



**HAL**  
open science

# Étude expérimentale d'un jet plan turbulent isotherme en co-courant

Jean Youssef, Cédric Degouet, Johan Carlier

► **To cite this version:**

Jean Youssef, Cédric Degouet, Johan Carlier. Étude expérimentale d'un jet plan turbulent isotherme en co-courant. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03390919

**HAL Id: hal-03390919**

**<https://hal.science/hal-03390919>**

Submitted on 21 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Étude expérimentale d'un jet plan turbulent isotherme en co-courant

J. YOUSSEF<sup>a</sup>, C. DEGOUET<sup>b</sup>, J. CARLIER<sup>a</sup>

a. Cemagref, Université Européenne de Bretagne, 17 Avenue de Cucillé, F-35044 Rennes, France.

b. LaVision France, 5 Avenue de Scandinavie - Les Ulis, F-91953 Courtaboeuf, France.

## Résumé :

Les rideaux d'air sont des jets plans utilisés pour limiter les transferts entre 2 ambiances sans avoir recours à une barrière physique. Une soufflerie a été conçue pour reproduire dans un flux uniforme en co-courant un jet plan vertical descendant. L'écoulement résultant est exploré par anémométrie à fil chaud pour différents nombres de Reynolds et paramètres de cisaillement. L'influence de ces paramètres de contrôle sur les statistiques et la similitude de l'écoulement est discutée.

## Abstract :

Air curtains are planar jets used to limit transfers between two ambiances without physical barrier. A wind tunnel was designed to study the downward planar jet issuing in an uniform co-flow. The flow is measured by hot-wire anemometry for different Reynolds numbers and shear parameters. The influence of these control parameters on the flow statistics and on the similarity behaviour are discussed.

## Mots clefs : Jet plan, turbulence, fil chaud

## Nomenclature

$x$	Direction longitudinale ou de l'écoulement	$\Delta U = U_j - U_e$	Vitesse relative du jet
$y$	Direction normale au plan central du jet	$Re = \frac{\Delta U H}{\nu}$	Nombre de Reynolds
$z$	Direction transversale ou selon l'envergure	$\lambda = \frac{U_j - U_e}{U_j + U_e}$	Paramètre de cisaillement
$u$	Vitesse longitudinale instantanée	$r = \frac{U_e}{U_j}$	Rapport de vitesse
$\langle \cdot \rangle$	Opérateur de moyenne statistique	$\delta(x)$	Demi-épaisseur du jet
$\nu$	Viscosité cinématique	$U_{max}(x)$	Vitesse maximale du jet
$H$	Largeur du jet en sortie		
$U_j$	Vitesse du jet en sortie		
$U_e$	Vitesse du flux co-courant		

## 1 Introduction

Le jet plan turbulent est un écoulement académique étudié dans de nombreuses configurations tant il est présent dans les équipements industriels, notamment pour sa capacité à confiner une ambiance sans barrière physique (tunnels, meubles frigorifiques de ventes, etc.). Selon les applications, le jet plan peut déboucher d'une fente ou d'un canal dans un milieu de fluide identique ou non. Il peut être chauffé ou refroidi et se trouver successivement en régime de convection forcée, mixte et naturel. Il peut également être semi-confiné en impactant ou longeant une paroi. Le développement et la structure du jet plan turbulent dans ces différentes configurations ont fait l'objet de nombreux travaux notamment par des équipes françaises (on citera par exemple celles de F. Penot du LÉT<sup>1</sup>, de F. Anselmet de l'IRPHE<sup>2</sup> de C. Sollic de L'ÉMN<sup>3</sup>).

