

Banc d'étude de la vélocimétrie doppler à laser

1 Introduction et rappels théoriques

La détermination de la vitesse en mécanique des fluides est fondamentale pour avoir une meilleure connaissance du comportement des écoulements. Une des techniques optiques les plus utilisées dans l'industrie et la recherche est la vélocimétrie laser. Elle date de 1964 (Yeh et Cummins) et utilise de fines particules comme traceurs de l'écoulement pour déterminer les vitesses locales et leurs fluctuations. La gamme des vitesses accessibles est très étendue, de quelques m/s jusqu'à des centaines de m/s. Cette méthode ne perturbe pas l'écoulement, elle nécessite seulement que le fluide soit transparent et qu'il contienne des fines particules ou gouttelettes en suspension.

L'objet de ce TP (fig.1) est de se familiariser avec les principes fondamentaux de la vélocimétrie laser. Une annexe est déposée sur la table de TP pour la démonstration des formules.

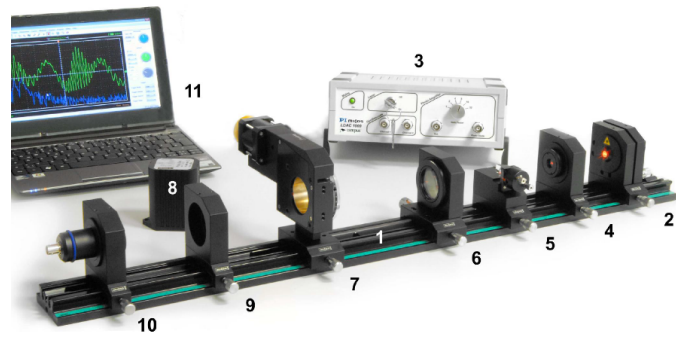


FIGURE 1 – banc d'anémométrie laser

1.1 Composition du banc

1 : Rail optique 0,8m avec échelle graduée 2 : Diode laser verte avec dispositif d'ajustement XY 3 : Alimentation diode laser 4 : Polariseur 5 : Bloc diviseur de faisceau 6 : Lentille focale 150 ou 80mm 7 : Disque tournant 8 : Contrôleur moteur pas à pas 9 : Lentille focale 100 mm 10 : détecteur Silicium 11 : Contrôle rotation moteur 12 : Oscilloscope, visualisation des signaux(pas présenté ici).

1.2 Précautions à prendre lors de la mise en oeuvre d'un laser

La diode laser verte de ce TP est un laser de classe IIIb. Elle peut provoquer des lésions irréversibles de la rétine si le faisceau direct est regardé. Quelques recommandations simples :

- Porter obligatoirement les lunettes prévues et disponibles sur la table et si les lunettes doivent être enlevées (dans le cas où l'on veut observer les franges d'interférences) suivre les indications qui suivent :
- Ne pas regarder le faisceau direct
- Ne pas regarder plus que nécessaire les réflexions du laser (se placer toujours à plus de 20cm)
- Ne pas placer les yeux à la hauteur du laser

-
- Retirer les bijoux (bagues, montre) qui pourraient réfléchir les faisceaux.

2 L'idée de base : l'effet Doppler

L'idée de départ de la vélocimétrie laser a été de dire qu'une particule en mouvement modifie la fréquence de la lumière qui l'éclaire en raison de l'effet Doppler : la source d'éclairage est un laser qui émet une fréquence optique f_0 dans le vide et se propage selon un vecteur unitaire \vec{r}_0 . La source et le photodétecteur sont fixes dans le laboratoire (fig.2), et la particule se déplace à la vitesse \vec{V} . Le photodétecteur est positionné selon la direction du vecteur \vec{r}_d .

