Vélocimétrie laser
Étude du 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.
Anénométrie laser Doppler (LDA).
Comparaison avec la simulation numérique.

Quels sont les résultats ?
À vous de les montrer à travers des graphes clairs.

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 connaitre les profils de vitesse longitudinale (dans la direction moyenne de l'écoulement) dans le plan vertical de symétrie de l'écoulement.

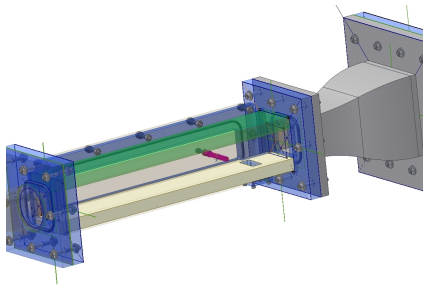


FIGURE 1 – Schéma de la section de mesure.

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

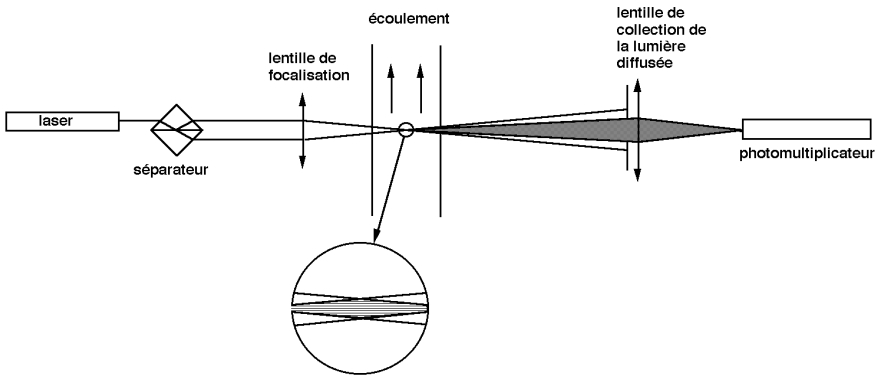


FIGURE 2 – Schéma optique du vélocimètre laser

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 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.

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 $d_i d_f \approx \lambda f$.

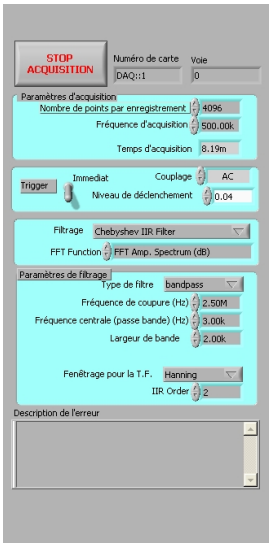


FIGURE 3 – Face avant du programme LabView pour l'acquisition du signal. Partie droite de la face avant avec les paramètres d'acquisition et de filtrage du signal.

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, un programme sous LabView. Ce dernier comporte une face avant (fig. 3, 4 et 5) qui est l'interface avec l'utilisateur et un diagramme qui est une représentation graphique des opérations effectuées sur les signaux.
Les différents traitements subis par le signal sont :

- numérisation : le signal analogique sortant du photomultiplicateur est digitalisé avec une fréquence d'acquisition (typiquement quelques centaines de kHz) et un nombre d'échantillons (typiquement 2000 à 4000) réglables.
- 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

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 nombre d'échantillons N (fig. 3). La combinaison de ces deux paramètres définit le temps total d'acquisition $\tau_{ac} = \nu_{ac} N$ à chaque itération du programme. La fréquence d'échantillonage doit naturellement être supérieure à la fréquence Doppler, mais il est inutile de choisir une fréquence trop grande. En effet, il faudrait alors choisir un nombre de points très grand pour acquérir correctement une bouffée Doppler et les calculs à effectuer sur le signal (filtrage et transformée de Fourier) prendraient trop de temps.