Le jet plan se développant dans une ambiance au repos a été initialement étudié par Van Der Hegge Zijnen [1], Heskestad [2] et Gutmark et Wagnanski [3] et dans un flux uniforme co-courant par Bradbury [4], Everitt et Robins [5] et Le Ribault, Sarkar et Stanley [6]. La présence de ce co-courant a de nombreux avantages

<sup>1</sup>Laboratoire d'Étude Thermique

<sup>2</sup>Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Équilibre

<sup>3</sup>École des Mines de Nantes

pratiques. Elle évite la stratification en température et les larges mouvements convectifs qui peuvent affecter le développement du jet. Il n'y a pas d'écoulement de retour à l'interface du jet ce qui permet l'utilisation de l'anémométrie à fil chaud. L'écoulement peut êtreensemencé de façon homogène pour une meilleure qualité des mesures par Vélocimétrie par Images de Particule. Par ailleurs, un léger co-courant est souvent ajouté au profil d'entrée du domaine de calcul des simulations numériques pour des raisons de stabilité numérique [6]. Cependant, la présence de ce co-courant n'est pas sans effet sur le développement du jet. Rajaratnam [7] montre que si les profils de vitesses moyennes sont auto-similaires dans la région pleinement développée du jet, la demi-épaisseur  $\delta(x)$  et la vitesse maximale  $U_{max}(x)$  ne suivent pas nécessairement de simples lois de puissance.

Dans ce travail, le jet plan turbulent se développant dans un co-courant de même température est exploré par anémométrie à fil chaud simple dans la région  $0 < x/H < 40$  pour différents nombres de Reynolds  $Re$  et rapports de vitesse  $r$ . Cette région comprend le cône potentiel, la zone transitoire et le début de la zone pleinement développée et de similitude. L'objectif principal est de déterminer l'influence des paramètres de contrôles sur les statistiques et la similitude de l'écoulement.

## 2 Description des expériences

Les expériences consistent à mesurer par anémométrie à fil chaud simple le champ de vitesse de l'écoulement dans la soufflerie Jet Plan du Cemagref. Cette section contient la description de cette soufflerie et de ses équipements, de la méthode d'étalonnage dynamique du fil chaud utilisée et des expériences réalisées.

### 2.1 Soufflerie Jet Plan

Une soufflerie modulaire a été conçue au Cemagref pour simuler expérimentalement le développement d'un jet plan dans différentes configurations. Cette soufflerie mesure 5 m de hauteur et occupe au sol une surface de  $2 \times 2 m^2$  dans sa configuration de base, le jet plan se développant dans un écoulement co-courant uniforme. La figure 1 juxtapose une photographie de la soufflerie et une visualisation de l'écoulement obtenue par tomographie laser.

La soufflerie est constituée de 3 circuits aérauliques verticaux et juxtaposés. Chacun de ces circuits est équipé d'un ventilateur centrifuge qui alimente en air un caisson de mise en pression suivi d'un convergent. Les caissons de mise en pression sont équipés de mousses, de nids d'abeille et de grillages à mailles fines. Le circuit central a un caisson de  $200 \times 20 cm^2$  de section et un convergent de coefficient de contraction 4. Les 2 circuits adjacents ont un caisson de  $200 \times 80 cm^2$  de section et un convergent asymétrique de coefficient de contraction  $8/3$ . L'écoulement débouchant dans la veine d'essai est un jet plan vertical descendant de 52 mm de largeur et de 200 cm d'envergure se développant entre 2 flux uniformes de 30 cm de largeur et de même envergure. La veine d'essai mesure 200 cm de hauteur. Les 2 parois externes parallèles au plan central du jet sont en toile pour s'affranchir des effets de confinement. Les 2 parois d'extrémité suivant l'envergure sont en verre pour permettre la mise en œuvre future des méthodes de mesure optique. L'écoulement impacte le sol 50 cm après la sortie de la veine d'essai et s'échappe naturellement sur les côtés.

Un variateur de fréquence équipe chaque ventilateur pour le contrôle de la vitesse dans les 3 flux. La vitesse atteint un maximum de 12 m/s pour le jet plan et de 3.7 m/s pour les flux co-courants. La température du jet plan est contrôlée avec un échangeur air-eau glycolée et une résistance chauffante à puissance variable. La température des flux co-courants est ajustée par le système de climatisation du hall. L'origine des axes  $(x, y, z)$  se situe au milieu de la section de sortie du jet, au niveau des bords de fuites des 2 plaques séparatrices.

