

# Analyse par PIV de l'interaction d'une paire de jets synthétiques avec le sillage d'un corps profilé en vue de réduire la traînée

M. BEN CHIEKH<sup>a</sup>, M. FERCHICHI<sup>b</sup>, M. MICHARD<sup>c</sup>, J.C. BERA<sup>d</sup>

a. LESTE, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Monastir 5019, Tunisie

b. Collègue Militaire Royale du Canada

c. LMFA, Ecole Centrale de Lyon, 69134 Ecully Cedex, France

d. Université Lyon 1, U1032 INSERM, Lyon, France

## Résumé :

Ce travail porte le contrôle du sillage d'une plaque plane par des actionneurs de type jet synthétique en vue de manipuler le lâcher tourbillonnaire qui affecte la traînée de pression et les oscillations périodiques des forces aérodynamiques. Des mesures de vitesse par vélocimétrie par images de particules (PIV) ont été réalisées dans une soufflerie à faible turbulence pour caractériser les interactions entre le sillage et l'écoulement périodique émanant des jets synthétiques placés symétriquement à la base du modèle à une distance de  $\pm 0,27 h$  au niveau du bord de fuite. Les dynamiques des sillages naturel et contrôlé sont analysées à travers les champs moyens de vitesse, les contraintes de Reynolds et l'identification des structures cohérentes du sillage. On constate que le mécanisme du contrôle dépend de la phase entre les excitations des actionneurs. Dans le cas d'excitations en phase, une parfaite synchronisation des couches de cisaillement est observée ce qui conduit à une réduction des deux composantes de la traînée (moyenne et turbulente). Les excitations en opposition de phase sont jugées plus efficaces avec une importante réduction de la composante moyenne de la traînée.

## Abstract :

The interactions of the wake of a flat plate and the periodic flow emanating from a pair of synthetic jets placed symmetrically at the trailing edge, spanning the width of the plate, were experimentally studied considering the flow physics that led to wake drag reduction. The experiments were carried out in a low turbulence wind tunnel at a Reynolds number of 7200. The synthetic jet actuators, providing a momentum addition of  $C_u=24\%$ , were positioned symmetrically at the model base at a distance of  $\pm 0.27 h$  from the base centerline to introduce perturbations at early stages of the shear layers' development. Two-component velocity measurements were acquired using Particle Image Velocimetry, for natural wake and controlled wake using symmetric synchronous actuation and out-of-phase actuation. Phase-averaged velocity fields through the vorticity contours were determined to provide insights into the actuation mechanisms, namely, the role of the blowing and the suction phases of the actuation cycle on the flow dynamics.

**Mots clefs:** contrôle, sillage, PIV, tourbillon, traînée, moyenne de phase.

## 1 Introduction

D'après Zdravkovich [1], les écoulements autour des obstacles (cylindre par exemple) sont dominés par des instabilités de haute fréquence de type « convectives » dans la couche de cisaillement à la séparation et des instabilités de fréquences inférieures de type « absolues » régissant la formation de tourbillons dans le proche sillage. Ces instabilités rendent les écoulements autour des obstacles de référence (cylindre, carré, sphère,...) très intéressants pour étudier le contrôle d'écoulement et développer des stratégies de suppression de la formation des tourbillons. Diverses techniques passives et actives de contrôle des sillages des corps profilés ayant un bord de fuite qui présente une arrête vive, ont été développées. Ces techniques seraient très bénéfiques pour les configurations dites à dos plat (flatback en anglais) ou pour des applications

aérodynamiques de bord de fuite telles que les pales d'éoliennes, profils aérodynamiques supercritiques, etc. Ces profils présentent des caractéristiques attractives car la portance est améliorée et la structure est plus résistante en raison du bord de fuite plus épais. Cependant, ils génèrent une traînée de pression plus élevée.

