



HAL
open science

Mesures PIV stéréoscopiques en couche d'Ekman turbulente

Damien Sous, Joël Sommeria

► **To cite this version:**

Damien Sous, Joël Sommeria. Mesures PIV stéréoscopiques en couche d'Ekman turbulente. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03358598

HAL Id: hal-03358598

<https://hal.science/hal-03358598>

Submitted on 29 Sep 2021

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.

Mesures PIV stéréoscopiques dans une couche d'Ekman turbulente

Damien Sous^{1,2} & Joël Sommeria²

¹MAE

Arizona State University, Tempe, USA

²Coriolis/LEGI

Grenoble, France

sous@coriolis-legi.org

Résumé :

Cette communication présente les techniques de mesures et les résultats obtenus lors d'une campagne de mesures en fluide tournant sur des couches limites turbulentes sur fond plat horizontal. Une technique de PIV stéréoscopique est utilisée pour obtenir les trois composantes des champs de vitesse dans un plan. La composante hors-plan du déplacement est reconstruite grâce à une méthode originale basée sur une approximation linéaire autour du plan de mesure. Les profils de vitesse obtenus en régime laminaire sont en très bon accord avec les prédictions théoriques d'Ekman.

Abstract :

This paper reports on measurements techniques and results of an experimental campaign concerning frictional rotating turbulent boundary layer in spin-up flow over flat horizontal bottom. Stereoscopic Particle Image Velocimetry technique is used to obtain two-dimensional three components fluctuating velocity fields. Out-of-plane component is reconstructed thanks to an original method based on a linear approximation on the acquisition plane. Velocity profiles measured in laminar regime show a remarkable agreement with the Ekman theoretical predictions.

Mots-clefs :

Stéréo-PIV, couche d'Ekman, turbulence

1 Introduction

Cette communication présente les techniques expérimentales utilisées lors d'une campagne de mesure sur les couches limites en fluide tournant. Ces couches limites jouent un rôle prépondérant dans la dynamique des écoulements géophysiques (V.W.Ekman 1905).

Peu de résultats quantitatifs sont disponibles pour analyser en détail le comportement des couches limites en fluide tournant, en particulier dans le cas turbulent d'analyser quantitativement. Les données existantes ont généralement été obtenues au cours d'expériences de spinup/spindown. Le transport d'Ekman, dirigé radialement vers l'intérieur pour les écoulements de type spindown et vers l'extérieur pour les spinups, est compensé par un écoulement intérieur opposé. Les études de stabilité (Lilly 1966) ont montré que les couches d'Ekman devenaient instables pour des nombres de Reynolds autour de $Re_\delta = 55$; here $Re_\delta = \left(2u_0^2 / f\nu\right)^{1/2}$, où u_0 est la vitesse de l'écoulement intérieur, $f=2\Omega$ le paramètre de Coriolis et ν la viscosité cinématique. Quelques mesures en couche d'Ekman pleinement turbulentes ($Re_\delta > 150$) ont été obtenues sur des surfaces lisses et rugueuses (Howroyd et

Slawson 1975, Ferrero *et al* 2005), et comparées avec les théories de la Couche Limite Atmosphérique, la partie supérieure de la CLA étant une couche d'Ekman où la direction du vent subit une rotation pouvant atteindre 40°.

Notre étude expérimentale vise à employer les développements récents des techniques de mesures pour approfondir notre connaissance des couches limites en rotation. Les trois composantes des champs de vitesse dans un plan sont mesurées par PIV stéréoscopiques (Particle Image Velocimetry). Cette technique est une variante de la PIV classique (Raffel 1998) qui utilise deux caméras pour obtenir une perception dans la profondeur et ainsi donner accès à la composante hors plan de la vitesse. Une méthode originale de reconstruction stéréoscopique basée sur une approximation linéaire a été développée à cet effet.

2 Techniques expérimentales

2.1 Dispositif expérimental

La campagne de mesures s'est déroulée sur la plateforme tournante Coriolis au LEGI (Grenoble). Cette cuve tournante de 13m de diamètre est remplie d'une couche d'eau salée de 85cm, de densité constante 1,02 kg/m³ etensemencée avec des particules de 30µm préalablement sélectionnées par ségrégation. Le mouvement relatif du fluide est induit en augmentant la période de rotation de la plateforme de T=53s à T=40s. Le paramètre de Coriolis est $f=0,31$ et le nombre de Rossby est défini par $\Delta\omega/\omega=0,33$

Deux caméras CCD (1024x1024 pixels, B&W 12 bits) sont placées à l'extérieur de la cuve, visent la même zone d'acquisition à travers une fenêtre de Plexiglas et enregistrent des séries d'images simultanées. Les objectifs ont été désalignés pour accroître la profondeur de champ. La zone d'acquisition (9x9cm²) est illuminée par une tranche laser argon verticale, l'angle entre la tranche et la direction azimuthale est 8° et les caméras sont placées à 30° et 14° respectivement.

