

Étude expérimentale de l'influence des paramètres de contrôle sur le comportement d'un jet plan turbulent en co-courant

Jean YOUSSEF^a, Johan CARLIER^a, Joël DELVILLE^b et Éva DORIGNAC^b

a. Cemagref, Université Européenne de Bretagne, F-35044 Rennes

b. Institut PPRIME, CNRS-Université de Poitiers-ENSMA, UPR 3346, CEAT F-86036 Poitiers

Résumé :

Les rideaux d'air sont souvent utilisés pour leur capacité à limiter les transferts entre 2 ambiances sans avoir recours à une barrière physique. Cet écoulement est reproduit en soufflerie dans une configuration de jet plan descendant entre 2 flux uniformes co-courants. Il est exploré par anémométrie à fils chauds croisés pour différents nombres de Reynolds et rapports de vitesse. L'influence de ces paramètres de contrôle sur le comportement en similitude est discutée.

Abstract :

Air curtains are often used because of their ability to limit transfers between 2 atmospheres without the use of physical barrier. A typical air curtain is reproduced in a wind tunnel in the configuration of a submerged plane jet in a uniform co-flow. This flow is explored by crossed Hot Wire Anemometry for different Reynolds numbers and velocity ratios. The influence of these control parameters on the similitude behaviours is discussed.

Mots clefs : Jet plan ; Turbulence ; Fils chauds

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
$\vec{u}(t)$	Vitesse instantanée avec (u, v, w)	$r = \frac{U_e}{U_j}$	Rapport de vitesse
ν	Viscosité cinématique	$\delta_{0.5}(x)$	Demi-épaisseur du jet
H	Largeur du jet en sortie	$\langle u \rangle_{axe}(x)$	Vitesse moyenne sur l'axe du jet
U_j	Vitesse du jet en sortie	$\langle \cdot \rangle$	Opérateur de moyenne
U_e	Vitesse du flux co-courant		

1 Introduction

Les jets plans turbulents font partie de la famille des écoulements cisailés. Ils sont souvent étudiés dans des configurations très variées telles que jet plan simple ou double, impactant ou pariétal, avec ou sans gradient de température ou de densité, tant ils sont présents dans les équipements industriels, notamment pour leur capacité à confiner une ambiance sans barrière physique (tunnels, meubles frigorifiques de ventes, *etc.*). L'étude du comportement moyen d'un jet plan turbulent se développant dans une ambiance au repos a été initiée par Van Der Hegge Zijnen [1], Heskestad [2] et Gutmark et Wagnanski [3] et dans un flux uniforme co-courant par Bradbury [4] et Everitt et Robins [5]. La présence de ce co-courant n'est pas sans effet sur le développement du jet. Rajaratnam [6] montre en

effet que pour un jet fort ($(\langle u \rangle_{axe} - U_e)/U_e \gg 1$), la vitesse moyenne sur l'axe du jet $\langle u \rangle_{axe}$ décroît en $x^{-1/2}$ et l'épaisseur du jet croît linéairement. Pour un jet faible ($0 < (\langle u \rangle_{axe} - U_e)/U_e \ll 1$), la vitesse décroît toujours en $x^{-1/2}$, mais l'épaisseur croît quant à elle en $x^{1/2}$. Un jet plan dans une ambiance au repos se comporte donc toujours comme un jet fort alors qu'un jet plan en co-courant peut se comporter comme un jet fort au début de son développement puis, la vitesse moyenne sur l'axe étant décroissante, se comporter comme un jet faible plus loin en aval. La compilation des résultats de la littérature ne permet pas de dégager un comportement clair des constantes (pentes et origines virtuelles) intervenant dans ces lois de similitude en fonction du nombre de Reynolds Re et du rapport de vitesse r . Dans ce travail, le jet plan turbulent se développant dans un co-courant de même température est exploré par anémométrie à fils chauds croisés dans la région $0 \leq x/H < 40$ pour différents paramètres de contrôle (Re, r). Cette région comprend le cône potentiel, la zone transitoire et le début de la zone de turbulence pleinement développée et de similitude. L'objectif principal est de déterminer l'influence des paramètres de contrôle sur les lois de similitude dans la zone pleinement développée. L'exploitation de la base de données acquise se limitera donc pour cette étude à l'écoulement moyen.