Les techniques de contrôle passif d'écoulement sur les corps profilés ont été le sujet de plusieurs études. Tanner [2] a employé des segments en forme de M et des extensions de bords de fuite; Grinstein et al. [3] ont placé une lame séparatrice dans l'axe de sillage; Tombazis et Bearman [4] ont fixé un ensemble de surfaces ondulées au culot; Park et al. [5] ont connecté des petites languettes au bord de fuite, etc. Dans ces études, des réductions significatives de traînée ont été réalisées par la suppression de l'interaction entre les deux couches de cisaillement et/ou en affectant le tourbillon dans sa zone de formation. Des réductions de la traînée de forme ont également été réalisées en modifiant la dynamique de l'écoulement dans le proche sillage des corps profilés soit par aspiration [6] soit par soufflage [7,8] au bord de fuite. Park et Cimbalà [8] ont montré l'efficacité d'une injection adéquate à partir deux fentes, positionnées symétriquement autour du centre de la base. Ces moyens passifs sont fiables en raison de simplicité. Toutefois, lors de l'utilisation en dehors des conditions nominales de conception, ces systèmes statiques peuvent induire des effets négatifs.

Les techniques de contrôle actif pourraient améliorer les performances en adaptant la gamme d'action aux conditions de fonctionnement. Le contrôle actif de sillage des obstacles a été rapporté dans nombreuses publications proposant une variété de techniques de contrôle actif, on cite : les oscillations du corps, le forçage électromagnétique, l'actionneur plasma, les jets pulsés et les jets synthétiques. Cependant, les techniques de contrôle actif destinées à réduire la traînée des corps profilés sont rares dans la littérature et elles n'ont été abordées que récemment. Henning et al. [9] et Pastoor et al. [10] ont utilisé un actionneur de type jet synthétique pour contrôler le sillage d'un profil à arêtes vives à travers de minces fentes disposées aux deux bords de fuite. Ils indiquent que l'action du jet synthétique augmente l'amplitude des perturbations dans la couche de cisaillement et rectifie le processus d'enroulement. En outre, les actionneurs commandent la phase des tourbillons et la synchronisation des couches de cisaillement supérieure et inférieure peut être accomplie lorsque les deux actionneurs sont en phase. Dans ce cas, lorsque le contrôle est appliqué de manière symétrique, la suppression de l'effet des allées tourbillonnaire est obtenue pour une fréquence de contrôle dans la plage d'environ 0,28 à 1,15 fois la fréquence des instabilités naturelles du sillage, ce qui conduit à une récupération de pression. Le contrôle symétrique en phase semble être le plus efficace (jusqu'à une augmentation de 40% de la pression au niveau de la base du profil) pour une fréquence d'excitation d'environ 0,65 fois la fréquence de l'instabilité du sillage. L'application des excitations en opposition de phase provoque une réduction significative de la traînée, malgré une amplification du lâcher et donc une diminution de la récupération en pression.

L'objectif du présent travail est d'étudier le mécanisme physique qui permet la réduction de la traînée en utilisant un système de contrôle actif basé sur une action périodique en boucle ouverte. Une étude expérimentale sur un écoulement de sillage de plaque plane a été menée dans le but de tester différentes stratégies de contrôle par jets synthétiques. L'objectif ultime est d'arriver à conjuguer les divers effets et analyser les mécanismes d'action mis en jeu lors des différentes stratégies de contrôle.

