HAL
open science

Interaction entre un tourbillon longitudinal et une couche limite se développant sur un NACA0015

Sébastien Prothin, Henda Djeridi, Jean-Yves Billard

To cite this version:

Sébastien Prothin, Henda Djeridi, Jean-Yves Billard. Interaction entre un tourbillon longitudinal et une couche limite se développant sur un NACA0015. 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-00906031

HAL Id: hal-00906031

https://hal.science/hal-00906031v1

Submitted on 19 Nov 2013

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.

Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)
OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: http://oatao.univ-toulouse.fr/
Eprints ID: 9881

To cite this document: Prothin, Sebastien and Djeridi, Henda and Billard, Jean-Yves *Interaction entre un tourbillon longitudinal et une couche limite se développant sur un NACA0015*. (2011) In: 20ème Congrès Français de Mécanique, 29 August 2011 - 02 September 2011 (Besançon, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@inp-toulouse.fr

Interaction entre un tourbillon longitudinal et une couche limite se développant sur un NACA0015

S. Prothin[a], H. Djeridi[b], J-Y. Billard[c]

a. *Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, (Ifremer Brest), Département de Recherches et Développements Technologiques, Hydrodynamique et Océano-Météo. BP 70, 29280 Plouzané, France (sebastien.prothin@ifremer.fr)*
b. *Laboratoire de Physique des Océans (LPO, UMR 6523, CNRS, IFREMER, IRD, UBO), Université Européenne de Bretagne, Université de Brest / UFR Science, 6 Av. Le Gorgeu, BP 809, 29285 Brest Cedex*
c. *Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav EA 3634), Département Mécanique et Energétique en Environnement Naval, CC 400, 29240 BREST Cedex 9*

sebastien.prothin@ifremer.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est d'analyser expérimentalement l'interaction entre un tourbillon longitudinal isolé et une couche limite se développant sur un profil portant bi-dimensionnel de type NACA0015 pour des incidences faibles et autour du décrochage statique. Le travail a été réalisé en tunnel hydrodynamique à Reynolds 5 10^5, le tourbillon est généré en amont par une aile elliptique de section NACA0020 et les campagnes de mesures ont été réalisées par LDV et PIV 3C/2D en ce qui concerne le champ de vitesse et par balance hydrodynamique en ce qui concerne les efforts globaux. Les résultats ont montré que la présence du tourbillon inhibe le phénomène d'hystérésis lors du décrochage statique du profil NACA0015, ceci étant associé à une modification notable des états de couche limite tant en valeur moyenne que fluctuante. En effet, pour les faibles incidences, la présence du tourbillon longitudinal modifie le gradient de pression, retarde de manière globale le décollement de la couche limite en ré-accélérant le fluide à la paroi. Pour les incidences plus élevées, on observe un ré-attachement de la couche limite dans la région d'inflow (zone d'apport de fluide rapide à la paroi). La dynamique de cet écoulement est analysée grâce aux quantités turbulentes dans le sillage du profil NACA0015 dans la zone d'inflow et par comparaison avec celles obtenues sans la présence du tourbillon.

Abstract

The objective of this study is to analyze experimentally the interaction between a single longitudinal vortex and a boundary layer developing on a 2D foil NACA0015 for low incidences and around the static stall. The work was carried out in water tunnel at Reynolds 5.10^5, the vortex is generated upstream by an elliptical wing of NACA0020 section and measurement campaigns were conducted by LDV and PIV 3C/2D regarding the velocity field and by a gauge balance for the global efforts. The results showed that the presence of the vortex suppresses the hysteresis phenomenon in the static stall of NACA0015, this being associated with a marked change in state boundary layer. Indeed, for low incidences, the presence of the vortex changes the pressure gradient, so delaying the separation of the boundary layer. For higher incidences, there is a re-attachment of the boundary layer in the inflow region. The dynamics of this flow is analyzed through the turbulent quantities in the wake of the NACA0015 profile in the zone of inflow and by comparison with those obtained without vortex.

Mots-clés : Couche limite turbulente, Gradient de pression adverse, Tourbillon, Contrôle d'écoulement, LDV, PIV, POD.

