

TP Écoulement turbulent entre plaques parallèles

1 Présentation et objectifs

Ce TP apporte une illustration des notions vues dans le cours "Introduction aux Écoulements Turbulents", notamment celles vues dans le chapitre dédié aux écoulements contraints par la présence de parois. Nous nous intéresserons ici au cas académique d'un écoulement turbulent entre deux plaques parallèles, entretenues par un gradient de pression. Cette étude sera aussi l'occasion de se familiariser avec l'anémométrie par fil chaud. Cette technique de mesure est fréquemment utilisée pour analyser des écoulements turbulents, car elle autorise une très bonne résolution temporelle de la vitesse, de l'ordre de 50 kHz, donnant ainsi un accès à la vitesse instantanée.

2 Dispositif expérimental

2.1 L'installation

L'installation expérimentale est constituée d'un canal horizontal en Plexiglas transparent de 6 m de long, de 60 cm de large et de 51 mm d'épaisseur (voir le schéma de la figure 1). Elle est alimentée par une soufflerie constituée par un ventilateur centrifuge équipé d'une roue garnie d'aubes qui peut fournir un débit volumique (pression normale) de 2800 m³/heure sous 100 mm de pression totale, à une vitesse de rotation maximale de 2800 tr/min ; la puissance absorbée est alors à 1,5 kW. La vitesse maximale atteinte dans le canal est de l'ordre de 25 m/s. La soufflerie est alimentée par un moteur à courant continu pouvant délivrer une puissance de 3 kW à 4100 tr/min. L'alimentation du moteur se fait par un générateur de courant continu commandé par un potentiomètre réglable continûment. Il est impératif de ne pas afficher une consigne supérieure à 7/10 tours du potentiomètre, car ce réglage correspond à la vitesse de rotation maximale admissible de 2800 tr/min du ventilateur. L'entrée du canal est constituée par un convergent de fort rapport de section (12 :1) précédé d'une grille fine (mailles de 1 mm) utilisée pour briser les grosses structures turbulentes en sortie du ventilateur. Il a été vérifié que l'écoulement dans la section d'entrée du canal est ainsi uniforme sur toute la section et sans turbulence notable.

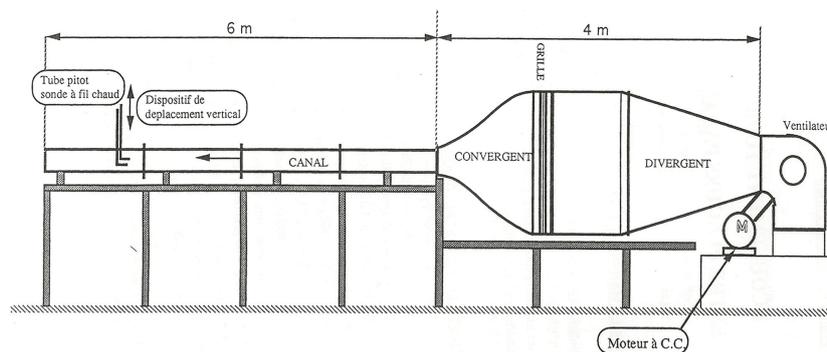


FIGURE 1 – Schéma de l'installation expérimentale.

2.2 Moyens de mesure

L'ensemble du canal est instrumenté afin de réaliser des mesures de pression ainsi que des mesures de vitesse dans la section de mesure qui se situe à 4,80 m de l'entrée.

2.2.1 Instrumentation

- une chaine anémomètre file chaud (CTA)
- un tube de Pitot (en parallèle avec la sonde fil chaud)
- un porte-sondes à déplacement muni d'un moteur pas à pas qui permet de déplacer verticalement dans l'écoulement le tube de Pitot et la sonde a fil-chaud
- 9 prises de pression à la paroi
- un micro manomètre de précision pour la mesure des pressions(gaz) différentielles. Il possède cinq gammes qui permettent une mesure précise des pressions exprimées en hauteur équivalente de colonne d'eau (CE) comprise entre 100 mm CE (échelle 100%) jusqu'à 1 mm CE (échelle 1%) soit une résolution maximale de 0,01 mm CE (0,1 Pa)
- un oscilloscope (pour vérification de l'acquisition par PC)

2.2.2 Anémomètre fil chaud

La chaine anémométrique est constituée principalement par :

- une sonde anémométrique constituée par un fil de tungstène. Pour ce TP deux types de sondes sont à disposition : Une "droite" et une à "45° " (voir plus bas).
- un anémomètre a température constante Dantec miniCTA
- un PC avec carte de conversion analogique numérique (de dynamique 0-10 V) qui permet d'acquérir le signal échantillonné en fréquence.

