à rendre avec la copie.**

La vitesse d'un fluide peut aussi 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.

### III.2.1 - Utilisation de trous d'Young

Dans le montage des trous d'Young, chaque trou suffisamment petit diffracte le faisceau de lumière incident. En sortie, le faisceau diverge avec un demi-angle au sommet  $\theta$  identique pour les deux trous. On place un écran au foyer image d'une lentille  $L_2$ .



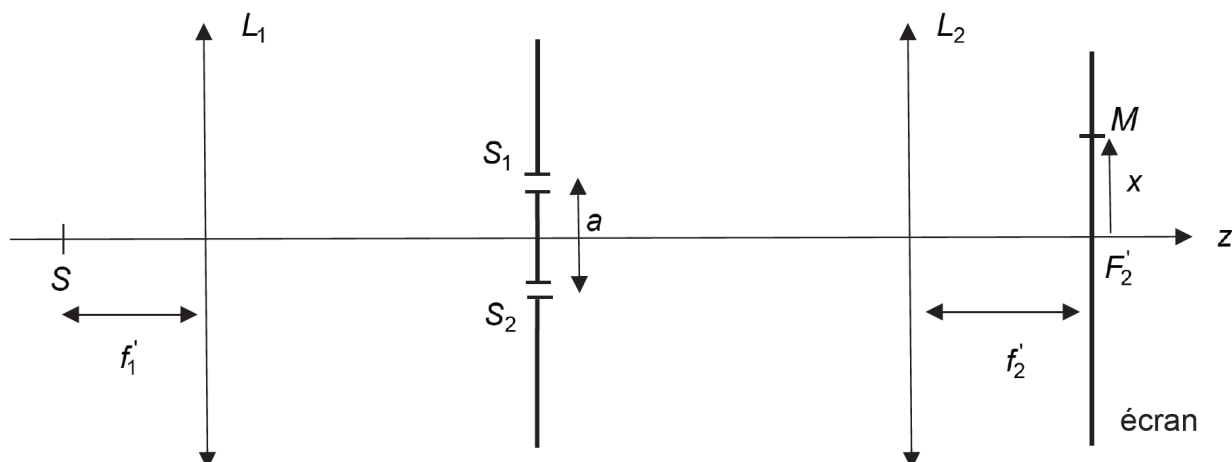
**Figure 9** - Diffraction par deux trous d'Young

**Q28.** Représenter sur le **DR** les rayons émergents atteignant l'écran et issus des rayons incidents (1), (2), (3) et (4).

**Q29.** Faire alors apparaître sur ce schéma la largeur  $\ell$  du champ d'interférences sur l'écran. Montrer que dans les conditions de Gauss, que l'on rappellera, cette largeur peut s'écrire :

$$\ell \simeq 2f_2'\theta$$

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  $x$  (**figure 10**).



**Figure 10** - Montage à l'infini des trous d'Young

**Q30.** Un tel montage permet de produire un faisceau de lumière parallèle. Quel instrument d'optique, utilisé notamment dans un goniomètre, réalise une telle opération ?

**Q31.** Compléter le **DR** en traçant deux rayons lumineux partant de  $S$  pour aller à  $M$ , l'un passant par  $S_1$  et l'autre par  $S_2$ .

**Q32.** Faire apparaître sur le schéma précédent (**DR**) 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  $\lambda_0$ .

**Q33.** 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  $a$ ,  $x$ ,  $\lambda_0$  et de  $f_2'$ .

**Q34.** Définir et déterminer l'expression de l'interfrange  $i$ .

Les trous de rayon  $r = 10 \mu\text{m}$  sont espacés d'une distance de  $a = 50 \mu\text{m}$ .

