

Détection de tourbillons longitudinaux dans la zone tampon de la couche limite turbulente.

Jie Lin, JeanMarc Foucaut, Jean Philippe Laval et Michel Stanislas

Laboratoire de Mécanique de Lille
Boul. P. Langevin
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex
Jean-marc.foucaut@ec-lille.fr

Résumé :

La zone tampon est une région qui joue un rôle très important dans le processus d'auto-génération de la couche limite turbulente. Cette région contient des structures cohérentes : Tourbillons, Streaks, Sweep, Ejections, ... Une expérience de PIV Stéréoscopique a été réalisée à la soufflerie du LML pour caractériser l'organisation de cette région. Dix plans de PIV ont été enregistrés très près de la paroi ($14.5 < y^+ < 48$) contenant chacun 500 champs de vitesse à trois composantes. Après avoir validé cette base de données, une analyse de la structure à l'aide de la reconnaissance de forme a été effectuée qui a permis de détecter et de caractériser statistiquement les Streaks et les tourbillons longitudinaux. Une organisation de la zone tampon a pu être déduite à partir de la corrélation spatiale double des fonctions indicatrices des différentes structures.

Abstract :

The buffer layer is a region which plays an important role in the production process of the turbulent boundary layer. Such a region contains coherent structures: vortex, streaks, sweep, ejection, ... An experiment of stereoscopic PIV has been carried out in the LML wind tunnel in order to characterize the organization of that region. Ten planes have been recorded very close to the wall ($14.5 < y^+ < 48$). Each plane contains 500 three component velocity fields. After the validation of the database, an analysis of the structure by means of pattern recognition was done which allow to detect and to characterize statistically the streaks and the streamwise vortex. An organisation of the buffer layer could be deduced from double space correlation of the different structure indicative functions.

Mots-clefs : turbulence de paroi ; PIV Stéréoscopique ; organisation

1 Introduction

L'étude de la couche limite turbulente est un domaine important pour l'industrie. Par exemple en aéronautique ou dans l'automobile elle intervient lorsque l'on cherche à limiter le coût à dépenser pour vaincre la traînée. D'un point de vue plus général, on s'intéresse à l'étude de la couche limite turbulente de plaque plane et plus particulièrement de la zone proche de la paroi. La zone tampon est une région qui joue un rôle très important dans le processus de génération de la couche limite turbulente. Cette région contient des structures cohérentes. Ceci a déjà été prouvé par de nombreux auteurs. Les structures cohérentes principales sont les tourbillons, les 'streaks', les 'ejections' et les 'sweeps'.

Theodorsen (1952) a montré que la déformation de vorticité transversale peut créer des tourbillons en fer à cheval ou en épingle à cheveux (nommés 'harpins'). Les 'streaks' sont des régions étroites d'écoulement lent ou rapide. Elles sont allongées dans le sens de l'écoulement. Depuis plus de 50 ans, les structures cohérentes et l'organisation de ces différentes structures cohérentes ont été étudiées par de nombreux auteurs. Mais il reste de nombreuses questions en suspens. Par exemple, quel est le mécanisme de formation de chaque structure ? Quelles relations et interactions existent-ils entre les différentes structures cohérentes ? Dans cette étude, nous allons tâcher de répondre à ces quelques questions.

Le premier objectif de cette étude est d'utiliser des données de PIV stéréoscopique pour caractériser les structures cohérentes. Ceci passe par la détection, l'identification et la

quantification de ces structures. Cette étude doit mener à la proposition d'un modèle d'organisation général de la turbulence de paroi.