### 2.2 Instrumentation

Les mesures de vitesse sont obtenues par anémométrie à fil chaud simple. La chaîne de mesure est une chaîne DANTEC constituée d'un anémomètre à température constante (module 90C10 monté dans un boîtier Streamline 90N10) et d'une sonde fil simple (modèle 55P11). Les mesures de température sont effectuées avec un thermocouple du type  $T$  (cuivre-constantan). La jonction de mesure est réalisée pour des raisons pratiques par une soudure à l'étain. Les signaux analogiques sont enregistrés par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition PCIMIO16E4 et d'un échantillonneur bloqueur SC2040 de National Instruments. En configuration de mesure, la sonde fil simple et le thermocouple sont fixés à l'extrémité d'un mât profilé lui-même fixé sur un système de déplacement à 3 axes motorisés ISEL. En configuration étalonnage, ils sont fixés en milieu de veine de la soufflerie d'étalonnage décrite ci-après.

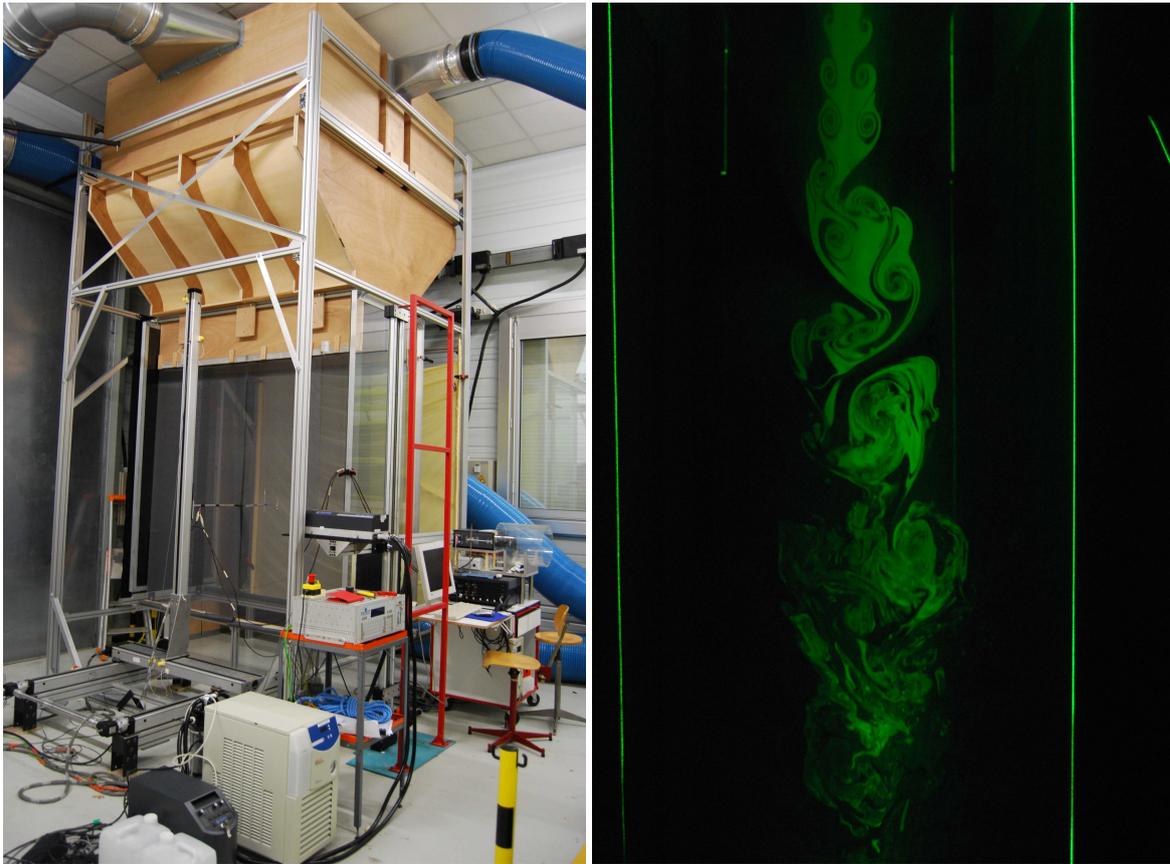


FIG. 1 – À gauche, photographie de la soufflerie Jet Plan. À droite, visualisation par tomographie laser ( $Re = 5000$  et  $\lambda = 0.7$ ).