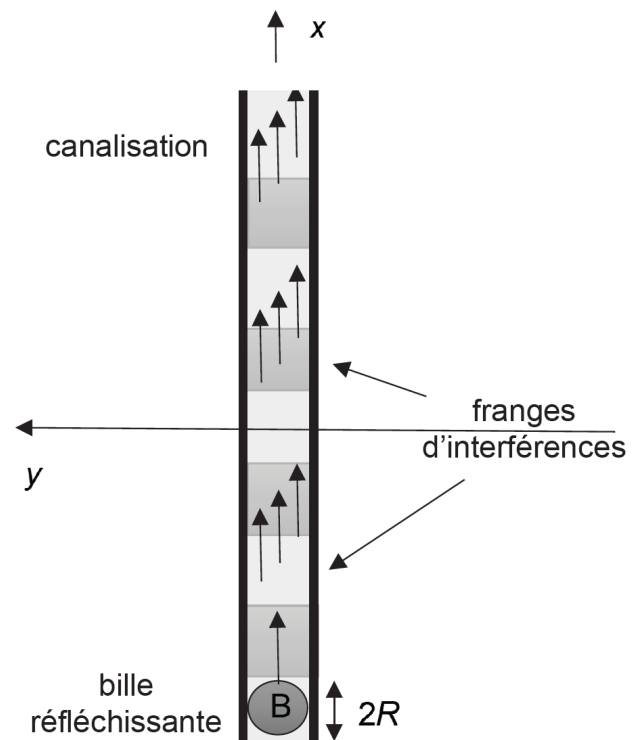
**Q35.** Sachant que le demi-angle de diffraction  $\theta$  est de l'ordre de  $\frac{\lambda_0}{2r}$ , déterminer le nombre de franges visibles sur l'écran à l'aide du résultat de la question **Q29**. L'utilisation de trous d'Young permet-elle d'obtenir une mesure précise de la vitesse d'un fluide ?

Un fluide, dont on souhaite mesurer la vitesse, circule dans une canalisation transparente le long de l'axe  $F_2'x$ , perpendiculairement au système de franges (**figure 11**). 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.

**Q36.** 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  $i$ .

**Q37.** Déterminer l'expression de la position  $x_B(t)$  de la bille en fonction de  $v$ ,  $t$  et de sa position initiale  $x_0$ .



**Figure 11** - Écoulement schématisé d'un fluide au travers d'un système de franges



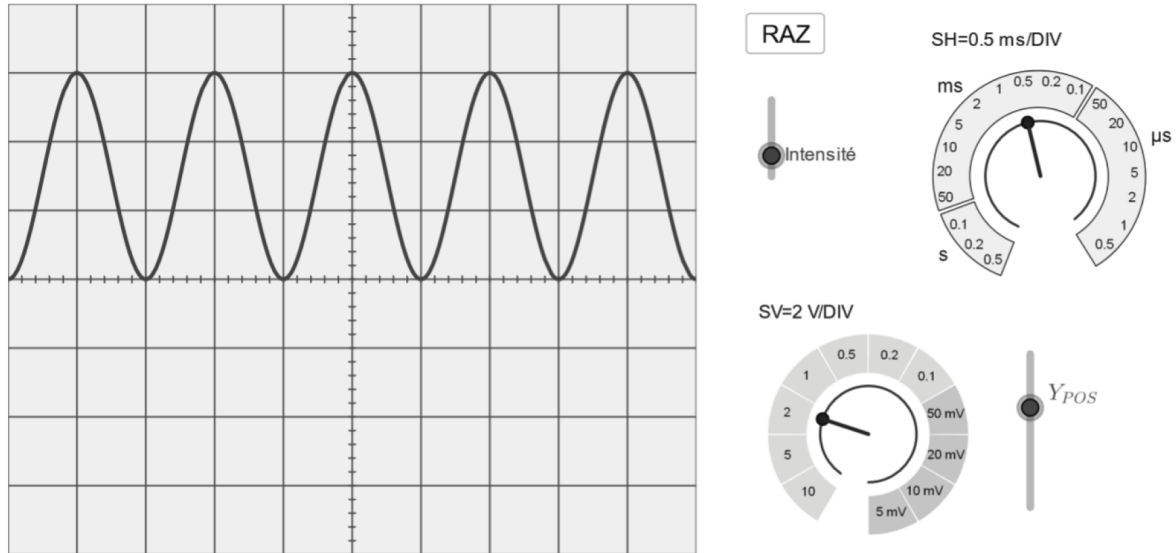
**Q38.** Montrer, à l'aide de la formule de Fresnel, que l'intensité reçue par le détecteur est de la forme :

$$I' = \frac{I_{\max}}{2} [1 + \cos(2\pi f t + \varphi)]$$

avec  $I_{\max}$  l'intensité maximale enregistrée par le détecteur.