2 Base de données expérimentale

Le Laboratoire de Mécanique de Lille possède une soufflerie de grande dimension dont la couche limite peut atteindre une épaisseur de 30 cm pour un nombre de Reynolds Re_0 de 7800. Dans cet écoulement, une base de données a été obtenue expérimentalement à l'aide de la PIV Stéréoscopique qui donne accès aux trois composantes de la vitesse dans un plan (Jie et al, 2004). Deux caméras SENSICAM de LAVISION de 1280×1024 Pixel² ont été placées sous la soufflerie comme illustré sur la figure 1. La focale des objectifs était de 105 mm réglée à $f\#5,6$. Des montures optiques respectant les conditions de Scheimpflug ont été utilisées. Le champ visuel était de 6.5×3.5 cm². Un laser Nd-YAG de 2x250 mJ d'énergie à 15 hertz a été employé pour produire les plans lasers. La base de données comprend dix plans parallèles à la paroi situés à une distance de 14.5 à 48 unités de paroi. La résolution spatiale est de l'ordre de 5 unités de paroi. La vitesse infinie U_∞ est de l'ordre de 3 m/s et la vitesse de frottement u_τ est de l'ordre de 0.12 m/s. Chaque plan contient 500 champs de vitesse de manière à pouvoir faire des statistiques sur les grandeurs étudiées. La taille des champs est de 65×40 mm² ($\approx 530 \times 300$) Pour obtenir les champs de vitesse instantanée, la méthode de Soloff (1997) à 3 plans de calibration avec « shift » entier a été choisie. La résolution spatiale est de 12 pixels ce qui fait environ 5 unités de paroi et la fenêtre d'interrogation finale est de 32×32 pixels². La figure 2 présente un exemple de champs de vitesse fluctuante mesuré à environ 30 unités de paroi. Les vecteurs représentent la vitesse dans le plan et les contours la vitesse normale au plan de mesure. On peut voir se dessiner des structures allongées dans le sens longitudinal.

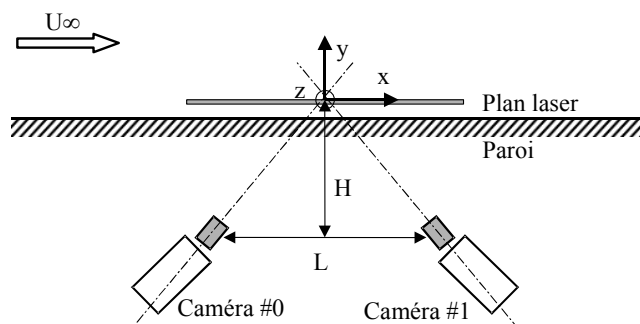


FIG. 1 – Montage expérimental.

A partir des champs obtenus, on a calculé des caractéristiques statistiques de l'écoulement (vitesse longitudinale moyenne, contraintes de Reynolds, densité spectrale de puissance, densité de probabilité, ...). La figure 3 présente une comparaison entre les résultats de la PIV et de l'anémométrie à fils chauds pour la vitesse moyenne et les fluctuations. Les fluctuations sont également comparées à la DNS de couche limite de Spalart (1988) obtenue à un nombre de Reynolds plus petit ($R_0 = 1440$). Dans l'ensemble les résultats sont en bon accord. Il y a cependant des différences avec les résultats obtenus par le fil chaud, probablement à cause du gradient de vitesse qui existe près de la paroi à l'échelle des sondes à fils croisés et de l'obstruction dû au porte sonde.

De plus, des corrélations spatiales doubles des vitesses à une dimension et à deux dimensions ont été calculées et analysées en détail (Lin, 2006). Elles ont permis de mettre en évidence la présence des structures cohérentes.

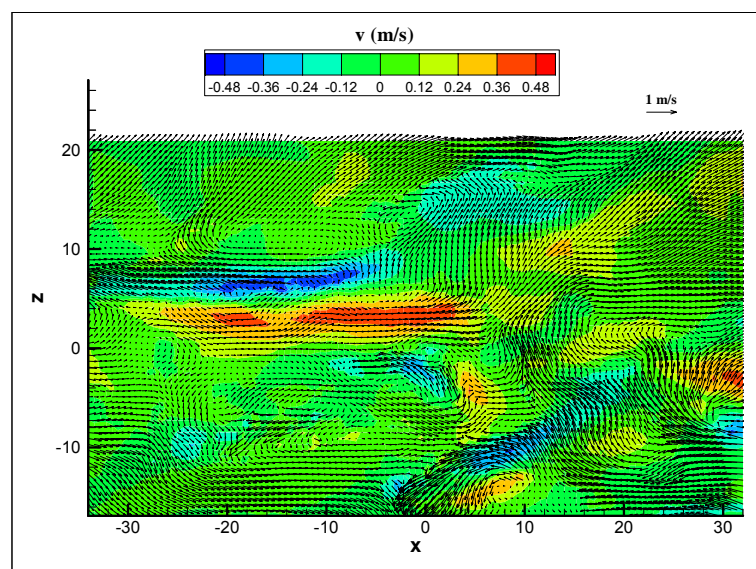


FIG. 2 – Exemple de champs de vitesse fluctuante.

