

Caractérisation multi-plan d'un écoulement de cavité tridimensionnel par PIV stéréoscopique

Christelle L. DOUAY, Thierry M. FAURE, François LUSSEYRAN

Université Pierre et Marie Curie et Université Paris-Sud, Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur (LIMSI), rue J. Von Neumann, 91 403 ORSAY

Résumé :

La mesure des trois composantes de la vitesse est obtenue par PIV stéréoscopique avec un algorithme de flot optique. Cette méthode est un outil efficace pour une caractérisation quantitative de champs instantanés tridimensionnels comme les écoulements au sein desquels se développent des structures tourbillonnaires. Nous nous intéressons à un écoulement de cavité dans lequel apparaît une instabilité centrifuge sous forme de structures tourbillonnaires contrarotatives. Les mesures sont effectuées dans deux plans d'observation orthogonaux pour rendre compte de la structure 3D de l'écoulement.

Abstract :

The three components of velocity are measured with stereoscopic PIV using an optical flow algorithm. This technique is a useful tool for quantitative diagnostic of instantaneous 3D fields as flows developing vortical structures. We study a cavity flow where a centrifugal instability develops and is observed as counter-rotating vortices. Measurements are conducted in two orthogonal planes in order to get the 3D flow features.

Mots clefs : PIV stéréoscopique, recirculation, instabilité

1 Introduction

La PIV est une technique de mesure quantitative permettant la description des écoulements [1]. Une observation avec deux caméras fournit le champ des trois composantes de vitesse (3C) dans un plan laser (2D). Un algorithme de PIV stéréoscopique par flot optique utilisant une programmation dynamique orthogonale est mis en œuvre dans cette étude [2]. Après la description du dispositif expérimental et de l'enregistrement des images, nous présentons la procédure permettant l'étalonnage du système PIV et la localisation de chacune des deux caméras par rapport au plan de mesure laser. Nous nous intéressons ici à un écoulement de cavité dans lequel apparaît une instabilité centrifuge sous forme de structures tourbillonnaires contrarotatives. Les mesures sont effectuées dans deux plans d'observation différents et permettent une comparaison entre la PIV 2C-2D et la PIV stéréoscopique 3C-2D. La discussion des résultats s'articule autour des principales caractéristiques de l'écoulement et de l'évolution d'une instabilité de type Taylor-Görtler.

2 Dispositif expérimental

La longueur L de la cavité et sa profondeur H permettent de définir son rapport de forme L/H qui est compris entre 0,5 et 2, l'envergure de la cavité est constante et vaut $S=0,3$ m, x est la direction de l'écoulement extérieur incident, y est perpendiculaire à la paroi amont et orienté vers le haut et z est selon l'envergure de la cavité. L'écoulement correspond à une gamme de nombres de Reynolds, construits à partir de la vitesse extérieure U_e et la profondeur de la cavité, compris entre 860 et 37 000. Dans la suite, les expressions « amont » et « aval » font référence à la direction de l'écoulement extérieur. L'ensemencement est réalisé par des particules de DEHS atomisées par air comprimé, de diamètre moyen de l'ordre de $1 \mu\text{m}$. L'origine du système de coordonnées cartésiennes est placée au bord amont de la cavité à mi-envergure. Les mesures PIV sont réalisées avec un laser YAG pulsé qui émet une nappe lumineuse d'environ 1 mm d'épaisseur dans la longueur d'onde 532 nm pendant 6 ns et d'énergie 200 mJ par impulsion. Le système d'enregistrement des images est constitué de caméras 10 bits de 1032×778 pixels à une cadence d'acquisition de 20 Hz.