## 2 Dispositif expérimental

L'étude expérimentale a été réalisée dans une soufflerie de section 384 x 100 mm<sup>2</sup>. Le modèle est une plaque plane de bord d'attaque elliptique, montée à mi-hauteur de la section de la soufflerie (Figure 1.a). L'écoulement est décrit en un système de coordonnées cartésiennes (x,y,z) dont l'origine est situé au centre de la base arrière de la plaque. Cette dernière est de longueur  $c=520$  mm, d'épaisseur  $h=12$  mm, et d'une envergure  $w=90$  mm. Le rapport de blocage est de 3%. Sous ces conditions,  $c/h=43.3$  ce qui représente une valeur largement supérieure à la valeur critique de 4.2 reportée par Taylor et al. [11] pour garantir un rattachement de l'écoulement aux surfaces de la plaque avant le bord de fuite. Dans ce travail, la vitesse en amont de la plaque est de 9 m/s, ce qui correspond à un nombre de Reynolds basé sur la hauteur de la plaque de 7200, est comparable à celui de Park et Cimbalà [8]. L'intensité de la turbulence en amont était inférieure à 0.1%. Les couches limites qui se développent sur les surfaces de la plaque sont caractérisées juste avant le bord de fuite par une épaisseur de quantité de mouvement  $\theta=1.45$  mm et une épaisseur de déplacement  $\delta^*=2.05$  mm. Le facteur de forme est  $H=1,41$  ce qui représente une valeur typique de couche limite turbulente.

Un arrangement original de deux actionneurs à jet synthétique couplés à deux paires placées symétriquement le long de l'envergure du culot a été implémenté afin d'obtenir les caractéristiques aérodynamiques du sillage avec et sans activation du contrôle. La figure 1.b-c schématise les deux de fentes qui assurent une excitation

périphérique en mode symétrique ou antisymétrique selon le déphasage appliqué entre les deux actionneurs. L'excitation est fixée à une fréquence de  $f_A=100$  Hz et un coefficient d'addition de quantité de mouvement de chaque actionneur de  $C_{\mu}=24\%$ . La vélocimétrie par images de particules (PIV) en mode tirs aléatoires ou synchronisés est utilisée. Trois cas sont étudiés dans ce travail : le sillage naturel, noté C0, le sillage contrôlé par les actionneurs en mode synchrone (en phase), noté C1, et le sillage contrôlé par les actionneurs en mode alterné (en opposition de phase), noté C2.

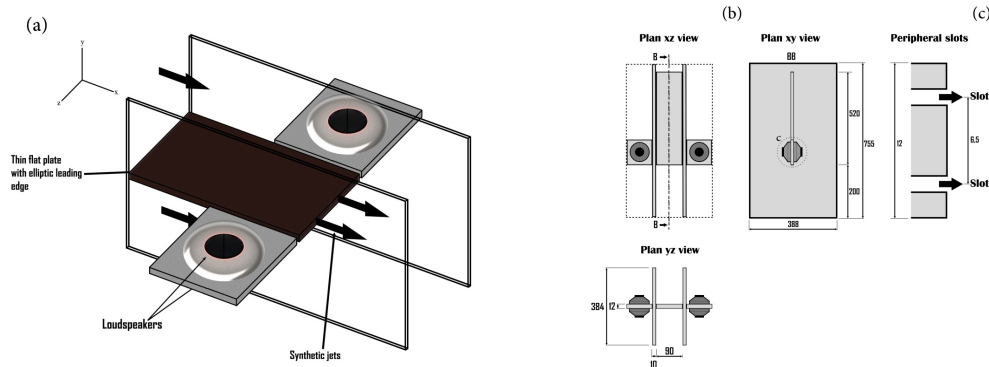


FIG. 1 – Dispositif expérimental (a) définition de la maquette (b) différentes vues (dimensions en mm) (c) position des actionneurs

### 3 Résultats et discussions

#### 3.1 Profils de la vitesse moyenne

Les profils adimensionnels de la composante longitudinale de la vitesse moyenne  $U/U_e$  à différentes positions derrière le culot de  $x/h=1$  à 5 sont présentés sur la Fig. 2. Pour le sillage naturel (C0), on retrouve la forme caractéristique d'un sillage derrière un obstacle. La longueur de la zone de recirculation est  $l_b=1.16 h$ . Lorsqu'un contrôle simultané (C1) est appliqué, l'écoulement moyen présente une diminution importante du déficit de vitesse et même, à partir de  $x/h=3$ , le profil peut être considéré comme uniforme. Lorsque les actionneurs sont en opposition de phase (C2), les profils de la vitesse débitante moyenne présentent un comportement de type "jet faible" au niveau l'axe ( $y=0$ ) et ce à partir de  $x/h=2$ , ce qui démontre l'efficacité du contrôle à combler le déficit de vitesse.

