EXERCICE 3. Vélocimétrie laser à franges (6 points)

La vélocimétrie laser à franges est une méthode pour mesurer la vitesse d'écoulement d'un fluide sans perturber localement l'écoulement. Elle consiste à croiser deux faisceaux laser issus d'une même source dans une zone de l'écoulement (voir figure 1) afin d'y créer des franges d'interférences lumineuses (voir figure 2).

On introduit dans le fluide des particules diffusantes. Celles-ci suivent l'écoulement et lorsqu'elles traversent une frange lumineuse, elles diffusent la lumière reçue. Un capteur mesure alors l'intensité de la lumière diffusée au cours du temps, ce qui permet d'accéder à la vitesse avec laquelle la particule traverse les différentes franges d'interférences. On considère que cette vitesse est constante, et, est égale à celle du fluide dans la zone étudiée.

Lorsqu'on étudie un écoulement d'air, on peut utiliser comme particules diffusantes des gouttelettes d'huile d'olive.

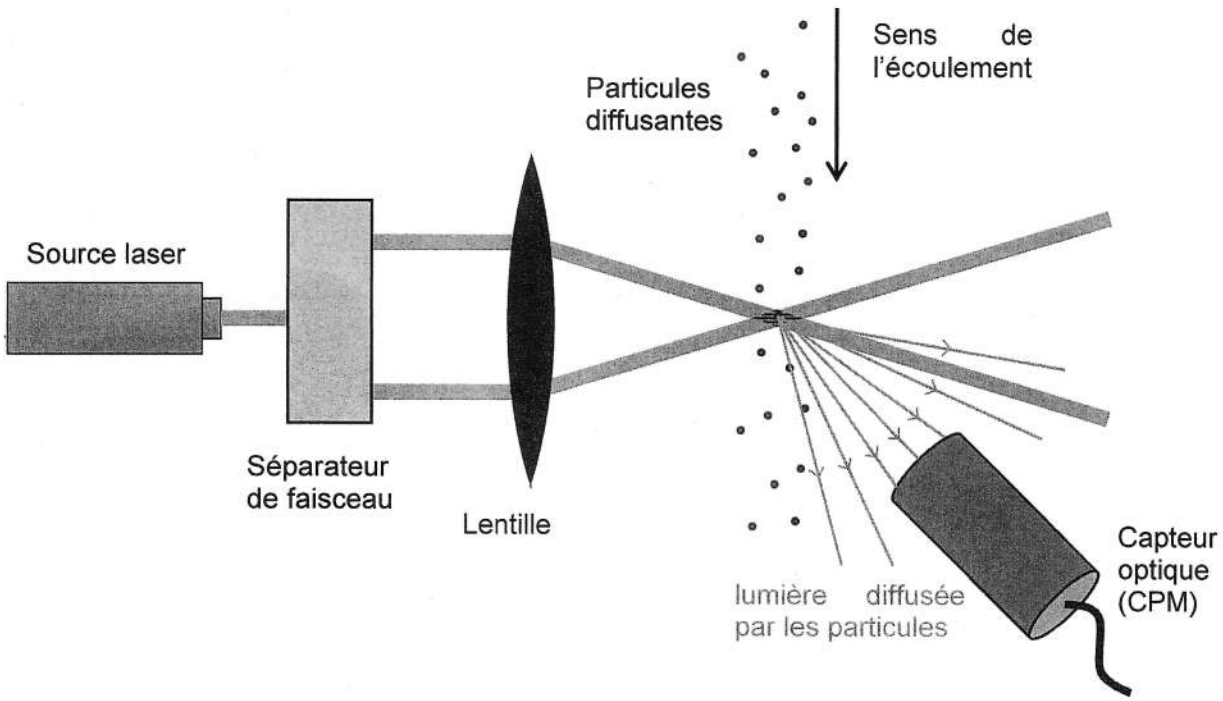


Figure 1. Schéma simplifié d'un montage de vélocimétrie laser à franges

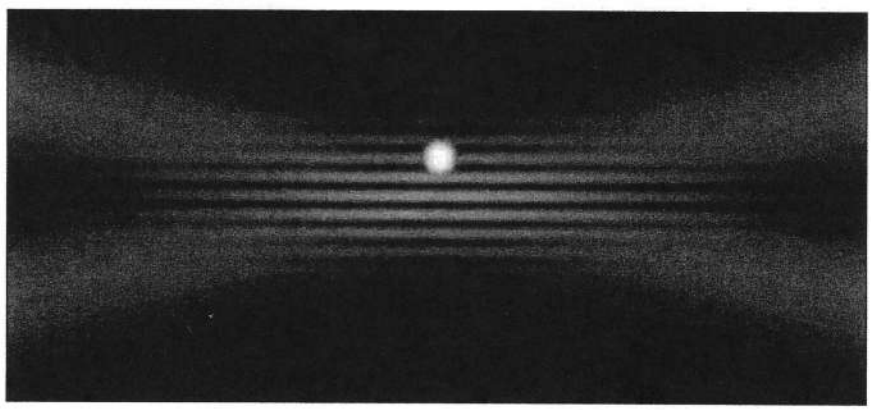


Figure 2. Figure d'interférences obtenue en croisant les deux faisceaux laser. Une gouttelette d'huile (point brillant) portée par le courant d'air scintille en passant à travers les franges.
Source : ONERA