1. Introduction

Le contrôle de la couche limite autour de profil d'aile peut trouver de nombreuses applications dans diverses configurations pour les aéronefs, la capacité de supprimer ou de retarder le phénomène de séparation conduit à améliorer le niveau de portance, ainsi que de réduire le bruit et la traînée. De nombreuses études ont été menées afin de tester expérimentalement l'efficacité des différents actionneurs. En outre, concernant les manipulateurs de couche limite, les générateurs de vortex ont été utilisés pendant de nombreuses années en matière d'aérodynamique appliquée sur les ailes d'avion *Velte et al.* [1] ou *Angèle et Grewe* [2]. En dépit de ces applications industrielles très peu de données sont disponibles concernant l'impact d'un tourbillon longitudinal unique (en dehors de la couche limite) sur les caractéristiques locales ou globales de l'écoulement. La présente étude examine expérimentalement les effets d'un tourbillon unique généré sur un profil de NACA0015 2D. Une attention particulière est portée sur la dynamique du sillage proche (allée de Karman, la zone de cisaillement et le nombre de Strouhal) avec et sans vortex. Afin de comprendre les mécanismes sous-jacents, à la fois globaux (efforts) et locaux (vitesse), des mesures ont été effectuées. Des mesures LDV 2 composantes à l'aide d'une grille raffinée dans la couche limite à des incidences non loin du détachement ainsi que de la PIV stéréoscopique ont été réalisées afin d'analyser la topologie de l'écoulement avant et après l'apparition du décrochage. Des mesures d'effort ont été effectuées pour déterminer l'incidence du vortex sur les paramètres globaux du profil aval.

2. Dispositif Expérimental

Les expériences ont été menées dans la veine d'essai du tunnel hydrodynamique de l'école navale. Les caractéristiques d'écoulement correspondant au nombre de Reynolds basé sur la corde du profil amont (NACA0015) soit 5.10^5. Le vortex est généré par un profil tridimensionnel NACA0020 de forme en plan elliptique situé à 2 cordes en amont du profil aval 2D. Ce type de vortex à été largement étudié par *Pichon* [3]. La configuration expérimentale est représentée sur la Figure 1. Sur le profil aval, le tourbillon détermine 2 zones, à savoir une zone de « outflow » où le tourbillon induit un champ de vitesse allant de la paroi vers l'écoulement non perturbé et une zone « inflow » où le vortex induit un champ de vitesse dirigée vers la paroi. Les mesures de vitesses ont été réalisées par LDV, 2 composantes et les champs instantanés par PIV 2D-3C stéréoscopique. Le système LDV utilisant un laser solide 4 faisceaux (2 rouges : 660 nm et 2 Infrarouges : 785 nm) permettant la mesure de deux composantes de la vitesse (u, v). Le nombre d'échantillons choisi est égal à 20000 assurant une convergence acceptable et permettant ainsi un traitement de type analyse fréquentielle. Le volume de mesure de forme ellipsoïdale a une dimension de 0.1*0.1*1 mm. La tête est mise en rotation de telle sorte que le dernier point de mesure soit au plus prés de la paroi, soit situé à 50 µm. Le système PIV 2D-3C constitué d'un laser pulsé double cavité, de marque *DualPowerTR Lasers* émettant dans le visible 527 nm avec une cadence pouvant aller à 2 fois 20kHz. Il délivre une énergie de 2x30mJ. Pour l'acquisition d'un doublet d'images, chaque cavité délivre un 'pulse' laser avec un décalage en temps qui correspond au temps inter-images (dt = 20µs). Les images sont acquises avec des caméras *SpeedSense 9072* possédant une résolution de 1280 x 800 pixels, avec une cadence maximale de 2190 images par seconde. Pour des raisons d'accès optique, nos caméras ont été placées du même coté du plan objet, mais avec une caméra en configuration 2D (perpendiculaire au plan objet). Les mesures sont réalisées à l'aide du logiciel *DynamicStudio* de la société *Dantec Dynamics*.