2.2.3 Dispositif de mesure de pression statique

Le canal est équipé de 9 prises de pression sur la paroi supérieure. Les tubes sont à connecter individuellement au micro manomètre pour la mesure des pressions différentielles. Leurs positions repérées à partir de l'entrée du canal sont données dans le tableau 1.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x (en m)	0,3	1	1,7	2,3	3	3.7	4.3	5	5.7

TABLE 1 – Position des prises de pression statiques. La distance en mètre est comptée à partir de l'entrée du canal.

2.2.4 Déplacement et acquisition

Le moteur de déplacement vertical des sondes ainsi que l'acquisition est contrôlé sous Matlab avec une interface GUI. Cette interface permet de :

- positionner verticalement la sonde à fil chaud et le tube de Pitot (attention, l'origine $y = 0$ est sur la paroi supérieure)
- Déterminer les paramètres d'acquisition : fréquence (Hz) et la durée (s)
- relever directement la tension moyenne sur l'écran (et l'écart type) : utilisé uniquement pour l'étalonnage ou la détermination de vitesse critiques (section 3.2).
- de déclencher l'acquisition du signal de sortie de la chaine anémométrique. Les données de chaque acquisition sont stockées sous format `.mat` dans le répertoire `Données_étudiants` sous le nom de Valeurs tensions `yy.mat` ; `yy` étant la position y de la sonde. Utiliser pour calculer les profils des vitesses moyennes et leurs statistiques turbulentes (section 4).

2.3 Mesure au fil chaud

le principe de l'anémométrie à fil chaud consiste à mesurer la puissance transférée depuis un fil fin chauffé par effet Joule et refroidi par le passage du fluide. La mesure de la puissance emportée par le fluide donne donc une mesure indirecte de la vitesse de l'écoulement.

Ses points faibles sont sa fragilité et (dans la configuration la plus simple) la limitation de la mesure à une seule composante de la vitesse en un seul point de mesure ainsi que le fait que c'est une mesure intrusive (l'introduction de la sonde dans l'écoulement perturbe celui-ci).

La puissance injectée dans le fil par effet Joule est mesurée par la loi d'Ohm ($P(t) = R_w I(t)^2$). La résistance du fil chaud (généralement du platine ou du tungstène) dépend principalement de sa température. Ainsi la mesure de la résistance du fil permet de connaître sa température. L'anémomètre est constitué d'un montage électronique permettant de maintenir la résistance du fil chaud constante : si la résistance baisse, l'intensité parcourant le fil chaud augmente afin de générer un effet joule plus important et d'augmenter ainsi la température du fil chaud. On peut ainsi considérer que la température du fil chaud est constante. En général celle-ci est maintenue autour de $220^\circ C$. Le fil chaud est donc en équilibre thermique et la puissance injectée est alors égale à la puissance échangée avec l'environnement. Cette dernière est due aux échanges par conduction avec le support et avec l'air ambiant, aux échanges radiatifs et aux échanges convectifs. Seul ce dernier mode d'échange de chaleur dépend de la vitesse. Par ailleurs King a proposé que le nombre de Nusselt d'un barreau dans un écoulement laminaire dépende du nombre de Reynolds de la façon suivante :

$$Nu = 1 + \sqrt{2\pi Re}$$

avec $Re = Ud/\nu$ et $Nu = hd/k_f$. Grâce à cette loi, on peut a priori écrire la relation entre la tension aux bornes de l'anémomètre, E , et la vitesse de l'écoulement comme :

$$E = A + BU^n$$

où les coefficients A , B et n doivent être déterminés de façon expérimentale (voir procédure de calibration §3.2). Ces coefficients dépendent fortement de la température ambiante et de celle du fil chaud.

L'anémomètre à fil chaud retourne uniquement une information pouvant être reliée à l'amplitude de la vitesse, mais aucune information concernant sa direction. Le refroidissement du fil chaud est principalement assuré par les composantes de vitesse perpendiculaire à celui-ci, alors que la composante tangentielle au fil ne contribue que très peu. On fera donc l'hypothèse que seule la composante normale est mesurée par l'anémomètre.

Le banc peut être équipé de deux sondes : l'une droite, l'autre dite à 45° *circ*. Demander à votre encadrant quelle sonde équipe le banc. La sonde droite sera donc essentiellement sensible à la composante longitudinale de la vitesse. Alors que la seconde sera sensible aux composantes selon les directions x et y (voir le schéma de la figure 2) et permettra après traitement d'obtenir des statistiques des composantes longitudinales et normales à la paroi (voir plus bas).