Les caméras sont calibrées grâce à la technique proposée par Tsai (1986) sur une mire placée dans la zone d'acquisition. Les champs de déplacements dans le plan sont calculés par corrélation croisée de l'intensité lumineuse (CIV, Fincham and Delerce 2000). La grille de calcul est raffinée dans la zone proche paroi.

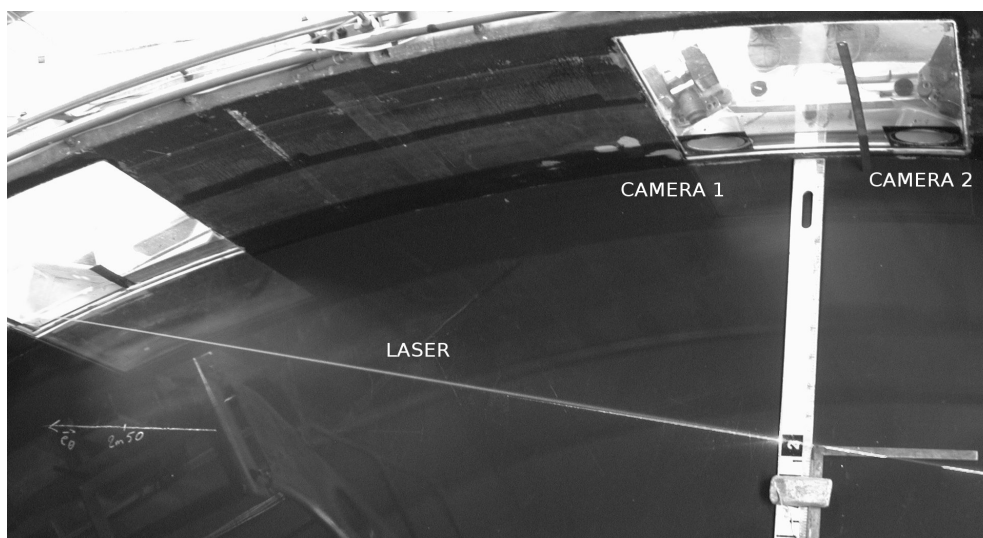


FIG. 1 –Dispositif expérimental vu de dessus.

Nous obtenons des séries de champs de vitesse décrivant le déclin de l'écoulement, typiquement un millier de champs pour chaque caméra pour une durée d'acquisition de 6000s.

2.2 Reconstruction stéréoscopique

Nous présentons ici la méthode originale de reconstruction de la composante hors-plan du champ de déplacement. Pour plus d'informations sur la PIV stéréoscopique, le lecteur est renvoyé à Prasad (2000). Notre méthode est basée sur une approximation linéaire autour du plan $z=0$.

Pour x, y, z coordonnées physiques et x_i, y_i, z_i coordonnées dans l'espace image, la configuration générale du modèle de Tsai donne les coordonnées images.

$$x = \frac{f S_x}{d_x} \left[\frac{x_i}{z_i} \right] = \frac{f S_x}{d_x} \left[\frac{r_1 x + r_2 y + r_3 z + T_x}{r_7 x + r_8 y + r_9 z + T_z} \right]$$

$$y = \frac{f}{d_y} \left[\frac{y_i}{z_i} \right] = \frac{f}{d_y} \left[\frac{r_4 x + r_5 y + r_6 z + T_y}{r_7 x + r_8 y + r_9 z + T_z} \right]$$

où r_i et T_i sont les coefficients du modèle de Tsai de la transformation 3D du repère physique à celui de la caméra, f est la distance focale de la caméra, (d_x, d_y) sont les distances entre les capteurs adjacents dans les deux directions et S_x est le facteur d'échelle (voir Tsai 1986). Les effets de distortion sont négligeables dans notre configuration expérimentale.

