

Vélocimétrie laser

Sillage d'un obstacle trapézoïdal

Quelles sont les questions scientifiques ou techniques ?

Sillage derrière un obstacle non profilé.

Instabilité hydrodynamique.

Par quelles expériences y répondre ?

Expérience modèle quasi 2D dans un canal hydraulique avec un obstacle de section trapézoïdale.

Quelles techniques expérimentales ?

Injection de colorant.

Anémométrie Laser Doppler (LDA).

Comparaison avec la simulation numérique.

Quels sont les résultats ?

À vous de les montrer à travers des représentations graphiques claires.

Comment les interpréter ?

Ingrédients physiques, lois d'échelle, ajustement de courbes expérimentales : à vous de jouer !

1 Sillage derrière un obstacle trapézoïdal

Le but de cette expérience est de caractériser le sillage d'un obstacle non profilé, de section trapézoïdale. On s'intéressera particulièrement à l'instabilité du sillage qui donne lieu à l'émission régulière de tourbillons alternés. Ce type d'instabilité est utilisée dans les débitmètres dits "à émission de tourbillons".

On utilisera la visualisation par injection de colorant sur l'obstacle et la vélocimétrie laser pour connaître les profils de vitesse longitudinale (dans la direction moyenne de l'écoulement) dans le plan vertical de symétrie de l'écoulement.

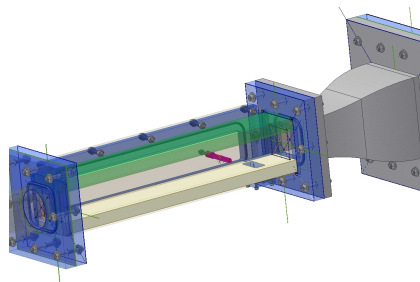


FIGURE 1 – Schéma de la section de mesure.

2 Principe de la vélocimétrie laser Doppler

La vélocimétrie laser a l'avantage de donner accès à la vitesse d'un fluide sur une gamme de quelques microns/s jusqu'à des centaines de mètres par seconde sans perturber l'écoulement. Cette méthode nécessite seulement que le fluide soit transparent et qu'il contienne des petites particules ou gouttelettes en suspension. Souvent, l'ensemencement naturel par des poussières ou des petites

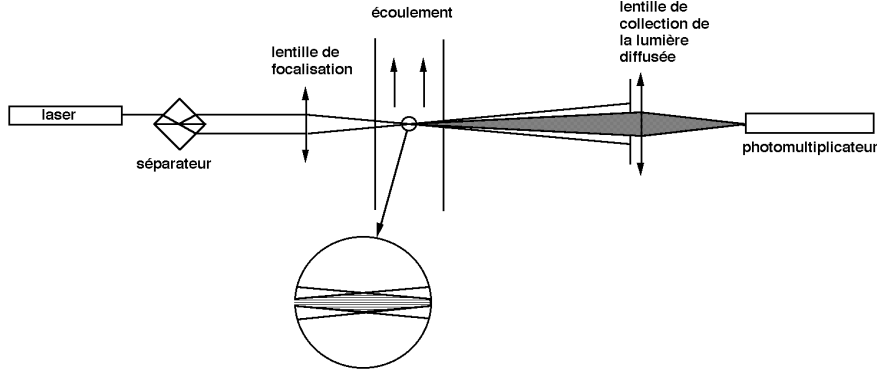


FIGURE 2 – Schéma optique du vélocimètre laser

bulles est suffisant. Dans d'autres cas, on ajoute au fluide des particules de taille contrôlée, dont la taille est de l'ordre de quelques dizaines de microns.