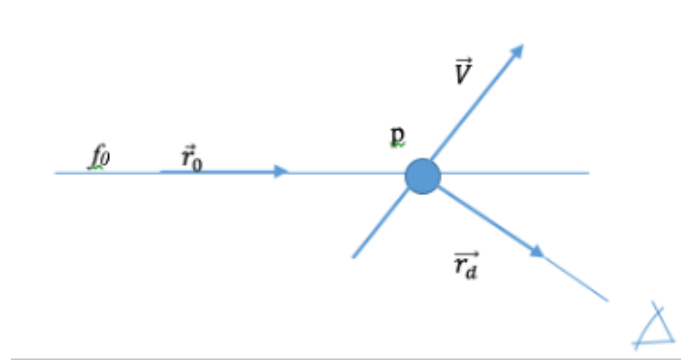


FIGURE 2 – Diagramme de la formule de base de la vélocimétrie laser "Doppler"

On peut alors montrer que le photodétecteur reçoit un signal à la fréquence f :

$$f = f_0 \left(1 - \frac{\vec{V} \cdot (\vec{r}_0 - \vec{r}_d)}{c} \right) \quad (1)$$

où c est la vitesse de la lumière. Il est donc possible d'obtenir une composante de la vitesse en mesurant la fréquence reçue par le photodétecteur. Comme le rapport $\frac{V}{c} \ll 1$, $f \sim f_0 \sim 10^{14}$ Hz, cette valeur n'est pas mesurable par des photodétecteurs usuels. De plus la formule (1) montre que la fréquence détectée dépend de la direction d'observation, ce qui pose des problèmes d'erreurs de mesure. Des montages optiques ont été créés pour s'affranchir de ces problèmes. La technique la plus utilisée est celle de "vélocimétrie à franges".

2.1 Théorie de la vélocimétrie laser à franges

Dans le cas du vélocimètre à franges, deux faisceaux issus de la même source laser donc cohérents, ayant des directions de propagation différentes \vec{r}_1 et \vec{r}_2 et faisant entre eux un angle α (ou θ) (fig.3), se croisent dans le volume de mesure V . Dans ce volume se crée alors un réseau de franges réel d'où l'appellation de cette technique "vélocimétrie laser à franges". L'interfrange i est donné par l'équation ci-dessous (cf. annexe sur table) (avec λ_0 la longueur d'onde émise par le laser) :

$$i = \frac{\lambda_0}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2)$$

Quand une particule passe au travers du réseau de franges, elle croise alternativement des franges sombres et brillantes, et diffuse donc un flux périodique, si bien que le détecteur recevant cette lumière modulée délivre un signal ayant une fréquence f : $f = \frac{V}{i}$ (3) où V est la composante de vitesse perpendiculaire aux franges. La fréquence détectée est indépendante de la direction d'observation, c'est une propriété essentielle de ce montage.

3 Dispositif d'anémométrie laser

Le banc dont nous disposons (CA-1350) permet de montrer et d'étudier le principe de fonctionnement d'un Anémomètre Laser Doppler (ALD), fig.1. Afin de générer les deux faisceaux laser et les

