

Evolution longitudinale des moments d'ordre deux dans un écoulement turbulent plan pleinement développé soumis à un soufflage pariétal localisé

A. Mazouz, M. Haddad, L. Labraga et L. Keirsbulck

Laboratoire de Mécanique et d'Energétique., Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, Le Mont Houy, 59313 Valenciennes Cedex 9, France

Résumé :

L'effet du soufflage pariétal, appliqué à travers une bande poreuse locale, sur un écoulement turbulent pleinement développé en canal plan a été quantifié en mesurant, par anémométrie à fils chauds, les principales composantes du tenseur de Reynolds. Le taux de soufflage, défini par $F (\equiv V_p / U_0$, où V_p et U_0 représentent respectivement la vitesse moyenne de soufflage et celle sur l'axe du canal) ne dépasse pas 5%. En aval de la bande poreuse, les résultats indiquent que les composantes du tenseur de Reynolds $(\overline{u^2})^+$, $(\overline{v^2})^+$ et $-(\overline{uv})^+$, normalisées par la vitesse de frottement sans soufflage, sont fortement modifiées par le soufflage. Le degré de modification augmente quand le taux de soufflage augmente mais se réduit en s'éloignant longitudinalement de la bande poreuse. Les trois profils s'écartent du cas sans soufflage formant ainsi un maximum localisé dans la zone logarithmique. Cet écart se réduit progressivement quand on s'éloigne longitudinalement de la bande de soufflage. Ce maximum augmente avec la valeur de F . Les résultats suggèrent que l'activité turbulente dans la région de paroi est fortement influencée par le soufflage soulignant ainsi une modification dans le transport des tensions de Reynolds.

Abstract :

The effect of wall blowing applied through a porous localized strip on fully developed turbulent channel flow has been quantified by measuring the main Reynolds stresses using the hot wire anemometry. The magnitude of blowing rate $F (\equiv V_p / U_0$, where V_p and U_0 is blowing and centreline velocity, respectively) are less than 5%. Downstream of the strip, the results showed that the components of the Reynolds stresses $(\overline{u^2})^+$, $(\overline{v^2})^+$ and $-(\overline{uv})^+$, normalized by the friction velocity, are significantly altered by blowing. The degree of alteration is increased as the blowing rate increases, but reduces as the streamwise distance is increased. The three profiles deviate from the no blowing case exhibiting a maximum located in the logarithmic region. The departure is reduced as the streamwise position is increased. The overall results suggest that the turbulent activity in the wall region is strongly interfering with blowing highlighting an alteration in the turbulent transport of the Reynolds stresses.

Mots clefs : écoulement turbulent, canal, soufflage, moments d'ordre deux.

Introduction

Des efforts importants ont été consacrés au développement des techniques de contrôle de la turbulence par des procédés actifs. Une attention particulière a été attribuée à l'étude du soufflage pariétal uniforme ou localisé [1-15]. Les résultats des différentes études concernant le soufflage indiquent l'effet sur les champs moyen et fluctuant des écoulements turbulents. On recense l'effet du soufflage sur : les vitesses

