



Available online at www.sciencedirect.com



C. R. Mécanique 333 (2005) 273–278



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2B/>

Contrôle par rotation ou par aspiration de l'écoulement autour d'un cylindre calculé par Simulation des Grandes Échelles

Guillaume Fournier, Stéphanie Pellerin, Loc Ta Phuoc

LIMSI-CNRS, BP 133, 91403 Orsay cedex, France

Reçu le 4 juin 2004 ; accepté après révision le 28 octobre 2004

Disponible sur Internet le 28 janvier 2005

Présenté par Sébastien Candel

Résumé

Le contrôle de l'écoulement autour d'un cylindre circulaire est étudié à l'aide de la Simulation des Grandes Echelles. L'influence du contrôle par rotation et par aspiration sur les caractéristiques de l'écoulement est considérée pour différents nombres de Reynolds. Un bon accord est obtenu avec des expériences pour des cas avec et sans contrôle à $Re = 10^5$. Une réduction de traînée de 30 % est obtenue pour une aspiration d'intensité moyenne. *Pour citer cet article : G. Fournier et al., C. R. Mécanique 333 (2005).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Control by rotation or by boundary layer suction of the flow around a circular cylinder by using Large Eddy Simulation. Control of the flow around a circular cylinder is studied using Large Eddy Simulation. The influence of control by rotation and suction on the flow characteristics is considered for several Reynolds numbers. Comparisons with experiments were conducted at $Re = 10^5$ for the flow with and without control. A drag reduction up to 30% is obtained for an usual suction intensity. *To cite this article: G. Fournier et al., C. R. Mécanique 333 (2005).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Mécanique des fluides ; Contrôle ; Simulation des Grandes Échelles ; Cylindre

Keywords : Fluid mechanics; Control; Large Eddy Simulation; Cylinder

Adresse e-mail : Guillaume.Fournier@limsi.fr (G. Fournier).

1631-0721/\$ – see front matter © 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.
doi:10.1016/j.crme.2004.11.001

Abridged English version

Flow control is a current topic in aerodynamics, particularly for drag reduction. Various aerodynamic applications can be found, in particular the famous Turbosail [1]. Various control techniques are used: rotation (Magnus effect), suction [1,2], synthetic jets [3–5], passive control (flap, riblets), acoustic control [6], This Note concerns the influence of control by rotation and boundary layer suction on aerodynamic coefficients for a flow past a circular cylinder. Simulations are carried out for Reynolds numbers from $Re = 2 \times 10^3$ to $Re = 10^5$. Large Eddy Simulation [8] solves the largest structures of the flow only. The mixed scale model [9] is used as subgrid scale model to take into account the influence of small scales. The velocity–vorticity formulation of the Navier–Stokes equations is chosen and second order schemes are applied. First, the vorticity transport equation (1) is treated. The Div–Rot problem is then solved by means of a fractional step algorithm [10,11]. The numerical method is detailed in Tenaud et al. [12]. In this study, the viscous drag is negligible for the considered Reynolds numbers for uncontrolled or controlled cases, excepted for strong rotations. Control by rotation associated to the Magnus effect is obviously efficient. At $Re = 2 \times 10^3$, both strong lift forces and drag reduction are obtained (Fig. 1). Nevertheless, in terms of energy, control by rotation is expensive and other control techniques are preferred. For control by suction, the momentum coefficient C_μ is defined. The increase of C_μ at $Re = 2 \times 10^3$ and $Re = 2 \times 10^4$ induces an increase of lift and a pressure drag reduction (Fig. 2). For an equivalent lift force, the pressure drag reduction is stronger with control by suction. Moreover, the suction location (starting angle θ_{beg}) has a great influence on the control efficiency. The optimal location is linked to the control intensity. Indeed, for a given Reynolds number and for a strong enough intensity, the suction is able to reattach the separated boundary layer (Fig. 3(c)) and not only to delay the separation (Fig. 3(a) and (b)). For the optimal position, a strong drag reduction is observed. Three-dimensional simulations have then been conducted. Fig. 4(a) gives a flow visualization in the near wake of the cylinder. Comparisons between LES 3D results and experiments (LEA/ENSMA [4]) have been performed at $Re = 10^5$ with and without control by suction. As expected [13], the flow characteristics depend strongly on the spanwise dimension of the cylinder (Fig. 4(b)). The experimental cylinder has an aspect ratio $L/D = 10$. For a numerical ratio $L/D = 4$, the LES results without control agree with experiments. Using control by suction, considering CPU time, $L/D = 1$ is chosen. Suction occurs on a small surface of 1.4° in a drag reduction objective, located in $\theta = 90^\circ$, which is the experimental optimal location. Fig. 5 represents the pressure distribution on the cylinder, for low and moderate suction rates. A good agreement is obtained between both approaches. Nevertheless a strong enough suction is needed to reduce the influence of the aspect ratio and consequently the difference with experiments. In conclusion, Large Eddy Simulation is an efficient approach for high Reynolds numbers flows studies. Different control techniques can then be tested and compared using LES.