L'algorithme PIV utilisé est une méthode de flot optique par programmation dynamique orthogonale, c'est un algorithme avancé qui fournit un champ de vitesse avec une résolution d'un vecteur par pixel. Les champs de vitesse sont mesurés dans deux plans d'observations. Un plan (x,y) avec une des caméras alignée selon l'envergure de la cavité pour permettre une comparaison entre les algorithmes de flot optique 2C-2D et 3C-2D (Figure 1-a). La distance focale de l'optique de chaque caméra est de 50 mm et chaque caméra est placée sur une monture de Scheimpflug. Un plan (x,z) situé à $y/H = -0,3$ permet une description du mouvement 3D de l'écoulement et des structures résultant d'une l'instabilité centrifuge (Figure 1-b). Pour ce second plan, la distance focale de l'optique de chaque caméra est de 25 mm. Une précédente étude a montré que la recirculation de la cavité est dominée par un tourbillon principal d'axe transverse [3]. Pour certains paramètres, l'instabilité centrifuge de type Taylor-Görtler apparaît sous la forme de paires de tourbillons contrarotatifs quasi-annulaires inscrits dans le tourbillon principal.

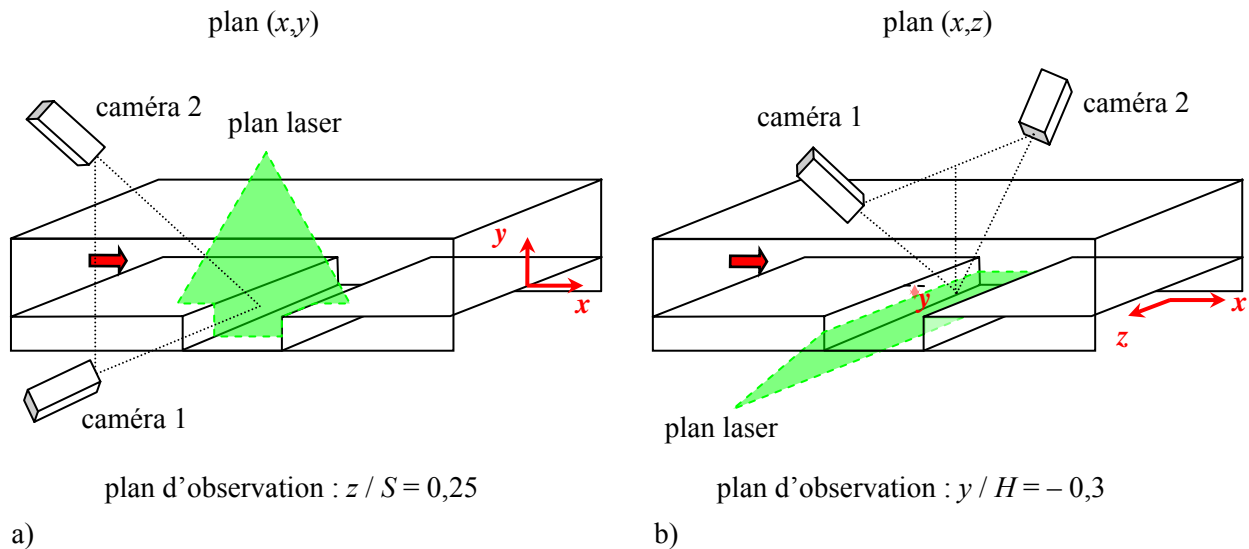


FIG. 1 – Plans de mesure : a) plan (x,y) et b) plan (x,z) dans la cavité.

3 Etalonnage

L'étalonnage des deux caméras est inclus dans une procédure fondée sur un modèle de sténopé [5]. La position de chaque caméra est calculée à partir d'une unique vue d'une mire placée précisément au milieu de l'épaisseur de la nappe laser et de la distance focale de la caméra. La mire est une image plane constituée de disques noirs sur fond blanc, placés sur un maillage carré (Figure 2 a-b). Afin de déterminer sans ambiguïté l'origine de la mire et son orientation, les disques dont les coordonnées, en unité de maillage, sont $(0,0)$, $(3,0)$ et $(0,2)$ sont ôtés de la mire. Un programme d'étalonnage des caméras crée, à partir de l'image de la mire, la position angulaire et la distance de chacune des caméras comptées à partir du centre de la mire. La reconstruction de la mire est alors possible, à partir des images enregistrées par chaque caméra (Figure 2 c-d).