3. Mesures d'efforts

Des mesures de coefficients de traînée et de portance globales ont été effectuées avec une balance à jauges de contrainte avec et sans tourbillon, et sont présentées sur la Figure 2. On peut observer que les valeurs des deux coefficients ne sont pas affectées par le tourbillon pour des incidences inférieures à 7 °. Entre 7 ° et 15 ° le coefficient de portance reste inchangé, mais la traînée augmente. Pour les grandes valeurs d'incidence, la boucle d'hystérésis, caractéristique du décrochage statique, disparaît et la perte de portance associée se transforme en un plateau. La présence du tourbillon induit une modification du mouvement du point de détachement, et son oscillation est inhibée (*Sarraf et al.* [4]).

4. Interactions à faible incidence

A faible incidence les mesures de vitesse dans la couche limite ont été réalisées par LDV compte tenu de l'épaisseur de celle-ci. Les valeurs moyennes et les composantes du tenseur de Reynolds ont également

été évaluées. En ce qui concerne la structure de la couche limite, les mesures de vitesses normale et tangentielle sont effectuées sur plusieurs normales à la paroi à différentes abscisse de x/c afin d'évaluer les quantités intégrales à 5, 10 et 15 °.

4.1. Quantités intégrales

Les profils de vitesse sur chaque normale ont été intégrés pour calculer les épaisseurs de déplacement δ_1, de quantité de mouvement δ_2 ainsi que le facteur de forme h donnés par les formules suivantes :

$$\delta_1 = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U_e}\right) dy \qquad \delta_2 = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{U_e}\right) \frac{u}{U_e} dy \qquad h = \frac{H_{12} - 1}{H_{12}} \qquad H_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2}$$

Kline et al [5]. utilisent le paramètre h pour caractériser finement la naissance de la séparation et l'écoulement pleinement séparé. Dans une couche limite turbulente sans gradient de pression adverse (ZPG) la valeur de H_{12} est classiquement égale à 1,4 correspondant à une valeur de h=0.29. Les conditions de décollement étant données par $h \geq 0.63$, séparation naissante ($H_{12} \geq 2.7$) et $h \geq 0.75$, séparation complète ($H_{12} \geq 4$). L'évolution du facteur de forme est donnée Figure 3a pour les angles d'incidence de 5, 10 et 15° avec et sans tourbillon. On constate que sans tourbillon et pour les deux incidences les plus faibles on observe une transition à la turbulence qui se rapproche du bord d'attaque lorsque l'incidence augmente et un décollement caractérisé à 15°. En présence du tourbillon, les valeurs de h correspondent à celles observées sur une couche limite turbulente. En revanche, on voit que, à 15°, dans la région inflow la couche limite reste attachée jusqu'à x/c = 0,9. Comme prévu dans la région d'inflow, le tourbillon retarde la séparation près du bord de fuite par le transfert de quantité de mouvement dans la couche limite (*Velte et al.* [1]). Nous avons également choisi de représenter le coefficient β_{ZS} sur la Figure 3b, au sens de *Zagarola et Smits* [6] dans le but de retrouver des conditions de similarité de couche limite avec gradient de pression adverse, correspondant à une valeur de 0,05 de ce paramètre. Ce coefficient est défini par :

$$\beta_{ZS} = \frac{-\delta}{U_{ZS}} \frac{dU_e}{dx} \qquad \text{avec} \qquad U_{ZS} = U_e \frac{\delta_1}{\delta}$$

La présence du tourbillon a une influence notable à 15°, en effet, la valeur dans la région de inflow retrouve globalement sa valeur d'équilibre. Le tourbillon dans cette situation a un effet plus important sur le gradient de pression.

4.2. Quantités turbulentes

Les tensions turbulentes sont représentées Figures 4 en fonction de la distance à la paroi y/δ pour les distances par rapport au bord d'attaque de x/c=0,65 à 0,98 à 10° d'incidence et sont adimensionnalisées par la vitesse U_{ZS}. D'après *Maciel et al.* [7], cette échelle de vitesse, en présence d'un gradient de pression adverse, permet de retrouver une auto-similarité de ce type de couche limite turbulente et de recaler le maximum de d'agitation dans la région y/δ=0,5 quelle que soit la distance au bord d'attaque. Dans le cas présent le maximum d'agitation se situe à y/δ=0,4 avec et sans tourbillon, on remarque que le tourbillon diminue d'un facteur 4 l'amplitude des fluctuations turbulentes. La présence du tourbillon semble améliorer l'auto-similarité des tensions turbulentes en agissant à la fois sur le gradient de pression dans la région d'inflow mais également sur le mélange turbulent dans la zone logarithmique.