1. Introduction

Le contrôle des écoulements autour d’obstacles est une préoccupation majeure en aérodynamique (Magnus (1853), Prandtl (1904)). Le but le plus souvent recherché du contrôle est l’amélioration des performances aérodynamiques. Pour la réduction de traînée, l’aspiration de la couche limite [1,2] ou les jets synthétiques [3–5] sont des solutions efficaces. L’aspiration peut servir aussi à créer de la portance, comme sur la célèbre turbovoile de Cousteau–Malavard [1], qui a équipé l’Alcyone. D’autres techniques comme le contrôle passif (riblets, volet . . .) ou le contrôle acoustique [6] sont également utilisées. Cette étude porte sur le contrôle de l’écoulement autour d’un cylindre circulaire. Cet écoulement académique, largement étudié [7], reste physiquement complexe. Deux techniques de contrôle ont été choisies, la rotation pour créer une forte portance et l’aspiration dans le double objectif de création de portance et de réduction de traînée. L’influence du contrôle sur les coefficients aérodynamiques est étudiée pour des nombres de Reynolds relativement élevés compris entre $Re = 2 \times 10^3$ et $Re = 10^5$ (régime pleinement turbulent pour $Re > 5 \times 10^5$). La Simulation des Grandes Echelles permet d’obtenir des informations

instationnaires sur les différentes structures de l'écoulement à haut nombre de Reynolds. Dans le cas $Re = 10^5$, des comparaisons ont été effectuées avec des expériences du LEA/ENSMA [4].

2. Méthode numérique

Les équations de Navier–Stokes incompressibles écrites en formulation vitesse-tourbillon sont résolues par une méthode aux différences finies. Pour la Simulation des Grandes Echelles, ces équations sont filtrées spatialement afin de ne calculer que les grosses structures de l'écoulement [8] :

$$\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} - \nabla \times (\bar{\mathbf{v}} \times \bar{\omega}) = -\frac{1}{Re} \nabla \times \nabla \times \bar{\omega} + \nabla \times \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

où Re est le nombre de Reynolds construit à partir du diamètre du cylindre (D) et de la vitesse infini amont (U_∞), $\bar{\mathbf{v}}$ la vitesse résolue (ou filtrée), et $\bar{\omega} = \nabla \times \bar{\mathbf{v}}$ son rotationnel. Le filtre spatial de type filtre *boite* (*top hat filter*) correspond à la taille locale de la maille Δ . Le tenseur $\boldsymbol{\tau}$, dit de sous-maille, représente les contributions des petites échelles, non-résolues. Ce tenseur est modélisé par l'intermédiaire d'une viscosité de sous-maille $\boldsymbol{\tau} = -(v_{sg}/Re)\nabla \times \bar{\omega}$. Le modèle de sous-maille utilisé est le modèle d'échelles mixtes [9] tel que $v_{sg} = (C_S \Delta)^2 \|\bar{\omega}\|^\alpha (C_B \Delta \sqrt{|k'|})^{1-\alpha}$, où k' représente une énergie cinétique de sous-maille. Les discrétisations spatiales sont appliquées sur un maillage décalé de type MAC, à l'aide de schémas d'ordre deux. Les termes diffusifs sont discrétisés à l'aide d'un schéma centré, tandis qu'un schéma Quick est utilisé pour le terme convectif. La dérivée temporelle est approchée par un schéma d'Euler retardé d'ordre 2. Pour le terme convectif, une extrapolation d'Adams–Bashforth d'ordre 2 est utilisée. Le pas de temps adimensionné utilisé est $\Delta t = 2 \times 10^{-3}$. L'équation de transport du tourbillon (1) est tout d'abord résolue. Les composantes de la vitesse peuvent ensuite être obtenues par une méthode à pas fractionnaires qui permet d'obtenir la vitesse et la pression simultanément [10]. Les détails de la méthode sont donnés dans [11,12].