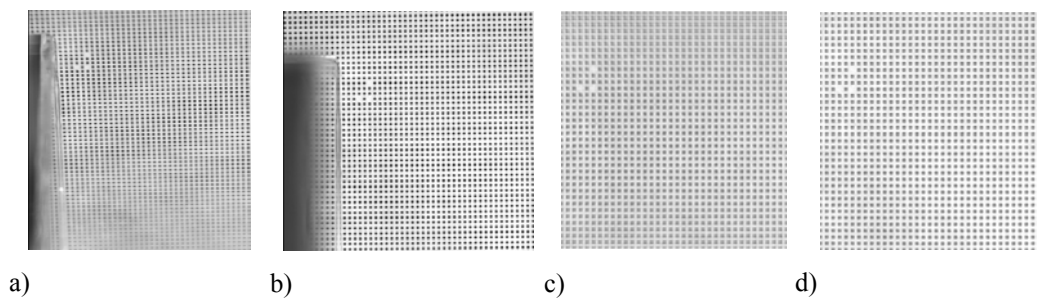


FIG. 2 – Mire d'étalonnage observée par a) la caméra 2, b) la caméra 1 et reconstruction de la mire c) à partir de l'image de la caméra 2 et d) à partir de l'image de la caméra 1.

Pour les mesures dans le plan (x,y) , si l'incertitude est ε_1 pour la première caméra et ε_2 pour la seconde

caméra alors les incertitudes sur les trois composantes de vitesse sont, pour un angle d'environ 45° entre les caméras :

$$\varepsilon_{U,x} \approx \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$$

$$\varepsilon_{U,y} \approx \varepsilon_1$$

$$\varepsilon_{U,z} \approx \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\tan \beta_2}$$

En supposant $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$:

$$\varepsilon_{U,x} \approx \varepsilon = 0,15\% ; \varepsilon_{U,y} \approx \varepsilon = 0,15\% ; \varepsilon_{U,z} \approx 2\varepsilon = 0,3\%$$

Pour les mesures dans le plan (x,z) , avec un angle d'environ 20° :

$$\varepsilon_{U,x} \approx \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$$

$$\varepsilon_{U,y} = \frac{\varepsilon_1 \tan \beta_2 + \varepsilon_2 \tan \beta_1}{\tan \beta_2 - \tan \beta_1}$$

$$\varepsilon_{U,z} \approx \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\tan \beta_2 - \tan \beta_1}$$

En supposant à nouveau $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$:

$$\varepsilon_{U,x} \approx \varepsilon = 0,15\% ; \varepsilon_{U,y} \approx \varepsilon = 0,15\% ; \varepsilon_{U,z} \approx 6\varepsilon = 0,9\%$$

4 Résultats

Pour les mesures réalisées dans le plan (x,y) et $L/H = 1$, la première caméra est placée perpendiculairement au plan laser et l'angle entre les deux caméras est d'environ 45°. Les lignes de courant instantanées montrent clairement le tourbillon d'axe transverse inscrit à l'intérieur de la cavité (Figure 3-a). De plus, comme une caméra est alignée avec l'axe de la cavité, il est possible d'effectuer une comparaison entre la PIV stéréoscopique 3C-2D et la PIV classique 2C-2D. Les profils de vitesse selon l'axe y passant par le centre du tourbillon de la recirculation sont en bon accord entre les deux algorithmes (Figure 3-b), ce qui montre que la seconde caméra n'induit pas d'effet sur la détermination des vitesses selon x et y . La composante de vitesse axiale présente un fort gradient dans la couche de cisaillement qui se développe entre la cavité et l'écoulement extérieur. Une petite zone de vitesse négative est observée vers le fond de la cavité, ce qui correspond à une rotation de l'écoulement dans le sens des aiguilles d'une montre. La composante de vitesse selon l'axe y est beaucoup plus faible et proche de zéro au-dessus et au fond de la cavité où l'écoulement est horizontal.