Par différentiation autour du plan d'acquisition, $z=0$, on peut écrire

$$dx = A_{11} dx + A_{12} dy + A_{13} dz$$

$$dy = A_{21} dx + A_{22} dy + A_{23} dz$$

où dx_d et dy_d sont les déplacements image et les coefficients A_{ij} donnés par:

$$A_{11} = \frac{f S_x}{d_x} \frac{(y(r_1 r_8 - r_2 r_7) + r_1 T_z - r_7 T_x)}{(r_7 x + r_8 y + T_z)^2}$$

$$A_{12} = \frac{f S_x}{d_x} \frac{(x(r_2 r_7 - r_1 r_8) + r_2 T_z - r_8 T_x)}{(r_7 x + r_8 y + T_z)^2}$$

$$A_{13} = \frac{f S_x}{d_x} \frac{(x(r_3 r_7 - r_1 r_9) + y(r_3 r_8 - r_2 r_9) + r_3 T_z - r_9 T_x)}{(r_7 x + r_8 y + T_z)^2}$$

$$A_{21} = \frac{f}{d_y} \frac{(y(r_4 r_8 - r_5 r_7) + r_4 T_z - r_7 T_y)}{(r_7 x + r_8 y + T_z)^2}$$

$$A_{22} = \frac{f}{d_y} \frac{(x(r_5 r_7 - r_4 r_8) + r_5 T_z - r_8 T_y)}{(r_7 x + r_8 y + T_z)^2}$$

$$A_{23} = \frac{f}{d_y} \frac{(x(r_6 r_7 - r_4 r_9) + y(r_6 r_8 - r_5 r_9) + r_6 T_z - r_9 T_y)}{(r_7 x + r_8 y + T_z)^2}$$

Considérons maintenant deux caméras A et B. Les déplacements connus en pixels (dXa, dYa, dXb, dYb) et les déplacements physiques en cm (dx, dy, dz) sont reliés par le système suivant

$$\begin{cases} dXa = A_{11}dx + A_{12}dy + A_{13}dz \\ dYa = A_{21}dx + A_{22}dy + A_{23}dz \\ dXb = B_{11}dx + B_{12}dy + B_{13}dz \\ dYb = B_{21}dx + B_{22}dy + B_{23}dz \end{cases} \quad (\text{eq. 1})$$

où les B_{ij} sont les A_{ij} pour la caméra B. Ce système linéaire est utilisé pour définir l'hyperplan des déplacements compatibles, dont l'équation est:

$$A_1 dXa + A_2 dYa + B_1 dXb + B_2 dYb = 0$$

où les A_i sont des produits des coefficients A_{ij} .

Les déplacements mesurés sont ensuite projetés sur l'hyperplan pour obtenir quatre déplacements compatibles Ua, Va, Ub, Vb :

$$\begin{cases} Ua = dXa - \lambda A_1 \\ Va = dYa - \lambda A_2 \\ Ub = dXb - \lambda B_1 \\ Vb = dYb - \lambda B_2 \end{cases} \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{A_1 dXa + A_2 dYa + B_1 dXb + B_2 dYb}{A_1^2 + A_2^2 + B_1^2 + B_2^2}$$

Les déplacements réels, non développés ici par souci de simplicité, sont finalement obtenus en introduisant Ua, Va, Ub, Vb dans (1).

3 Résultats

Les composantes du vecteur vitesse sont: u azimuthale positive dans le sens horaire, v radiale positive vers l'intérieur, et w verticale ascendante. Les paramètres expérimentaux sont choisis pour avoir une couche limite pleinement turbulente déclinant progressivement vers le régime laminaire lors de l'ajustement de la vitesse du fluide. Les séries de champs de vitesse sont ensuite traités

Les résultats expérimentaux obtenus en régime laminaire sont comparés aux solutions théoriques d'Ekman pour une couche limite en fluide homogène tournant

$$u = U(1 - e^{-z/\delta_E} \cos(z/\delta_E))$$

$$v = U(e^{-z/\delta_E} \sin(z/\delta_E))$$

où U est la vitesse géostrophique et $\delta_E = \left(\frac{2\nu}{f}\right)^{1/2}$ l'épaisseur de la couche d'Ekman.

La figure 1 montre la comparaison des profils de vitesse expérimentaux moyennés spatialement dans la zone d'acquisition et temporellement sur cinq champs successifs. La méthode utilisée permet de capturer les caractéristiques fines de la couche d'Ekman, en particulier la survitesse azimuthale. L'accord remarquable confirme la validité de la méthode de mesure.