Pour cette étude, le domaine de calcul dans le plan (r, θ) est pris circulaire et de diamètre $10D$, le cylindre étant situé au centre de ce domaine. Les maillages utilisés, raffinés en r et réguliers en θ et en z , vont de $257(r) \times 257(\theta)$ à $Re = 2 \times 10^3$ en 2D à $385(r) \times 257(\theta) \times 132(z)$ à $Re = 10^5$ pour $L/D = 4$. Le contrôle s'effectue en appliquant une vitesse constante à la paroi du cylindre, tangentielle pour la rotation et normale pour l'aspiration de la couche limite. Pour une simulation avec ou sans contrôle en 3D à $Re = 10^5$, le temps de calcul nécessaire pour obtenir un écoulement établi est d'environ 400 heures CPU avec $L/D = 4$ sur NEC-SX5 (IDRIS, Orsay).

3. Influence des méthodes de contrôle

Dans le cas d'un cylindre sans contrôle, la traînée visqueuse est négligeable devant la traînée de forme pour les nombres de Reynolds étudiés : $C_D^{visq}/C_D^{tot} = 6\%$ pour $Re = 2 \times 10^3$ et diminue jusqu'à 2,5 % à $Re = 10^5$. Le contrôle augmente cependant cette part de la traînée, qui reste faible, sauf pour de fortes rotations. Avec contrôle par aspiration, on obtient $C_D^{visq}/C_D^{tot} = 7,3\%$ à $Re = 2 \times 10^3$ et 5 % à $Re = 10^5$. Seule la traînée de forme sera donc étudiée dans ce travail.

Dans un premier temps, le contrôle par rotation (effet Magnus) est utilisé afin de créer une forte force de portance. Des vitesses de rotation supérieures à U_∞ sont considérées pour $Re = 2 \times 10^3$. Sur la Fig. 1, on peut constater qu'un très fort coefficient de portance peut alors être obtenu. La traînée de forme est réduite jusqu'à devenir négative, mais, pour de telles rotations, la traînée visqueuse devient alors très élevée (pour $V_{ROT} = 3 \times U_\infty$, $C_D^{visq} = 0,21$). Cependant, la réduction de traînée totale est considérable par rapport au cas sans contrôle. En dépit d'excellents résultats obtenus, en particulier au niveau de la création de portance, les difficultés technologiques et le coût énergétique de cette méthode de contrôle la rendent difficilement applicable. C'est pourquoi l'aspiration de la couche limite à la paroi, beaucoup plus économique et facilement réalisable techniquement, lui est préférée.

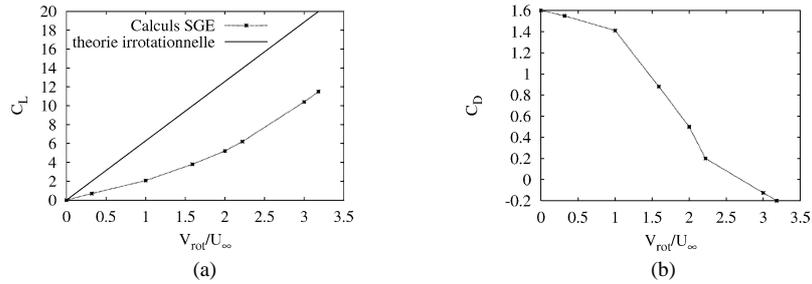


Fig. 1. Coefficients (a) de portance et (b) de traînée, en fonction de la vitesse de rotation à $Re = 2 \times 10^3$.

Fig. 1. (a) Lift and (b) drag coefficients as function of rotation velocity at $Re = 2 \times 10^3$.

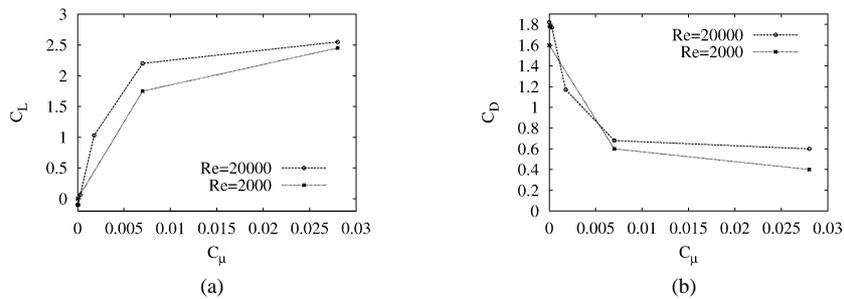


Fig. 2. Coefficients (a) de portance et (b) de traînée, en fonction de l'intensité de l'aspiration C_μ .