2 Description des expériences

L'écoulement d'un jet plan se développant dans un flux co-courant est reproduit dans une soufflerie dédiée. Il est exploré par anémométrie à fils chauds croisés. Cette section décrit la soufflerie et ses équipements, la méthode d'étalonnage dynamique de l'anémométrie à fils chauds utilisée et résume les caractéristiques des différentes expériences réalisées.

2.1 Soufflerie Jet Plan

La soufflerie Jet Plan du Cemagref a été conçue pour simuler expérimentalement le développement d'un jet plan dans différentes configurations. Cette soufflerie mesure 5m de hauteur et occupe au sol une surface de $2 \times 2\text{m}^2$ dans sa configuration de base. 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 $200 \times 20\text{cm}^2$ de section et un convergent de coefficient de contraction 4. Les 2 circuits adjacents ont un caisson de $200 \times 80\text{cm}^2$ de section et un convergent asymétrique de coefficient de contraction 8/6. L'écoulement débouchant dans la veine d'essais est un jet plan vertical descendant de 4,8cm de largeur et de 200cm d'envergure se développant entre 2 flux uniformes de 60cm de largeur et de même envergure. Les profils de vitesse moyenne en sortie sont du type "top-hat" ou chapeau haut de forme avec un taux de turbulence inférieur à 1%. La veine d'essais mesure 200cm 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 des méthodes de mesure optique. L'écoulement impacte le sol 50cm après la sortie de la veine d'essais 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 12m/s pour le jet plan et de 2m/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 Anémométrie à fils chauds

Une chaîne d'anémométrie à fils chauds propre au laboratoire, une loi d'étalonnage originale et une procédure d'étalonnage dynamique ont été mises en place pour la mesure fine de la turbulence.

2.2.1 Instrumentation

L'anémométrie à température constante (CTA) de fils chauds croisés de type X a été mise en œuvre pour mesurer simultanément les 2 composantes de la vitesse dans le plan défini par les fils. Les

anémomètres utilisés ont été développés au CEAT¹ à partir d'anémomètres TSI 1750. Deux sondes miniatures de fils croisés ont été utilisées, l'une en configuration uv et l'autre en configuration uw . Les fils sont en tungstène et plaqués de platine. Ils ont un diamètre de $2,5\mu\text{m}$ pour une longueur de $0,5\text{mm}$ et l'angle entre les fils est approximativement de 90° . La mesure de température a été effectuée avec un thermocouple du type T (cuivre-constantan). La jonction de mesure est réalisée pour des raisons pratiques avec une soudure à l'étain. L'enregistrement simultané des signaux analogiques a été réalisé avec une chaîne d'acquisition ETEP équipée de filtres passe-bas intégrés. En configuration étalonnage, les sondes fils croisés et les thermocouples sont fixés en milieu de veine de la soufflerie d'étalonnage décrite ci-après. En configuration de mesure, ils sont fixés à l'extrémité d'un mât profilé lui-même fixé sur un système de déplacement à 3 axes motorisés ISEL.

2.2.2 Loi d'étalonnage

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. En revanche, cette température d'équilibre varie légèrement (quelques dixièmes de degré) au cours d'une expérience ou d'une expérience à l'autre. Il est donc nécessaire d'étalonner les sondes fils croisés en vitesse-angle-température. La loi d'étalonnage utilisée est une loi polynomiale de la forme :

$$\|\vec{u}(t)\| = \sum_{i=0, j=0}^{i+j \leq 3} p_{ij} (e_1^{**})^i (e_2^{**})^j \text{ et } \alpha(t) = \sum_{i=0, j=0}^{i+j \leq 3} q_{ij} (e_1^{**})^i (e_2^{**})^j. \quad (1)$$

Cette formulation est explicite. Elle relie la norme $\|\vec{u}\|$ et l'angle α de la vitesse aux tensions e_1^{**} et e_2^{**} . Le double astérisque désigne une compensation en température et dérive de la tension e mesurée aux bornes de l'anémomètre. La compensation en température utilisée est de la forme :

$$e_k^{*2}(t) = e_k^2(t) \left[\frac{\theta_k^f - \theta_0}{\theta_k^f - \theta(t)} \right] \quad (2)$$

où θ_k^f est la température du fil k et θ_0 est une température de référence quelconque. La compensation en dérive est de la forme :

$$e_k^{**2}(t) = \frac{e_k^{*2}(t) - (a_{0k} + a'_k)}{(1 + b'_k)}. \quad (3)$$

Les coefficients a_{0k} , a'_k et b'_k proviennent de la loi de King étendue $e_k^{*2}(t) = a_k + b_k \cdot u^{n_k}(t)$ communément utilisée pour relier la tension e aux bornes de l'anémomètre à la vitesse u et la température θ du fluide avec $a_k = a_{0k} + a'_k$ et $b_k = (1 + b'_k) b_{0k}$.