moyennes longitudinales, les moments statistiques de différents ordres, les échelles de turbulence, les structures cohérentes etc. Un des principaux résultats retenus est l'adaptation rapide du champ des vitesses moyennes longitudinales à la nouvelle condition de paroi. Ce dernier se traduit par un déficit des vitesses moyennes par rapport au cas sans soufflage dans la région de paroi. Ce déficit dépend essentiellement de deux paramètres, le premier appelé taux de soufflage $F \left(\equiv V_p / U_{0(\infty)} \right)$ et le second appelé nombre de Reynolds rapporté à l'épaisseur de la quantité de mouvement : $Re_{\delta_{2_0}} \left(\equiv U_{0(\infty)} \delta_{2_0} / \nu \right)$. Les indices 0 et ∞ font référence à la vitesse moyenne axiale dans un écoulement turbulent confiné et à la vitesse extérieure dans une couche limite turbulente, respectivement. Le paramètre δ_{2_0} représente l'épaisseur de quantité de mouvement mesurée dans le cas sans soufflage. Un autre paramètre, noté $\sigma \left(\equiv V_p w / U_{0(\infty)} \delta_{2_0} \right)$, prenant en compte la géométrie et la dynamique du soufflage est introduit à la place de F , où w représente la largeur de la bande poreuse. Ce dernier paramètre est considéré comme le facteur déterminant de l'effet du soufflage local sur les caractéristiques des écoulements turbulents [3,7]. Plusieurs études ont montré que le soufflage pariétal local réduit fortement le frottement pariétal à la position du soufflage [3, 10, 15]. Park et Choi [10] ont expliqué que cette réduction est due à un affaiblissement du phénomène d'éjection dans la région de très proche paroi et cela malgré l'augmentation des valeurs des principales composantes du tenseur de Reynolds en aval du soufflage. Krogstad et Kourakine [12], Senda et al. [2], Sumitami et Kasagi [5], Haddad al. [14,15] ont montré que la structure de la turbulence est fortement dépendante du paramètre σ . Le rétablissement de l'écoulement aux conditions sans soufflage dépend aussi de σ . Dans ce travail, on s'est intéressé à la réponse des moments d'ordre deux des vitesses fluctuantes longitudinale u et normale v d'un écoulement turbulent pleinement développé en aval d'une bande poreuse de soufflage localisé. L'évolution longitudinale des profils des intensités de turbulence longitudinale $(u^2)^+$ et normale $(v^2)^+$ ainsi que celui de la tension de cisaillement $-(\overline{uv})^+$ a été examinée pour deux valeurs du taux de soufflage : $F=0.03$ et 0.05 ($\sigma = 0.022$ et 0.036) et un nombre de Reynolds $Re_{\delta_{2_0}} = 452$. Le nombre de Kármán, noté $h^+ \left(\equiv h U_{\tau_0} / \nu \right)$, où h représente la demi hauteur du canal) est de l'ordre de 254 où U_{τ_0} représente la vitesse de frottement dans le cas sans soufflage.

2. Dispositif expérimental et techniques de mesures

Les expériences sont réalisées dans un écoulement turbulent pleinement développé du type canal plan soumis à un soufflage pariétal local. La veine d'essai présente une longueur de 5m avec une section transversale rectangulaire de dimensions : 3cm x 45cm. Le soufflage est appliqué à travers une bande poreuse située à 4m ($\approx 267h$) de l'entrée du canal. La bande est disposée normalement à la direction de l'écoulement turbulent moyen [Fig. 1-a]. Des mesures préliminaires des vitesses moyennes et fluctuantes en amont de la bande poreuse indiquent que l'écoulement turbulent est pleinement développé à la position du soufflage. Toutes les mesures sont obtenues à la même vitesse longitudinale axiale : $U_0=5\text{m/s}$, ce qui correspond à un nombre de Reynolds $Re_h \left(\equiv U_0 h / \nu \right) \approx 5000$. La bande poreuse est de longueur $w = 10\text{mm} \left(\approx 170 \nu / U_{\tau_0} \right)$ est de même largeur que celle du canal. Elle est en bronze fritté avec des pores de diamètre 40-80 μm ($\approx (0.4 - 0.9170) \nu / U_{\tau_0}$). Le soufflage est appliqué à travers un tube poreux relié à ses deux extrémités à un réservoir d'air comprimé. L'ensemble est monté dans un caisson rectangulaire en plexiglas [Fig. 1-b]. Deux valeurs du taux de soufflage ont été testés: $F = V_p / U_0 \approx 0.03$ et 0.05 , ce qui correspond à $\sigma \left(\equiv V_p w / \delta_{2_0} U_0 \right) \approx 0.022$ et 0.036 . L'uniformité de la vitesse de soufflage a été vérifiée le long de bande poreuse par mesure à fils chauds. Les mesures des vitesses fluctuantes longitudinale u et verticale v sont obtenues par anémométrie à fils chauds au moyen de la sonde double du type 55P61. La longueur de chacun des deux fils correspond à 21 unités de paroi [16]. Les fils sont chauffés à température constante avec un rapport de surchauffe égale à 1.5. Les mesures ont été réalisées à quatre stations en aval de la bande

poreuse ($x/h \approx 0.67, 2, 7.3$ et 20.7). L'origine des distances x est comptée à partir du bord de fuite de la bande poreuse.