5. Mesures de vitesse à grande incidence

5.1 Champs moyens

Les mesures en PIV stéréoscopique à haute vitesse ont été réalisées pour des incidences plus élevées (15 °, 20 °, 25 °) dans le plan vertical (x, y). La Figure 5, montre les iso-contours de vitesse longitudinale et verticale normalisées sans vortex dans le plan z=0 et avec vortex dans les régions inflow et outflow. Les lignes de courant sont également superposées sur les iso-contours afin de mieux visualiser la zone de recirculation et les tourbillons de bord de fuite et de bord d'attaque. Les iso-contours de vitesse verticale présentent une structure à deux lobes caractéristique d'un lâcher tourbillonnaire alterné. En présence du tourbillon, dans la région de outflow, la zone de recirculation est plus épaisse et le sillage est dévié vers les y positif. On note également une structure à deux lobes pour les vitesses verticales qui est plus étendue en

aval dans le sillage. Dans la région d'inflow, on remarque la disparition de la zone de recirculation associée à un fort apport de fluide rapide à la paroi. Comme prévu par l'évolution de la valeur de h, l'écoulement est maintenu attaché et donc des incidences importantes peuvent être atteintes sans décrochage.

5.2 Profils des quantités turbulentes

Les profils verticaux de vitesses turbulentes sont représentés ici pour une distance x/c=1.5 correspondant à une position juste en aval de la zone de recirculation dans le sillage. Ces profils sont systématiquement comparés à ceux obtenus en présence du tourbillon dans la zone d'inflow. Figure 6, sans tourbillon on note des profils classiques de sillage instationnaire présentant une structure à deux lobes pour les fluctuations longitudinales $\overline{u'^2}$ (correspondant à deux pics d'intensité turbulente), verticales, $\overline{v'^2}$ et $-\overline{u'v'}$ (correspondant à deux maxima de signes opposés). On remarque, comme aux incidences plus faibles, une diminution de l'intensité turbulente liée à la présence du tourbillon et la disparition de la structure à deux lobes.

6. Conclusion et Perspectives

Le travail présenté ici a permis de mettre en évidence les effets d'un tourbillon longitudinal unique sur la couche limite se développant sur un profil de NACA0015 bidimensionnel ainsi que sur son décollement. Afin de comprendre les mécanismes sous-jacents des mesures globales d'efforts et locales de vitesse ont été effectuées (par LDV et PIV) pour des incidences de 5, 10, 15 et 25°. Les résultats ont montré que la présence du tourbillon (hors couche limite) a supprimé le phénomène d'hystérésis au décrochage statique engendrant une augmentation de la portance et de la traînée. Pour les faibles incidences (avant décrochage) le tourbillon modifie de manière préférentielle les distributions turbulentes en diminuant leurs amplitudes sans modifier l'équilibre de la couche limite turbulente. A 15° d'incidence, le tourbillon recolle la couche et lui redonne une structure auto-similaire (dans la zone d'inflow correspondant à un apport de fluide rapide à la paroi). A plus forte incidence, la dynamique tourbillonnaire est fortement altérée comme en atteste la disparition de la fréquence de Strouhal dans la zone d'inflow. D'autre part, même à 25° la couche limite recolle partiellement sans retrouver son équilibre classique. De manière générale le tourbillon tend à inhiber l'agitation turbulente dans la zone d'inflow.