Le principe de la vélocimétrie laser est le suivant : on forme dans l'écoulement un système de franges d'interférence dans le volume d'intersection de deux faisceaux laser. Lorsqu'une particule en suspension dans le fluide traverse la zone de franges, elle voit alternativement des franges sombres et brillantes. La lumière diffusée par cette particule est donc modulée en intensité à une fréquence $\nu_d = V/p$ où p est le pas du réseau de franges et V la projection de la vitesse de la particule sur la normale au plan des franges. Il faut noter que c'est la vitesse des particules en suspension qui est mesurée et non celle du fluide. La mesure n'est donc fiable que si les particules suivent exactement le mouvement du fluide (en pratique ceci limite les fréquences accessibles dans les écoulements instationnaires). D'autre part, la mesure de vitesse est discontinue dans le temps, elle n'est effectuée que lorsqu'une particule est présente dans le système de franges.

2.1 Montage optique

Le montage optique ne requiert a priori pas de réglage : demandez avant d'y toucher ! Le montage optique utilisé ici comprend un laser continu (He-Ne 5 mW), un séparateur de faisceau, une lentille de focalisation (distance focale 220 mm) qui fait converger les faisceaux au point de mesure et une lentille de collection de la lumière diffusée (distance focale 140 mm) qui fait l'image du point de mesure sur le diaphragme d'entrée du photomultiplicateur (fig. 2). Lorsque les deux faisceaux sont séparés horizontalement, les franges sont orientées de manière à mesurer la composante de vitesse dans la direction moyenne de l'écoulement. En revanche, lorsque les faisceaux sont séparés verticalement, c'est la composante verticale de vitesse qui est mesurée. Le banc qui supporte les composants optiques est mobile et permet de déplacer le point de mesure sur 100 mm dans la direction de l'écoulement et sur 40 mm transversalement à l'écoulement.

Pour que l'optique soit réglée correctement, il est essentiel que l'image du point de croisement des faisceaux se trouve bien sur le petit diaphragme à l'entrée du photomultiplicateur. L'axe optique de la lentille de collection de la lumière diffusée est décalé verticalement par rapport au plan des faisceaux laser. De ce fait, on peut observer sur la face avant du boîtier du photomultiplicateur, l'image des deux faisceaux qui se présente comme une croix lumineuse. Aux extrémités de chaque branche de la croix, on voit en général des points surbrillants qui sont les images de l'intersection des faisceaux avec les parois en Plexiglas du canal. Il faut contrôler le réglage en observant le signal qui sort du photomultiplicateur (avec le logiciel Waveform ou le script Matlab **LDA-LiveVolt**) et en vérifiant qu'il présente bien les bouffées et oscillations caractéristiques. Les oscillations doivent disparaître si on obture un des deux faisceaux laser.

Afin d'effectuer la conversion fréquence Doppler/vitesse, il faut connaître le pas des franges d'interférence p . Le calcul de l'interfrange est analogue à celui des franges d'Young : si D est la distance entre les deux faisceaux laser et f est la focale de la lentille, l'interfrange est $p = \lambda f / D$.

Un autre paramètre optique important est le diamètre des faisceaux dans le plan focal de la lentille. Ce diamètre d_f est limité par la diffraction et définit la résolution spatiale de la mesure. Si d_i est le diamètre des faisceaux à l'entrée de la lentille de focalisation, les lois de la diffraction donnent $d_i d_f \approx \lambda f$.

2.2 Traitement du signal

Le signal obtenu en sortie du photomultiplicateur se présente sous forme de bouffées, chaque bouffée étant due au passage d'une particule dans le réseau de franges. A partir de ce signal, on doit extraire le temps qui sépare deux pics successifs dans une bouffée. Ce temps est l'inverse de la fréquence Doppler ν_d .