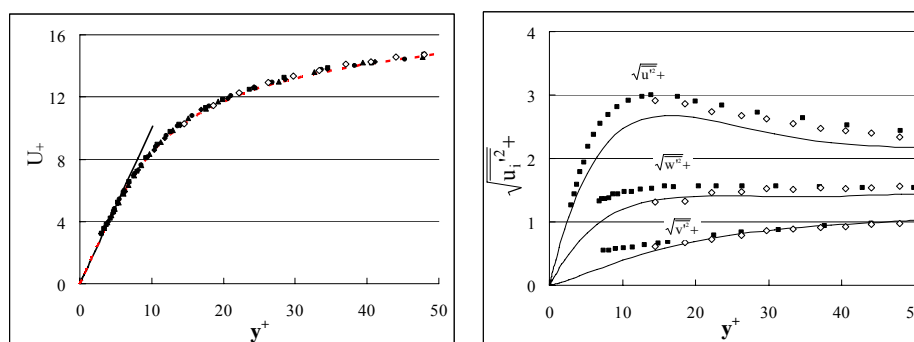


FIG. 3 – Profils de vitesse moyenne et des fluctuations - symboles noir : résultats de l'anémométrie à fils chaud –symboles blancs : résultats de la PIV – traits : DNS Spalart.

3 Procédure de détection des structures

Afin de les caractériser, les structures cohérentes sont détectées à partir de champs de vitesse instantanée. La procédure de détection des structures est réalisée en quatre étapes (Lin, 2004). Dans la première étape, une fonction de détection est choisie pour chaque type de structure. Cette fonction est définie à l'aide des propriétés des structures cohérentes. Pour les streaks, on a utilisé les fluctuations de vitesse longitudinale normalisées par leur écart type. Dans une deuxième étape, on applique un seuillage à cette fonction pour obtenir une image binaire. Puis, dans la troisième étape, un filtrage à base d'outils de morphologie mathématique est appliqué pour lisser les images binaires. Dans la dernière étape, un nettoyage est utilisé pour rejeter les objets dégénérés. Dans cette étape, on prend la surface comme critère de validité. La figure 4 montre un exemple de détection des «low speed streaks». Avec cette méthode de détection, on obtient les fonctions indicatrices des streaks.

Dans cette étude, le plan de mesure comme l'axe des tourbillons longitudinaux sont parallèles à la paroi. Ceci exclu toutes les méthodes de détection classique basées sur les gradients comme la vorticité ou le critère Q . Ainsi la méthode présentée est une alternative nouvelle de détection de structure dans le cas où l'axe des tourbillons se trouve dans le plan de mesure. Celle-ci est développée pour deux types de tourbillons longitudinaux : les tourbillons individuels et les tourbillons contrarotatifs. Le tourbillon individuel (Fig. 5) sera pris comme exemple. La figure 5 est basée sur le profil de fluctuation de vitesse normale de ce tourbillon

dans la direction transversale. Dans le plan de coupe ABCD, on peut trouver des régions avec de grandes fluctuations de vitesse (VF) et des régions avec de grands gradients de vitesse (GO). La détection d'un tourbillon est basée sur la combinaison ordonnée de ces différentes régions. D'abord, on détecte les objets 'fluctuation de vitesse' (VF) et les objets « gradient » (GO) comme précédemment. Ensuite on dilate les objets « gradient » pour créer des fenêtres de recherche. Ensuite on examine les positions relatives et les tailles de ces objets pour détecter les tourbillons. On obtient alors la fonction indicatrice des tourbillons. Pour les tourbillons contrarotatifs, les principes de détection sont les mêmes que les tourbillons individuels avec une combinaison un peu plus complexe.

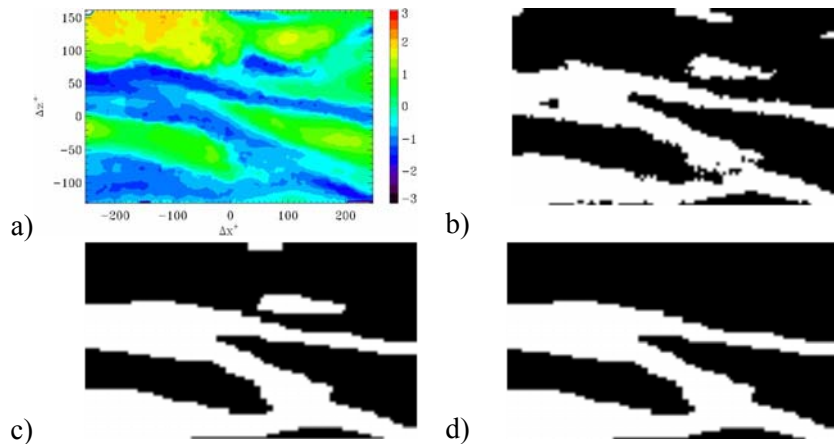


FIG. 4 – Processus de détection : a) fonction de détection, b) seuillage, c) filtrage, d) nettoyage.

