

De la bougie à l'optique - Matériel et Méthodes

Charles-Alexis de Mayenne, Cyril Bonhomme, Cillian Jezequel

Comment déterminer la température d'une flamme de bougie par méthode optique?

1 Interféromètre de Michelson

1.1 Matériel et montage expérimental

L'interféromètre de Michelson servant à l'étude est constitué de:

- Un laser vert ($\lambda = 532 \text{ nm}$) d'une puissance $P = 1 \text{ mW}$.
- 2 miroirs plans montés sur supports mobiles (en uniaxial) à vis micrométriques.
- Une lame semi-réfléchissante et une lame compensatrice.
- Un collimateur de faisceau.
- Une lentille de projection ($f' = 20 \text{ cm}$).
- Un breadboard en aluminium $80 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$.
- Une bougie.

On fixe les composantes sur le breadboard selon le schéma suivant:

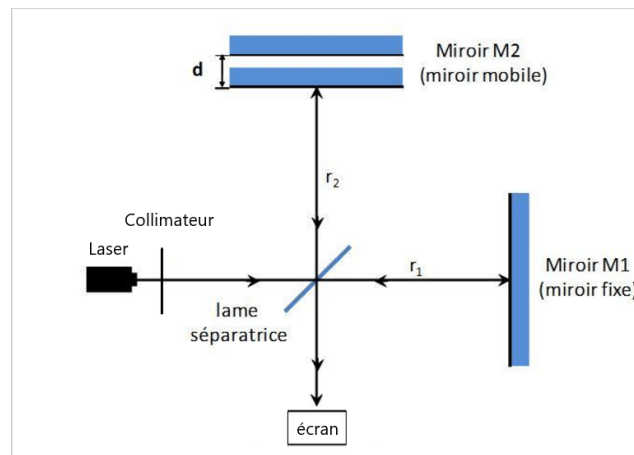


Figure 1: Schéma de principe de l'interféromètre.

La lame séparatrice est fixée sur le breadboard et les miroirs sont placés de sorte d'être à égale distance de la lame et à 90° l'un de l'autre.

Les distances sont réglées grossièrement (à la règle) dans un premier temps pour se placer proche du contact optique. La lame séparatrice et la compensatrice sont placées sur le même support et leur parallélisme est évalué en les éclairant en incidence normale par le Laser et en cherchant à superposer les images observées.

Le parallélisme des miroirs est évalué grossièrement. En plaçant le Laser sur son support, derrière le collimateur, on peut observer des anneaux d'interférence sur l'écran. On chariote le miroir M_1 jusqu'à atteindre le contact optique. Si les anneaux se déforment proche du contact optique, on règle le parallélisme des miroirs jusqu'à obtenir la teinte plate.

Le montage est ensuite configuré en coin d'air (on introduit un léger angle entre les deux miroirs M_1 et M_2) afin d'observer des franges d'interférence.

La bougie est placée entre le miroir M_2 et la lame séparatrice.

1.2 Observation, mesures et analyse

Des images de la figure d'interférence sont prises par un appareil photographique pour réaliser des traitements informatiques.

Une image du défilement des franges introduit par la bougie est comparée à une image prise sans bougie.

Pour la détermination de l'ordre de grandeur de la température de la bougie, le nombre de franges défilant est compté et la température est calculée en utilisant la loi de Clausius-Mosotti simplifiée pour un gaz que l'on considère parfait.

La seconde méthode requiert un traitement de l'image. La méthode utilisée est dérivée de celle présentée par Hervé Rabat et Charles de Izarra[2]. Le nombre de franges ayant défilé est déterminé par le nombre de maxima d'intensité perçus sur une ligne de l'image présentant la perturbation par rapport à la ligne d'une frange de l'image référence. Le profil de phase est déduit du graphe d'intensité sachant qu'à chaque nouvelle frange, un déphasage de 2π est ajouté. Une transformation d'Abel fait usage du profil de phase pour déterminer l'indice optique du milieu:

$$n(r) - n_0 = -\frac{\lambda}{2\pi^2} \int_r^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{x^2 - r^2}} \frac{d\phi(x)}{dx} dx$$

où $\phi(x)$ est la distribution de phase, λ la longueur d'onde du Laser utilisé, n_0 l'indice de l'air à pression et température ambiantes.

