

# Analyse du sillage et de l'écoulement décollé autour d'une plaque en incidence par PIV Tomographique

E. Deri<sup>a</sup>, E. Cid<sup>a</sup>, S. Cazin<sup>a</sup>, M. Braza<sup>a</sup>, G. Harran<sup>a</sup>, C. Dégouet<sup>b</sup>, D. Michaelis<sup>c</sup>, D. Harribey<sup>d</sup>, J.F. Rouchon<sup>d</sup>, E. Duhayon<sup>d</sup>, B. Nogaredé<sup>d</sup>

a. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (CNRS UMR5502), 2 allée Soula, 31400 TOULOUSE

b. La Vision France, 5 av de Scandinavie, F-91953 COURTABOEUF

c. La Vision GmbH, Anna-Vandenhoeck-Ring 19, D-37081 GÖTTINGEN

d. Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (CNRS UMR5213), 2 rue Camichel, F-31071 TOULOUSE

## Résumé :

L'écoulement autour d'une plaque plane en incidence est étudié au nombre de Reynolds de 200 000 par expériences physiques en soufflerie S4 de l'IMFT. Les champs de vitesse statistiques, bi- et tri-dimensionnels ont été mesurés par PIV et Tomo-PIV. La dynamique tourbillonnaire est analysée à l'aide entre autres de l'approche POD.

## Abstract :

The wake of a flat plate has been studied, at a Reynolds number of 200 000, by means of experiment series in the S4 wind tunnel in IMFT. Bi- and tridimensional static velocity fields have been measured by PIV and Tomo-PIV. Vortex dynamics have been studied by means of the POD approach on a rigid model.

**Mots clefs :** PIV tomographique, turbulence

## 1 Introduction

Même s'il s'agit d'un cas d'étude assez simple, la littérature concernant l'écoulement autour d'une plaque plane à arêtes vives est moins riche par rapport à d'autres types de profil. Les mesures de chute libre réalisées par Eiffel [10] en 1911 depuis son bureau sur la tour sont encore d'actualité.

Quelques années plus tard Fage et Johansen [4] ont produit des données plus détaillées sur une plaque à arêtes fuselées et de grande envergure pour un nombre de Reynolds de 150 000. Grâce à des prises de pression le long de la corde, ces auteurs ont calculé le coefficient de force normale pour treize angles d'incidence entre 0° et 90°. En plus ils ont effectués des mesures par anémométrie à fil chaud dans le sillage.

D'autres mesures dans le sillage existent, et des simulations ont été réalisées même récemment [5, 6, 8].

Avec la croissance d'intérêt pour les micro drones, l'aérodynamique des plaques planes redevient un sujet d'actualité [9]. Dans ce contexte, le projet EMMAV (Electroactive Morphing for Micro Air Vehicles) a pour but l'optimisation des performances des micro drones en situations réalistes grâce à l'emploi de concepts de modification de forme électro-activée. Dans un premier temps, un démonstrateur simple a été mis en place pour valider l'intégration des actionneurs. En raison de sa simplicité structurelle, le choix s'est porté sur une plaque plane avec arêtes vives et non fuselées.

Dans ce contexte, des méthodes de simulation avancées sont mises en jeu pour le fluide et la structure. Même si d'autres études sur des plaque planes existent en littérature, aucune ne présente des données de vitesse en trois dimensions pour le support d'études de Mécanique des Fluides Numérique (CFD) à grand nombre de Reynolds.

Cette communication décrit les mesures préliminaires en configuration statique réalisées en deux et trois dimensions à grand nombre de Reynolds.

## 2 Installation expérimentale

Les expériences ont été menées dans la soufflerie  $S_4$  de l'*Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse* (IMFT). C'est une soufflerie à veine fermée et boucle fermée avec un niveau de turbulence de moins de 1%, la veine mesure 2 m de long, 0,7 m de haut et 0,6 m de large [1].