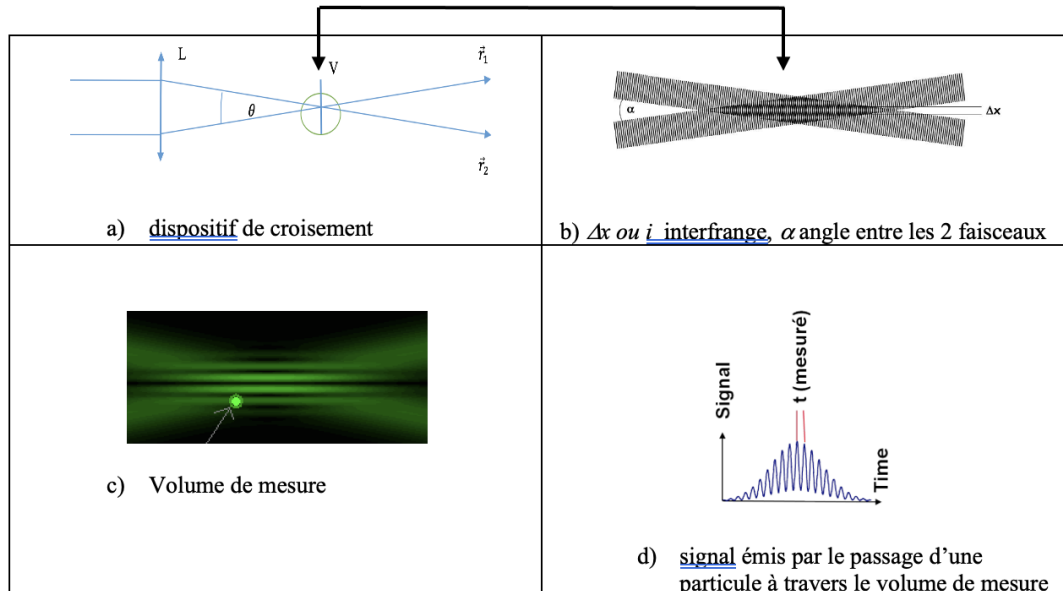


FIGURE 3 – Volume de mesure et interférences

franges, on dispose d'un ensemble d'émission composé d'une diode laser verte (2) (10 mW, $\lambda_0 = 532$ nm), d'un séparateur de faisceau (5) (jeu de miroirs qui sépare le faisceau laser en deux faisceaux cohérents, de même intensité et d'écartement variable) et d'une lentille convexe (6) (deux focales possibles : $f = 150$ mm ou $f = 80$ mm). Cette dernière permet de faire interférer les deux faisceaux pour donner naissance à un réseau de franges brillantes et sombres périodiquement espacées, fig.3. Un disque acrylique rayé (7), en rotation, est placé dans la zone de mesure, c'est-à-dire au point de croisement des deux faisceaux. Les particules de poussière collées sur la surface permettent la diffusion de la lumière. Le signal lumineux est recueilli par un objectif (9) puis focalisé sur un photodétecteur en silicium (10). Un photomultiplicateur (12) effectue la transformation du signal lumineux en signal électrique, celui-ci est amplifié puis visualisé sur un oscilloscope numérique. La traversée successive de franges brillantes et sombres (fig.3) donne un signal périodique. La détermination de sa fréquence permet de remonter à la vitesse des particules. De plus l'appréciation de la profondeur de modulation permettra de faire une conclusion semi-quantitative quant à la taille des particules.

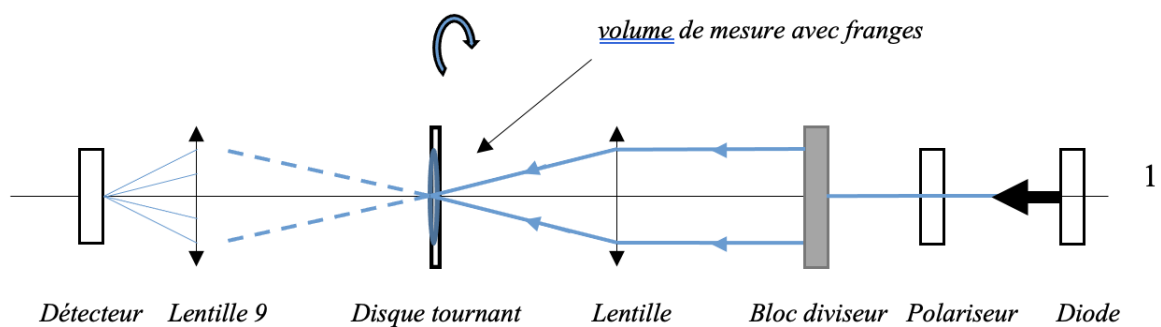


FIGURE 4 – Schéma du dispositif expérimental

3.1 Mise en place du dispositif

Le dispositif de mesure des vitesses, correspondant au kit CA-1350 (Fig.4), est déjà mis en place. Un deuxième banc est prévu pour se familiariser avec l'optique et voir l'obtention des franges, voir §4. La séance débutera par cette partie. La longueur d'onde du faisceau utilisé sur ce dispositif annexe, est de 635nm.

3.2 Visualisation des franges d'interférence

Bien lire les consignes de sécurité avant de commencer les réglages optiques !