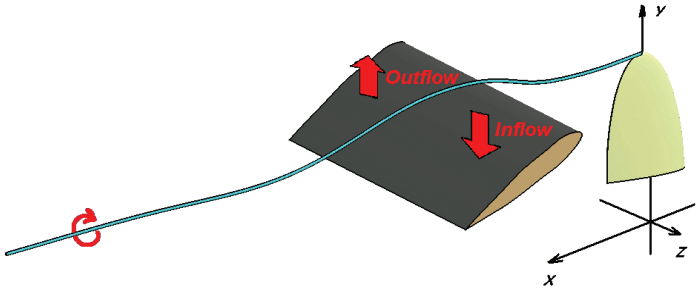


Fig 1 : Configuration expérimentale

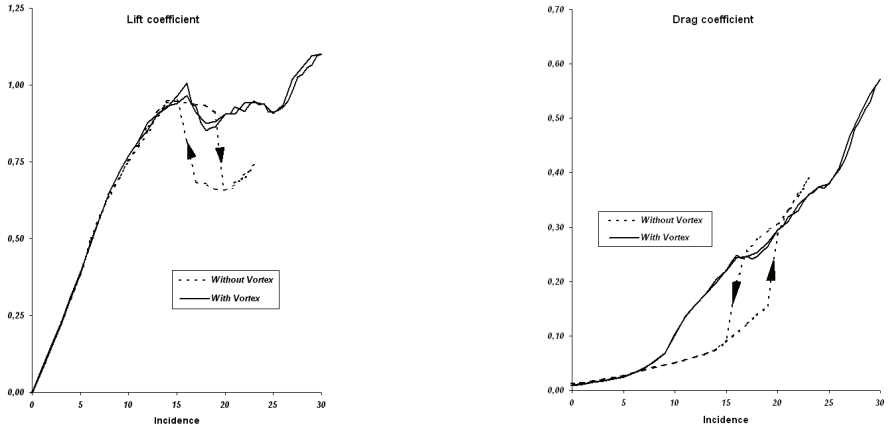
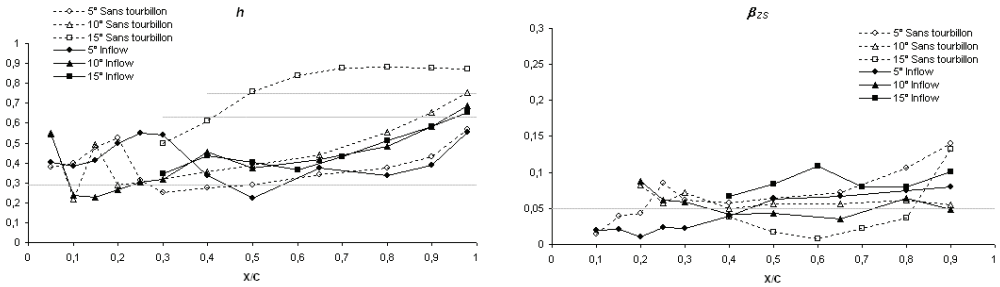


Fig 2: Coefficients de portance et de traînée en fonction de l'incidence avec et sans tourbillon



a b

Fig 3 : a) Facteur de forme b) Paramètre de gradient de pression
pour les différentes incidences et configuration étudiées.