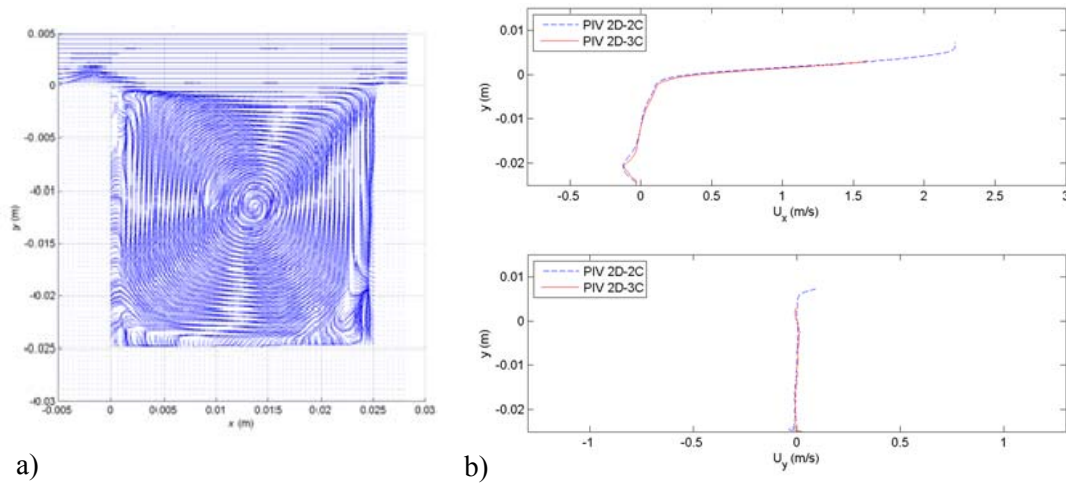


FIG. 3 – a) Lignes de courant pour $Re_H = 3\,750$ $S/H = 12$ et $L/H = 1$, b) comparaison des profils de vitesse moyenne des composantes U_x et U_y le long d'un axe passant par le centre du tourbillon, obtenus par PIV 2C et PIV 3C stéréoscopique.

Comme l'écoulement est tridimensionnel, et dominé par le mouvement du tourbillon principal d'axe transverse, les mesures à l'intérieur de la cavité dans un plan (x,z) sont réalisées avec une forte composante de vitesse perpendiculaire au plan laser, dont l'amplitude est 5 fois supérieure à la vitesse dans ce plan. Ainsi, une mesure des deux composantes de vitesse est sujette à des effets de projection en-dehors de l'axe optique. Pour cela, des mesures PIV stéréoscopiques sont effectuées dans un plan (x,z) et permettent d'appréhender le développement d'une rangée de tourbillons contrarotatifs de type Taylor-Görtler précédemment mise en évidence (Figure 4). Les lignes de courant instantanées dans le plan (x,z) sont superposées à la composante de vitesse selon l'axe y . L'écoulement proche du bord amont de la cavité montre des valeurs globalement positives de U_y , tandis que le bord aval de la cavité présente des valeurs globalement négatives de U_y , ce qui correspond au mouvement de recirculation du tourbillon d'axe transverse. De plus, l'alternance selon l'envergure de maxima et de minima U_y est corrélée aux positions des tourbillons centrifuges de type Taylor-Görtler dont la structure est quasi-annulaire.

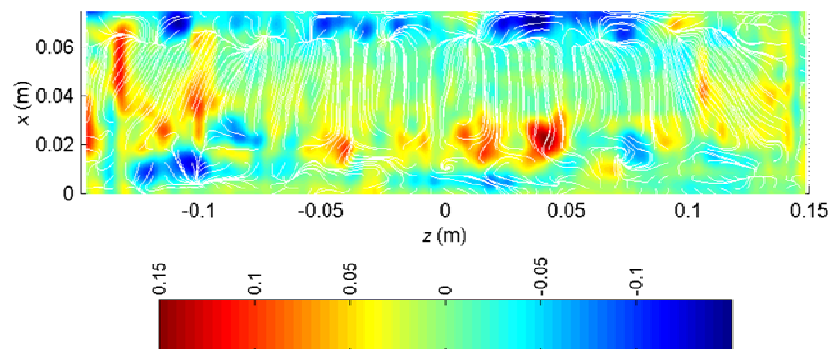


FIG. 4 – Lignes de courant instantanées des composantes (U_x, U_y) dans un plan (x,z) et composante U_y de vitesse (palette de couleur), mesurées par PIV stéréoscopique pour $L/H = 1,5$ et $Re_H = 2\,970$ dans un plan situé à $y/H = -0,3$.

