

# Écoulement turbulent entre plaques parallèles

(version du 3 décembre 2012)

## 1 Présentation et objectifs du TP

Ce TP a pour but d'illustrer les notions sur les notions de couches limites introduites dans le cours de turbulence (NHC42 Introduction à la turbulence). Nous nous intéressons ici au cas prototype d'un écoulement turbulent entre deux plaques parallèles, entretenue par un gradient de pression.

Pour cette étude nous utiliserons l'anémométrie par fil chaud, une technique de mesure très utilisée dans l'analyse des écoulements turbulents car elle permet de bien résoudre temporellement les vitesses instantanées. En fonction du nombre de fils de la sonde et de leur agencement géométrique, cette technique donne accès aux profils de vitesses moyennes ainsi qu'à des grandeurs caractéristiques de la turbulence comme l'énergie cinétique turbulente, les composantes du tenseur de Reynolds. Les fils chauds les plus courants permettent de mesurer une ou deux composantes de la vitesse. Nous utiliserons une sonde droite dont l'angle du fil à est à  $45^\circ$  ce qui permet de résoudre les tensions de Reynolds avec un seul fil en exploitant les conditions de symétrie de l'écoulement.

## 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. Elle est alimentée par une soufflerie constituée par un ventilateur centrifuge E.C.L. (type NJ) équipé d'une roue garnie d'aubes qui peut fournir un débit volumique (pression normale) de  $2800 \text{ m}^3/\text{heure}$  sous 100 mm de pression totale, à une vitesse de rotation maximale de 2800 tr/min ; la puissance absorbée correspond 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 (C.E.M.) 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 10 tours réglable continûment. Il est impératif de ne pas afficher une consigne supérieure à 7 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 de la soufflerie. L'écoulement dans la section d'entrée du canal est ainsi parfaitement uniforme sur toute la section et sans turbulence notable (après vérification).

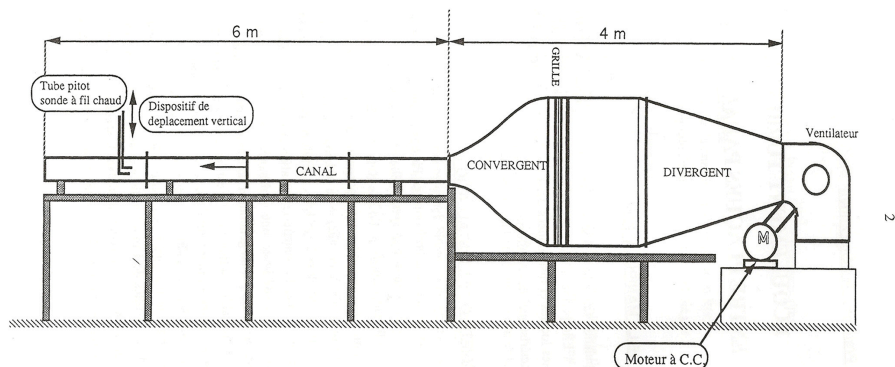


FIGURE 1 – Schéma de l'installation expérimentale.

## 2.2 Moyens de mesure

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

### 2.2.1 Instrumentation

- une chaîne anémométrique
- 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 à 45° ;
- 9 prises de pression
- 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 équivalent de colonne d'eau (CE) comprises entre 100 mm CE (échelle 100% ) jusqu'à 1 mm CE (echelle 1% ) soit une resolution maximale de 0,01 mm CE (0,1 Pa) ;
- un oscilloscope ;
- un voltmètre intégrateur pour l'obtention de la moyenne temporelle des signaux analogiques (Dantec 56N22) (pour vérification de l'acquisition par PC) ;

### 2.2.2 Chaîne anémométrique à fil chaud

La chaîne anémométrique anémométrique est constituée principalement par :

- une sonde anémométrique constituée par un fil de tungstène faisant un angle de 45° par rapport a la direction moyenne de l'écoulement ;
- un anémomètre a température constante ( Dantec 56C17 ) ;
- un linéarisateur analogique (Dantec 56N21 ) ;
- 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 a sonde à fil chaud et le tube de pitot ( **attention, l'origine  $y = 0$  est sur la paroi supérieure**, voir figure 2 ;
- déterminer les paramètres d'acquisition : fréquence (Hz) et la durée (s)
- relever directement la tension moyenne sur l'écran (et l'écart type) : **Utiliser uniquement pour l'étalonnage ou la détermination de vitesse critiques** (section 3.2).
- de déclencher l'acquisition du signal sortie de la chaîne anémométrique (tensions instantanées linéarisées). 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 leur statistiques turbulentes** (section 3.4).