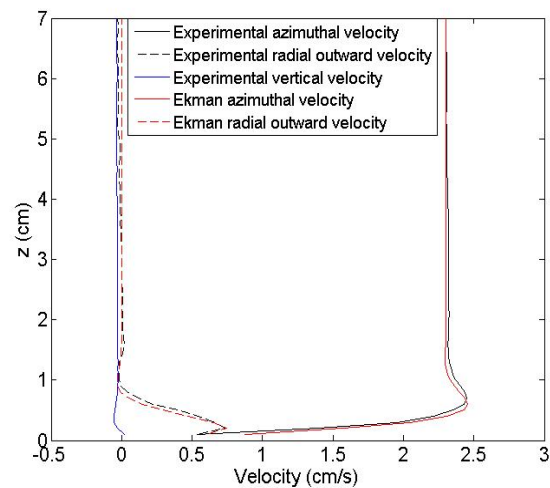


FIG. 2 – Comparaison entre les profils expérimentaux en régime laminaire et les solutions d'Ekman.

Nous présentons ensuite l'évolution des profils des trois composantes de la vitesse au cours du temps (figure 2). Les profils sont des moyennes temporelles sur trente champs successifs, ce qui correspond à un intervalle de temps autour de 100s suffisant pour gommer l'influence des fluctuations turbulentes. On note l'influence diffusive de la turbulence sur les profils de vitesse azimuthale et radiale. La vitesse verticale est faible, son signe négatif est cohérent avec la présence d'un flux vertical dans cet écoulement anticyclonique.

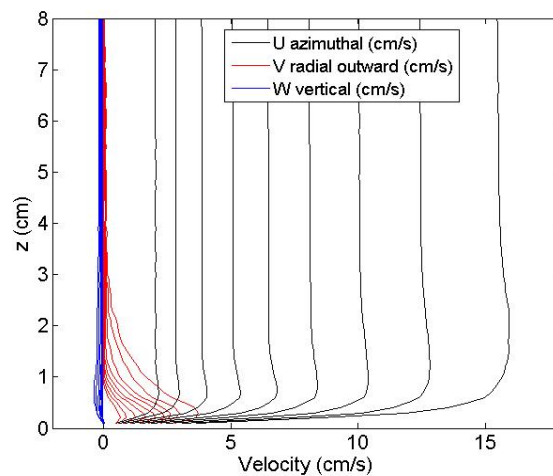


FIG. 2 – Evolution des profils de vitesse au cours du temps

4 Conclusions

Cette communication présente les techniques expérimentales et les résultats obtenus lors d'une campagne de mesure PIV stéréoscopique menée sur la plateforme Coriolis pour analyser

les couches limites en fluide homogène tournant. Les paramètres expérimentaux ont été choisis afin de générer une couche limite turbulente déclinant progressivement vers le régime laminaire. Une méthode originale, basée sur une approximation linéaire autour du plan d'acquisition, est utilisée pour reconstruire la composante hors-plan à partir des champs de déplacements dans le plan.

Les résultats expérimentaux sont confrontés avec succès aux solutions théoriques obtenues par Ekman pour le régime laminaire. Le bon accord confirme la validité de la méthode de mesure pour l'analyse détaillée des couches limites en fluide tournant. L'étude en régime turbulent met en évidence les changements de structure de la couche limite. Le calcul des fluctuations turbulentes permet de quantifier les flux de quantité de mouvement dans la couche limite.

Références

- Ekman, V.W. 1905 On the influence of the earth's rotation on ocean currents. *Arkiv. Matem., Atr. Fysik*, Stockholm 2(11)
- Ferrero, E., Longhetto, A., Montabone, L., Mortarini, L., Manfrin, M., Sommeria, J., Didelle, H., Giraud, C., Rizza, U. 2005, Physical simulations of neutral boundary layer in rotating tank, *Nuovo Cimento C* 28:1-17
- Fincham, A. Delerce, G. 2000 Advance optimization of correlation imaging velocimetry algorithms *Exp. Fluids. Suppl.* 29:13-22
- Howroyd, G.C., Slawson, P.R. 1975 The characteristics of a laboratory produced turbulent Ekman layer. *Boundary-Layer Meteorolog.* 8(2):201-219.
- Lilly, K.D. 1966 On the Instability of Ekman Boundary Flow. *J. Atmos. Sci.* 23:481-494.
- Prasad, A.K. 2000 Stereoscopic particle image velocimetry. *Exp. Fluids* 29:103-116.
- Raffel, M., Willert, C., Kompenhaus, J. 2002, Particle image Velocimetry: a practical guide. Berlin: Springer
- Tsai, R.Y. 1986 An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami Beach, FL, pp. 364-374