Ces mesures par PIV stéréoscopique valident de précédentes analyses effectuées par PIV-2C, qui concernent la taille et la longueur d'onde des tourbillons résultant de l'instabilité centrifuge pour certains paramètres expérimentaux [6]. Au-delà d'un seuil d'apparition, une rangée de paires de tourbillons contrarotatifs est présente dans la cavité. Ces tourbillons sont engendrés par la courbure de l'écoulement créé par le tourbillon de la recirculation, et ont une structure quasi-annulaire. Afin de localiser ces tourbillons, on utilise le critère I_2 [7]. Il s'agit d'un critère eulérien qui est un moment cinétique normalisé par rapport au mouvement relatif par rapport à une position donnée, et il est défini par :

$$\Gamma_2(\bar{x}) = \frac{1}{S} \int_{\bar{x}' \in S} \frac{(\bar{x}' - \bar{x}) \wedge [\vec{U}(\bar{x}') - \vec{U}(\bar{x})]}{\|\bar{x}' - \bar{x}\| \|\vec{U}(\bar{x}') - \vec{U}(\bar{x})\|} d\bar{x}' \quad (1)$$

Dans cette équation, S est un domaine qui contient la position \bar{x} . En pratique, ce domaine S est un cercle de rayon un pixel, ce qui n'induit pas de lissage d'information par rapport au champ de vitesse. La dimension des tourbillons ainsi détectés est bien supérieure au diamètre du domaine S . Le principal avantage de ce critère par rapport à d'autres critères d'identification de structures tourbillonnaires est qu'il est un invariant galiléen. Il est appliqué à un champ instantané et montre la position de paires de tourbillons contrarotatifs correspondant aux zones où Γ_2 est voisin de -1 ou 1 (Figure 5). En particulier, l'alternance de régions positives et négatives dans la partie centrale de la cavité résulte de la modulation de la vitesse axiale due à la présence des tourbillons contrarotatifs. Ces résultats ont été précédemment observés dans les visualisations de l'écoulement par injection d'un marqueur [4] et les mesures PIV 2C-2D [8].

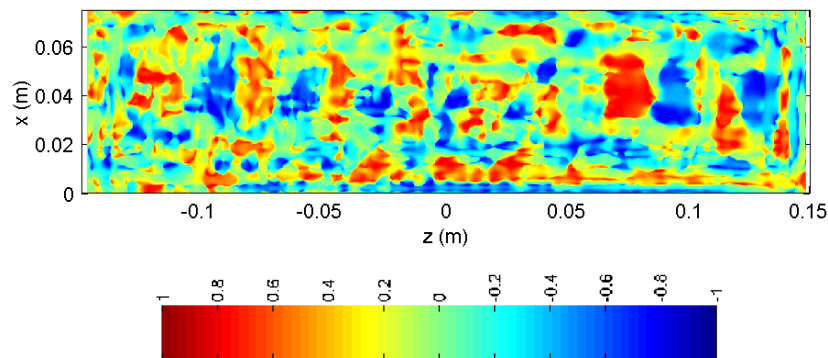


FIG. 5 – Champ instantané du critère Γ_2 mesuré par PIV stéréoscopique pour $L/H = 1,5$ et $Re_H = 2\,970$ dans un plan situé à $y/H = -0,3$.

Il a été montré [4] que cette rangée de tourbillons résultant d'une instabilité centrifuge migre du centre de la cavité vers les parois latérales. Cette dérive transverse est due à l'écoulement qui se développe selon l'envergure, de la ligne médiane centrale de la cavité vers ses extrémités. La vitesse de dérive transverse W_s est mesurée à partir de diagrammes spatio-temporels. Ils sont construits en empilant l'une au-dessus de l'autre, des lignes horizontales prélevées dans le champ de Γ_2 et choisies dans une zone où la rangée de tourbillons est présente, pour différents instants. Dans ces diagrammes, des lignes verticales sont associées à des événements stationnaires, tandis que des lignes obliques sont associées à des structures qui se déplacent (Figure 6). Si les lignes obliques sont plus ou moins des lignes droites, cela signifie que la structure se déplace à une vitesse constante. Comme ces lignes ont une pente comprise entre zéro et une valeur maximum, nous choisissons de caractériser chaque configuration par une vitesse maximum de dérive transverse W_s . La mesure de W_s/U_e donne 0,0130 ce qui est en bon accord avec la valeur de 0,0101 obtenue par PIV 2C-2D et les visualisations de l'écoulement pour les mêmes conditions expérimentales.