Cette partie se fera à l'aide du dispositif annexe au kit CA-1350, l'ancien banc optique !

Le faisceau rouge issu du laser est séparé en plusieurs faisceaux par l'intermédiaire d'un réseau de diffraction. Pour cela, on utilise un disque de verre gravé de 3 pistes concentriques ce qui permet d'avoir 3 réseaux. Chacun d'eux a un pas différent permettant d'accéder à trois interfranges différents (cf annexe).

Le réseau est optimisé pour travailler sur les ordres $+1$ et -1 . L'ensemble est monté sur une platine XY qui permet de faire tourner le plan défini par les faisceaux émergents. Ne pas déplacer la platine sur le banc.

- Allumez le laser et surtout ne pas modifier sa position.
- Observez la figure de diffraction fournie par un des réseaux. En jouant sur le réglage de position horizontale (ou verticale), vous pouvez accéder aux trois pistes.
- Bien vérifier que les taches de diffraction sont alignées suivant une verticale (ou une horizontale).

3.2.1 Mise en place du module de convergence des faisceaux

Ce module est muni d'une lentille de mise en faisceaux parallèles, d'une lentille de focalisation et d'un masque supprimant les ordres indésirables générés par le réseau de diffraction. Les deux lentilles seront placées avec leur face convexe l'une vers l'autre.

Lentille de mise en faisceaux parallèles :

- Choisissez la lentille notée n°1
- Placez la première lentille par la méthode de projection des faisceaux :
- Placez la lentille de sorte que les distances mesurées entre les deux faisceaux en sortie de lentille et au loin soient égales (utilisez une feuille de papier pour visualiser les faisceaux). Le réseau est alors dans le plan focal de la lentille et les faisceaux en sortie de la lentille sont parallèles.
- Quelle est la distance focale d_1 de la lentille sélectionnée ?
- Mettez en place le masque sur cette lentille et ne laissez passer que les ordres $+1$ et -1 .

Lentille de focalisation :

Les faisceaux arrivent parallèles sur cette lentille, ils vont se combiner au point focal pour générer un réseau de franges perpendiculaires au plan qu'ils déterminent.

- A quelle distance doit-on placer cette lentille de la précédente ?
- A l'aide d'un papier calque, repérer le volume de mesure, à l'intersection des deux faisceaux.
- Quelle est la distance focale d_2 de la lentille n°2 ?

L'optique d'émission est en place, pour vérifier le réglage vous allez visualiser les franges d'interférence sur le mur en aval. Vous schématiserez sur vos comptes rendus, le dispositif mis en place.

3.2.2 Visualisation des franges d'interférence

Pour cela on utilise l'objectif de visualisation des franges.

- Placez l'objectif dans le volume de mesure et observez la projection des franges sur le mur.
- Les franges sont-elles horizontales ou verticales ?
- Retrouvez ce résultat en utilisant les transparents représentant les fronts d'ondes.
- Quelle composante de la vitesse pouvez-vous mesurer avec ce montage ?

3.2.3 Mesure de l'interfrange i

L'interfrange est fonction de l'angle α entre les faisceaux en sortie de la lentille de convergence (éq. 2).

- Mesurez l'angle entre les deux faisceaux (utilisez la projection des faisceaux sur le mur).
- En déduire l'interfrange correspondant au réseau sélectionné.

4 Mesure de l'interfrange i sur le dispositif CA-1350

- Faire les réglages nécessaires sur le banc CA-1350, afin d'obtenir un réseau de franges d'interférences. Pour cela, consulter l'annexe à disposition.
- Mesurez l'angle entre les deux faisceaux
- En déduire l'interfrange

5 Mesure de vitesse sur le disque d'évaluation

Le disque d'évaluation est un disque tournant à vitesse constante dans les deux sens. Il va permettre d'effectuer des mesures simples de vitesse de déplacement d'un solide en diffusion avant. Il sera nécessaire de mesurer la position du volume de mesure par rapport au centre du disque si on veut vérifier la vitesse en ce point par rapport à la vitesse angulaire du disque. Pour fixer une vitesse, ouvrir le logiciel PolluxTerm et voir les indications sur banc TP.