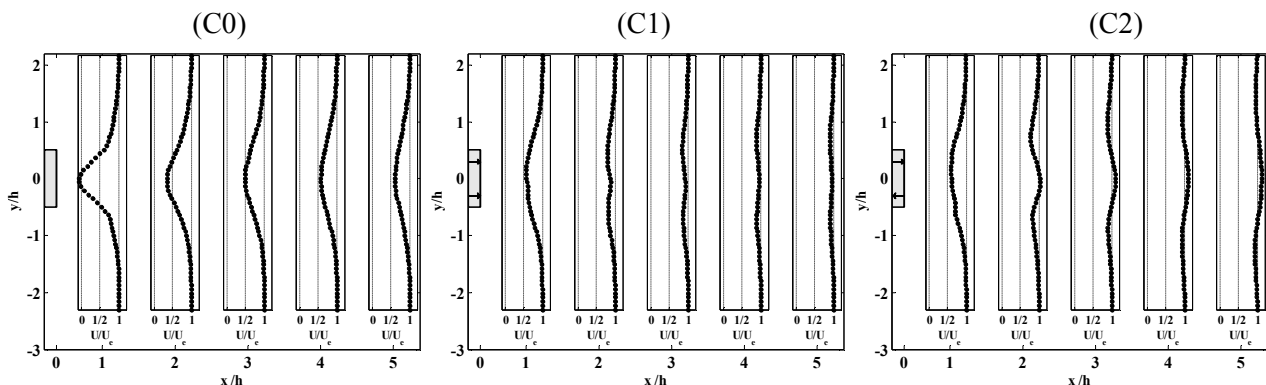


FIG. 2 – Evolution des profils de vitesse longitudinale,  $U_e$  étant la vitesse moyenne en dehors du sillage

#### 3.2 Spectres des fluctuations

La figure 3 illustre le spectre des fluctuations de la vitesse longitudinale dans le sillage mesuré à  $x/h=y/h=2$ . Dans la configuration (C0), le spectre présente un pic fondamental qui correspond à la fréquence du lâcher tourbillonnaire de Von Karman d'environ 135 Hz soit un nombre de Strouhal  $St=0.18$ , qui se situe bien dans la gamme reportés dans Taylor et al. [11]. Lorsque le contrôle est appliqué, les spectres présentent un pic fondamental qui correspond à la fréquence d'excitation. On observe également une réduction de 15dB du bruit de large bande et on remarque l'absence de sous-harmoniques qui est une caractéristique notable du jet synthétique à cause de l'absence d'interactions entre les paires de tourbillons qui forment le jet [12]. Le contrôle influencerait le champ de vitesse instantané par la formation de nouvelles structures

synchronisées à la fréquence des actionneurs et qui interagiraient avec les couches de cisaillement du sillage.

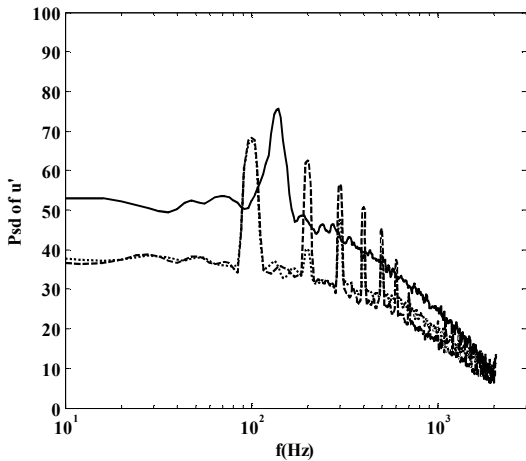


FIG. 3 – Spectres des fluctuations de la vitesse longitudinale mesurés à  $x/h=2$  et  $y=h/2$  pour les configurations : (C0) —, (C1) ---, (C2) ....