Les coefficients p_{ij} , q_{ij} , a_k , b_k et n_k sont déterminés par étalonnage dans une soufflerie dédiée à l'étalonnage de nos capteurs. Les coefficients a'_k et b'_k , relatifs à la compensation en dérive, sont initialement nuls. Ils sont déterminés par la suite régulièrement *in situ* pendant la campagne expérimentale, soit directement dans la soufflerie Jet Plan.

2.2.3 Procédure d'étalonnage dynamique

La soufflerie d'étalonnage est une soufflerie à circuit semi-ouvert. La veine d'essais a une longueur de 200cm et une section de $28 \times 28\text{cm}^2$. 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 12m/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 . 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 θ_r est donnée par une sonde PT100.

¹Centre d'études aérodynamiques et thermiques de l'université de Poitiers

La première étape de la procédure d'étalonnage est un étalonnage droit de la sonde (à incidence nulle) en vitesse-température. 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. Cette évolution simultanée de la vitesse et de la température pendant la durée d'un étalonnage permet d'obtenir une répartition équiprobable du couple (u, θ) . Elle permet ainsi d'estimer les coefficients a_k, b_k, n_k et les températures θ_k^f de chacun des fils (avec $a'_k = 0$ et $b'_k = 0$). La seconde étape de la procédure d'étalonnage est un étalonnage angulaire de la sonde en vitesse-angle. Pour 13 angles α compris entre -30° à $+30^\circ$, on impose à l'écoulement une variation de vitesse en dents de scie et une température constante. On en déduit les coefficients p_{ij} et q_{ij} .

Le transfert des sondes uv et uw dans la soufflerie Jet Plan et la dérive des fils après quelques jours d'utilisation nécessitent la mise en œuvre d'une compensation en dérive. Cette compensation est réalisée systématiquement avant chaque expérience par un étalonnage droit *in situ* en estimant les coefficients a'_k et b'_k relatifs aux fils. Les coefficients p_{ij} et q_{ij} , relatifs à la géométrie des sondes, restent fixes, même après plusieurs mois d'utilisation. Ceci a pu être vérifié par retour des sondes dans la soufflerie d'étalonnage.

2.3 Expériences réalisées

Pour caractériser l'influence du nombre de Reynolds et du rapport de vitesse sur le comportement de l'écoulement jet plan turbulent en co-courant, plusieurs configurations ont été explorées. Le rapport de vitesse est d'abord fixé à $r = 0.15$ pour 5 nombres de Reynolds différents ($Re = 10\,000, 15\,000, 20\,000, 25\,000$ et $30\,000$). Le nombre de Reynolds est ensuite fixé à $Re = 15\,000$ pour 7 rapports de vitesse différents ($r = 0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25$ et 0.30). Avec $H = 4,8$ cm et $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ m²/s, on a donc $0 \leq U_e \leq 2$ m/s et $3,8 \leq U_j \leq 11,5$ m/s. Chaque expérience consiste à mesurer dans le plan central du jet $z = 0$ (z est une direction homogène en moyenne pour l'écoulement) 13 profils de vitesse (de $x/H = 0$ à 36) constitués chacun de 101 points de mesure, soit un total de 1313 points. En chaque point, la fréquence d'acquisition des signaux analogiques est de 12 500 Hz, la fréquence de coupure du filtre anti-repliement est de 6 250 Hz et le nombre d'acquisitions est de 500 000, soit une durée d'acquisition par point de 40 s. Ces valeurs sont à rapprocher de la fréquence de Strouhal de l'ordre de 10 Hz dans les expériences réalisées. La durée totale d'une expérience (temps d'acquisition et déplacements motorisés de la sonde) est d'environ 20 h.