Fig. 2. (a) Lift and (b) drag coefficients as function of suction intensity C_μ .

Afin de créer une force de portance conséquente se rapprochant du cas de la turbomachine, de grandes zones d'aspiration ont été considérées (de l'ordre de 40° , soit 29 mailles). Dans le but de quantifier l'influence de l'intensité de l'aspiration, un coefficient de débit est défini $C_\mu = 2e/D(U_{suc}/U_\infty)^2$ [4], où e et U_{suc} représentent respectivement la largeur de la zone d'aspiration et la vitesse d'aspiration. Les coefficients de débit utilisés varient entre 0,8 % et 20 % pour $Re = 2 \times 10^3$ ($U_{suc} = 0,1 - 0,5U_\infty$) et entre 0,008 % et 3 % pour $Re = 2 \times 10^4$ ($U_{suc} = 0,01 - 0,2U_\infty$). L'augmentation du C_μ entraîne celle de la portance ainsi qu'une réduction de la traînée de forme (Fig. 2). A portance équivalente, l'aspiration est plus efficace que la rotation en terme de réduction de traînée. La position de l'aspiration est également un paramètre majeur de l'efficacité du contrôle. Si l'aspiration a en effet lieu trop à l'amont ou trop à l'aval du point de décollement, les coefficients aérodynamiques sont peu modifiés et la traînée peut même augmenter par rapport au cas sans contrôle. Cependant, la position optimale ne peut être trouvée a priori, dans la mesure où elle est intimement liée à l'intensité de l'aspiration. En effet, à $Re = 2 \times 10^3$, la position optimale est obtenue pour une aspiration débutant en $\theta_{deb} = 94^\circ$ pour $C_\mu = 0,8\%$ (Fig. 3(a)), alors qu'elle devient supérieure à $\theta_{deb} = 108^\circ$ lorsque $C_\mu = 3\%$. Ceci s'explique par le fait que pour un nombre de Reynolds donné, à partir d'une certaine intensité, l'aspiration devient assez forte pour recoller une couche limite décollée (Fig. 3(c)) et non plus pour seulement retarder son décollement (Fig. 3(a) et (b)). L'aspiration peut alors fournir de très bons résultats i.e. une force de portance intéressante et jusqu'à 75 % de réduction de traînée.

4. Comparaison calculs – expériences à haut nombre de Reynolds

L'écoulement à un nombre de Reynolds nettement plus élevé $Re = 10^5$ est à présent considéré. Des comparaisons entre les résultats de SGE 3D et des expériences effectuées au LEA/ENSMA [4] ont été menées. L'allée tourbillonnaire se forme derrière le cylindre en sillage proche (Fig. 4(a)). Dans le cas sans contrôle, l'influence de la

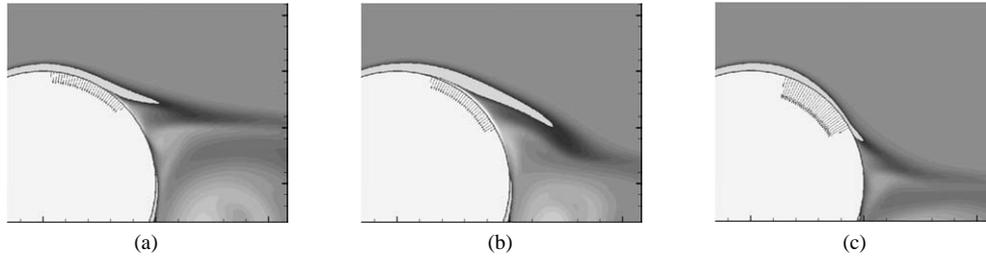


Fig. 3. Contrôle par aspiration à $Re = 2 \times 10^3$ ($\overline{\omega_z}$). 1^{er} cas : le décollement est retardé pour $C_\mu = 0,8\%$: (a) position optimale $\theta_{deb} = 94^\circ$ et (b) $\theta_{deb} = 108^\circ$. 2nd cas : l'aspiration recolle la couche limite pour un fort $C_\mu = 3\%$: (c) $\theta_{deb} = 108^\circ$.

