HAL
open science

PIV stéréoscopique par flot optique

Thierry Faure, Christelle L. Douay, Sépass Mochki, François Lusseyran, Georges Quénot

To cite this version:

Thierry Faure, Christelle L. Douay, Sépass Mochki, François Lusseyran, Georges Quénot. PIV stéréoscopique par flot optique. 12e Congrès Francophone de Techniques Laser, Sep 2010, Vandoeuvre-lès-Nancy, France. pp.443-450. hal-00520064

HAL Id: hal-00520064

https://hal.science/hal-00520064v1

Submitted on 22 Sep 2010

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.

PIV stéréoscopique par flot optique

Thierry M. Faure[1], Christelle L. Douay[1], Sépass Mochki[1], François Lusseyran[1], Georges M. Quénot[2]
[1]Université Pierre et Marie Curie et Université Paris-Sud
LIMSI-CNRS, UPR 3251, bât. 508, rue J. Von Neumann, B.P. 133, 91403 Orsay Cedex
[2]LIG-CNRS, UMR 5217, 385 rue de la Bibliothèque, B.P. 53, 38041 Grenoble Cedex 9
Email auteur correspondant : thierry.faure@limsi.fr

Résumé

La mesure des trois composantes de la vitesse dans un plan est obtenue par vélocimétrie par images de particules (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.

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. Après la description du dispositif expérimental et d'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. Ce système est ici appliqué à un écoulement de recirculation dans une cavité, où des instabilités associées à des structures tourbillonnaires sont présentes. 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 selon la profondeur de la cavité et z selon son envergure. 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, comprise entre 860 et 37 000. Dans la suite, les expressions « amont » et « aval » font référence à la direction de l'écoulement extérieur. 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 de 0,25 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 1 032×778 pixels à une cadence d'acquisition de 20 Hz. La distance focale de l'optique de chaque caméra est de 25 mm. 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). Un plan (x,z) situé à $y/H = -0{,}3$ permet une description du mouvement 3D de l'écoulement et des structures résultant de l'instabilité de Taylor-Görtler (Figure 1-b). Une précédente étude a montré que la recirculation de la cavité est dominée par un tourbillon principal d'axe transverse [2]. Pour certains paramètres, une instabilité centrifuge de type Taylor-Görtler apparaît sous la forme de paires de tourbillons contrarotatifs quasi-annulaires inscrits dans le tourbillon principal [3].

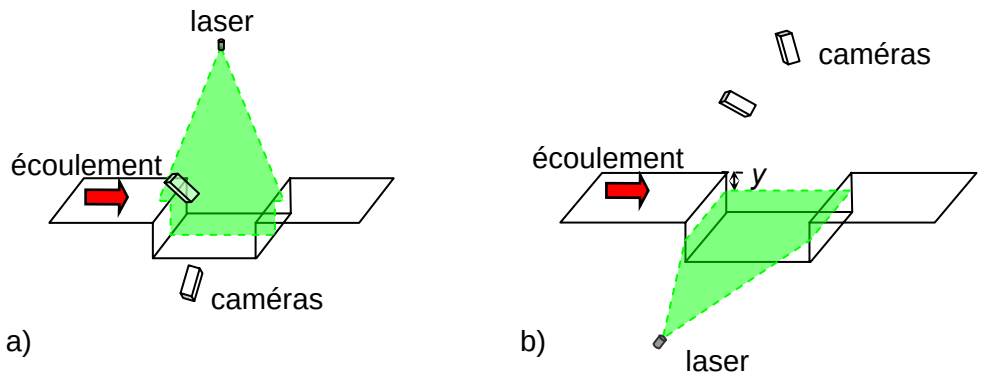

Figure 1 : Plans de mesure : a) plan (x,y) et b) plan (x,z) dans la cavité.

3 Algorithme PIV

Les images PIV sont analysées avec un algorithme de flot optique qui utilise une programmation dynamique orthogonale [4]. Cet algorithme avancé de PIV est fondé sur une recherche itérative d'un alignement global des images de particules, avec des contraintes de régularité et de continuité (minimisation d'une norme de Minkowski). Le problème du déplacement d'une image de particule dans un plan est réduit à un problème à une dimension, en considérant le déplacement selon une direction à l'intérieur d'une bande d'analyse donnée. La solution à deux dimensions est obtenue par une résolution itérative à l'intérieur de bandes orthogonales de plus en plus petites. Les principaux avantages de cette méthode stable et précise sont les suivantes :

- elle peut être utilisée sur des séquences de deux images ou davantage ;
- elle fournit des champs de déplacement à haute résolution d'un vecteur par pixel ;
- le champ de vitesse obtenu est continu et différentiable, ce qui est particulièrement adapté pour les écoulements à forts gradients de vitesse ;
- elle peut être généralisée à la PIV stéréoscopique pour fournir les trois composantes de vitesse, cette version de l'algorithme étant l'objet de cette étude.

Ces principaux inconvénients sont :

- un temps de calcul élevé qui n'excède cependant pas celui des algorithmes avancés utilisant des méthodes d'intercorrélation et de déformation d'image [5] ;
- l'ajustement de nombreux paramètres et leur sensibilité à la configuration de l'écoulement.