3 Résultats

Les vitesses du jet U_j et du flux co-courant U_e en sortie sont extraits du profil de vitesse moyenne en $x = 0$. La vitesse moyenne sur l'axe du jet $\langle u \rangle_{axe}$ et la demi-épaisseur du jet $\delta_{0.5}$ sont estimées en approchant par une fonction gaussienne chaque profil de vitesse moyenne $\langle u \rangle$ dans la région de turbulence pleinement développée. La demi-épaisseur du jet $\delta_{0.5}$ est définie par la position y pour laquelle $\frac{\langle u \rangle - U_e}{\langle u \rangle_{axe} - U_e} = \frac{1}{2}$. Une attention particulière a été portée sur l'estimation de ces grandeurs ($H, U_j, U_e, \langle u \rangle_{axe}$ et $\delta_{0.5}$) qui expriment le comportement global de l'écoulement et qui sont utilisées pour adimensionner les profils des différentes quantités statistiques. Les figures 1 et 2 présentent l'évolution le long de l'axe du jet de la vitesse moyenne et de la demi-épaisseur du jet pour différents nombres de Reynolds et rapports de vitesse. Dans la région du cône potentiel, la vitesse axiale reste constante et la longueur du cône varie assez peu. La demi-épaisseur du jet croît linéairement, conformément au développement des couches de mélange de part et d'autre du cône potentiel. Dans la zone de turbulence pleinement développée, le comportement linéaire observé pour l'ensemble des profils de $\langle u \rangle_{axe}$ et $\delta_{0.5}$ est conforme à la loi de similitude des jets forts avec :

$$\left[\frac{(U_j - U_e)}{\langle u \rangle_{axe} - U_e} \right]^2 = K_u \left(\frac{x}{H} - C_u \right) \text{ et } \left[\frac{\delta_{0.5}}{H} \right] = K_y \left(\frac{x}{H} - C_y \right). \quad (4)$$

Les constantes K_u, K_y et C_u, C_y sont respectivement les pentes et les origines virtuelles de ces lois de similitude. Les figures 3 et 4 présentent l'évolution de ces constantes en fonction du nombre de Reynolds et du rapport de vitesse. Ces constantes dépendent faiblement du nombre de Reynolds,

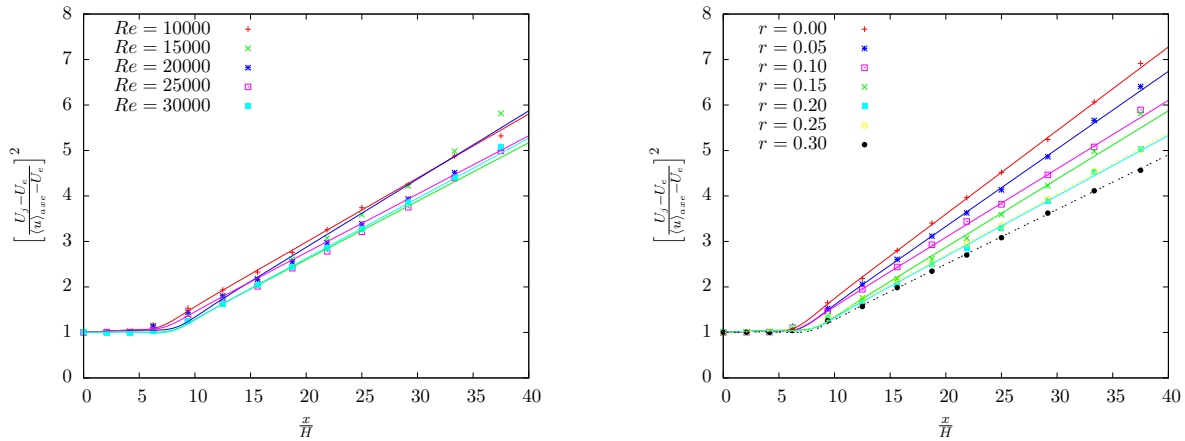


FIG. 1 – Évolution le long de l'axe du jet de la vitesse moyenne pour $r = 0.15$ (à gauche) et $Re = 15\,000$ (à droite).