On utilise pour traiter le signal, une série de programmes sous Matlab. Le signal est récupéré par un oscilloscope USB (Analog Discovery 3, Digilent) relié à l'ordinateur. On peut aussi lire le signal à l'aide du logiciel Waveform. Sur Matlab, le script **LDA_LiveVolt** permet de lire, d'enregistrer et d'afficher le signal pendant une durée choisie. Le signal se décompose en bouffées de pics successifs correspondant au passage d'une particule dans les franges successives du motif d'interférences optiques. Pour extraire la fréquence de ces pics et donc la vitesse des particules, différents traitements du signal sont appliqués :

- numérisation : le signal analogique sortant du photomultiplicateur est digitalisé avec une fréquence d'acquisition fixée à 100 kHz pendant un temps d'acquisition au choix (10 s par exemple).
- filtrage en fréquence : connaissant approximativement la fréquence Doppler attendue, on effectue un filtrage passe bande autour de cette fréquence pour éliminer d'une part le bruit haute fréquence et d'autre part la composante continue du signal.
- extraction de la fréquence Doppler : une fois le filtrage effectué, la fréquence Doppler peut être identifiée par le pic le plus intense dans la transformée de Fourier du signal.

2.2.1 Numérisation

Nous conseillons de conserver les paramètres d'acquisition du signal. En fonction de la fréquence Doppler que l'on cherche à mesurer, il faut adapter les paramètres d'acquisition du signal : fréquence d'acquisition ν_{ac} et temps d'acquisition ($t_{ac} = 10$ s par exemple). La fréquence d'échantillonnage doit naturellement être supérieure à la fréquence Doppler (typiquement quelques kHz), mais il est inutile de choisir une fréquence trop grande. En effet, un grand nombre de données induit un long temps d'analyse du signal.

2.2.2 Filtrage

On effectue d'abord le spectre du signal pour déterminer les fréquences typiques mesurées. Le script **LDA_LiveFFT** permet de lire, d'enregistrer et d'analyser (à la fréquence de mesure $f_{me} = 10$ Hz) le signal issu du photomultiplicateur afin d'afficher en temps réel son spectre en fréquence. Le script permet donc de déterminer sur le spectre les fréquences de coupure f_{bas} et f_{haut} adéquates pour un filtre passe-bande. Le filtrage en fréquence permet d'éliminer le bruit du signal sortant du photomultiplicateur ainsi que les composantes basses fréquences.

2.2.3 Détection de la fréquence Doppler

Une fois les fréquences du passe-bande déterminées, on reproduit la transformée de Fourier sur le signal filtré afin d'y détecter la fréquence correspondant à la plus grande puissance. Le script **LDA_ExtractVelocity** analyse le signal (préalablement enregistré à l'aide des scripts **LDA_LiveVolt** ou **LDA_LiveFFT**). Il commence par demander les fréquences de coupure préalablement identifiées puis effectue la transformée de Fourier du signal brut et du signal filtré. Enfin, le pic du spectre en fréquence est identifié et converti en valeur de vitesse en tenant compte du pas

des franges d'interférence ($p = 5 \mu\text{m}$). Cette analyse peut prendre un certain temps pour des enregistrements longs (un temps d'acquisition $t_{ac} = 10 \text{ s}$ suffit généralement).

À la fin de l'analyse, le résultat est affiché sous la forme de 3 graphiques représentant le spectre du signal brut, celui du signal filtré et la vitesse extraite au cours du temps. Vous pouvez juger de la qualité du filtrage en examinant le signal filtré et son spectre en fréquence. Celui-ci doit présenter un pic bien isolé correspondant à la fréquence Doppler. L'affichage graphique permet de vérifier la bonne détection de la fréquence Doppler. Le script renvoie un vecteur temps t (en secondes) et vitesse V (en m/s) que vous pouvez utiliser pour vos analyses (analyse dynamique, histogramme, moyenne, écart-type...).

Si vous souhaitez relancer la représentation graphique d'un jeu de données, nul besoin de relancer le traitement du signal, il suffit d'utiliser le programme **LDA_DisplayVelocity**.