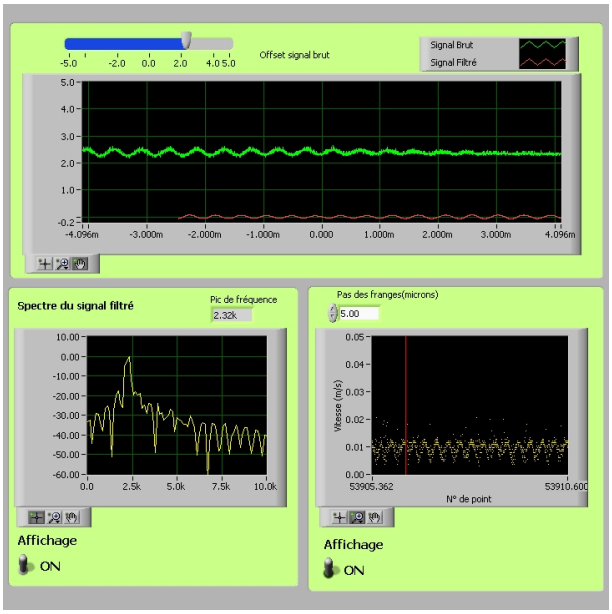


FIGURE 4 – Face avant du programme LabView pour l'acquisition du signal. Partie centrale de la face avant avec la visualisation du signal sortant du PM (signal brut) et du signal après filtrage, la visualisation du spectre en fréquence du signal filtré, la valeur du pic de fréquence et la visualisation du signal de vitesse

2.2.2 Filtrage

On effectue d'abord un filtrage en fréquence du signal issu du photomultiplicateur. Vous pouvez choisir le type de filtre (passe haut, passe bas, passe bande) et les fréquences de coupures. Vous pouvez visualiser simultanément le signal brut et le signal filtré (fig. 4). Le filtrage en fréquence permet d'éliminer le bruit du signal sortant du photomultiplicateur ainsi que les composantes basses fréquences.

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.

2.2.3 Détection de la fréquence Doppler

Une fois le signal filtré, on recherche dans la transformée de Fourier la fréquence correspondant à la plus grande puissance. Cette fréquence est suivie au cours du temps. À la fin de chaque acquisition, le pic dans la transformée de Fourier est identifié et converti en valeur de vitesse en tenant compte du pas des franges d'interférence. Un graphe déroulant (fig. 4) affiche la valeur de la vitesse qui est mesurée à chaque acquisition. Attention, dans ce graphe l'abscisse ne représente pas le temps. En effet, la vitesse du fluide n'est mesurée qu'après la succession d'opérations suivantes :

— arrivée d'un signal excédant le niveau de déclenchement fixé
— acquisition de N points au taux d'acquisition demandé
— filtrage et transformée de Fourier du signal

L'histogramme des vitesses, leur valeur moyenne et leur écart type s'affiche sur la partie gauche de l'écran (fig. 5).

Vous pouvez sauvegarder sur un fichier les valeurs de vitesse (moyenne et écart type) ainsi que la position correspondante du point de mesure (vous devez rentrer les coordonnées dans les indicateurs correspondant). Ce fichier texte contient quatre colonnes (coordonnées x, y, valeur moyenne, écart type) séparées par des tabulations. Pour visualiser le champ de vitesse, vous pouvez utiliser le logiciel Igor et une procédure adaptée au format du fichier.

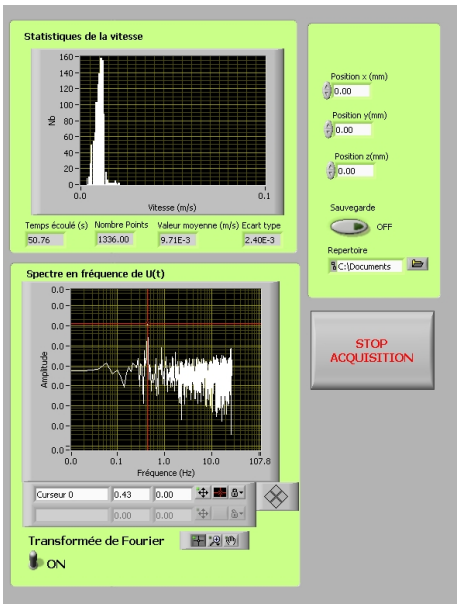


FIGURE 5 – Face avant du programme LabView pour l'acquisition du signal. Partie gauche de la face avant.

Enfin, pour analyser les écoulements instationnaires, on calcule la transformée de Fourier du signal de vitesse $v(t)$. Il faut pour cela cliquer sur "ON" avant de lancer l'acquisition.

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 tranquilisation, remplie de tubes, qui permet de régulariser l'alimentation de la chambre précédent le convergent.
- la section de mesure (section 50 x 50 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 90cm^3/s pour le petit débitmètre et 567cm^3/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 sous Igor à l'aide de la macro LDA.

— 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 sous Igor. 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 du programme sous Labview et les relier 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 par exemple les expériences récentes réalisées au laboratoire PMMH : http ://www.pmmh.espci.fr/ ?Swimming-and-Flying
La simulation donne-t-elle des résultats en accord avec l'expérience ?