### 2.3 Procédure d'étalonnage dynamique

Dans ce travail, le système de régulation en température de la soufflerie Jet Plan permet d'obtenir aisément une température d'équilibre identique pour les 3 flux pendant la durée d'une expérience (voir figure 2). En revanche, cette température d'équilibre peut être légèrement différente (quelques dixièmes de degré) d'une expérience à l'autre. Il est donc nécessaire d'étalonner la sonde fil simple en vitesse et température.

La tension anémométrique mesurée  $e$  est reliée à la vitesse  $u$  et à la température  $\theta$  de l'écoulement par la loi de King étendue prenant en compte une correction de température. Cette loi est bien adaptée à la gamme de vitesse de notre étude. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$\frac{e^2}{(\theta_f - \theta)} = A + Bu^n \quad (1)$$

où la température du fil  $\theta_f$  et les constantes  $A$ ,  $B$  et  $n$  sont à déterminer par étalonnage.

La sonde fil simple est étalonnée en vitesse et température dans une soufflerie dédiée à l'étalonnage de nos capteurs. Cette soufflerie fonctionne en circuit semi-ouvert. La veine d'essais a une longueur de 70 cm et une section de  $14 \times 14 \text{ cm}^2$ . Le profil de vitesse dans la veine d'essais est uniforme avec un taux de turbulence inférieur à 1%. Un ventilateur centrifuge équipé d'un variateur permet de contrôler la vitesse de 0.5 à 12 m/s. Une résistance chauffante à puissance variable et un échangeur air-eau glycolée muni d'une vanne sont placés dans le circuit de retour de la soufflerie. La température de l'écoulement peut ainsi être contrôlée de 5 à 40° C.

Pendant l'étalonnage, on impose à l'écoulement une variation de vitesse en dents de scie et une décroissance monotone de la température en agissant respectivement sur le variateur du ventilateur et sur la vanne du circuit du frigoporteur. La figure 3 montre cette évolution simultanée de la vitesse et de la température pendant la durée d'un étalonnage. Elle permet d'obtenir un répartition équi-probable du couple  $(u, \theta)$ . Cette méthode d'étalonnage dynamique est similaire à celle utilisée par Ndoye *et al.* [8]. La vitesse de référence  $u_r$  est déduite de la fréquence de rotation du ventilateur préalablement étalonnée à l'aide d'un moulinet étalon. La température de référence  $\theta_r$  est donnée par une sonde PT100. Les constantes d'étalonnages  $A$ ,  $B$ ,  $n$  et  $\theta_f$  sont obtenues par ajustement aux moindres-carrés non-linéaire (Levenberg-Marquart).

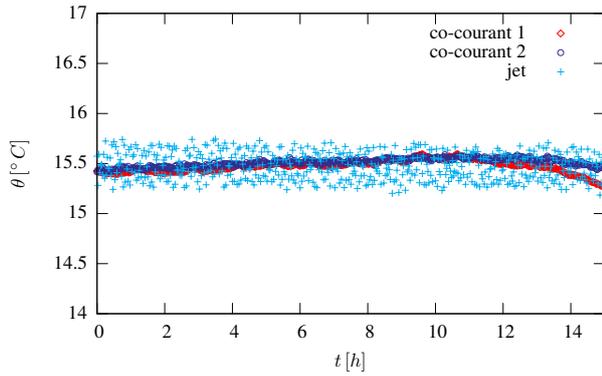


FIG. 2 – Évolution de la température dans les 3 flux pendant la durée d'une expérience

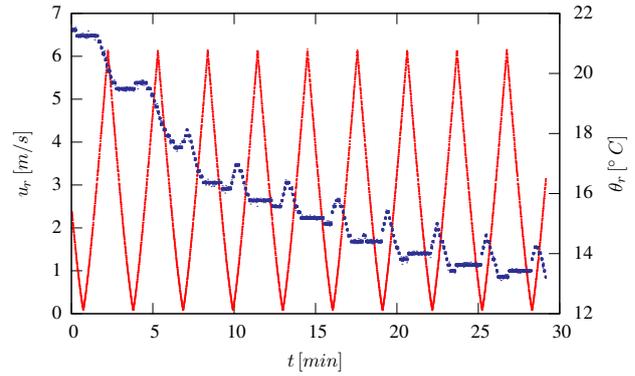


FIG. 3 – Évolution de la vitesse (en rouge) et de la température (en bleu) de référence pendant la durée d'un étalonnage