On donnera l'expression de la fréquence  $f$  en fonction de  $v$  et de  $i$ .

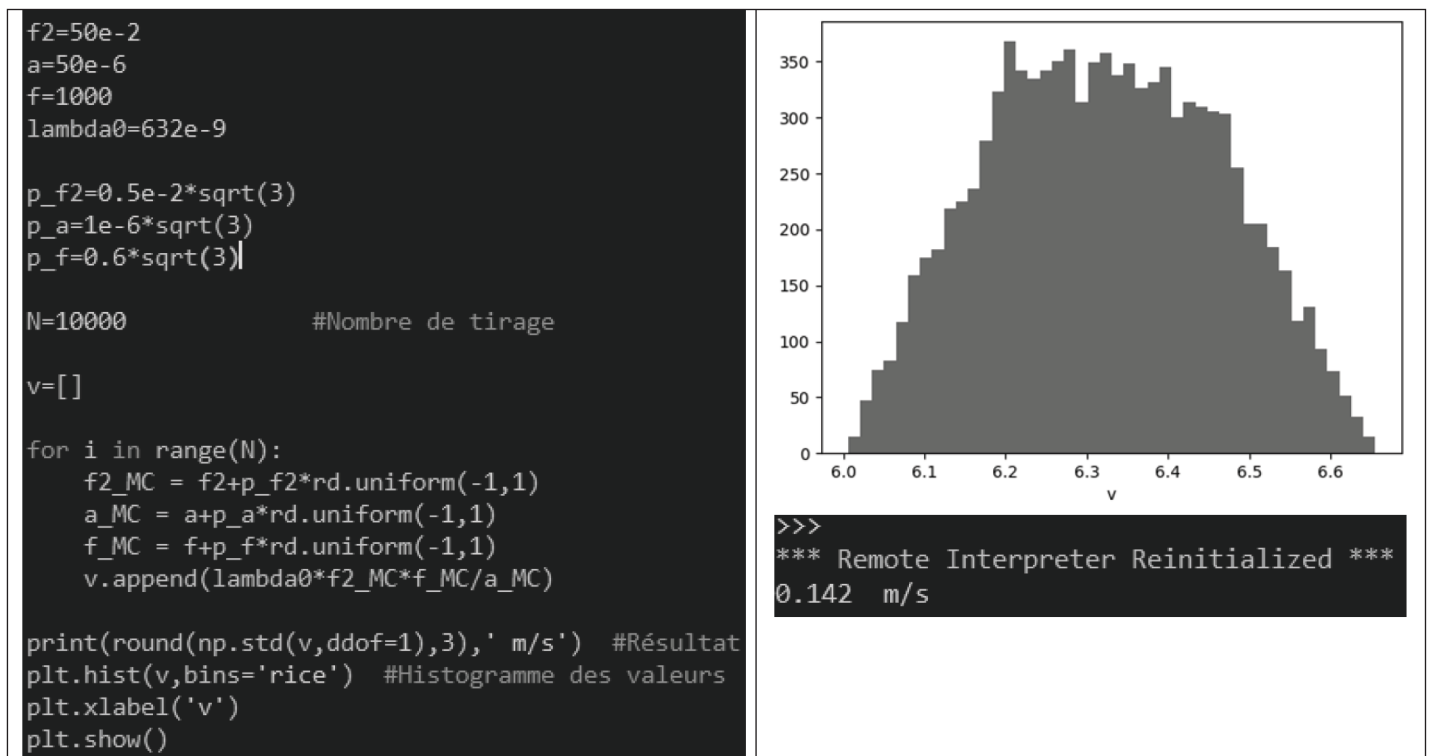
Le signal enregistré par le détecteur est donné **figure 12**.