5.1 Estimation de la vitesse angulaire du disque

- Comparer la vitesse angulaire du disque fixée sur le PC (logiciel Polluxterm) avec une mesure faite à l'aide du tachymètre (celui-ci sera placé à l'avant du disque) et une mesure obtenue manuellement (en utilisant un chronomètre).
- Le diamètre du disque est de 6.5 cm, quelle est la gamme de vitesse que l'on cherche à mesurer ?

5.2 Mesures pour plusieurs vitesses de rotation angulaire

Pour plusieurs valeurs de la vitesse angulaire fixées sur l'ordinateur, déterminer la vitesse de rotation au niveau du volume de mesure (qui n'est pas la vitesse angulaire), en déterminant la fréquence du signal obtenu sur l'écran de l'oscilloscope. Il est fortement recommandé d'utiliser la fonction run/stop qui permet un arrêt sur image dès qu'un signal bien régulier apparaît. Pour plus de précision, il est possible de mesurer par exemple l'intervalle de temps correspondant à plusieurs périodes en utilisant 2 curseurs. Ou encore, en mode « acquisition », sélectionner « moyennage » et 128 moyennes. Puis passer en mode « mesures » et utiliser deux curseurs pour mesurer comme précédemment le temps correspondant à plusieurs périodes.

5.3 Changement de sens de rotation du disque

- Inverser le sens de rotation et mesurez la fréquence sur l'oscilloscope, en déduire la vitesse
- Vos mesures dépendent-elles du sens de la vitesse ?

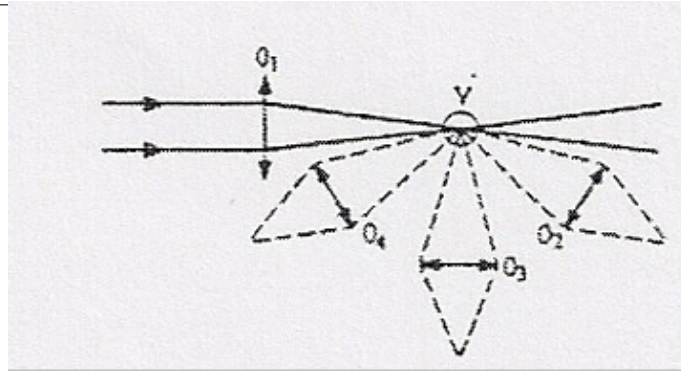


FIGURE 5 – Les trois positions pour collecter la lumière diffusée

6 Premières approches d'un signal Doppler réel (partie facultative)

6.1 Observation de la lumière diffusée

- Sur l'ancien banc optique, avec un brumisateur, observer la lumière diffusée dans 3 directions ;
- Orientez le jet sur le volume de mesure
- Observez le signal en rétrodiffusion, en diffusion avant et à 90° (figure 5)
- Dans quelle position le signal est-il le plus intense ?

Les lois de diffusion de Mie s'appliquent aux particules submicroniques de taille voisine de celle de la lumière qui les éclairent. La théorie de Mie indique que la lumière diffusée vers l'avant est maximale, que la lumière rétrodiffusée est 10^3 fois moins intense (ce qui conduit à une réduction du rapport signal sur bruit d'un facteur 30), et que finalement la lumière diffusée à 90° est minimale.

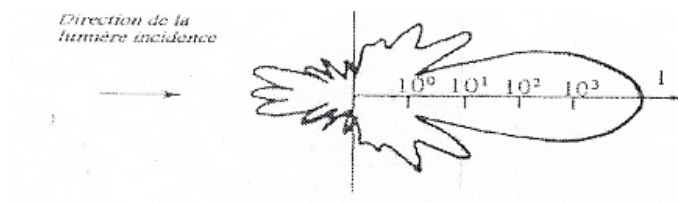


FIGURE 6 – Lumière diffusée par une particule