3 Acquisitions

3.1 Préliminaires

1. Créer un répertoire pour votre groupe dans D : /TP-B004/Données-étudiants/. Ne pas mettre d'espaces ou caractères spéciaux dans les noms de répertoires ou fichiers.
2. Ouvrir Matlab (attention le programme de contrôle nécessite la version 2011) et placer vous le répertoire précédemment créé.

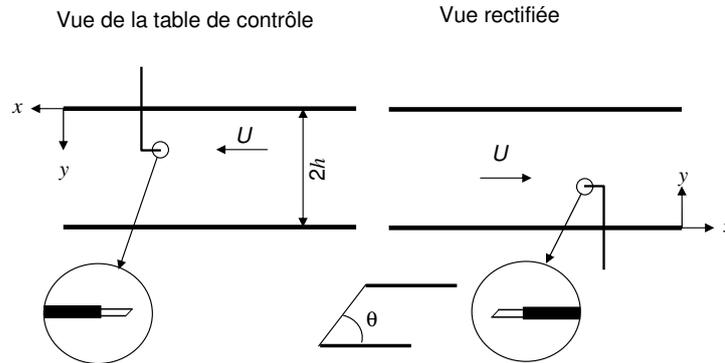


FIGURE 2 – Schéma de la position de la sonde, définition des coordonnées et angle de la sonde.

3. Executer dans Matlab la commande `addpath('D:/TP-B004/Progra')` afin d'ajouter le répertoire D:/TP-B004/Progra dans les chemins d'accès ;
4. Executer le programme de contrôle de déplacement et d'acquisition en tapant `run Test_Ise1_IT116_4`. Attention : Version `Test_Ise1_IT116_4.m` : le zéro affiché correspond à une position de 3 mm de la paroi supérieure

3.2 Etalonnage de la sonde à fil chaud

Comme présenté plus haut, nous devons calibrer le fil chaud afin d'être en mesure de relier la vitesse de l'écoulement à la tension délivrée par le fil chaud. Pour obtenir cette loi de calibration vous utiliserez le tube de pitot qui est fixé à côté de la sonde fil chaud. Du fait de la piètre réponse fréquentielle d'une sonde de Pitot, on considérera que celle-ci donnera accès uniquement à la moyenne temporelle de la vitesse de l'écoulement. Après avoir placé approximativement la sonde au centre de la veine, nous allons mesurer simultanément la vitesse (moyenne) donnée par le fil chaud et la tension moyenne de l'anémomètre à fil chaud. Ces mesures simultanées tension/vitesse seront répétées pour toute une gamme de réglage de la vitesse de rotation du ventilateur, afin d'avoir une gamme de vitesse \bar{U} (moyenne temporelle de U) allant d'environ 0,5 m/s à 12 m/s (environ 20 points).

1. Mesurer la vitesse \bar{U} à l'aide de la sonde de Pitot ;
2. Mesurer la tension \bar{E} correspondante. \bar{E} est la moyenne temporelle de E calculée sur une durée d'une dizaine de 10 secondes.
3. Déterminer par la méthode des moindres carrés les coefficients de la loi de King donnée ci-dessous :

$$\bar{U} = A + B\bar{U}^n \quad (1)$$

On pourra utiliser la fonction `basic fitting` dans les outils de la figure du plot, ou utiliser un programme adapté du TP "introduction à l'optimisation" pour déterminer les coefficients A , B et n . A priori $n \approx 0.5$ et A est donnée par la tension mesurée en l'absence d'écoulement. On vous fourni un programme Matlab permettant de déterminer les coefficients de la loi de King à partir de la série de mesure de \bar{E} et \bar{U} . Ce programme est nommé "`calibration_fc.m`", vous le trouverez sur le site Moodle du cours "introduction aux écoulements turbulents". Pour l'utiliser entrée la commande suivante dans matlab :

```
param_calibration = calibration_fc(E,U)
```

où les vecteurs $\mathbf{E} = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_n]$, $\mathbf{U} = [U_1 \ U_2 \ \dots \ U_n]$ seront préalablement définis à partir de vos mesures de tension et vitesse moyenne respectivement

4. commenter la courbe $E = f(U)$ que obtenez ainsi que l'accord avec la loi de King avec les paramètres obtenus.
5. A partir de la visualisation du signal de tension sur l'oscilloscope, déterminez la valeur de la vitesse et le nombre de Reynolds correspondant à la transition laminaire-turbulent. Pensez à bien commenter et expliquer votre procédure.