Après avoir obtenu toutes les images instantanées de chaque structure cohérente, une analyse morphologique permet d'obtenir les caractéristiques de chaque tourbillon : angle transversal, largeur, longueur, surface, distance transversale ... Ces caractéristiques sont ensuite elles-mêmes analysées à l'aide de statistiques classiques : fréquence d'apparition, moyenne, écart type, histogramme, ...

Cette analyse a montré qu'il existe des liens forts entre les différentes structures. Ainsi, de manière remarquable, la distance transversale est comparable quelque soit le type de structure cohérente. De plus, la loi de variation de densité de probabilité est la même pour la même caractéristique des différentes structures.

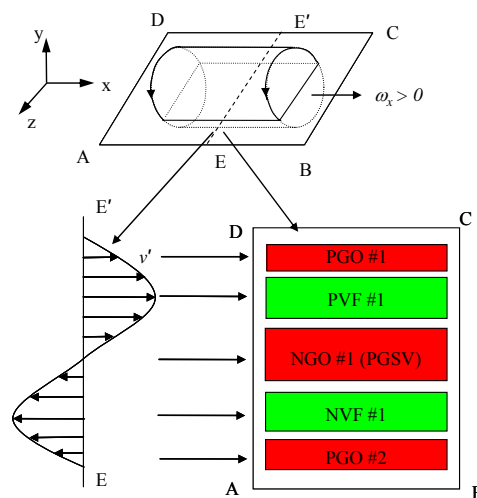


FIG. 5 – Processus de détection des tourbillons longitudinaux

4 Statistique et organisation

Après avoir obtenu les images indicatrices instantanées pour chaque structure cohérente, les corrélations spatiales entre les différents structures : auto corrélation et corrélation croisée des « low et high speed streaks » et des tourbillons négatifs et positifs ont été calculées. Les résultats de ces corrélations et les analyses statistiques précédentes fournissent des informations sur l'organisation de ces structures dans l'écoulement. La figure 6 montre deux exemples de corrélation de la fonction indicatrice des streaks lents et rapide pour les plans situés à 14.5 et 48 unités de paroi. Proche de la paroi on constate deux pics situés à environ 75 unités de paroi qui indique la distance moyenne entre les streaks lents et rapide. Lorsque l'on s'éloigne de la paroi on ne retrouve plus ces pics caractéristiques des streaks.

La figure 7 présente les corrélations des fonctions indicatrices des streaks (lent à droite et rapide à gauche) avec celles des tourbillons longitudinaux positifs. On constate une forte probabilité de présence d'un tourbillon entre les deux streaks. On observe également un angle formé par cette organisation de l'ordre de 7°. On a pu faire la même constatation pour les tourbillons négatifs qui sont inclinés, cette fois, d'un angle opposé. Un schéma représentant cette organisation est proposé sur la figure 8.

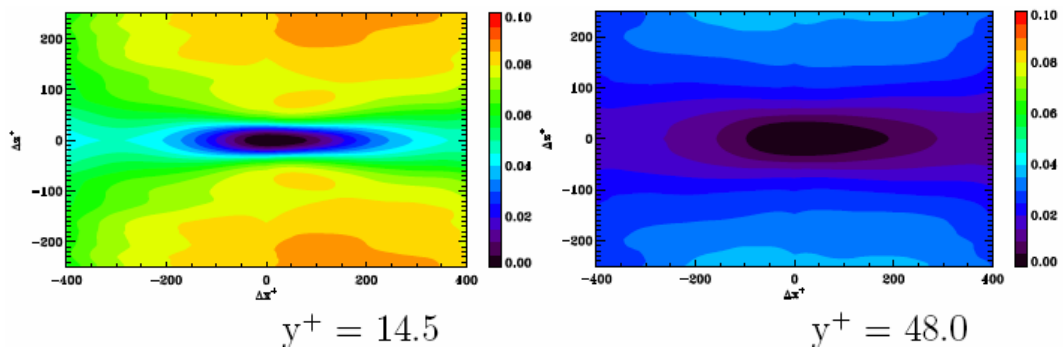


FIG. 6 – Corrélation des fonctions indicatrices des streaks entre eux.