**Figure 12** - Signal enregistré par le détecteur sur un oscilloscope

**Q39.** 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  $f'_2 = 50 \text{ cm}$ .

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 :



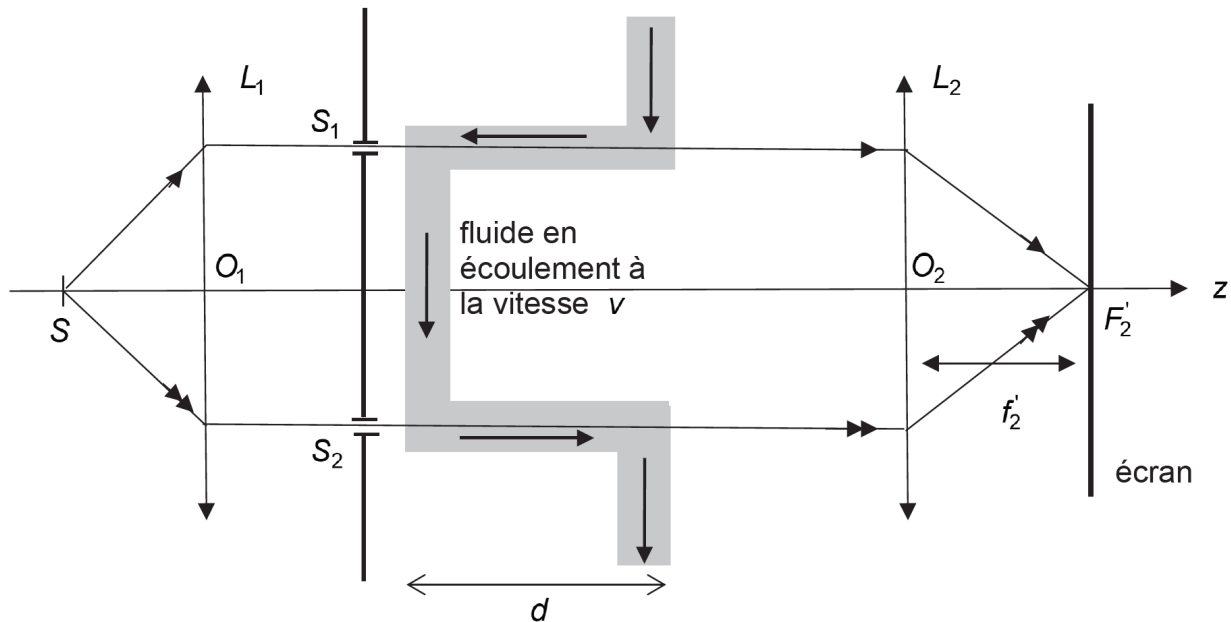
**Figure 13** - Algorithme python (à gauche) et résultat de l'exécution (à droite)



**Q40.** 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.

**Q41.** Donner le résultat de la vitesse du fluide  $v$  avec son incertitude-type associée  $u(v)$ . Commenter la dispersion des mesures.

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  $L_2$  (figure 14) et de mesurer le décalage de la figure d'interférences en  $F'_2$ .



**Figure 14** - Montage équivalent à celui de Fizeau de 1851

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 :

$$v_1 = \frac{c}{n} \frac{1 - \frac{nv}{c}}{1 - \frac{v}{nc}}$$

(pour le rayon passant par  $S_1$ )

$$v_2 = \frac{c}{n} \frac{1 + \frac{nv}{c}}{1 + \frac{v}{nc}}$$

(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 ( $v \ll c$ ).

**Q42.** Montrer 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 :

$$\Delta t \simeq \frac{2vd}{c^2} (n^2 - 1)$$

**Q43.** 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.

**Q44.** Montrer que la variation de la différence de marche avec et sans écoulement s'écrit :

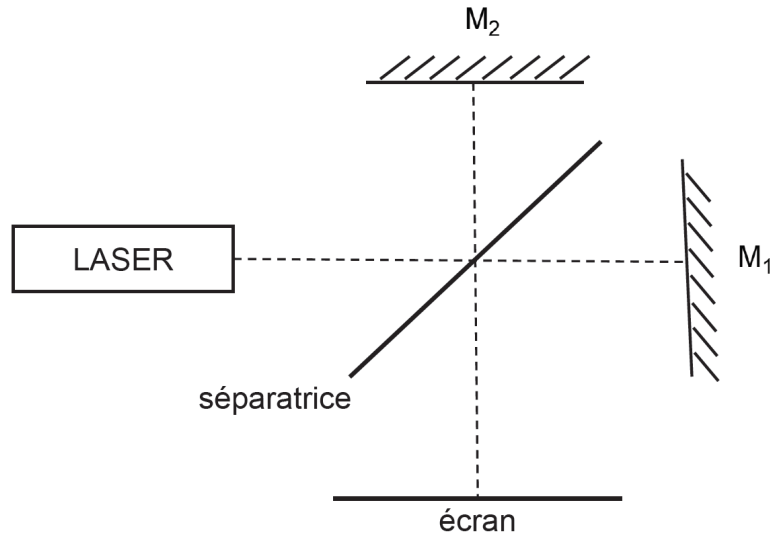
$$p_{mobile} - p_{immobile} = \frac{2vd}{\lambda_0 c} (n^2 - 1)$$