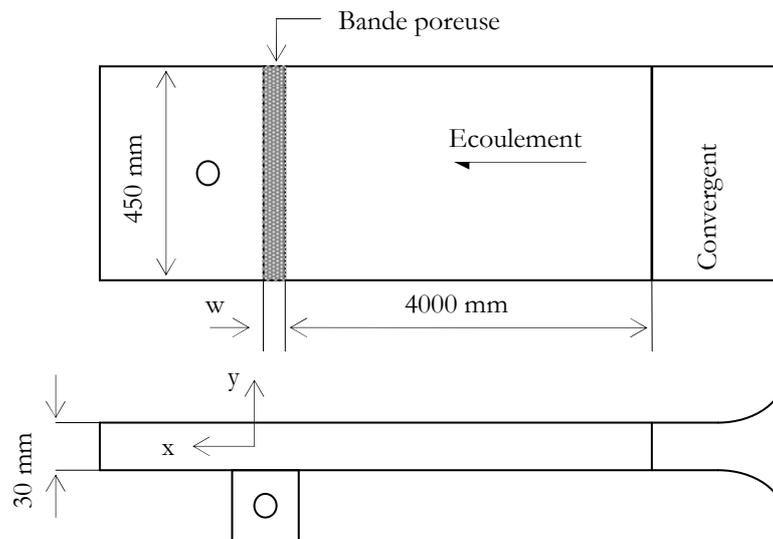


Figure 1-a. schéma du dispositif expérimental.

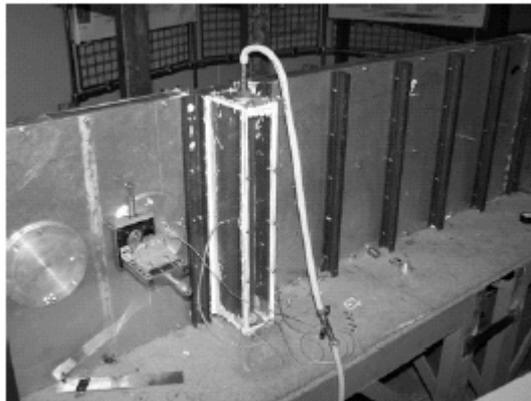


Figure 1-b. Schéma du système de soufflage.

3. Analyse des résultats

Les figures 2 et 3 montrent l'évolution longitudinale des intensités de turbulence longitudinale $(\overline{u^2})^+$ et normale $(\overline{v^2})^+$ en aval de la bande poreuse ($x/h=0.67; 2; 7.3$ et 20.7). Afin de mettre en évidence les régions perturbées par le soufflage pariétal, nous avons normalisé ces moments par la vitesse de frottement obtenue dans le cas sans soufflage [12]. Les mesures des deux cas, avec et sans soufflage, sont réalisées aux mêmes stations longitudinales. Les résultats sans soufflage, indiqués par $F = 0$, ont été inclus dans les différents graphes pour souligner l'effet du taux de soufflage. En aval proche la bande poreuse ($x/h \leq 2$), Les résultats des deux figures montrent une augmentation nette dans les valeurs de $(\overline{u^2})^+$ et $(\overline{v^2})^+$ par rapport au cas sans soufflage. Cette augmentation dépend fortement de la valeur de F et reste importante dans la zone limitée par $y^+ \leq 100$. Dans le cas de $F = 0.05$, une augmentation de 100% est constatée à $y^+ \approx 60$ dans les valeurs de $(\overline{u^2})^+$ et $(\overline{v^2})^+$ par rapport au cas sans soufflage. L'écoulement turbulent s'adapte donc rapidement à la nouvelle condition de paroi. La figure 2-b montre l'influence du soufflage sur les valeurs de $(\overline{u^2})^+$ qui s'étend jusqu'à $y^+ \approx 150$ pour la plus grande valeur de F . L'effet du soufflage s'atténue progressivement