La température est ensuite liée à l'indice optique par la relation de Gladstone-Dale appliquée pour l'air, considéré comme un gaz parfait:

$$n(r) - 1 = \frac{K}{T}$$

avec $K = 0.082\text{K}^{-1}$ pour l'air.

2 Schlieren Classique

L'imagerie Schlieren est basée sur la déflexion des rayons lumineux traversant un gradient d'indice de réfraction dans un milieu transparent. Un tel gradient d'indice de réfraction peut être obtenu par une variation d'une condition d'expérience (variation de température, de pression, de composition du milieu). Dans des configurations classiques de Schlieren, un faisceau lumineux collimaté est dévié à travers une lame ou "couteau de Foucault", provoquant un changement d'intensité lumineuse dans la direction perpendiculaire à la lame.

2.1 Matériel et montage expérimental

Le montage est constitué de:

- Un miroir concave de focale $f' = 3$ m.
- Une caméra.
- Une lame de rasoir (filtre dans le plan de Foucault).
- Une bougie.
- Une source de lumière (LED).

- Un fer à souder thermorégulé.
- Un briquet.
- Supports pour la lame et la bougie.
- Un ordinateur avec Image J, Matlab.
- Thermocouple de type K.

Le montage réalisé comme proposé ci-dessous:

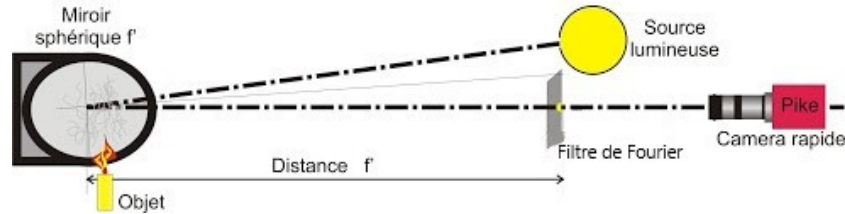


Figure 2: Schéma de principe du montage Schlieren classique

Le montage consiste en une diode placée au plan focal d'un miroir sphérique concave de focale $f' = 3\text{m}$. Un miroir parabolique serait préférable pour un meilleur stigmatisme. La LED est couverte en très grande majorité pour maximiser la ponctualité de la source. L'élément chauffant est placé le plus près possible du miroir (5 cm) pour éviter un dédoublement de l'image lié au fait que la source et la caméra ne soient pas exactement sur l'axe optique. Un masque est placé sur le plan focal image (également le plan de fourrier) pour éliminer la composante continue de notre signal et ainsi avoir un bien meilleur contraste. Enfin une caméra permet l'acquisition des données.

2.2 Observation, mesures et analyse

Nous obtenons alors en l'absence de mouvements d'air parasites, une colonne blanche partant de notre source de chaleur. Cela ne permet cependant pas de mesurer la vitesse d'ascension des volutes. Pour cela on coupe périodiquement, à l'aide d'un fil, le courant d'air chaud. Cela crée des volutes distinctes où la mesure de vitesse devient possible.

Un traitement manuel des données est possible en utilisant un logiciel comme ImageJ. Pour cela il faut sélectionner une colonne de pixels dans la colonne d'air chaud et regarder son évolution au fil du temps. Une image unique peut alors être obtenue pour retracer la position des volutes. En observant la pente, on remonte à la vitesse.

Au niveau du traitement des données, plusieurs approches sont possibles (détection des contours, transformée de fourier 2D, ...). Après une analyse rapide, toutes ces méthodes donnent des erreurs semblables. Nous sommes donc restés sur notre première solution, une approche par dérivée et corrélation, qui montre les étapes de notre raisonnement personnel pour résoudre le problème donné.

L'image initiale est initialement floutée pour éliminer les imperfections du miroir qui est une source artificielle de corrélation (une tâche sur le miroir induit une baisse de luminosité au même endroit sur les images), puis on sélectionne la colonne de pixels la plus brillante dans la colonne d'air chaud.

On réalise alors une image qui cumule cette colonne, réalisant ainsi une évolution temporelle des volutes.

Après élimination de la zone du bas, où le fil est visible en noir (cela rajoute également de la corrélation non voulue), on réalise une dérivée suivant Y de l'image (les dérivées de très faible amplitude sont prises nulles pour éviter de faire la corrélation du bruit de l'image). Cela permet de mieux distinguer les volutes et de réaliser ensuite une corrélation colonne à colonne de l'image. On remonte alors à la distance parcourue par la volute entre deux images. Avec une fréquence d'image déterminée, on peut alors remonter à la vitesse instantanée de la volute.