## 2.4 Expériences réalisées

Le tableau 1 donne les paramètres de contrôle pour les 5 expériences réalisées. Le rapport de vitesse est d'abord fixé à  $r = 0.2$  pour 3 nombres de Reynolds ( $Re = 10\,000$ ,  $20\,000$  et  $30\,000$ ). Le nombre de Reynolds est ensuite fixé à  $Re = 30\,000$  pour 3 rapports de vitesse ( $r = 0, 0.1$  et  $0.2$ ).

no	$Re$	$r$	$U_j$ [m/s]	$U_e$ [m/s]	$\Theta$ [°C]
Exp. 1	10 000	0.2	3.60	0.72	15.2
Exp. 2	20 000	0.2	7.21	1.44	15.2
Exp. 3	30 000	0.2	10.81	2.16	14.9
Exp. 4	30 000	0.1	9.61	0.96	15.5
Exp. 5	30 000	0	8.65	0	14.7

TAB. 1 – Paramètres de contrôle pour les 5 expériences réalisées

Chaque expérience consiste à mesurer dans le plan central du jet  $z = 0$  ( $z$  est une direction homogène en moyenne pour l'écoulement) le profil de vitesse selon  $x$  en  $y = 0$  et les profils de vitesse selon  $y$  en  $x/H = 0, 4, 8 \dots 36$ , soit un total de 1163 points de mesure. Pour chacun de ces points, la fréquence d'acquisition des signaux analogiques est de  $6\,000\text{ Hz}$ , la fréquence de coupure du filtre anti-repliement est de  $3\,000\text{ Hz}$  et le nombre d'acquisitions est de 131 072, soit une durée d'acquisition par point d'environ  $22\text{ s}$ . Ces valeurs sont à rapprocher de la fréquence de Strouhal de l'ordre de  $10\text{ Hz}$  dans les expériences réalisées. La durée totale d'une expérience (temps d'acquisition et déplacements motorisés de la sonde) est d'environ  $15\text{ h}$  (voir figure 2).

## 3 Résultats

Les vitesses du jet  $U_j$  et du flux co-courant  $U_e$  en sortie sont directement issues du profil de vitesse moyenne en  $x = 0$ . La vitesse moyenne sur l'axe du jet  $U_{max}$  (également vitesse moyenne maximale pour un profil selon  $y$ ) et la demi-épaisseur du jet  $\delta$  sont estimées en approchant par une fonction gaussienne le profil de vitesse moyenne dans la région de turbulence pleinement développée. La demi-épaisseur du jet  $\delta$  est définie par la position  $y$  pour laquelle  $\frac{U(y) - U_e}{U_{max} - U_e} = \frac{1}{2}$ . Une attention particulière a été portée sur l'estimation de ces grandeurs ( $H, U_j, U_e, U_{max}$  et  $\delta$ ) qui expriment le comportement global de l'écoulement et qui sont utilisées par la suite pour adimensionner les profils des différentes quantités statistiques.

La figure 4 présente les profils adimensionnés de vitesse moyenne en sortie (en  $x = 0$  et donc en entrée de veine d'essai) pour les 5 expériences. Ces profils uniformes sont du type "top-hat" ou chapeau haut de forme. Le déficit de vitesse en  $x/H = \pm 0.5$  correspond aux sillages des 2 plaques séparatrices. Des figures non-représentées ici montrent de plus que l'écoulement est uniforme en moyenne dans la direction  $z$  est que le taux de turbulence est inférieur à  $0.5\%$  dans les 3 flux.