La maquette est fixée aux parois de la veine en occupant toute la largeur. Nous avons effectué des mesures en PIV 2D2C avec une plaque de 0,30 m de corde avec une vitesse de l'écoulement amont  $U_\infty = 10$  m/s. Pour les mesures tri-dimensionnelles nous avons utilisé une plaque de 0,16 m de corde avec une vitesse de l'écoulement amont  $U_\infty = 19,2$  m/s. Le rapport entre la corde et l'épaisseur de la plaque est 20 dans les deux cas. L'angle d'incidence est fixé à  $10^\circ$ . Le nombre de Reynolds, basé sur la vitesse de l'écoulement à l'infini amont, la corde de la plaque et la viscosité de l'air, est de 200 000 pour tous les tests.

La zone d'investigation retenue comprend le sillage proche à moitié de l'envergure : l'origine du référentiel des données qui sont montrées par la suite est fixé au bord de fuite (Fig. 1).

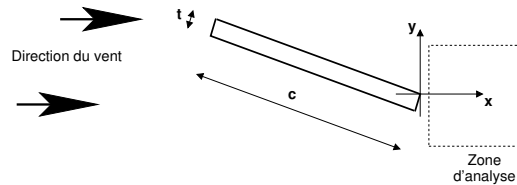


FIG. 1 – Schéma de la configuration et du référentiel.

Les premières mesures ont été effectuées par Vélocimétrie par Imagerie de Particules (PIV) 2D2C et non résolue dans le temps. Nous nous sommes servis d'une caméra de  $2048 \times 2048$  pixels et d'un double laser Nd:YAG pulsé à 200 mJ par impulsion. La synchronisation laser-caméra est cadencée à 4 Hz par un système réalisé à l'*IMFT*.

Les doublets d'images de particules ont été analysés en utilisant le code *PIVis* développé au Service Signaux Images de l'*IMFT*, qui est basé sur une corrélation FFT 2D, implémentée dans un algorithme itératif avec déformation d'image subpixel [7]. Des fenêtres d'interrogation de  $16 \times 16$  pixels ont été retenues avec un recouvrement de 0,5, ce qui donne des maillages de  $255 \times 255$  vecteurs pour une zone de mesure de  $0,6 \times 0,6$  cordes environ.

Dans un deuxième temps, le sillage a fait l'objet d'une campagne de PIV Tomographique [3] à l'aide d'un double laser Nd:YAG pulsé à 200 mJ par impulsion et de quatre caméras de  $2048 \times 2048$  pixels. La synchronisation, l'enregistrement des images, la reconstruction des volumes de mesure et la corrélation croisée ont été réalisées avec l'outil *DaVis* de *LaVision*.

La reconstruction est faite avec l'algorithme MART (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) en six itérations. Ensuite on a choisi des fenêtres de  $40 \times 40 \times 40$  voxels pour la corrélation croisée avec toujours un recouvrement de 0,5, cela donne des champs d'environ  $0,4 \times 0,4 \times 0,06$  cordes avec  $202 \times 202 \times 32$  points pour une résolution de 0,002 cordes.

## 3 Résultats

On montre d'abord les résultats de la PIV-2D, toutes les grandeurs montrées par la suite sont adimensionnées avec la vitesse nominale de l'écoulement à l'infini  $U_\infty$  et la corde  $c$  de la maquette. La bonne convergence des composantes de la vitesse au milieu du maillage, c'est à dire dans la zone cisailée, est affichée dans la Fig. 2(a) pour les composantes horizontale  $u$  et verticale  $v$  de la vitesse. Dans la suite de cette communication la nomenclature issue de la décomposition de Reynolds (valeur moyenne plus fluctuation) sera utilisée (pour la grandeur générique  $\phi$  :  $\phi(t) = \Phi + \phi'(t)$ ).