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.

**Q45.** En déduire la valeur de la vitesse de l'écoulement dans l'expérience de Fizeau dans laquelle les paramètres avaient pour valeur  $d = 1,5 \text{ m}$ ,  $n^2 - 1 \simeq \frac{3}{4}$  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 ?

### III.2.2 - Utilisation de l'interféromètre de Michelson

Le réseau de franges peut aussi être créé par un dispositif proche de celui de l'interféromètre de Michelson que nous détaillons ici au préalable.



**Figure 15** - Interféromètre de Michelson

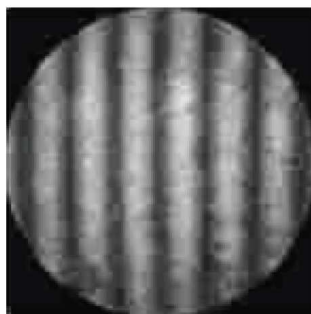
L'interféromètre est éclairé par une source ponctuelle émise par un laser émettant un faisceau de lumière divergent de longueur d'onde  $\lambda_0$  dans le vide.

**Q46.** Donner les possibilités de réglage (translation et/ou rotation) de la séparatrice, du miroir  $M_1$  et du miroir  $M_2$ .

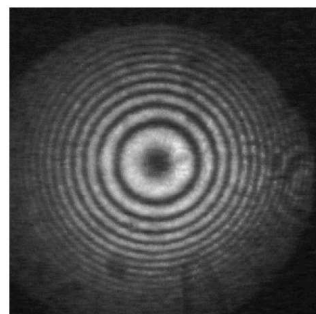
**Q47.** Pour une source supposée ponctuelle, est-il nécessaire de placer une lentille entre l'interféromètre et l'écran pour l'observation des franges avec un bon contraste ?