2.2.4 Écoulements instationnaires

Enfin, pour analyser les écoulements instationnaires, il nous faut calculer la transformée de Fourier du signal de vitesse $V(t)$. Pour cela, il est préférable de mesurer le signal avec une plus grande fréquence de mesure ($f_{me} = 25 \text{ Hz}$ par exemple). On peut tout d'abord visualiser le signal et les fréquences caractéristiques à l'aide du script Matlab **LDA_LiveFFT**. Ensuite, on peut enregistrer un signal pour une durée à choisir ($t_{ac} = 20 \text{ s}$ par exemple) à l'aide de **LDA_RecordData**. Les scripts **LDA_MakeFFT** puis **LDA_DisplayVelocity** permettent d'effectuer et de visualiser le traitement du signal et d'extraire un vecteur temps t (en secondes) et vitesse V (en m/s) que vous pouvez utiliser pour vos analyses. Si le signal $V(t)$ présente des oscillations, le script **LDA_FFTVelocity** permet d'obtenir le spectre en fréquence de $V(t)$ et d'en extraire la fréquence d'émissions des tourbillons.

3 Plomberie

Le canal comporte :

- un réservoir d'alimentation supérieur à niveau constant qui assure une surpression constante en amont.
- un réservoir inférieur où est récupérée l'eau sortant des débitmètres.
- une pompe de circulation remontant l'eau du réservoir inférieur au réservoir supérieur.
- une chambre de tranquillisation, remplie de tubes, qui permet de régulariser l'alimentation de la chambre précédent le convergent.
- la section de mesure (section $50 \times 50 \text{ mm}^2$, longueur 200 mm) dans laquelle est placé l'obstacle de 5 mm de hauteur.
- un injecteur de colorant sur l'obstacle, alimenté par un pousse-seringue.
- deux vannes pour ajuster le débit et deux débitmètres à flotteur montés en parallèle. Les débitmètres sont gradués en pourcentage du débit maximum, celui-ci étant égal à $90 \text{ cm}^3/\text{s}$ pour le petit débitmètre et $567 \text{ cm}^3/\text{s}$ pour le grand débitmètre. La position du flotteur se lit sur la partie inférieure du chapeau conique.

4 Mesures à effectuer

1- Avant de commencer les mesures quantitatives.

- Afin de comparer votre écoulement avec d'autres mesures de la littérature et en particulier avec le groupe de TP de simulation, commençons par définir les paramètres sans dimensions pertinents. Dans leur ordinateur, vos camarades n'entrent pas une vitesse en m/s, mais un nombre de Reynolds. Nous le définirons ici à partir de la hauteur h de l'obstacle : $Re \equiv Uh/\nu$, où U est la vitesse moyenne de l'écoulement. Vos camarades auront aussi besoin du confinement h/H où H la hauteur du canal.

- À l'aide de l'injection de colorant, déterminer le débit critique Q_c , et le nombre de Reynolds correspondant Re_c , où apparaît l'instabilité du sillage. Cette mesure expérimentale est-elle compatible avec les simulations numériques de vos camarades ?

2- Nous nous placerons ensuite dans le régime sans instabilité.

- À l'aide de la technique de la vélocimétrie laser Doppler, réaliser une cartographie de la vitesse sur différents plans en amont et en aval de l'obstacle, puis tracer le champs de vitesse (fonction Matlab utile : `quiver`).

- Dans un deuxième temps, on cherchera à évaluer la trainée sur l'obstacle en faisant un bilan de quantité de mouvement entre deux plans situés respectivement en amont et en aval de l'obstacle (fonction Matlab utile : `trapz`). En déduire le coefficient de trainée C_x .

3- Dans le régime d'instabilité de sillage, mesurer la fréquence f des oscillations de la vitesse à l'aide des programmes Matlab **LDA_LiveFFT**, **LDA_RecordData**, **LDA_MakeFFT**, **LDA_DisplayVelocity** et **LDA_FFTVelocity**. Relier les fréquences d'oscillations de la vitesse aux débits de fluide correspondants. Afin de comparer vos résultats à ceux de la simulation numérique, vous pouvez adimensionner la fréquence sous la forme $St = fL/U$, où L est la taille du barreau (5 mm) et U la vitesse moyenne du fluide. St est le nombre de Strouhal, qui est notamment un paramètre clé dans la compréhension de la propulsion par palmage (voir expériences récentes au PMMH). La simulation donne-t-elle des résultats en accord avec l'expérience ?