Fig. 3. Control by suction at $Re = 2 \times 10^3$ ($\overline{\omega_z}$). 1st case: separation is delayed for $C_\mu = 0.8\%$: (a) optimal position $\theta_{beg} = 94^\circ$ and (b) $\theta_{beg} = 108^\circ$. 2nd case: suction reattaches the boundary layer for a strong $C_\mu = 3\%$: (c) $\theta_{beg} = 108^\circ$.

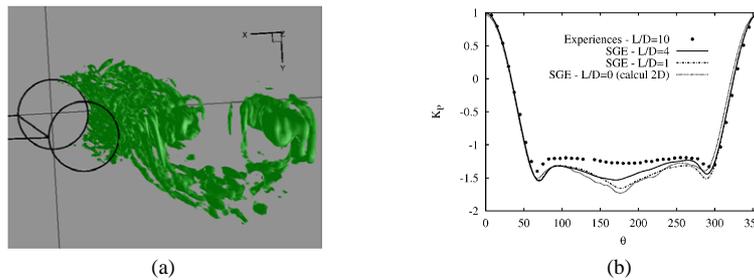


Fig. 4. Écoulement 3D derrière un cylindre. (a) Sillage proche (critère Q) à $Re = 2 \times 10^4$ et (b) comparaison calculs–expériences à $Re = 10^5$ sans contrôle. Influence de l'envergure L sur la répartition de pression moyenne.

Fig. 4. Three-dimensional flow past a circular cylinder. (a) Visualization of the flow in the near wake at $Re = 2 \times 10^4$ and (b) comparison LES–experiments at $Re = 10^5$ without control. Spanwise dimension influence on the pressure distribution.

taille du domaine de calcul dans la direction transverse (L) a été étudiée, en considérant des rapports d'aspect L/D de 0 (2D) à 4, tandis que L/D est égal à 10 pour l'étude expérimentale. La Fig. 4(b) représente le coefficient de pression moyen à la surface du cylindre. Lorsque le rapport d'aspect est petit, le K_p présente une dépression autour de $\theta = 180^\circ$ qui n'apparaît pas dans la répartition expérimentale. De plus, le niveau de pression de la zone décollée ($\theta \in [90; 270]$) est beaucoup plus faible. Cependant, lorsque l'envergure du cylindre augmente, le plateau de K_p se rapproche des valeurs expérimentales, même si la zone de dépression reste encore visible. Cette dépendance de l'envergure a déjà été observée [13]. La traînée est elle aussi dépendante du rapport L/D , dans la mesure où sa valeur moyenne passe de $C_D = 1,48$ pour $L/D = 1$ à $C_D = 1,29$ pour $L/D = 4$. Notons que cette dernière valeur est très proche de la valeur expérimentale de $C_D = 1,25$. Dans la suite, un rapport d'aspect de 1 a été considéré, car il présente un bon compromis entre précision et temps de calcul.

Dans le cas du contrôle, une aspiration est appliquée sur une faible région (de l'ordre de $1,4^\circ$ soit une seule maille) afin de favoriser la réduction de traînée. Deux coefficients de débit ont été utilisés, $C_\mu \simeq 0,3\%$ (faible) et $C_\mu = 1\%$ (moyen) (soit $U_{suc} = 0,3U_\infty$ et $0,6U_\infty$). L'aspiration est appliquée en $\theta = 90^\circ$, correspondant à la position optimale déterminée par l'expérience. Dans ce cas, l'aspiration est suffisante pour recoller la couche limite puisque les mesures donnent $\theta_{dec} \simeq 80^\circ$, ce qui correspond bien aux valeurs usuelles du régime sous-critique. Un très bon accord est obtenu entre les deux approches pour les répartitions de pression (Fig. 5). Cependant, pour une faible aspiration, une différence de l'ordre de 25 % est observée sur le coefficient de traînée moyen soit $C_D = 1,29$ pour la SGE et $C_D = 1,03$ pour les expériences. Lorsque l'aspiration augmente, cette différence diminue fortement puisque pour $C_\mu = 1\%$, $C_D = 1,04$ par SGE contre $C_D = 1,00$ expérimentalement. Une aspiration suffisamment forte conduit donc l'écoulement à être moins dépendant de l'envergure du cylindre. Dans ce cas, une réduction de traînée de 30 % est obtenue.