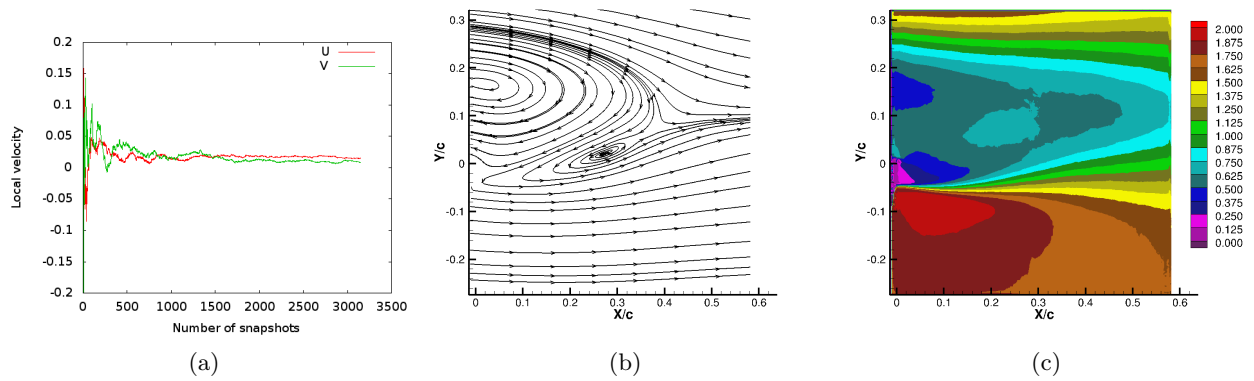


FIG. 2 – PIV 2D : convergence des vitesses moyennes (a), lignes de courant (b) et norme du vecteur vitesse (c).