### 3.3 Fluctuations turbulentes

Les iso-contours des contraintes de Reynolds longitudinale et transversale sont présentées sur la Figure 4. La composante longitudinale (Fig. 4C0a) présente une distribution caractéristique d'un sillage naturel avec une structure à deux lobes ayant chacun un maximum de 6%, ce qui indique un maximum d'intensité de turbulence de l'ordre de 24%. La composante transversale (Fig. 4C0b) présente également une distribution symétrique avec des valeurs importantes localisées à l'intérieur de la zone de recirculation. Son maximum d'environ 15% est localisé au point  $x/h=l_b$  et  $y/h=0$ .

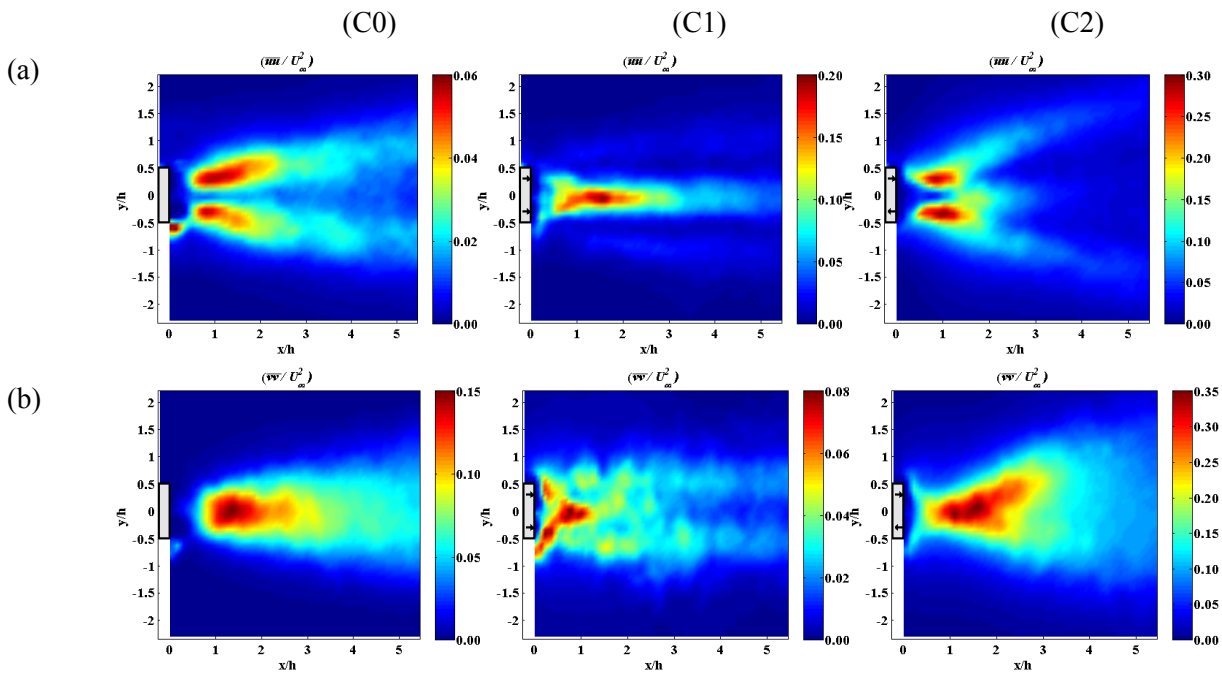


FIG. 4 – Evolution des profils de la vitesse longitudinale

Sous les excitations en phase (C1), la distribution de la contrainte longitudinale de Reynolds (Fig. 4C1a) présente une région réduite de fluctuations avec un pic à  $x/h=1,52$  et  $y=0$ . L'intensité de la turbulence axiale qui lui correspond est de 45%. L'augmentation de l'intensité de la turbulence est due à l'ajout de façon axiale de quantité de mouvement et aussi à l'entraînement induit de l'écoulement externe vers l'axe. La composante transversale (Fig. 4C1b) présente également une région réduite de fortes fluctuations en relation avec le déplacement de la zone la plus intense vers la zone de recirculation. Contrairement à la contrainte longitudinale, la valeur maximale de la contrainte transversale chute de 28%. Les extrema sont situées dans la zone de recirculation. Lorsque les actionneurs sont en opposition de phase (C2), les distributions des contraintes de Reynolds sont semblables à celles tracées pour le sillage naturel (C0) mais avec des fluctuations plus intenses. L'intensité de la turbulence maximale dépasse les 55%.