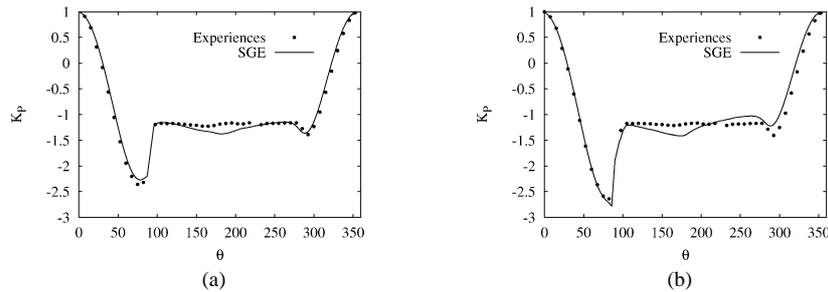


Fig. 5. Comparaison calculs–expériences à $Re = 10^5$ avec contrôle par aspiration en $\theta = 90^\circ$. Répartition de pression moyenne sur le cylindre pour une aspiration (a) faible et (b) moyenne.

Fig. 5. Comparison LES–experiments on K_p at $Re = 10^5$ with control for (a) low and (b) moderate suction rates.

5. Conclusion

Le contrôle de l'écoulement autour d'un cylindre par rotation et par aspiration de la couche limite a été étudié. L'aspiration de la couche limite est beaucoup plus efficace en terme de réduction de traînée. Les comparaisons effectuées à un nombre de Reynolds élevé de $Re = 10^5$ sans et avec contrôle par aspiration ont montré un très bon accord calculs–expériences. Le contrôle par aspiration rend l'écoulement moins dépendant de l'envergure que dans le cas sans contrôle. Pour les deux méthodes de contrôle étudiées, la Simulation des Grandes Échelles semble bien adaptée pour traiter les cas d'écoulements instationnaires à nombres de Reynolds relativement élevés.

Remerciements

Les auteurs remercient l'IDRIS (Orsay) dont la NEC-SX5 a servi de support aux calculs associés à ce travail.

Références

- [1] L. Malavard, Un nouveau propulseur éolien de navire, La vie des sciences, C. R. 1 (1) (1984) 57–72.
- [2] G. Fournier, S. Pellerin, L. Ta Phuoc, Contrôle de l'écoulement turbulent incompressible autour d'un cylindre circulaire par la Simulation des Grandes Echelles, in: 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice, 1–5 Septembre, 2003.
- [3] J.-C. Béra, M. Sunyach, M. Michard, G. Comte-Bellot, Changing lift and drag by jet oscillations: experiments on a circular cylinder with turbulent separation, Eur. J. Mech. B Fluids 19 (2000) 575–595.
- [4] S. Bourgois, J. Tensi, Contrôle de l'écoulement autour du cylindre par techniques fluidiques et acoustiques, in: 16ème Congrès Français de Mécanique, Nice, 1–5 Septembre, 2003.
- [5] D.R. Williams, H. Mansy, C. Amato, The response and symmetry properties of a cylinder wake subjected to localized surface excitation, J. Fluid Mech. 234 (1992) 71–96.
- [6] R.D. Blevins, The effect of sound on vortex shedding from cylinders, J. Fluid Mech. 161 (1985) 217–237.
- [7] M. Coutanceau, J.-R. Defaye, Circular cylinder wake configuration: a flow visualization survey, Appl. Mech. Rev. 44 (6) (1991) 225–305.
- [8] P. Sagaut, Introduction à la simulation des grandes échelles pour les écoulements de fluide incompressible, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [9] L. Ta Phuoc, Modèles de sous-maille appliqués aux écoulements instationnaires et décollés, Journée DRET, 1994.
- [10] R. Lardat, F. Bertagnolio, O. Daube, La formulation vitesse-tourbillon en maillage décalé : une méthode de projection, C. R. Mécanique 324 (1997) 747–753.
- [11] R. Lardat, Thèse de doctorat de l'UPMC Paris VI, juillet 1997.
- [12] C. Tenaud, S. Pellerin, A. Dulieu, L. Ta Phuoc, Large Eddy Simulations of a spatially developing incompressible 3D mixing layer using the $V-\omega$ formulation, Comput. Fluids 34 (2005) 67–96.
- [13] X. Ma, G.S. Karamanos, G.E. Karniadakis, Dynamics and low-dimensionality of a turbulent near-wake, J. Fluid Mech. 410 (2000) 29–65.