**Q48.** Pour une source étendue spatialement, où seraient 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 ?

**Q49.** Associer à chaque image ci-dessous une configuration de l'interféromètre (coin d'air ou lame d'air).

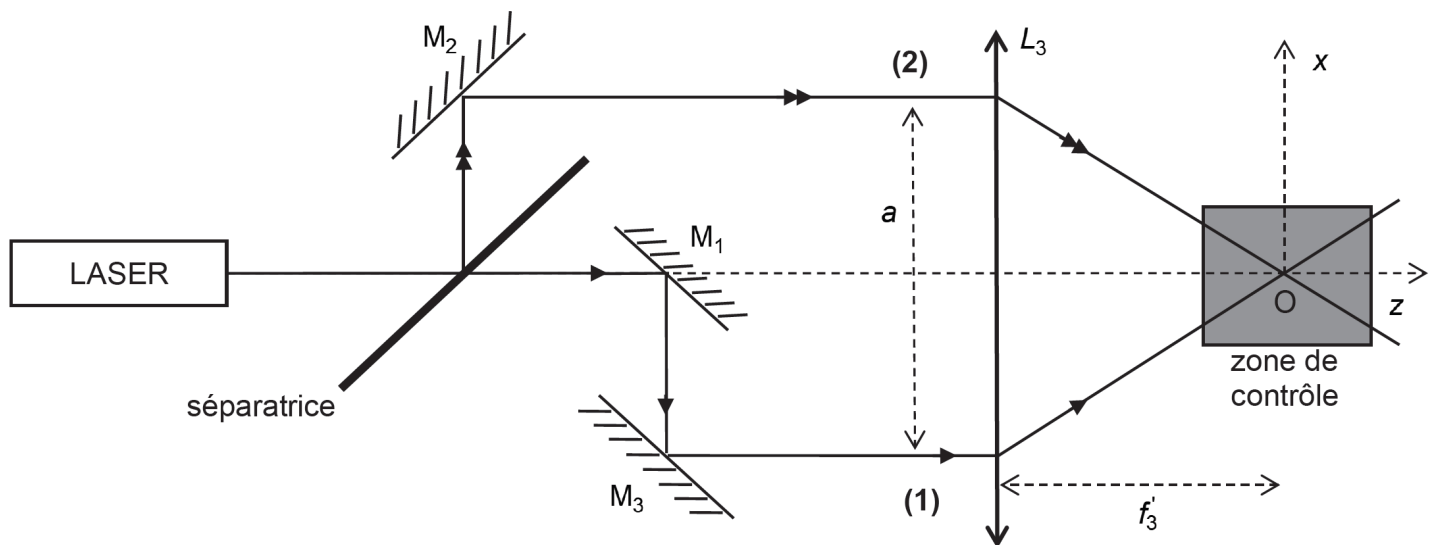


**Image A**



**Image B**

La vélocimétrie laser consiste à incliner les miroirs  $M_1$  et  $M_2$  à  $45^\circ$  à partir du contact optique. On ajoute un miroir  $M_3$  afin de renvoyer le faisceau vers une lentille convergente  $L_3$  derrière laquelle le système de franges sera visible dans une zone de contrôle (**figure 16**).



**Figure 16** - Montage de vélocimétrie laser à franges

**Q50.** 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 ?

**Q51.** Compléter le **DR** en y positionnant les sources secondaires  $S_1$  et  $S_2$  issues de  $S$  d'où semblent provenir respectivement les rayons **(1)** et **(2)** (on pourra s'aider de sources intermédiaires en les mentionnant sur le **DR**). Conclure que le dispositif est équivalent au montage de deux trous d'Young espacés d'une distance à préciser.

*(La suite ne sera pas traitée ici.)*

---

### **Annexe**

Célérité de l'onde lumineuse dans le vide :  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

### **Incertitude-type**

L'incertitude-type  $u(Z)$ , associée à une grandeur  $Z$ , est reliée à la précision  $\Delta(Z)$  (ou demi-intervalle) par :