### 3.4 Réduction de traînée

L'estimation du coefficient de traînée,  $C_D$ , est réalisée en utilisant la méthode décrite par Naghib-Lahouti et al. [13], en raison de la forte ressemblance entre les dispositifs utilisés dans leur étude et la nôtre :

$$C_D = \left[ 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{U}{U_\infty} \left( 1 - \frac{U}{U_\infty} \right) \frac{dy}{h} \right] + \left[ -2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overline{u^2}}{U_\infty^2} \frac{dy}{h} + 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\overline{v^2}}{U_\infty^2} \frac{dy}{h} \right] + \left[ \frac{2\mu}{U_\infty^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \frac{dy}{h} \right] \quad (1)$$

$$= C_{D,\text{moy}} + C_{D,\text{turb}} + C_{D,\text{visq}}$$

Le premier terme est attribué à l'écoulement moyen, le deuxième correspond à la traînée due à la turbulence, et le dernier est un terme de traînée visqueuse négligeable par rapport aux autres termes. Le tableau 1 récapitule les valeurs des différentes contributions en fonction des cas étudiés.

	$C_D$	$C_{D,\text{moy}}$	$C_{D,\text{turb}}$
Sillage naturel (C0)	0.93	0.78	0.15
Contrôle synchronisé (C1)	0.13	0.18	-0.05
Contrôle alterné (C2)	0.08	-0.19	0.27

TAB. 1– Traînée totale et ses différentes contributions pour les configurations C0, C1 et C2

Il apparaît que l'action du contrôle en opposition de phase est la plus efficace dans la réduction de la traînée totale. Ce résultat est en accord avec les résultats de Henning et Pastoor [9,10]. Cependant, chaque stratégie de contrôle (synchrone ou alterné) a engendré des effets différents sur les deux principales contributions moyenne et turbulente,  $C_{D,\text{moy}}$  et  $C_{D,\text{turb}}$ .