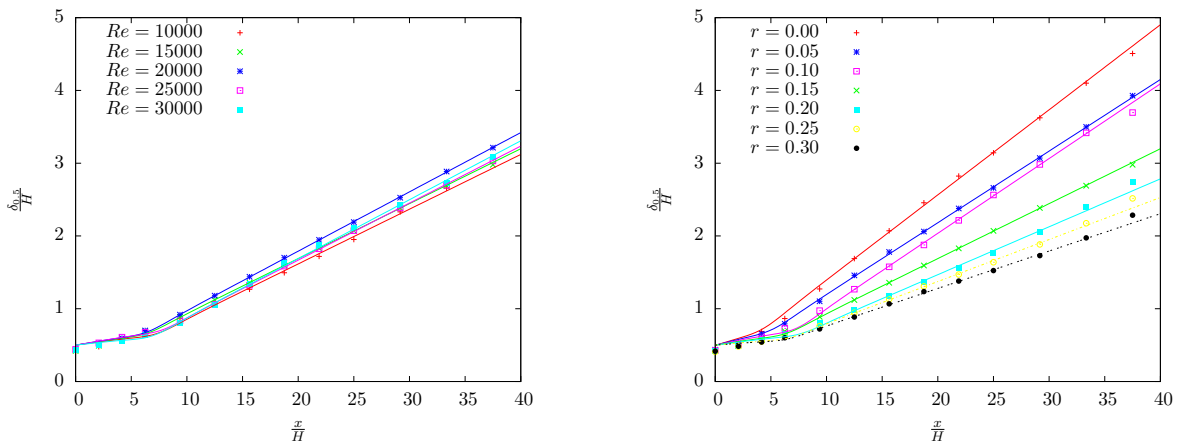


FIG. 2 – Évolution le long de l'axe du jet de la demi-épaisseur du jet pour $r = 0.15$ (à gauche) et $Re = 15\,000$ (à droite).

ce qui est en accord avec les travaux de Deo *et al.* [7]. Lorsque le rapport de vitesse augmente, les pentes diminuent significativement et les origines virtuelles reculent vers l'amont. Ce comportement correspond à une décroissance de la vitesse axiale et un épanouissement du jet plus lent pour des vitesses d'advection plus grandes. Pour $r = 0$, le jet plan s'épanouit sans co-courant avec $K_y = 0, 11$, soit une valeur proche de 0,1 obtenue par Gutmark et Wygnanski [3]. Il est communément admis que le comportement de l'écoulement dans la zone pleinement développée est indépendant des conditions génératrices du jet. Les pentes sont donc aisément comparables d'une expérience à l'autre. En revanche, les origines virtuelles dépendent fortement de ces conditions amont et sont donc assez peu confrontées.

4 Conclusion

Dans la gamme des paramètres de contrôle abordée, le jet plan turbulent se développe conformément aux lois de puissance de la théorie pour le jet fort du début de la zone de similitude en $\frac{x}{H} \simeq 8$ jusqu'à au moins pour $\frac{x}{H} = 40$. Ce résultat est en accord avec Everitt et Robins [5] lesquels observent l'apparition d'un comportement de jet faible plus loin en aval et pour des rapports de vitesse plus élevés. Le rapport de vitesse influe fortement sur la vitesse d'épanouissement du jet et de décroissance de la vitesse moyenne ainsi que sur leurs origines virtuelles respectives. En revanche, le nombre de Reynolds influe peu sur ces quantités. Cette présente étude a permis de caractériser le comportement en similitude d'un jet plan en co-courant. Elle donne une assise solide à la perspective d'étudier le jet plan se développant entre 2 co-courants de vitesse et de température différentes plus proche des