Dans cette partie, on s'intéresse à la production de la figure d'interférences, puis à la mesure de la vitesse de l'écoulement et enfin au capteur optique utilisé pour détecter la lumière diffusée.

Données :

- longueur d'onde du laser : $\lambda = 635\ \text{nm}$;
- vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;
- constante de Planck : $h = 6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}$;
- travail d'extraction d'un électron de l'or : $W_{\text{ext}} = 5{,}1\ \text{eV}$;
- $1\ \text{eV} = 1{,}6 \times 10^{-19}\ \text{J}$.

Production de la figure d'interférences

On fait interférer deux faisceaux laser obtenus à partir d'une même source laser et inclinés l'un par rapport à l'autre. La situation est schématisée dans la figure 3 ci-dessous.

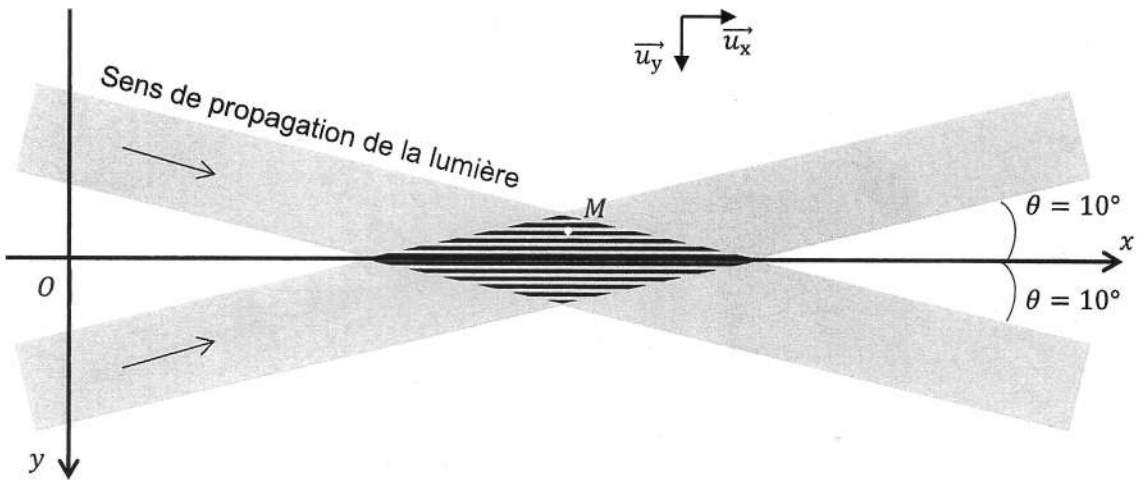


Figure 3. Croisement des faisceaux laser

On considère un point M de coordonnées $(x,\ y)$, situé dans la zone d'interférences. Les ondes des deux faisceaux laser parviennent en M avec une différence de chemin optique δ.

Q1. Donner la relation entre la différence de chemin optique δ, la longueur d'onde λ du laser et un entier k lorsque le point M est dans une zone d'interférences constructives.

On peut montrer géométriquement que $\delta = 2\,y \cdot \sin(\theta)$.

Q2. En déduire l'expression de y en fonction de δ, λ, θ et de l'entier k.

Q3. Donner la définition de l'interfrange.