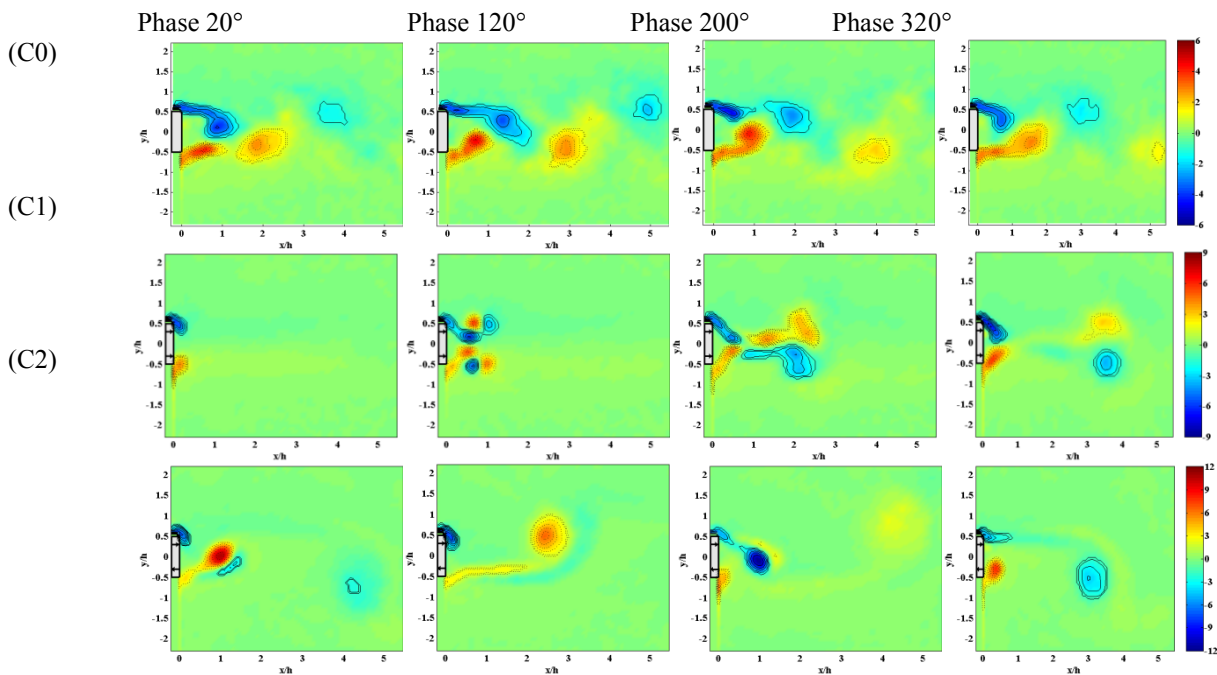


FIG. 5 – Cartographies de la vorticité adimensionnelle  $\frac{\omega_z h}{U_\infty}$  associées aux moyennes de phase

Afin de mieux analyser la dynamique de l'écoulement, la figure 5 donne les évolutions des cartographies de vorticité adimensionnelle  $\frac{\omega_z h}{U_\infty}$  associées aux moyennes de phase du champ de vitesse. Ces cartographies

sont obtenues à partir des mesures PIV en utilisant la technique décrites dans Perrin et al. [14] pour les cas du sillage naturel et à partir des mesures synchronisées avec le signal d'excitation pour les cas où le contrôle est activé. Pour le sillage naturel, la Fig. 5C0 illustre l'évolution du lâcher tourbillonnaire classique. Sous l'action du contrôle synchronisé, le mouvement des structures tourbillonnaires reste axial (Fig. 5C1) avec un important entraînement établi sur une courte distance en aval de la plaque résultant en un profil de vitesse moyenne à peu près uniforme dans le sillage (Fig. 2C0). Ceci explique la diminution considérable de 76%

de  $C_{D,moy}$ . En outre, la plupart de la production de turbulence est limitée à des régions étroites près du bord de fuite (figures 4bC1 et 4bC1) sans être maintenue en aval entraînant ainsi une diminution de la contribution  $C_{D,turb}$ . Dans le cas du contrôle alterné, les structures tourbillonnaires présentent alternativement des trajectoires vers l'axe du sillage (Fig. 5C2). Cela se traduit par un profil de vitesse moyenne, illustré figure 2, ressemblant à celui d'un « jet faible ». Cet ajout de quantité de mouvement conduit au changement de signe du coefficient de traînée. Cependant, comme le montre les figures 5C2, la nature oscillante du mouvement tourbillonnaire augmente la turbulence dans le sillage de sorte que les fluctuations transversales dominent en amplitude tout en agissant sur une large zone du sillage et engendrent par conséquent, l'augmentation de la contribution  $C_{D,turb}$  de la traînée totale.