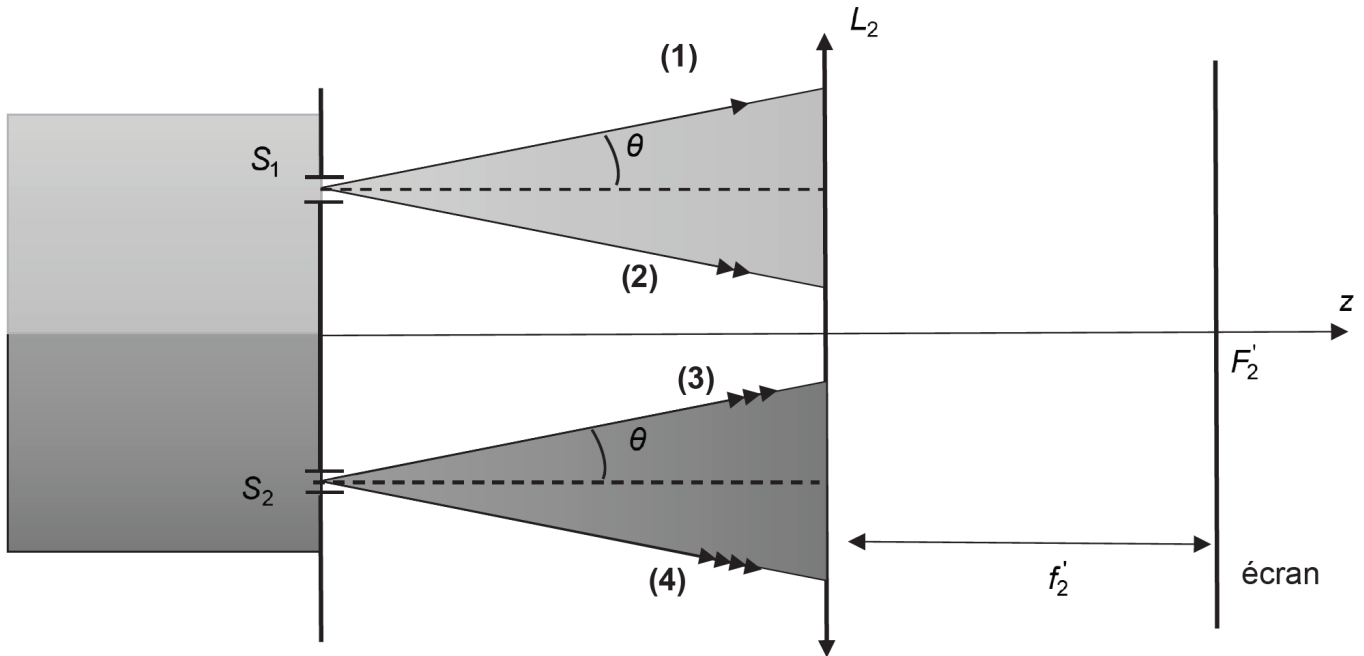
$$u(Z) = \frac{\Delta(Z)}{\sqrt{3}}$$

---

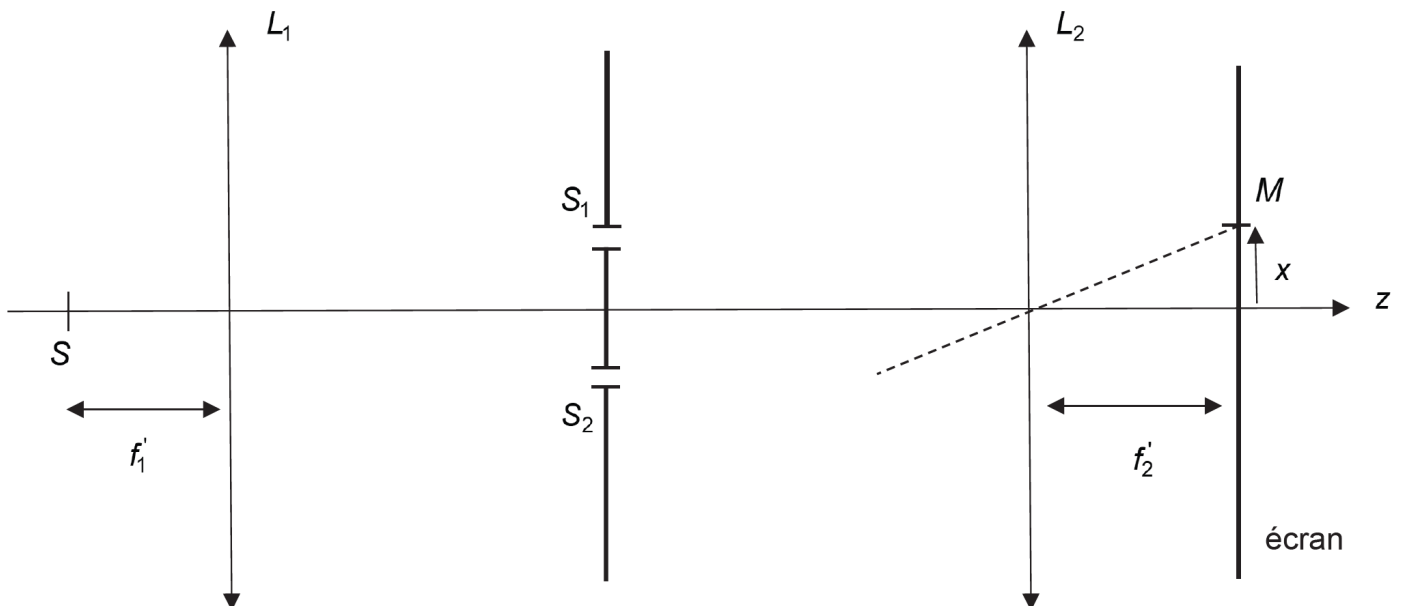
Nom et prénom :

**Document réponse**

**Q28 et Q29 - Diffraction par deux trous d'Young**



**Q31 et Q32 - Montage à l'infini des trous d'Young**





### Q51 - Montage de vélocimétrie laser à franges

(les traits en pointillés permettent de construire les images secondaires)