Q4. Montrer que, dans la situation étudiée, l'expression de l'interfrange i est donnée par :

$$i = \frac{\lambda}{2\sin(\theta)}.$$

Q5. Calculer la valeur de l'interfrange i en mètre puis en micromètre.

Mesure de la vitesse de l'écoulement

En traversant la zone d'interférences avec une vitesse $\vec{v} = v \cdot \overrightarrow{u_y}$, une gouttelette d'huile scintille.

Q6. Expliquer l'origine de ce scintillement.

Grâce à un photorécepteur placé près de la zone d'interférences, on mesure l'intensité lumineuse diffusée par la particule au cours du temps. On obtient le signal représenté sur la figure 4.

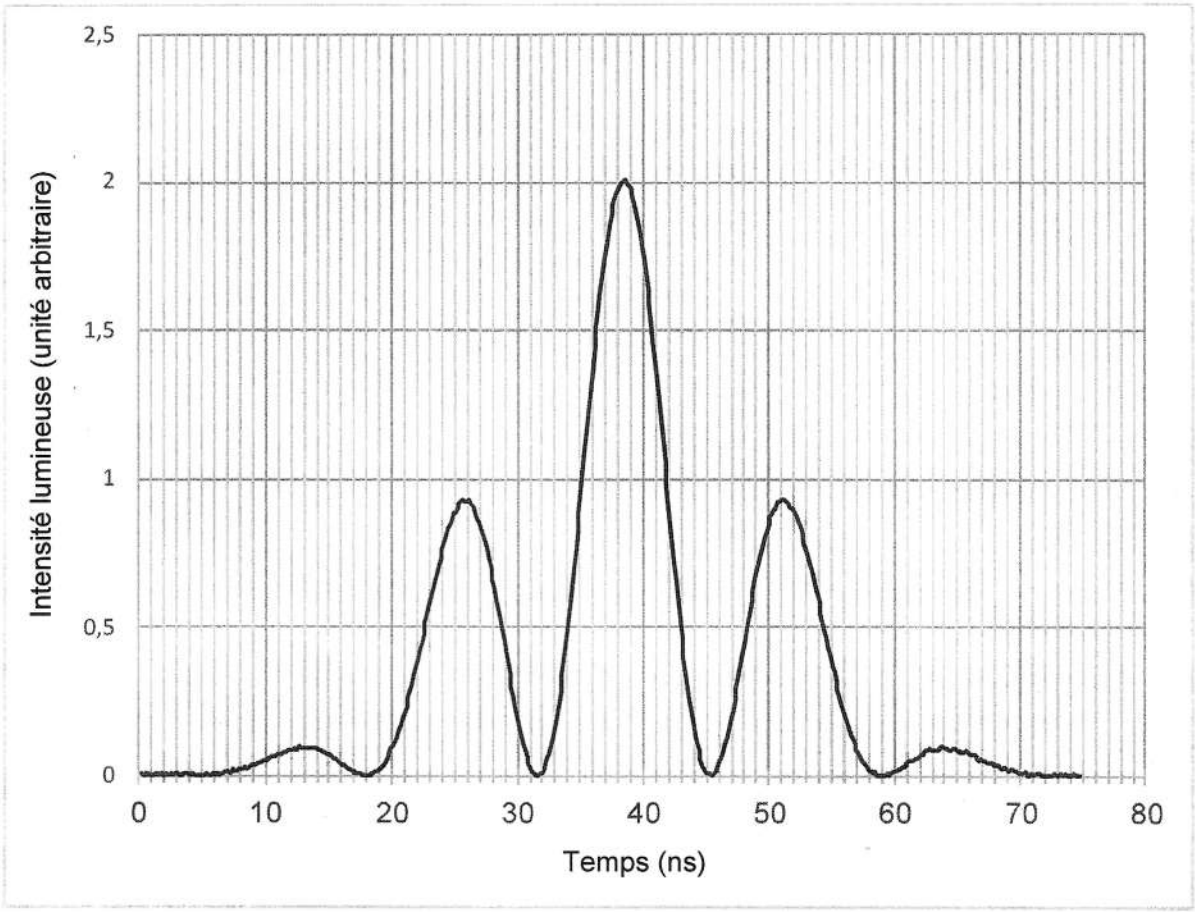


Figure 4. Intensité lumineuse reçue par le capteur lors du passage d'une gouttelette d'huile dans la zone d'interférences

Q7. À l'aide de la réponse à la question **Q5** et de la figure 4, déterminer la valeur de la vitesse v de la gouttelette d'huile. Détailler la démarche.