## 4 Conclusions

Les sillages naturel et contrôlé par jets synthétiques d'une plaque plane sont étudiés en utilisant des mesures PIV. On a comparé deux stratégies de contrôle correspondant à des excitations synchrone et alterné. Les principales conclusions de cette étude sont : (1) Le mécanisme de suppression de l'émission du tourbillon naturel dépend de la stratégie, dans le contrôle synchrone, les tourbillons extérieurs des jets synthétiques interfèrent avec les couches de cisaillement, et pour le contrôle alterné, la raison de la suppression réside dans les flux croisés des structures des jets synthétiques. (2) Dans le cas synchrone, le contrôle conduit à la fois à une synchronisation des couches de cisaillement et à un important entraînement. (3) Le contrôle alterné s'est avéré être le plus efficace dans la réduction de la traînée ; dans ce cas, une réduction considérable de la traînée moyenne est observée suite à l'ajout de la quantité de mouvement et l'apparition d'un comportement "jet-like" de la vitesse moyenne malgré que l'augmentation de traînée induite par les fluctuations transversale.

## References

- [1] Zdravkovich M., Flow around circular cylinder: Fundamentals, Oxford University Press, 1997.
- [2] Tanner M., New Investigation for Reducing the Base Drag of Wings with a Blunt Trailing Edge. Aerodynamic Drag, AGARD-CP-124, 12-1–12-9, 1973.
- [3] Grinstein F. F., Boris J. P., Griffin O. M., Passive pressure-drag control in a plane wake, AIAA Journal, 29, 1436–1442, 1991.
- [4] Tombazis N. and Bearman P. W., A Study of Three-Dimensional Aspects of Vortex Shedding from a Bluff Body with a Mild Geometric Disturbance, Journal of Fluid Mechanics, 330, 85-112, 1997.
- [5] Park H Li D., Jeon, W. P., Hahn S., Kim J., Kim J., Choi J, Choi H., Drag reduction in flow over a two-dimensional bluff body with a blunt trailing edge using a new passive device, Journal of Fluid Mechanics, 563, pp. 389–414, 2006.
- [6] Sharma S. D., Sahoo R. K., Control of the periodic wake behind a plane blunt base, In fluid mechanics and its applications, 53, IUTAM Symposium on Mechanics of Passive and Active Flow Control (eds)GEA Meier and PR Viswanath (Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic), pp. 267–272, 1998.
- [7] Wu Y., Zhu X., Du Z., Experimental investigation on the momentumless wake using trailing edge blowing, IMechE Vol. 222 Part C: J. Mechanical Engineering Science, pp. 1478-1486, 2008.
- [8] Park W.J., Cimbalá J.M., The effects of jet injection geometry on two-dimensional momentumless wakes. Journal of Fluid Mechanics, 224, pp. 29–47, 1991.
- [9] Henning L., Pastoor M., King R., Noack B., Tadmor G., Feedback control applied to the bluff body wake. In R. King, ed., Active Flow Control, Vol. 95 of Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 2007, Springer
- [10] Pastoor M., Henning L., Noack B.R., King R., Tadmor G., Feedback shear layer control for bluff body drag reduction, Journal of Fluid Mechanics, 608, pp. 161-196, 2008.
- [11] Taylor Z.J., Palombi E., Gurka R., Kopp G.A., Features of the turbulent flow around symmetric elongated bluff bodies, Journal of Fluids and Structures, 27, pp. 250-265, 2011.
- [12] Smith B. L., Glezer A., The formation and evolution of synthetic jets, Physics of fluids, 10, 2281, 1998.
- [13] Naghib-Lahouti A., Doddipatla L. S., Hangan H., Secondary wake instabilities of a blunt trailing edge profiled body as a basis for flow control, Experiments in Fluids, pp. 1547-1566, 2012.
- [14] Perrin R., Braza M., Cid E., Cazin S., Barthet A., Sevrain A., Mockett C., Thiele F., Obtaining phase averaged turbulence properties in the near wake of a circular cylinder at high Reynolds number using POD, Experiments in Fluids, 43, pp. 341-355, 2007.