en s'éloignant de la paroi. Pour $x/h > 2$ et dans la région de proche paroi limitée par $y^+ \leq 50$, l'effet du soufflage disparaît et les deux intensités turbulentes retrouvent les valeurs du cas sans soufflage. En dehors de cette région, les valeurs de $(\overline{u^2})^+$ et $(\overline{v^2})^+$ se détachent de celles sans soufflage indiquant la présence d'un maximum dans la zone logarithmique. On constate que ce maximum n'est pas relié au terme de la production turbulente, qui peut avoir lieu généralement à la position de paroi $y^+ \approx 15$ dans le cas canonique. L'effet du soufflage sur les intensités longitudinales $(\overline{u^2})^+$ est plus prononcé que celui sur les intensités normales $(\overline{v^2})^+$. L'écart entre les profils avec soufflage et sans soufflage reste significatif dans la région de paroi du fait que les activités turbulentes sont importantes dans cette région. Cet écart se réduit progressivement en s'éloignant de la bande de soufflage sans disparaître totalement. La modification globale de ces profils par le soufflage local souligne l'interaction du transport turbulent avec ce soufflage. L'effet du nombre de Reynolds $Re_{\delta_{20}}$ sur les profils de turbulence dans la région externe doit aussi être pris en compte.

Fig 2. Evolution longitudinale des intensités de turbulence longitudinale $(u^2)^+$. Symboles vides (a) : $F = 0.03$ et (b) : $F = 0.05$. Symbole plein : $F=0$.

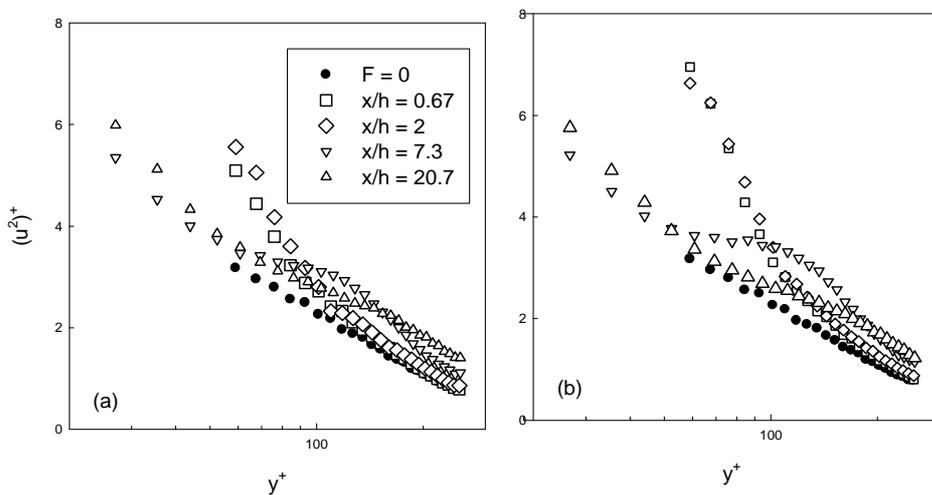
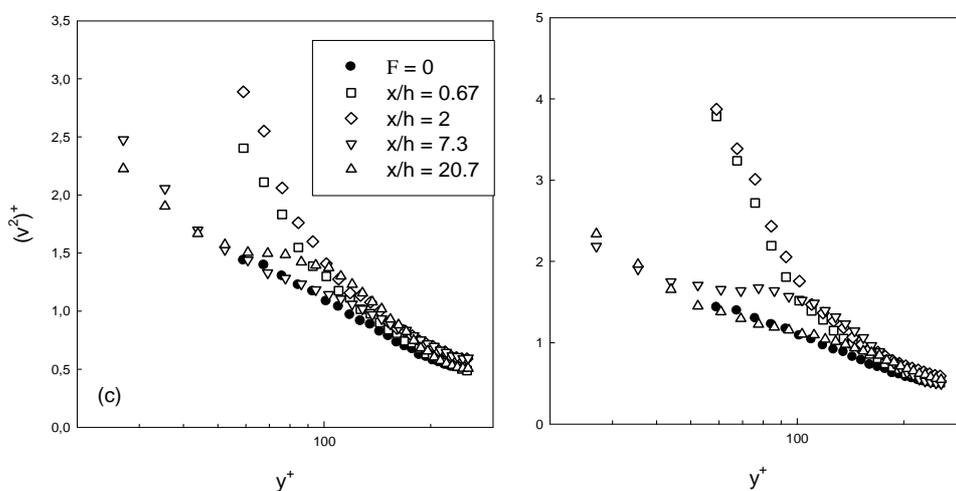