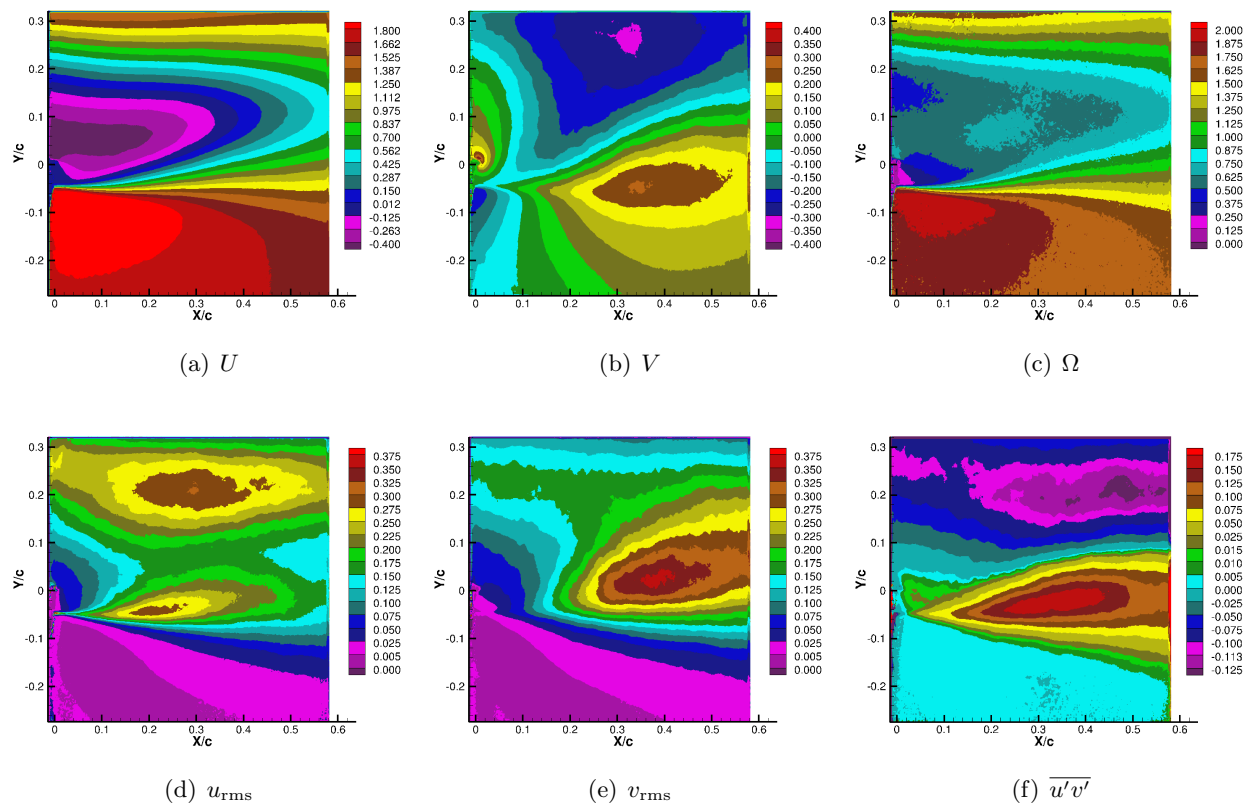


FIG. 3 – Grandeurs de l'écoulement moyen issues de la PIV 2D : vitesse horizontale (a), vitesse verticale (b), champs de vorticité (c),  $u_{rms}$  (d),  $v_{rms}$  (e) et  $\overline{u'v'}$  (f).

Les lignes de courant du champ de vitesse moyen (Fig. 2(b)) montrent la taille moyenne de la région décollée à l'extrados du profil. A l'intrados, l'écoulement est accéléré et on enregistre le maximum de la norme de vitesse, égal à  $1,96 \cdot U_\infty$ , près de la position ( $X/c = 0,07$  ;  $Y/c = -0,08$ ), le minimum est clairement situé à proximité du bord de fuite, à l'origine du référentiel.

Dans la Fig. 3 on montre les autres grandeurs moyennes (vitesse horizontale, vitesse verticale, vorticité  $\Omega$  suivant  $Z$ , les écarts type  $u_{rms}$ ,  $v_{rms}$  et la tension de cisaillement  $\overline{u'v'}$ ). On peut voir la taille de la zone cisailée par le tracé de la vitesse horizontale moyenne (Fig. 3(a)). Par le tracé de la vitesse verticale moyenne on voit l'effet des tourbillons alternés dans le sillage proche.

L'asymétrie du sillage due à la géométrie apparaît évidente par la comparaison avec des données mesurées autour de cylindres [2] ou de plaques à  $90^\circ$  d'incidence [6]. Cependant on reconnaît dans notre cas les caractéristiques du lâcher tourbillonnaire alterné aussi dans les intensités de turbulence horizontale (Fig. 3(d)) et verticale (Fig. 3(e)) et par le cisaillement moyen (Fig. 3(f)).

Le sillage engendré par la plaque en incidence à Reynolds 200 000 est marqué par une turbulence non homogène, gouvernée simultanément par des structures tourbillonnaires organisées et par la turbulence aléatoire. Son caractère anisotrope a une incidence importante pour les applications de modélisation de la turbulence.