En cumulant plusieurs enregistrements, on améliore la précision de notre moyenne. En réalisant cette mesure avec différentes températures de fer à souder, on peut alors réaliser un étalonnage et relier la vitesse mesurée à une température de source. Et ainsi remonter à notre température de flamme.

Un lien physique peut être fait entre la température des volutes et la vitesse des volutes. Moyennant quelques approximations sur la géométrie du système et la nature du gaz, on peut écrire, par un bilan des forces en régime stationnaire [1]:

$$v^2 \sim \frac{2Vg}{C\pi r^2} \frac{\Delta T}{T_0}$$

avec V le volume des volutes, g l'accélération de pesanteur, C le coefficient de traînée, r le rayon de la volute, T_0 la température de l'air ambiant et ΔT la différence de température entre la volute et l'air ambiant.

Une mesure directe de la température de la flamme de bougie a été déterminée pour vérifier les résultats obtenus par une autre méthode. Une sonde de type K a été fixée sur un support mobile muni d'une vis micrométrique afin de balayer la flamme et déterminer la distribution de température en son sein.

2.3 Schlieren Synthétique

La version numérique de la Schlieren est appelée Background Oriented Schlieren (BOS) ou Schlieren synthétique et repose sur la Corrélation Numérique d'Image (DIC). En pratique, seul un mouchetis à l'arrière-plan de l'écoulement est imagé avec une caméra haute résolution avant et pendant le test. En comparant les deux images (ou plus précisément, en corrélant les deux motifs de manière similaire à la corrélation d'image en PIV), le déplacement local du mouchetis peut être utilisé pour fournir des informations sur les variations de l'indice de réfraction intégrées le long du trajet des rayons lumineux. Par rapport à la méthode classique de Schlieren, la BOS permet de visualiser des phénomènes d'écoulement à grande échelle et de mesurer la distorsion optique de l'écoulement sous la forme d'une carte vectorielle numérique.

Le montage est constitué de:

- Une dalle rétroéclairée.
- Une caméra.
- Un damier (carré 2 mm).
- Une bougie.

Le montage se schématise comme suit:

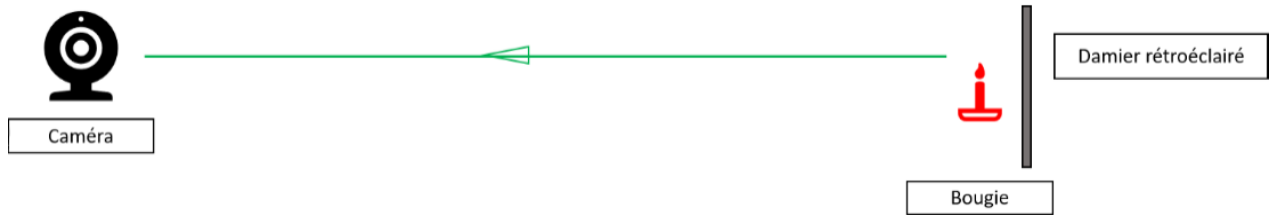


Figure 3: Schéma de principe du montage de Schlieren synthétique

La caméra est placée face au damier rétroéclairé. Une image du damier sans la bougie est prise comme référence puis la bougie est ajoutée. Le film pris est traité et les images sont corrélées par DIC. Les variations d'indice optique liées à la variation de densité du milieu sont déterminées par le déplacement local des dalles du damier par le programme de Sander[3] complété par nos programmes, disponibles dans le fichier zip joint.

Les matrices de déplacement obtenues sont mises en vidéo afin d'observer la variation d'indice temporelle (comme pour le schlieren classique permet de voir directement).

References

- [1] L.Auzémery J.Sautel G.Panel N.Taberlet, N.Plihon and T.Gibaud. Synthetic schlieren – application to the visualization and characterization of air convection. 2017.
- [2] Hervé Rabat and Charles de Izarra. Check of oh rotational temperature using an interferometric method. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 37:2371–2375, 2004.
- [3] Sander Wildeman. Real-time quantitative schlieren imaging by fast fourier demodulation of a checkered backdrop. *Experiments in Fluids*, 2017.