Fig. 3. Evolution longitudinale des intensités de turbulence normale $(v^2)^+$. Symboles vides : (c) : $F = 0.03$ et (d) : $F = 0.05$. Symbole plein : $F=0$.



Les figures 4 -a et -b montrent la distribution de la tension de cisailment $-(\overline{uv})^+$ à différentes stations de

mesure. En aval proche de la bande poreuse ($x \leq 2h$), les valeurs de $-(\overline{uv})^+$, comparés au cas sans soufflage, augmentent fortement dans la région logarithmique. Ces valeurs dépendent du taux de soufflage F et sont d'autant plus élevées que F est grand. Loin de la paroi, l'effet du soufflage s'atténue progressivement pour retrouver les valeurs du cas sans soufflage. Loin de la bande poreuse ($x > 2h$), l'effet du soufflage est diffusé vers la zone externe avec la présence d'un maximum localisé à ($y^+ \approx 100$). L'effet de $Re_{\delta_{20}}$ sur l'évolution longitudinale de $-(\overline{uv})^+$ doit aussi être pris en compte. Cette modification de la tension de cisaillement par le soufflage signifie nécessairement une modification des structures cohérentes dans la région pariétale.

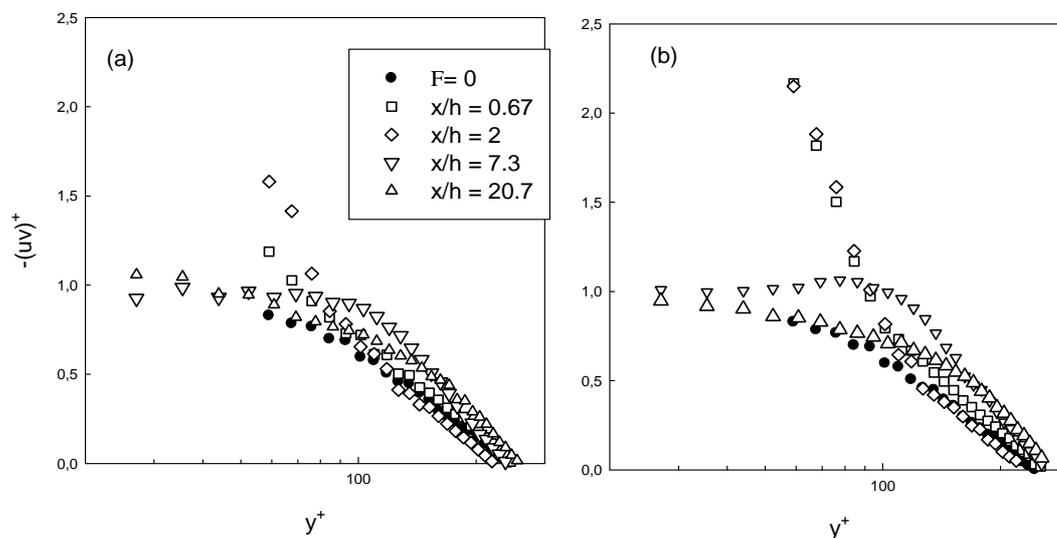


Fig. 4. Distribution des tensions de Reynolds $(uv)^+$ à différentes stations longitudinales. Symboles vides : (a): $F = 0.03$ et (b): $F = 0.05$. Symbole plein : $F=0$.