La figure 5 superpose les profils adimensionnés de vitesse moyenne pour  $Re = 30\,000$  et  $r = 0.2$  (Exp. 3) dans la zone de turbulence pleinement développée. Les profils des autres expériences sont semblables à ceux présentés sur cette figure. Dans le jet, les profils ont une forme gaussienne et sont en similitude, ce qui illustre

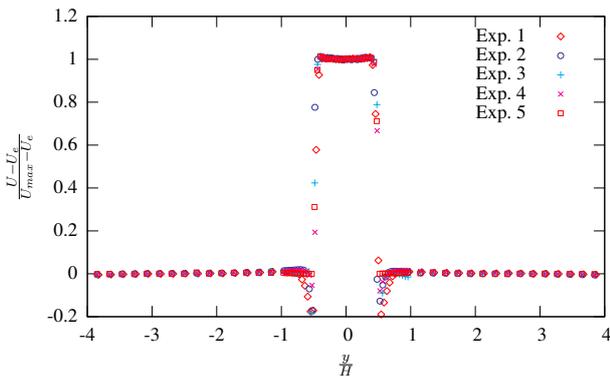


FIG. 4 – Profils de vitesse moyenne en sortie ( $x = 0$ ) pour les 5 expériences

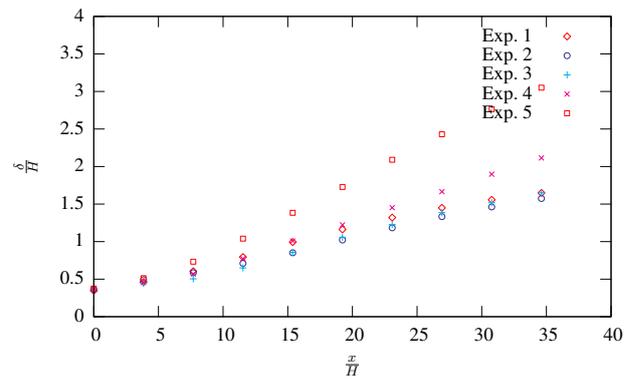


FIG. 7 – Évolution de la demi-épaisseur du jet  $\delta$  pour les 5 expériences

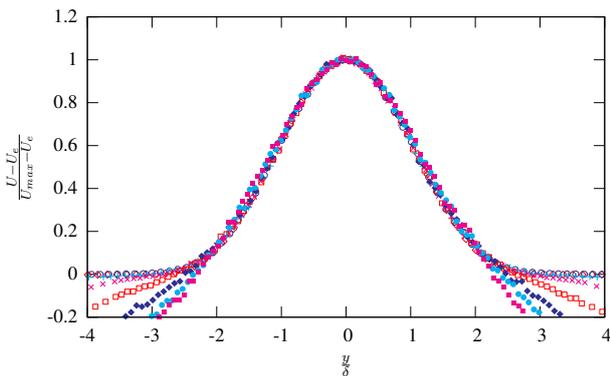


FIG. 5 – Profils de vitesse moyenne pour  $Re = 30\,000$  et  $r = 0.2$  (Exp. 3)

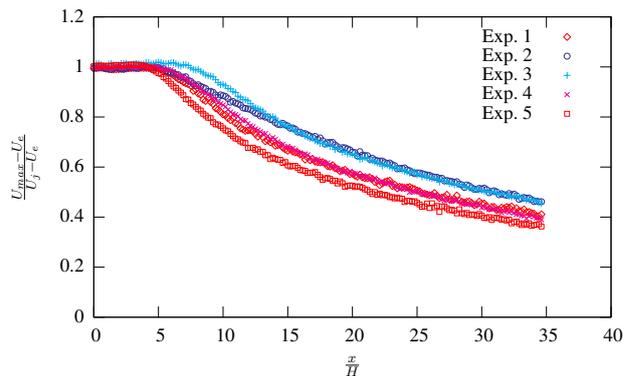


FIG. 8 – Évolution de la vitesse maximale du jet  $U_{max}$  pour les 5 expériences