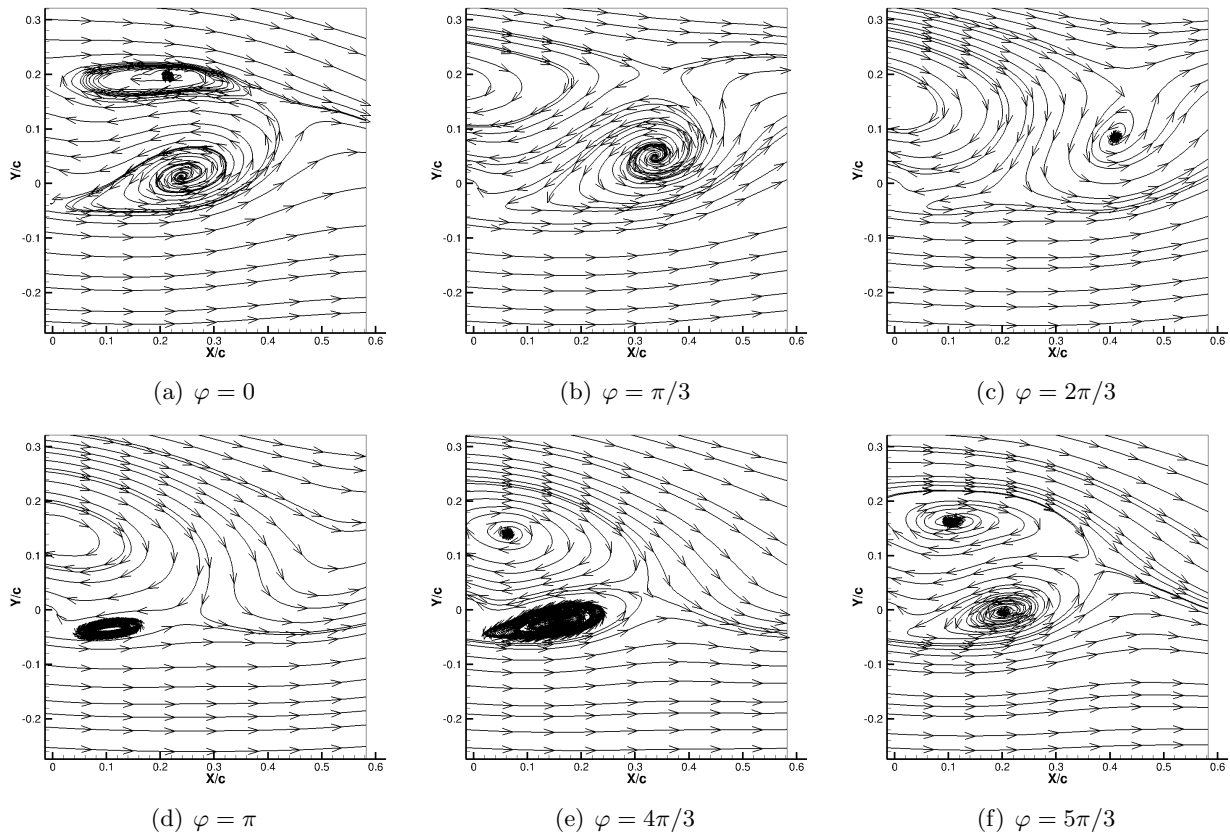


FIG. 4 – PIV 2D : lignes de courant des moyennes de phase.

La décomposition orthogonale propre (POD) est de plus en plus utilisée dans la mécanique des fluides. Mathématiquement la POD projette les champs de vitesse sur une base orthonormée de fonctions  $\Phi_k$  appelées modes. Ces derniers sont normalement classés s  lon l'énergie qui leur est associée. Les champs peuvent être donc exprimés comme combinaison linéaire de ces modes et leurs coordonnées  $a_k$  sont appelées coefficients. Chaque réalisation de vitesse  $\mathbf{u}(X, Y, Z)$  peut être ainsi décomposée :

$$\mathbf{u}(X, Y, Z) = \sum_k a_k \Phi_k(X, Y, Z) \quad (1)$$

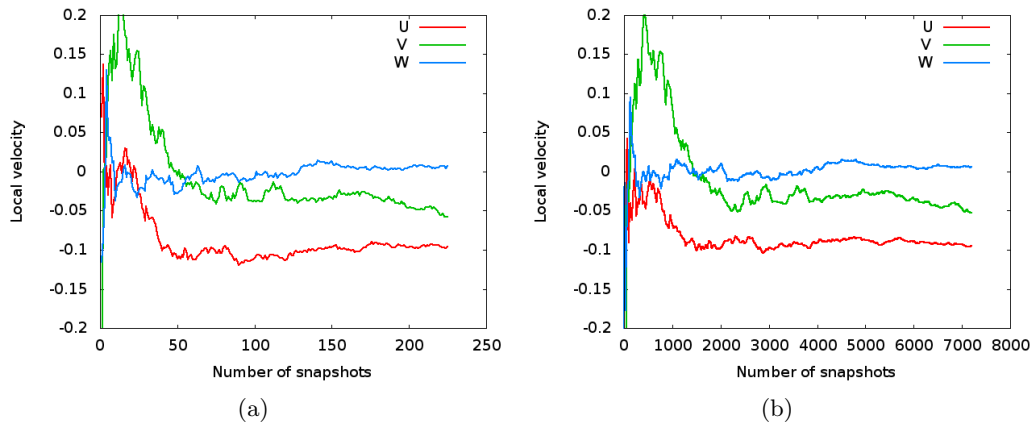


FIG. 5 – Convergence des grandeurs moyennes issues des mesures PIV-3D : pour le point au milieu du maillage 3D (a) et en moyennant aussi sur les plans Z (b).