## 2.3 Réponse de la sonde à fil chaud

La sonde à fil chaud se constitue d'un fil de tungstène faisant un angle  $\theta = 45^\circ$  par rapport à sa tige de support qui est alignée, le mieux que possible, avec la direction moyenne de l'écoulement. La sensibilité de

la sonde à la composante de la vitesse instantanée et parallèle au fil ( $Q_{\parallel}$ ) est environ 10% de la sensibilité de la sonde à la composante de la vitesse instantanée et perpendiculaire au fil ( $Q_{\perp}$ ), du fait d'un transfert de chaleur moins efficace. La composante  $Q_{\parallel}$  est généralement négligée et on supposera donc que le fil ne répond qu'à la composante du vecteur de vitesse perpendiculaire au fil chaud,  $Q_{\perp}$ . De plus, grace au dispositif de linéarisation la relation entre la tension et  $Q_{\perp}$  est affine :

$$E = K'Q_{\perp} + B. \quad (1)$$

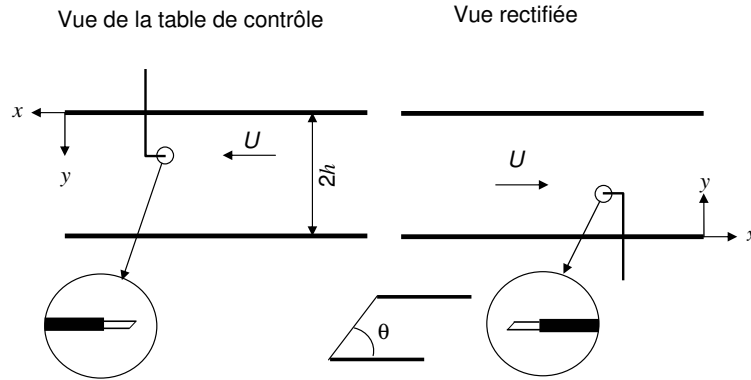


FIGURE 2 – Schéma de la position de la sonde, définition des coordonnées et angle de la sonde.

### 3 Acquisitions

#### 3.1 Préliminaires

1. Créer un répertoire pour votre groupe dans  $D : /TP-B004/Données-étudiants/$ . Ne JAMAIS mettre des espaces ou caractères spéciaux dans les noms de répertoires ou fichiers.
2. Ouvrir Matlab et placer vous le répertoire précédemment créé.
3. exécuter dans la Matlab la commande `addpath('D:/TP-B004/Progra')` afin d'ajouter le répertoire  $D : /TP-B004/Progra$  dans les chemins d'accès ;
4. Exécuter le programme de controle de déplacement et d'acquisition en tapant `Test_Ise1_IT116_4`.

**!!! Attention : Version *Test\_Ise1\_IT116\_4.m* : le zéro affiché correspond à une position de 3mm de la paroi supérieure!!!!**

#### 3.2 Etalonnage de la sonde à fil chaud

Placer approximativement le sonde au centre de la veine. Pour une gamme de vitesse  $\bar{U}$  (moyenne temporelle de  $U$ ) allant d'environ 3 m/s à 12 m/s (au moins 6 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 minimum de 10 secondes ;
3. tracer  $\bar{E} = f(\bar{U})$  ;
4. Déterminer par régression linéaire les coefficients  $K$  et  $B$  de la relation (2). On pourra utiliser la fonction *basic fitting* dans les outils de la figure du plot :

$$\bar{E} = K\bar{U} + B. \quad (2)$$

#### 3.3 Reynolds de transition

A partir de la visualisation du signal de tension sur l'oscilloscope déterminer la valeur de la vitesse et le nombre de Reynolds correspondant à la transition laminaire-turbulent. Justifier votre procédure et commenter.

### 3.4 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  $3 \text{ m.s}^{-1}$ . Assurez vous à l'oscilloscope que l'écoulement est bien turbulence.

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 ;
2. Pour chaque position  $y$  donnée par le tableau 2 réaliser 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 qui sauvegarde les données dans un fichier .ma.**

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

TABLE 2 – Position des mesures symétriques de vitesse. **Attention, les valeurs du tableaux 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

On note le vecteur vitesse instantané  $\vec{U} = U\vec{e}_x + V\vec{e}_y$  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

$$Q_{\perp} = U \sin \theta - V \cos \theta \quad (3)$$

2. Montrer que la tension linéarisée s'exprime comme :

$$E_1 = K(U - V) + B, \quad (4)$$

ou  $K = \sqrt{2}/2K'$ .

3. En utilisant les propriétés de symétrie de l'expérience, montrer qu'une mesure effectuée en  $2h - y$  avec une sonde à  $45^\circ$  est équivalente à une mesure effectuée en  $y$  avec une sonde à  $135^\circ$ . Faire un schéma pour illustrer et argumenter.
4. Montrer que la tension linéarisée de cette sonde à  $135^\circ$  (virtuelle) s'exprime comme :

$$E_2 = K(U + V) + B, \quad (5)$$

5. Calculer  $\overline{E_1}$ ,  $\overline{E_2}$ ,  $\overline{e_1'^2}$ ,  $\overline{e_2'^2}$  avec  $E_i = \overline{E_i} + e_i'$  ;
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  $\overline{U}$  et  $\overline{V}$  ainsi les tensions de Reynolds,  $\overline{u'^2 + v'^2}$  et  $\overline{u'v'}$ .