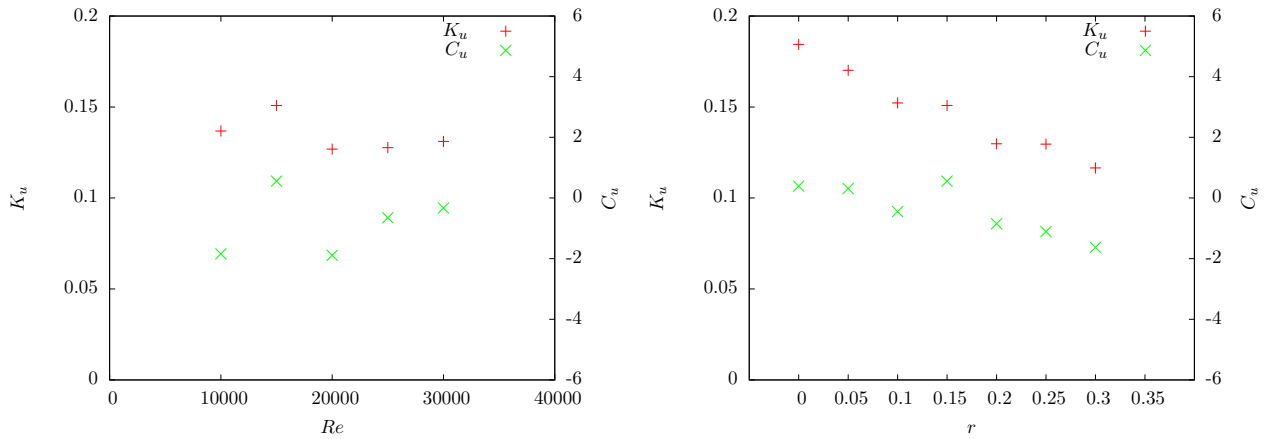


FIG. 3 – Pente K_u et origine C_u pour un comportement en $1/\sqrt{x}$ de la vitesse moyenne au centre du jet en fonction du nombre de Reynolds (à gauche) et du rapport de vitesse (à droite)

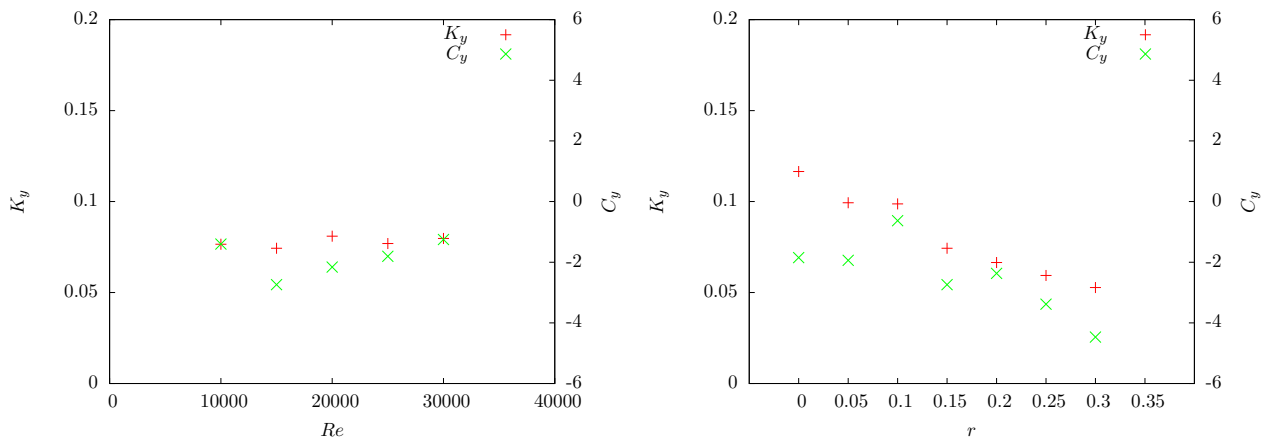


FIG. 4 – Pente K_y et origine C_y pour un comportement lineaire de la demi-épaisseur du jet en fonction du nombre de Reynolds (à gauche) et du rapport de vitesse (à droite)

configurations industrielles pour la séparation d'ambiance. Cette future étude permettra notamment de caractériser les mécanismes de transfert de scalaire pour les rideaux d'air chauds ou froids en régime de convection mixte ou forcée.

Références

- [1] B.G. Van Der Hegge Zijnen. Measurements of the velocity distribution in a plane turbulent jet of air. *Appl. sci. Res*, A-7 :256–276, 1958.
- [2] G. Heskestad. Hot wire measurements in a plane turbulent jet. *J. Appl. Mech.*, 32 :721–734, 1965.
- [3] E. Gutmark and I. Wygnanski. The planar turbulent jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 73 :465–495, 1976.
- [4] L. J. S Bradbury. The structure of a self-preserving turbulent plane jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 23 :31–64, 1965.
- [5] K. W. Everitt and A. G. Robins. The development and structure of turbulent plane jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 88 :563–583, 1978.
- [6] N. Rajaratnam. *Turbulents jet*. Elsevier, Amsterdam, 1976.
- [7] R. C. Deo, J. Mi, and G. J. Nathan. The influence of reynolds number on a plane jet. *Physics of Fluids*, 20(7) :075108, 2008.