Dans les écoulement de sillage caractérisés par un lâcher tourbillonnaire alterné, les deux premiers modes de la POD peuvent représenter une grande partie de l'énergie associé. En utilisant les deux premiers coefficients de la POD il est possible d'attribuer, à chaque champ instantané de vitesse, un angle de phase  $\varphi$  dans le lâcher tourbillonnaire [11]. Ensuite on définit six classes de phase (comme dans le travail de Leder [6]) et on moyenne les champs de chaque classe. Les lignes de courant des moyennes de phase ainsi obtenues sont montrées dans la Fig. 4. On observe le processus de tourbillons alternés bien défini au delà du fond de turbulence aléatoire.

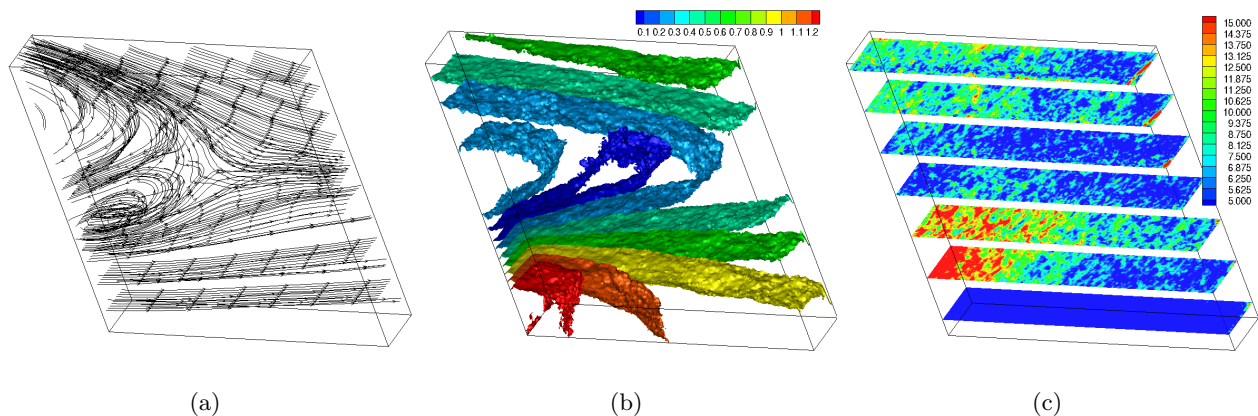


FIG. 6 – PIV Tomographique : lignes de courant du champ moyen 3D (a), isosurfaces norme du vecteur vitesse (b) et isovaleurs sur des tranches de la norme du vecteur vorticité (c).

En ce qui concerne les résultats de la campagne de la PIV Tomographique, une série de 225 volumes de vitesse a été sélectionnée. En Fig. 5(a) on montre la convergence des trois composantes de la vitesse au milieu du maillage, c'est à dire dans la zone cisailée.

Dans chaque volume de mesure il y a 32 plans suivant la largeur ce qui, multiplié par les 225 volumes disponibles, donne un ensemble de 7200 champs 2D. On pourrait avoir la tentation de les utiliser pour mener des analyses statistiques 2D. Cependant, puisque les plans du même volume ne sont évidemment pas statistiquement indépendants, la convergence de la moyenne sur le point du milieu de tous les plans disponibles (Fig. 5(b)) a la même allure que celle du cas 3D (Fig. 5(a)). De plus on perd toute information sur le caractère tri-dimensionnel de l'écoulement.

En Fig. 6 on montre la moyenne statistique 3D issue des champs de PIV Tomographique. Même avec le faible nombre d'échantillons à notre disposition, le champ moyen de vitesse (voir lignes de courant en Fig. 6(a)) est bien représenté par rapport aux mesures 2D (voir Fig. 2(b)). En Fig. 6(b) on montre

des iso-surfaces de la norme de la vitesse moyenne rapportée à la vitesse amont  $U_\infty$ .