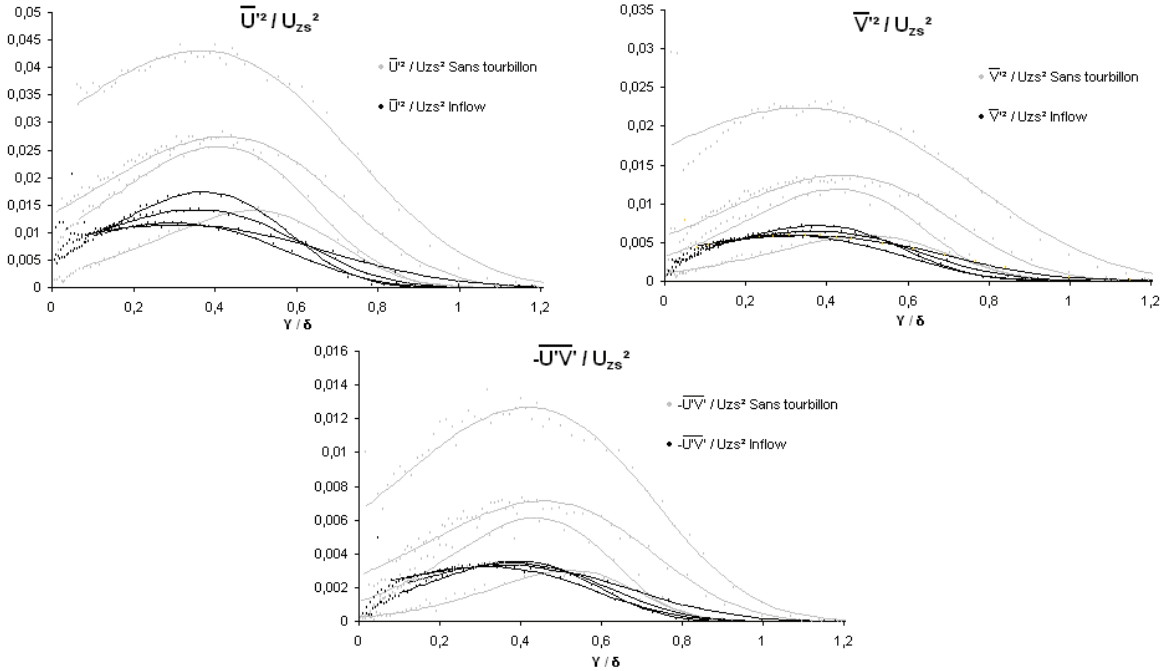


Fig 4 : Représentation des tensions turbulentes avec et sans tourbillon
pour la configuration à 10° pour différentes station en X/C.

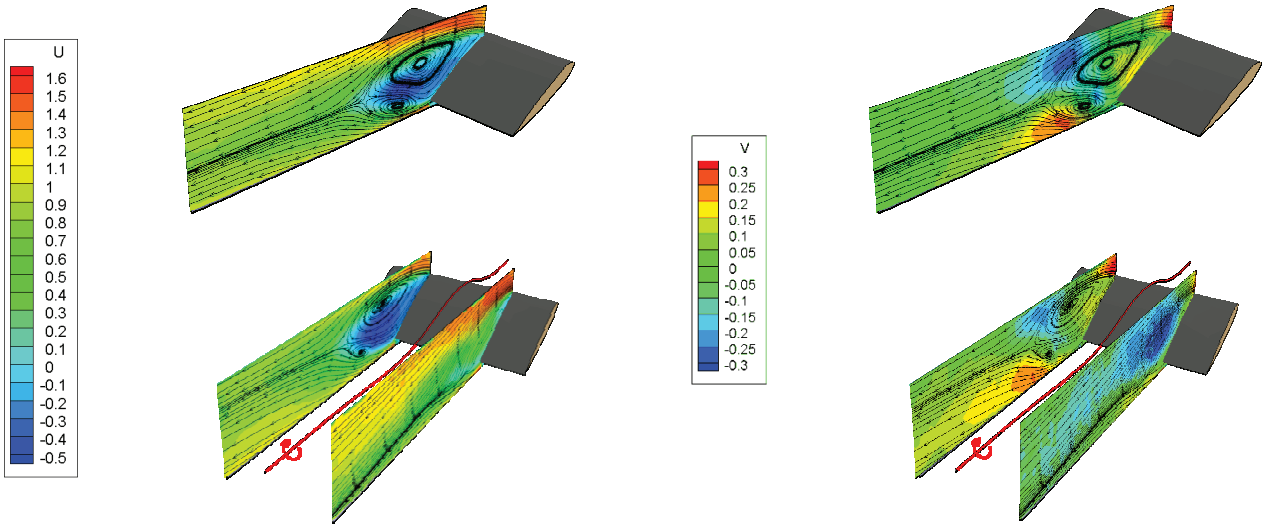


Fig 5 : Iso-contour de vitesse longitudinale U (Gauche) et verticale V (Droite)
à 25° superposé avec les lignes de courant 2D