3.3 Mesure des profils de vitesses moyennes et statistiques turbulentes

Régler la soufflerie de manière à ce que la vitesse sur l'axe soit de l'ordre de 10 m/s.

1. Mesurer la répartition longitudinale de pression moyenne dans le canal à l'aide du manomètre. Tracer $P(x)$ et déterminer le gradient de pression moyen (vous pourrez pour cela utiliser une régression linéaire).
2. Pour chaque position y donnée par le tableau, 2 réalisez une acquisition du signal de tension $E(t)$. Chaque série temporelle $E(t)$ doit contenir au moins 10000 points échantillonnés à 1000 Hz. Faites l'acquisition numérique du signal grâce au programme `Test_Ise1_IT116_4`. qui sauvegarde les données dans un fichier `Valeurs_tensions_XX.mat` avec `XX` la position de la sonde en millimètre lors de la prise de mesure. Ainsi à l'issue de cette série de mesure vous devez avoir 21 fichiers de résultats `.mat` qu'il conviendra de traiter.

y (en mm)	-0.5	0	1	3	5	8	11	14	17	20	22.5
y (en mm)	45.5	45	44	42	40	37	34	31	28	25	-

TABLE 2 – Position des mesures symétriques de vitesse. Attention, les valeurs du tableau sont les valeurs affichées à l'écran y_{aff} . La position réelle est $y = y_{aff} + 3mm$ avec $y = 0$ à la paroi supérieure.

4 Exploitation et analyse

4.1 Préliminaire

Cette partie est facultative si le banc de TP est équipé d'une sonde droite. Elle est en revanche indispensable si c'est une sonde à 45°

On note le vecteur vitesse instantanée $\vec{U} = U\vec{e}_x + V\vec{e}_y$ et on se place dans la configuration représentée sur la figure 2.

1. Montrer que la composante de la vitesse instantanée et perpendiculaire au fil incliné (Q_\perp), s'exprime comme

$$Q_\perp = U \sin \theta - V \cos \theta$$

2. Montrer que la vitesse mesurée s'exprime comme :

$$U_1 = \sqrt{2}/2(U - V)$$

3. En utilisant les propriétés de symétrie de l'expérience, montrer qu'une mesure effectuée en $2h - y$ avec une sonde à 45° est équivalente à une mesure effectuée en y avec une sonde à 135°. Faire un schéma pour illustrer et argumenter.

4. Montrer que la vitesse mesurée par cette sonde à 135° (virtuelle) s'exprime comme :

$$U_2 = \sqrt{2}/2(U + V)$$

5. Calculer $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \overline{u'^2}_1$ et $\overline{u'^2}_2$ ($u'_i = U_i - \bar{U}_i$) à partir des signaux de tension délivrée par le fil chaud E_1 et E_2 et de la loi de King.
6. En déduire que les deux mesures symétriques par rapport à l'axe du canal (E_1 et E_2) permettent d'obtenir le champ des vitesses moyennes \bar{U} et \bar{V} ainsi les tensions de Reynolds, $\overline{u'^2} + \overline{v'^2}$ et $\overline{u'v'}$.

4.2 Calculs des statistiques bruts

Les post-traitements envisageables dépendent du type de sonde qui équipe le banc de TP : sonde droite ou à 45° circ.

4.2.1 Sonde droite

Vous pourrez utiliser le programme matlab "get_stat_HW_kinglaw_sonde_droite.m" également disponible sur le site moodle du cours afin d'obtenir le profil de la vitesse longitudinale moyenne $\bar{U}(y)$ et de la variance de la vitesse longitudinale $\overline{u'^2}(y)$ à partir des séries temporelles acquises précédemment aux différentes positions.

La syntaxe est la suivante :

```
[U_mean U_var y] = get_stat_HW_kinglaw_sonde_droite(param_calibration)
```

où l'argument `param_calibration` est le vecteur contenant les paramètres de la loi de King obtenue grâce à la procédure de calibration.

4.2.2 Sonde à 45° circ.

Vous pourrez utiliser le programme matlab "get_stat_HW_kinglaw_sonde_45.m" également disponible sur le site moodle du cours afin d'obtenir le profil de la vitesse longitudinale et normale moyenne $\bar{U}(y)$ et de grandeurs suivantes $\overline{u'^2}(y) + \overline{v'^2}(y)$ et $\overline{u'v'}(y)$ à partir des séries temporelles acquises précédemment aux différentes positions.

La syntaxe est la suivante :

```
[V_fc_1_mean V_fc_2_mean V_fc_1_var V_fc_2_var]=get_stat_HW_kinglaw_sonde_45(param_calibrat
```

où l'argument `param_calibration` est le vecteur contenant les paramètres de la loi de King obtenue grâce à la procédure de calibration.