En Fig. 6(c) on montre la norme du vecteur vorticité adimensionnée par la vitesse amont  $U_\infty$  et la corde de la plaque. Dans le tracé on affiche des tranches sur des plans  $Y$ . Le champ, à cause de l'opération de dérivation sur une moyenne faiblement converg e, resulte très bruit .

Cependant le champ de vorticité et le champ de norme de vitesse montrent une allure assez uniforme en direction transversale : l'écoulement moyen dans la zone de mesure, à cheval du plan de symétrie transversale de la plaque, est fortement bi-dimensionnel. Retrouver cette même structure dans les mesures de PIV tomographique est encourageant quant à l'absence d'effets de bord liées à l'alignement du volume de mesure par rapport à la soufflerie, à la distribution d'énergie dans le volume d'éclairage, et à la reconstruction tri-dimensionnelle.

## 4 Conclusion

Dans cette communication nous avons montré les résultats des premiers essais de PIV 2D et PIV Tomographique sur le sillage issu d'une plaque plane soumise à un vent avec  $10^\circ$  d'incidence. Les grandeurs moyennes des champs de vitesse ont été mesurées ainsi que leur fluctuations. Une décomposition POD des champs de vitesse 2D a permis d'organiser les champs suivant leur phase dans le lâcher tourbillonnaire.

L'objectif est d'une part d'obtenir des informations sur la structure de l'écoulement turbulent afin d'en améliorer la modélisation, d'autre part de créer une base de données 3D pour mener des actions de validation d'outils de calcul CFD.

La prochaine étape implique l'étude par PIV résolue dans le temps du sillage d'une plaque déformable.

## Références

- [1] Chassaing, P., George, J., Claria, A., Sananes., F. Physical characteristics of subsonic jets in a cross-stream. *J. Fluid Mech.* **62** (1) 41-64, 1974.
- [2] Djeridi, H., Braza, M., Perrin, R., Harran, G., Cid, E., Cazin, S. Near-wake turbulence properties around a circular cylinder at high Reynolds number. *Flow Turb. Comb.* **71** 19-34, 2003.
- [3] Elsinga, G., Scarano, F., Wieneke, B., and van Oudheusden, B. W. Tomographic particle image velocimetry. *Exp. Fluids* **41** 933-947, 2006.
- [4] Fage, A. and Johansen, F. C. On the flow of air behind an inclined flat plate of infinite span. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* **116** (773) 170-197, 1927.
- [5] Lam, K. M. and Wei, C. T. Numerical simulation of the vortex shedding from an inclined flat plate. *Eng. Appl. Comp. Fluid Mech.* **4** (4) 569-579, 2010.
- [6] Leder, A. Dynamics of fluid mixing in separated flows. *Phys. Fluids A* **3** (7) 1741-1747, 1991.
- [7] Lecordier, B. Méthode de PIV avec déformation des images pour l'amélioration des mesures des gradients de vitesse. *8 me Congrès Francophone de V locim trie Laser*, pp. 97-103, 2002.
- [8] Ouvrard, H., Braza, M., Hunt, J., Barbut, G., Hoarau, Y. Capturing turbulent interfaces in wake flows by means of the OES approach. Invited presentation, EUROMECH Colloquium 517, *Interfaces and inhomogeneous turbulence*, 28 - 30 June 2010, UCL London.
- [9] Pelletier, A. and Mueller, T. J. Low reynolds number aerodynamics of low-aspect-ratio, thin/flat/cambered-plate wings. *J. Aircraft* **37** (5) 825-832, 2000.
- [10] Rebuffet, P. *A rodynamique expérimentale*. Dunod, 1950.
- [11] van Oudheusden, B. W., Scarano, F., van Hinsberg, N. P., and Watt, D. W. Phase-resolved characterization of vortex shedding in the near wake of a square-section cylinder at incidence. *Exp. Fluids* **39** 86-98, 2005.