4. Conclusions

L'évolution longitudinale des principales composantes du tenseur de Reynolds d'un écoulement turbulent pleinement développé en canal plan soumis à un soufflage pariétal localisé a été étudiée expérimentalement. En aval de la bande poreuse et dans la région de paroi, les profils des trois composantes $(\overline{u^2})^+$, $(\overline{v^2})^+$ et $-(\overline{uv})^+$ avec soufflage s'écartent de ceux sans soufflage. Cet écart augmente quand le taux de soufflage F augmente. Loin de la bande poreuse, la modification pariétale se manifeste dans la zone logarithmique par la présence d'un maximum qui s'atténue progressivement quand x/h augmente. Ce maximum reste prononcé dans le cas de $(\overline{u^2})^+$ et $-(\overline{uv})^+$. Ces modifications dans les profils des intensités de turbulence par rapport au cas sans soufflage suggèrent un changement dans le mode de transport de la tension de cisaillement. Le rétablissement total de ces trois moments à leurs valeurs sans soufflage doit être obtenu loin de la bande de soufflage ($x > 20h$).

References

- [1] Simpson R.L. Characteristics of turbulent boundary layer at low Reynolds numbers with and without

- mass transpiration. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 42, 769-802, 1970.
- [2] Senda M., Kawaguchi Y., Suzuki K. And Sato T. Study on turbulent boundary layer with injection. *Bulletin of Japanese Society of Mechanical Engineers*, vol. 24, No 196, 1748-1755, 1981
- [3] M. Sano and N. Hirayama, Turbulent boundary layers with injection and suction through a slit, *Bull. JSME* 28, 807, 1985.
- [4] A. P. Silva-Freire, An asymptotic solution for transpired incompressible turbulent boundary layers, *Int. J. Heat Mass Transfer* 31, 1011, 1988.
- [5] Sumitani Y. And Kasagi N. Direct Numerical Simulation of Turbulent Transport with uniform wall injection and suction. *AIAA Journal*, vol. 33, No 7, 1220-1228, 1995.
- [6] Chung Y.M. and Sung H.J. effects of local blowing on spatially evolving turbulent channel flow. *Proceeding of the Fourth KSME JSME Fluid Engineering Conference*, Pusan, Republic of Korea, 673-676, 1998.
- [7] Tardu S. Near wall turbulence control by local time periodical blowing. *Experimental Thermal and Fluid Science* 16, 41-53, 1998.
- [8] Chung Y.M. and Sung H.J. Asymmetric response of turbulent channel flow to wall suction and blowing. *Turbulence and Shear Flow Phenomena-I*, edited by S. Banerjee and K. Eaton, Begell House, New York, 423-428, 1999.
- [9] Krogstad P.-A and Kourakine A. The response of a turbulent boundary layer to injection through a porous strip. *Turbulence and Shear Flow Phenomena-1*, edited by S. Banerjee and J.K. Eaton, Begell House, New York, 429-434, 1999.
- [10] Park J. and Choi H. Effects to uniform blowing or suction from a spanwise slot on a turbulent boundary layer flow. *Physics of Fluids*, vol. 11, No 10, 3095-3105, 1999.
- [11] Chung, Y.M., Sung H.J., and Lu K.H. Response of turbulent channel flow to sudden wall suction and blowing. *Advances in Turbulence VIII*, edited by C. Dopazo, International Center for Numerical Methods in Engineering, Barcelona, Spain, 2000, pp. 109-112.
- [12] Krogstad P.-A and Kourakine A. Some effects of localized injection on the turbulence structure in a boundary layers. *Physics of Fluids*, vol. 12, No 11, 2990-2999, 2000.
- [13] Chung Y.M. and Sung H.J. Initial Relaxation of spatially evolving turbulent channel flow subjected to wall blowing and suction. *AIAA Journal*, Vol. 39, No 11, 2091-2099, 2001.
- [14] M. Haddad, L. Labraga and L. Keirsbulck, Turbulence structures downstream of the localized injection in a fully developed channel flow, *J. Fluid Eng.* 128, 611, 2006.
- [15] M. Haddad, L. Labraga and L. Keirsbulck, Effects of blowing through a porous strip in a turbulent channel flow, *Experimental Thermal and Fluid Science* 31, 1021, 2007.
- [16] P.M. Ligrani and P. Bradshaw, "Spatial resolution and measurements of turbulence in the viscous sublayer using subminiature hot-wires probes" *Exp. Fluids* 5, 407, 1987.