Capteur optique

L'intensité lumineuse diffusée par une unique gouttelette étant très faible, l'utilisation d'un capteur extrêmement sensible est nécessaire. On utilise donc généralement un Channel PhotoMultiplier (C.P.M.), capable d'amplifier le signal jusqu'à cent millions de fois.

Un C.P.M. est constitué, entre autres, d'une photocathode en métal reliée à une anode par un tube. Un schéma simplifié est présenté figure 5.

Lorsqu'un photon percute la photocathode, un électron est arraché. Cet électron, accéléré par le champ électrique généré par l'alimentation du C.P.M., va entrer en collision avec les parois du C.P.M. Ces collisions auront pour effet d'arracher un ou plusieurs électrons identiques au premier, qui seront également accélérés, et ainsi de suite jusqu'à l'anode, où le signal amplifié sera mesuré.

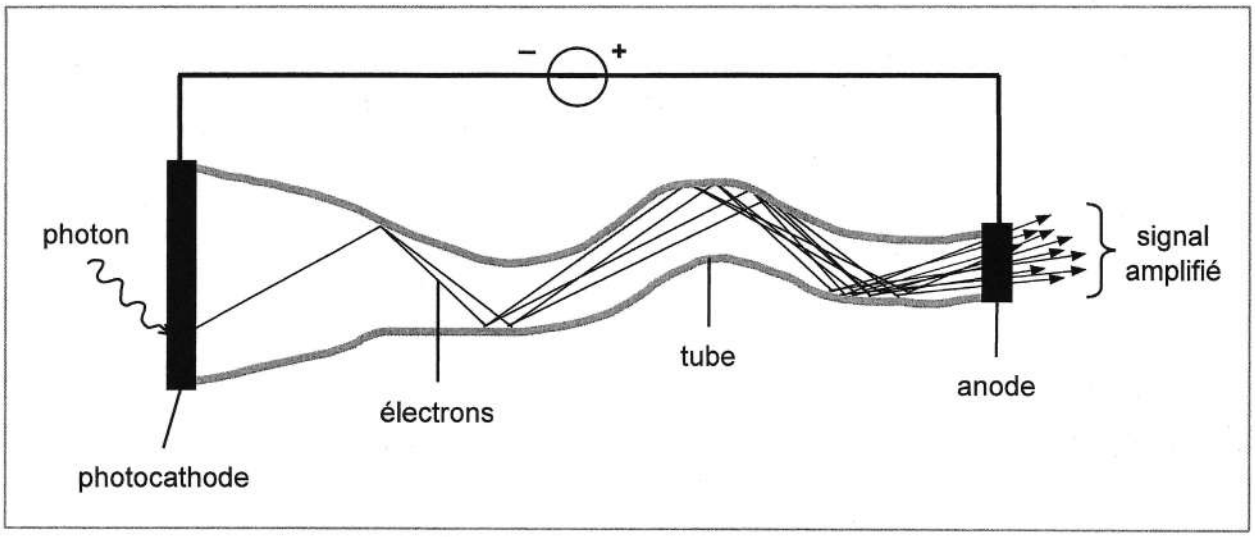


Figure 5. Schéma simplifié d'un Channel PhotoMultiplier (C.P.M.)

Q8. Rappeler le nom du phénomène ayant lieu à la photocathode et conduisant à l'émission d'un électron.

Q9. Choisir en justifiant la proposition correcte parmi les deux propositions suivantes.

Proposition A. Le champ électrique accélérant les électrons est orienté de la photocathode vers l'anode.

Proposition B. Le champ électrique accélérant les électrons est orienté de l'anode vers la photocathode.

Parmi les C.P.M. disponibles, on dispose d'un C.P.M. avec une photocathode en or.

Q10. Déterminer la valeur de la fréquence seuil ν_S de la lumière permettant d'extraire un électron de l'or.

Q11. Indiquer si ce C.P.M. peut être utilisé pour mesurer le signal diffusé par la gouttelette d'huile étudiée précédemment. On supposera que ce signal a la même longueur d'onde que le laser utilisé.

Le candidat est invité à prendre des initiatives et à présenter la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti. La démarche est évaluée et nécessite d'être correctement présentée.