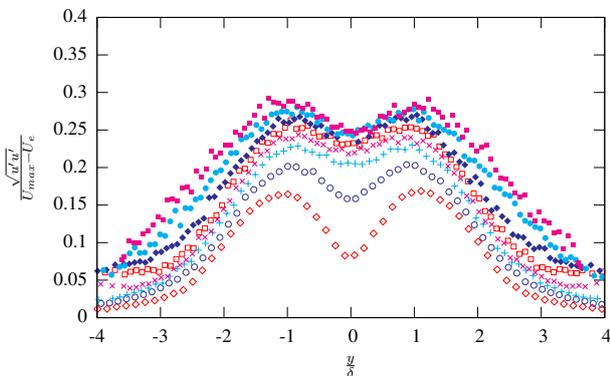


FIG. 6 – Profils RMS de vitesse pour  $Re = 30\,000$  et  $r = 0.2$  (Exp. 3)

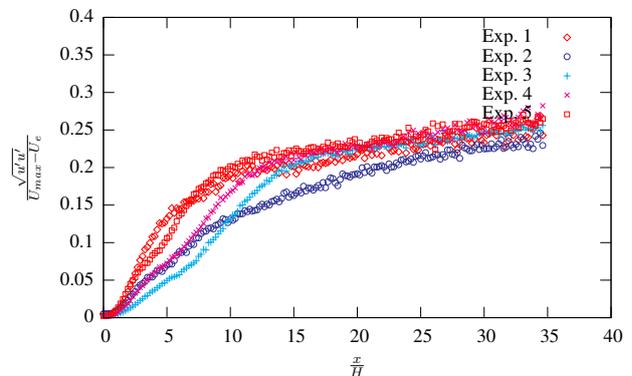


FIG. 9 – Évolution de la RMS de vitesse sur l'axe du jet pour les 5 expériences

également le choix pertinent et la bonne estimation des grandeurs d'adimensionnement. La définition donnée à la demi-épaisseur du jet positionne les 2 points d'inflexion du profil gaussien en  $\pm\delta$ . Dans le flux co-courant, la vitesse relative est nulle par définition. Cependant, cette vitesse devient négative loin de la sortie du jet. En fait, le jet plan conserve sa quantité de mouvement (à un terme de dissipation près) au cours de son développement et augmente son débit par entrainement. Cette augmentation de débit est alimentée par un flux d'air à travers les parois en toile de la veine d'essai. Les flux co-courants sont progressivement aspirés par le jet et remplacés par un flux plus lent provenant de l'extérieur de la soufflerie.

Avec le même adimensionnement que pour la vitesse moyenne, la figure 6 présente les profils RMS de la vitesse pour  $Re = 30\,000$  et  $r = 0.2$  (Exp. 3, comme pour la figure 5) dans la zone de turbulence pleinement développée. Ils présentent un double pic dont la position coïncide avec les 2 points d'inflexion des profils de vitesse moyenne. Ces points d'inflexion correspondent aux maximums du gradient de vitesse moyenne, lequel intervient directement dans le terme de production  $\frac{\partial U}{\partial y} \langle u'v' \rangle$  responsable du transfert d'énergie cinétique

moyenne vers l'énergie cinétique turbulente. Avec une vitesse d'adimensionnement propre à chaque profil (par exemple la RMS en  $y = 0$ ), les profils RMS de la vitesse sont également en similitude.

La figure 7 montre l'évolution de la demi-épaisseur du jet  $\delta$  pour les 5 expériences. Cette évolution est en accord avec la théorie sur l'épanouissement linéaire du jet plan lorsque  $r \ll 1$ . En effet, Rajaratnam [7] démontre pour un jet fort ( $\frac{U_{max}-U_e}{U_e} \gg 1$ ) que  $\delta \sim x$  et  $U_{max} \sim x^{-1/2}$  et pour un jet faible ( $0 < \frac{U_{max}-U_e}{U_e} \ll 1$ ) que  $\delta \sim x^{1/2}$  et  $U_{max} \sim x^{-1/2}$ . Lorsque le nombre de Reynolds augmente (Exp. 1 2 3), la vitesse d'épanouissement du jet reste constante et la position de son origine virtuelle semble ne pas être modifiée. Lorsque le rapport de vitesse  $r$  augmente (Exp. 3 4 5), la vitesse d'épanouissement du jet diminue nettement et son origine virtuelle semble se décaler vers l'amont.