Calculer alors $\bar{U}, \bar{V}, \overline{u'^2} + \overline{v'^2}$ et $\overline{u'v'}$ en fonction de la distance y à la paroi (sur la demi-largeur du canal) ;

4.3 Frottement de paroi

1. Effectuer un bilan de quantité de mouvement sur un domaine fixe compris entre deux sections distantes de Δx . En déduire la relation entre la contrainte pariétale τ_0 (contrainte visqueuse à la paroi $\rho\nu\partial\bar{U}/\partial y|_{y=0 \text{ ou } 2h}$) et le gradient longitudinal de pression $\Delta P/\Delta x$. (Ce bilan a été traité dans le cours)
2. En déduire la valeur numérique de τ_0 .
3. à partir de τ_0 , calculez la vitesse de frottement u_* (voir la définition de u_* dans le cours si nécessaire)
4. Déterminer également la longueur de frottement ℓ_* (voir la définition de ℓ_* dans le cours si nécessaire)

5. Le frottement est caractérisé par le coefficient de frottement λ (de Darcy) défini par :

$$\Delta P / \Delta x = \lambda \frac{1}{2} \rho U_m^2 \frac{1}{D_H}$$

où $D_h = 4h$ est le diamètre hydraulique et U_m la vitesse débitante moyenne. On a la relation suivante $\lambda = 4C_f$ avec $C_f = \tau_0 / 1/2 \rho U_m^2$

Déterminer la dimension de λ et calculer sa valeur.

6. Comparer la valeur de λ à la loi semi-empirique (voir cours) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log Re_{D_H} \sqrt{\lambda} - 1.19$$

4.4 Ecoulement moyen

Tracer le profil de $\bar{U}(y)$ et comparer avec la loi logarithmique de la vitesse. Discuter de la validité de la loi logarithmique au regard de cette comparaison.

Pour rappel, dans le cours nous avons obtenu que la loi logarithmique prévoit que la vitesse moyenne augmente comme le logarithme de la distance à la paroi pour $\ell_* \ll y \ll h$:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \log y^+ + B$$

avec $u^+ = \bar{U}/u_*$ et $y^+ = y/\ell_*$ et les constantes $\kappa \approx 0.4$ et $B \approx 5$

Si le banc est équipé de la sonde à 45° : tracer également le profil de la vitesse verticale moyenne $\bar{V}(y)$ et commenter.

4.5 Intensité turbulente

- Si le banc est équipé de la sonde droite : tracer le profil de la variance de la vitesse longitudinal $\overline{u'^2}(y)$ et commenter l'allure de la courbe
- Si le banc est équipé de la sonde à 45° : tracer le profil de la quantité $\overline{u'^2} + \overline{v'^2}$ et commenter l'allure de la courbe

Par quelles quantités vous pouvez normaliser ces courbes ?

4.6 Frottement turbulent

Les tensions de Reynolds $-\rho \overline{u'v'}$ agissent comme une contrainte supplémentaire due à la turbulence. La contrainte totale τ_{tot} est la somme du terme de frottement visqueux $\tau_\nu = \rho \nu d\bar{U}/dy$ et du terme de frottement turbulent $\tau_{turb} = -\rho \overline{u'v'}$:

$$\tau_{tot} = \tau_\nu + \tau_{turb} = \rho \nu \frac{d\bar{U}}{dy} - \rho \overline{u'v'}$$

où ν et ρ sont respectivement la viscosité cinématique et la masse volumique du fluide. Pour l'écoulement entre les deux parois parallèles on a montré dans le cours que

$$\tau^{tot} = \tau_0 (1 - y/h)$$

- Si le banc est équipé de la sonde à 45° : tracer τ^{tot}/τ_0 , τ_ν/τ_0 et τ^{turb}/τ_0 en fonction de y/h , et comparer aux résultats théoriques. Identifier les différentes couches/zones de l'écoulement.
- Si le banc est équipé de la sonde droite : vous ne pouvez pas mesurer ces quantités

4.7 Viscosité turbulente

La viscosité turbulente ν_{turb} est définie par :

$$\tau_{turb} = -\rho \overline{u'v'} = \nu_{turb} \frac{d\bar{U}}{dy}$$

Dans la région où la loi logarithmique est vérifiée, on trouve alors que :

$$\nu_{turb} = \kappa u_* y$$

Si le banc est équipé de la sonde à 45° : Comparez le profil de ν_{turb} obtenu par ce modèle avec celui mesuré.