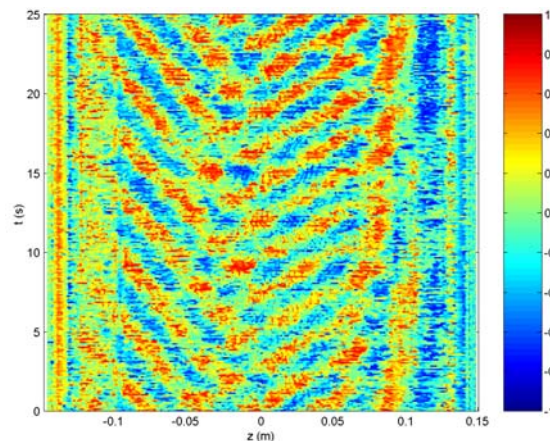


FIG. 6 – Diagramme spatio-temporel du critère Γ_2 mesuré par PIV stéréoscopique pour $L/H = 1,5$ et

$Re_H = 2\ 300$ dans un plan situé à $y/H = -0,3$.

5 Conclusion

Les trois composantes de la vitesse sont obtenues par une technique de PIV stéréoscopique dans un écoulement de recirculation de cavité, et montrent le développement d'une instabilité de type Taylor-Görtler. Les mesures stéréoscopiques fournissent les trois composantes de vitesse avec une incertitude de mesure sur la composante perpendiculaire au plan qui n'excède pas 0,9%. La réalisation de mesures PIV stéréoscopiques simultanées dans deux plans orthogonaux pourront être menées, afin de comprendre le couplage entre la recirculation dans le plan (x,y) , et le développement de l'instabilité de type Taylor-Görtler dans le plan (x,z) . Du point de vue phénoménologique, une meilleure compréhension des seuils d'apparition des instabilités doit aussi être réalisée. Cette configuration servira alors pour la mise en place d'un contrôle actif en boucle fermée par actionneurs plasma, visant à supprimer ou à amplifier les instabilités qui s'y développent.

References

- [1] Raffel, M., Willert, C.E., Kompenhans, J. (1998) *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*, Springer.
- [2] Quénot, G.M., Pakleza, J., Kowalewski, T.A. (1998) Particle image velocimetry with optical flow, *Exp. Fluids*, Vol. 25, No. 3, pp. 177–189
- [3] Faure, T.M., Adrianos, P., Lusseyran, F., Pastur, L.R. (2007) Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers, *Exp. Fluids*, Vol. 42, No. 2, pp. 169–184.
- [4] Faure, T.M., Pastur, L.R., Lusseyran, F., Fraigneau, Y., Bisch, D (2009) Three-dimensional centrifugal instabilities development inside a parallelepipedic open cavity of various shape, *Exp. Fluids*, Vol. 47, No. 3, pp. 395–410
- [5] Quénot, G.M. (2001) Camera calibration using a single target image and camera focal length, *Fourth International Workshop on Particle Image Velocimetry*, paper 1040, Göttingen, Germany, 17-19 September 2001
- [6] Faure, T.M., Defrasne, A., Lusseyran, F., Pastur, L.R. (2008) Flow instabilities development inside an open cavity, *13th International Symposium on Flow Visualization*, Nice (France), July 1-4 2008, Paper ID 81
- [7] Michard, M., Favelier, T. (2004) Développement d'un critère d'identification de structures tourbillonnaires adapté aux mesures de vitesse par PIV, *9^{ème} Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, Bruxelles (Belgique), 14-17 septembre 2004
- [8] Faure, T.M., Lefèvre, G., Pastur, L.R., Lusseyran, F. (2009) Critères d'apparition d'instabilités centrifuges dans une cavité ouverte, *19^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Marseille (France), 24-28 août 2009