Si ces résultats demandent à être confirmés, il sont néanmoins également en accord avec l'évolution de la vitesse maximale du jet  $U_{max}$  présentée sur la figure 8. Dans le cône potentiel, la vitesse maximale  $U_{max}$  est constante et égale à la vitesse du jet en sortie  $U_j$ . La longueur du cône potentiel semble augmenter avec le rapport de vitesse (Exp. 3 4 5) et rester constante pour les différents nombres de Reynolds (Exp. 1 2 3), ce qui est cohérent avec le comportement de l'origine virtuelle de la figure 7. Dans la zone de similitude, la vitesse maximale du jet  $U_{max}$  semble effectivement décroître en  $x^{-1/2}$ . Il est remarquable de constater que les profils décroissent à la même vitesse et sont simplement décalés suggérant des origines virtuelles différentes (excepté pour l'Exp. 2 dont le régime transitoire semble avoir été perturbé).

La figure 9 est à rapprocher de la figure 6. Elle présente l'évolution sur l'axe du jet (en  $y = 0$ ) de la RMS de vitesse adimensionnée de la même manière et pour les 5 expériences. Ce taux de turbulence local croît rapidement dans le cône potentiel et dans la zone transitoire et continue de croître lentement dans la zone de similitude.

## 4 Conclusion

Le jet plan turbulent se développant dans un co-courant de même température a été exploré par anémométrie à fil chaud simple dans la soufflerie Jet Plan du Cemagref pour différents nombres de Reynolds  $Re$  et rapports de vitesse  $r$ . Il apparaît que les profils de vitesse moyenne adimensionnée dans la zone pleinement développée sont en similitude. Dans la gamme de nombres de Reynolds et de rapports de vitesse abordée dans ce travail, le jet plan se développe conformément aux lois de puissance de la théorie pour le jet fort. Aussi, le rapport de vitesse  $r$  influe fortement sur la vitesse d'épanouissement du jet et sur son origine virtuelle. En revanche, le nombre de Reynolds  $Re$  semble n'avoir que peu d'effet.

Le travail réalisé apporte une base de données conséquente qui n'a pas encore été entièrement exploitée (densité de probabilité, densité spectrale de puissance, *etc.*). Pourtant, elle a déjà permis d'obtenir de nombreuses informations sur le comportement de la nouvelle soufflerie du Cemagref et sur le jet plan en co-courant. Elle permet également de préparer l'exploration de ce même écoulement par anémométrie à fils chauds croisés et par Vélocimétrie par Images de Particule pour accéder à la matrice de co-variance et à la topologie de l'écoulement.

Par la suite, le jet plan se développant dans un co-courant de température différente sera étudié par une méthode de mesure simultanée de la vitesse et de la température instantanées (anémométrie à fil chaud à surchauffes multiples développée par Ndoye *et al.* [8]) notamment pour caractériser les mécanismes de transfert de scalaire en régime de convection forcée, voire mixte.

## Références

- [1] Van Der Hegge Zijnen B. Measurements of the velocity distribution in a plane turbulent jet of air. Appl. sci. Res, A-7, 256–276, 1958.
- [2] Heskestad G. Hot wire measurements in a plane turbulent jet. J. Appl. Mech., 32, 721–734, 1965.
- [3] Gutmark E. and Wygnanski I. The planar turbulent jet. Journal of Fluid Mechanics, 73, 465–495, 1976.
- [4] Bradbury L. J. S. The structure of a self-preserving turbulent plane jet. Journal of Fluid Mechanics, 23, 31–64, 1965.
- [5] Everitt K. W. and Robins A. G. The development and structure of turbulent plane jets. Journal of Fluid Mechanics, 88, 563–583, 1978.
- [6] Le Ribault C., Sarkar S., and Stanley S. A. Large eddy simulation of plane jet. Physics of Fluids, 11(10), 3069–3083, October 1999.
- [7] Rajaratnam N. Turbulents jets é É. Elsevier, Amsterdam, 1976.
- [8] Ndoye M., Dorignac É., Carlier J., Arroyo G., Delville J., and Heitz D. Étude expérimentale d'une couche de mélange anisotherme. In 18<sup>e</sup> Congrès Français de Mécanique, Grenoble (France), 27-31 août 2007.