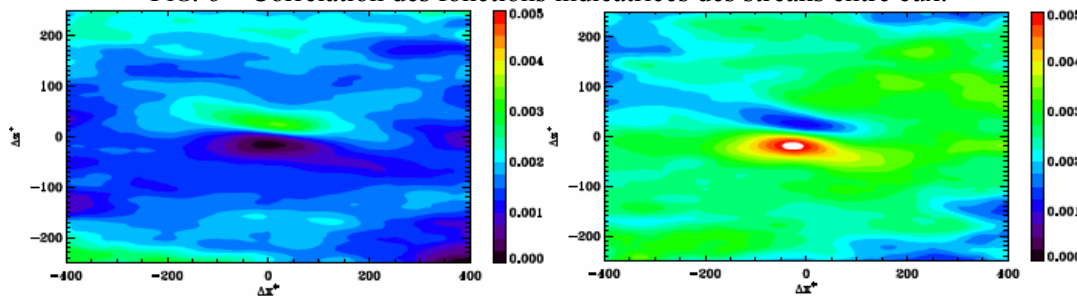


FIG. 7 – Corrélation des fonctions indicatrices des streaks et des tourbillons, $y^+ = 14.5$.

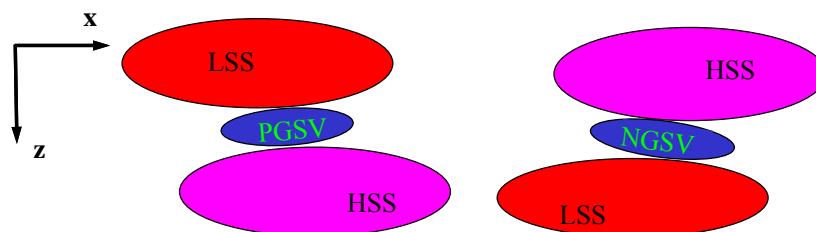


FIG. 8 – Schéma de l'organisation streaks - tourbillons.

4 Conclusions

Cette étude a permis de montrer que la PIV stéréoscopique est une méthode bien adaptée à l'étude de la turbulence de paroi. L'approche par reconnaissance de forme, lorsqu'elle est utilisée avec précaution, peut être une bonne méthode de détection des structures cohérentes. Les résultats obtenus dans cette présente étude sont en bon accord avec la littérature.

Afin d'extraire des informations quantitatives des champs de vitesse, une procédure originale de détection a été développée. Dans cette présente étude, on s'est intéressé plus particulièrement aux tourbillons longitudinaux. A partir de résultats statistiques, on a pu montrer les liens entre les streaks et les tourbillons longitudinaux qui jouent un rôle très important au niveau de l'organisation. Ces tourbillons sont localisés entre 20 et 30 unités de paroi. Leur diamètre y est de l'ordre de 40 unités de paroi. Il atteint 60 unités de paroi en $y^+ = 48$. Ces tourbillons peuvent être inclinés par rapport à la direction longitudinale. Globalement, les résultats sont en bon accord avec le modèle proposé par Adrian et al (2000).

Références

- Adrian RJ, Meinhart CD, Tomkins CD (2000). "Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, 422, 1–54.
- Carlier J, Stanislas M (2005). "Experimental study of eddy structures in a turbulent boundary layer using particle image velocimetry." *Journal of Fluid Mechanics*, 535, 143–188.
- Foucaut J.M., Carlier J. & Stanislas M, PIV optimization for the study of turbulent flow using spectral analysis, 2004, *Meas.Sci.Technol*, 15, 1046-1058.
- Jie. L, Foucaut J.M., Laval J.P. & Stanislas M., 2004, Optimisation de la PIV Stéréoscopique pour la caractérisation de la turbulence de paroi, , 9^e Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, 14-17 Sep 2004, Bruxelles
- Lin Jie, Etude détaillée des structures cohérentes de la zone tampon de la turbulence de paroi à l'aide de données de PIV stéréoscopique, 2006, Thèse de Doctorat 28, Université des Sciences et Technologies de Lille, France.
- Lin J., Laval J. P., Foucaut J. M., Stanislas M., 2004, Streaks Investigation in a Near-wall Turbulent Flow by SPIV, 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry Pasadena, California, USA, September 21-23, 2005
- Soloff S., Adrian R. & Liu Z-C., 1997, Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry, *Meas.Sci.Technol* 8, 1441-1454.
- Spalart P. R., Direct simulation of a turbulent boundary layer up to $R_\theta=1410$, 1988, *J.Fluid Mech.* 187, 61-98.
- Theodorsen T (1952). "Mechanism of turbulence." In "Proc. 2nd. Midwestern Conf.on Journal of Journal of Fluid Mechanics," Ohio State Univ. Columbus, OH.