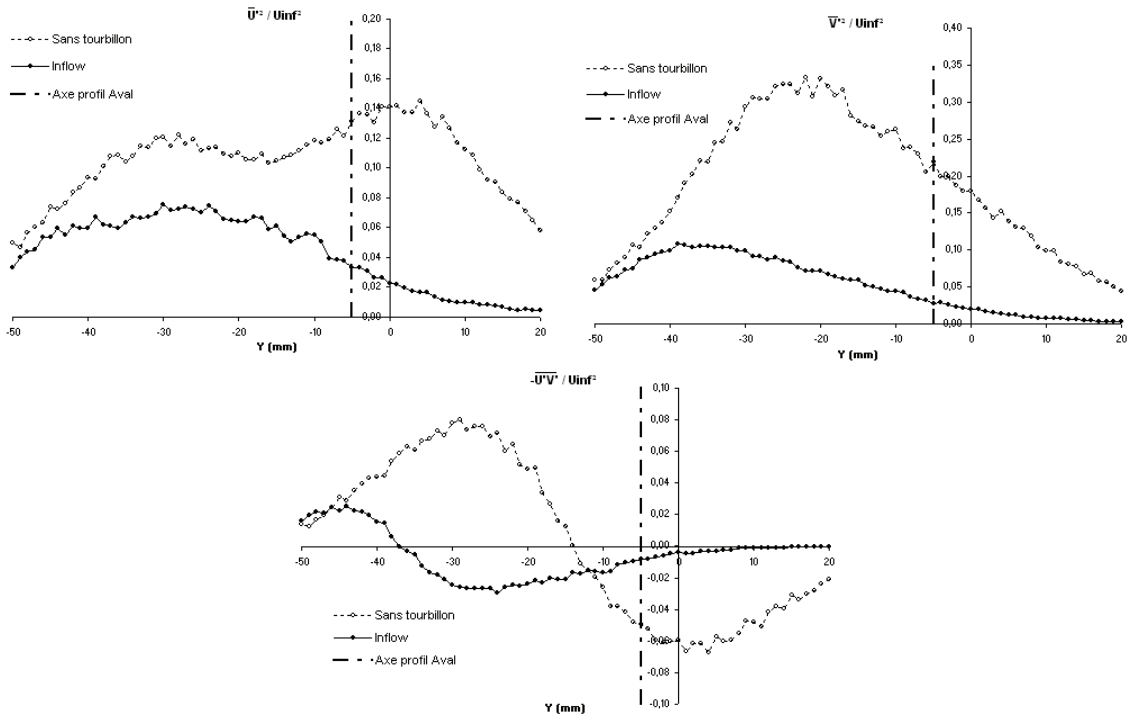


Fig 6 : Profil des fluctuations de vitesse dans le sillage du profil à 25° d'incidence, avec et sans tourbillon.

Références

[1] C.M. Velte, M.O.L. Hansen and D. Cavar. *Flow analysis of vortex generators on wing sections by stereoscopic particle image velocimetry measurements*. Environ. Res. Lett. 3, 2008.

[2] K. P. Angele, F. Grewe, *Instantaneous behaviour of streamwise vortices for turbulent boundary layer separation control*, Journal of Fluid Engineering, Vol. 129(2), 2007.

[3] T. Pichon, *Contribution à l'étude de la Cavitation de Tourbillon Marginal*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 1995.

[4] C. Sarraf, H. Djeridi, S. Prothin, J-Y. Billard, *Thickness effect of NACA foils on hydrodynamic global parameters, boundary layer states and stall establishment,* J. of Fluids and Structures. Vol. 26, pp. 559-578. 2010.

[5] S.J. Kline, J.G. Bardina, R.C. Strawn, *Correlation of the Detachment of Two-dimensional Turbulent Boundary Layers*, AIAA J., vol. 21, 1983, p. 68.

[6] M. V. Zagarola & A. J. Smits, *Mean-flow scaling of turbulent pipe flow*. J. Fluid Mech., vol. 373, pp. 33-79. 1998.

[7] Y. Maciel, K-S. Rossignol, J. Lemay. A study of a turbulent boundary layer in stalled-airfoil-type flow conditions. Exp. Fluids, 41, pp. 573-590. 2006.