### 4.2 Calculs des statistiques bruts

Utiliser la fonction Matlab `get_stat_HW_v0` qui calcule  $\overline{E_1}$ ,  $\overline{E_2}$ ,  $\overline{e_1'^2}$  et  $\overline{e_2'^2}$  à partir des données temporelles acquises précédemment. La syntaxe est la suivante :

```
[E1mean E2mean e1p e2p]=get_stat_HW_v0(K,B)
```

où  $E1mean = \overline{E_1}$ ,  $E2mean = \overline{E_2}$ ,  $e1p = \overline{e_1'^2}$ ,  $e2p = \overline{e_2'^2}$ .  $K$  et  $B$  sont les coefficients de la relation (2).

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

### 4.3 Ecoulement moyen

#### 4.3.1 Profils de vitesses moyennes

Tracer  $\overline{U}(y)$  et  $\overline{V}(y)$  Ajouter le profil théorique pour le cas laminaire. Commentez ces résultats.

### 4.3.2 Frottement de paroi

1. Effectuer un bilan de quantité de mouvement sur un domaine fixe compris entre deux sections distantes de  $\Delta x$ . En déduire la relation entre la contrainte pariétale  $\tau_p$  (contrainte visqueuse à la paroi  $\partial U/\partial y|_{y=0 \text{ ou } 2h}$ ) et gradient longitudinal de pression  $\Delta P/\Delta x$ . En déduire la valeur numérique de  $\tau_p$ .
2. Calculez la vitesse de frottement  $u^*$  définie par  $\tau_p = \rho u^{*2}$ .
3. Le frottement est caractérisé par le coefficient de frottement  $\lambda$  (de Darcy) défini par<sup>1</sup> :

$$\frac{dP}{dx} = \lambda \rho \frac{U_m^2}{2} \frac{1}{D_H} \quad (6)$$

où  $D_h = 4h$  est le diamètre hydraulique et  $U_m$  la vitesse débitante moyenne. Déterminer la dimension de  $\lambda$  et calculer sa valeur.

4. Comparer la valeur de  $\lambda$  à la loi semi-empirique (voir annexe et cours) :

$$\frac{1}{\lambda^{0.5}} = 2 \log(Re_{D_H} \lambda^{0.5}) - 1.19. \quad (7)$$

### 4.3.3 Frottement turbulents

Les tensions de Reynolds  $-\rho \overline{u'v'}$  agissent comme un frottement dû à la turbulence. Le frottement total  $\tau_T$  est la somme du terme de frottement visqueux  $\tau_v$  et du terme de frottement turbulent  $\tau_t$  (en 2D) :

$$\tau_T = \tau_v + \tau_t = \mu \frac{d\bar{U}}{dy} - \rho \overline{u'v'} \quad (8)$$

où  $\mu$  et  $\rho$  sont respectivement la viscosité dynamique et la densité du fluide. Pour l'écoulement entre les deux parois parallèles on peut montrer que

$$\tau_T = \tau_p \left(1 - \frac{y}{h}\right). \quad (9)$$

Tracer  $\tau_T/\tau_p$ ,  $\tau_v/\tau_p$  et  $\tau_t/\tau_p$  en fonction de  $y/h$  et comparer aux résultats théoriques. Identifier les différentes couches/zones de l'écoulement.

### 4.3.4 Viscosité turbulente

La viscosité turbulente  $\nu_t$  est définie par :

$$\tau_t = -\rho \overline{u'v'} = \rho \nu_t \frac{\partial \bar{U}}{\partial y}. \quad (10)$$

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

$$\nu_t = \kappa u^* y \quad (11)$$

où  $\kappa = 0.4$  est la constante de van Karman. Comparez le profil de  $\nu_t$  obtenu par ce modèle avec celui mesuré.

## 4.4 Annexe : les lois de parois

En considérant une couche intérieure, où la viscosité moléculaire domine et une couche extérieure où celle-ci est négligeable mais qui est contrôlée par des variables externes, et en raccordant ces deux couches, Prandtl et Van Karman ont démontré une loi universelle, la loi-logarithmique, valable dans la zone de recouvrement des deux couches et ceci pour tous types de couches limites. En particulier, avec les variables "internes" :

$$u^+ = \frac{\bar{U}}{u^*}, \quad y^+ = \frac{y u^*}{\nu}, \quad (12)$$

on obtient :

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (13)$$

où  $\kappa$  et  $B$  sont constantes empiriques mais quasi-universelles, pour toutes configurations.  $\kappa = 0.4$  est la constante de van Karman.  $B = 5$ .

---

1.  $\lambda = 4C_f$  avec  $C_f = \frac{\tau_p}{\frac{1}{2}\rho \langle U \rangle^2}$