5 Scripts Matlab

5.1 Régime stationnaire

LDA_LiveVolt Visualiser le signal brut tout en enregistrant le signal (data) pendant une durée ($t_{ac} = 10$ s par exemple) avec une fréquence d'acquisition fixée à 100 kHz. Le script permet de lire, d'enregistrer et d'afficher le signal pendant une durée choisie. Le signal se décompose en bouffées de pics successifs correspondants au passage d'une particule dans les franges successives du motif d'interférences optiques.

LDA_LiveFFT Visualiser la transformée de Fourier du signal brut tout en enregistrant le signal (data) pendant une durée ($t_{ac} = 10$ s par exemple). Le script permet de lire, d'enregistrer et d'analyser (à la fréquence de mesure $f_{me} = 10$ Hz) le signal issu du photomultiplicateur afin d'afficher en temps réel son spectre en fréquence. Le script permet donc de visualiser la transformée de Fourier et de déterminer sur le spectre les fréquences de coupure f_{bas} et f_{haut} adéquates pour un filtre passe-bande.

LDA_ExtractVelocity Extraire et afficher les évolutions temporelles de la vitesse. Le script analyse le signal (préalablement enregistré à l'aide des scripts **LDA_LiveVolt** ou **LDA_LiveFFT**). Il commence par demander les fréquences de coupure préalablement identifiées puis effectue la transformée de Fourier du signal brut et du signal filtré. Le filtrage en fréquence permet d'éliminer le bruit du signal sortant du photomultiplicateur ainsi que les composantes basses fréquences. Enfin, le pic du spectre en fréquence est identifié et converti en valeur de vitesse en tenant compte du pas des franges d'interférence ($p = 5 \mu\text{m}$). Cette analyse peut prendre un certain temps pour des enregistrements longs (un temps d'acquisition $t_{ac} = 10$ s suffit généralement). À la fin de l'analyse, le résultat est affiché sous la forme de 3 graphiques représentant le spectre du signal brut, celui du signal filtré et la vitesse extraite au cours du temps. Vous pouvez juger de la qualité du filtrage en examinant le signal filtré et son spectre en fréquence. Celui-ci doit présenter un pic bien isolé correspondant à la fréquence Doppler. L'affichage graphique permet de vérifier la bonne détection de la fréquence Doppler. Le script renvoie un vecteur temps t (en secondes) et vitesse V

(en m/s) que vous pouvez utiliser pour vos analyses (analyse dynamique, histogramme, moyenne, écart-type...).

LDA_DisplayVelocity Relancer la représentation graphique d'un jeu de données. Sans relancer le traitement du signal, le script permet d'afficher la représentation graphique de l'analyse spectrale.

5.2 Instationnarité de l'écoulement

LDA_LiveFFT Visualiser la transformée de Fourier du signal brut tout en enregistrant le signal (data) pendant une durée ($t_{ac} = 10$ s par exemple). Le script permet de lire, d'enregistrer et d'analyser (à la fréquence de mesure $f_{me} = 10$ Hz) le signal issu du photomultiplicateur afin d'afficher en temps réel son spectre en fréquence. Le script permet donc de visualiser la transformée de Fourier et de déterminer sur le spectre les fréquences de coupure f_{bas} et f_{haut} adéquates pour un filtre passe-bande.

LDA_RecordData Enregistrer un signal pour une durée à choisir ($t_{ac} = 20$ s par exemple).

LDA_MakeFFT Effectuer le traitement du signal et extraire un vecteur temps t (en secondes) et vitesse V (en m/s) que vous pouvez utiliser pour vos analyses.

LDA_DisplayVelocity Visualiser le traitement du signal et l'extraction des vitesses.

LDA_FFTVelocity Obtenir le spectre en fréquence de $V(t)$ pour en extraire la fréquence d'émissions des tourbillons.

5.3 Fonctions utiles

quiver Afficher un champ de vecteur en 2D.

trapz Intégrer un profil de vitesse.

cftool Boîte à outils pour les 'fits'.