Avec les paramètres de cette étude, la résolution du flot optique est de 1 / 32e de pixel, correspondant à une incertitude de mesure relative sur la vitesse de 0,15 %.

4 Étalonnage de la PIV stéréoscopique

L'étalonnage des deux caméras est inclus dans une procédure fondée sur un modèle de trou d'épingle [6]. La position de chaque caméra est calculée à partir d'une unique vue d'une mire placée dans le plan 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 de la mire enregistrées par chaque caméra (Figure 2 c-d).

Pour les mesures ici présentées, le critère de netteté des images n'est pas strictement vérifié, car nous n'utilisons pas de montures de Scheimpflug entre le capteur de la caméra et l'optique. Cependant, il est possible d'enregistrer des images suffisamment nettes du fait du faible angle entre les deux caméras $\theta \approx 20°$. Cet angle limité altère néanmoins la résolution sur la composante de vitesse perpendiculaire au plan de mesure.

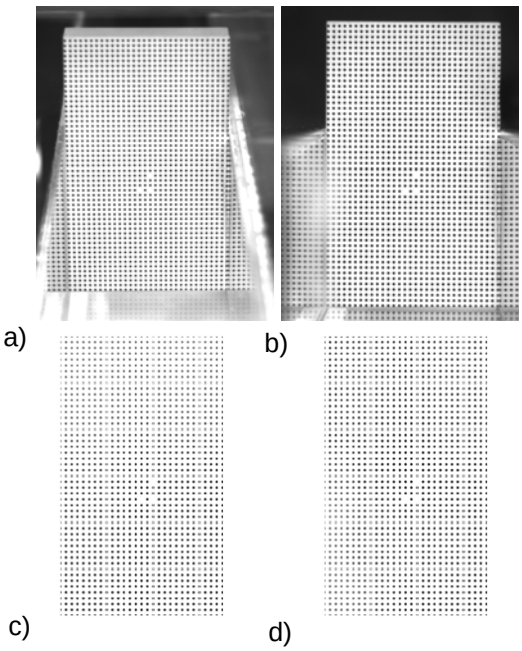

Figure 2 : Mire d'étalonnage observée par a) la caméra 2, b) la caméra 1 et reconstruction de la mire c) à partir de l'image de la caméra 2 et d) à partir de l'image de la caméra 1.

5 Reconstruction du vecteur vitesse

Le grandissement de la caméra est (Figure 3):

$$M = \frac{X_2 - X_1}{x_1 - x'_2}$$

où x_1 et x_2 sont les positions vraies correspondant au déplacement d'une particule dans le plan laser, x'_2 est la projection de ce déplacement dans le plan (x,y) et X_1 et X_2 le déplacement observé dans le plan image (capteur de la caméra).

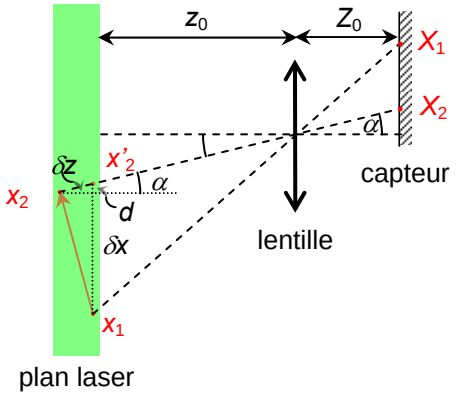

Figure 3 : Déplacement d'une particule dans le plan laser mesuré par une caméra.

À l'intérieur du plan (x,z), le déplacement observé est:

$$x'_2 - x_1 = \delta x + d$$

Ainsi, l'angle α dans le plan (x,z) est défini par :

$$\tan\alpha = \frac{d}{\delta z} = \frac{X_2}{Z_0}$$

Le déplacement dans le plan image est alors :

$$X_2 - X_1 = -M\left(\delta x + \delta z \frac{X_2}{Z_0}\right)$$

On obtient la même expression dans le plan (*y*,*z*) avec un angle β :

$$Y_2 - Y_1 = -M\left(\delta y + \delta z \frac{Y_2}{Z_0}\right)$$

Pour un système stéréoscopique de deux caméras, les composantes de vitesse mesurées sont respectivement, pour la première caméra :

$$U_1 = \frac{\delta x + \delta z \tan\alpha_1}{\delta t} \quad V_1 = \frac{\delta y + \delta z \tan\beta_1}{\delta t}$$

On obtient une expression similaire pour la seconde caméra avec les angles α_2 et β_2, ce qui donne les expressions des composantes de vitesse :

$$U_x = \frac{U_1 \tan\alpha_2 - U_2 \tan\alpha_1}{\tan\alpha_2 - \tan\alpha_1}$$

$$U_y = \frac{V_1 \tan\beta_2 - V_2 \tan\beta_1}{\tan\beta_2 - \tan\beta_1}$$

$$U_z = \frac{U_1 - U_2}{\tan\alpha_1 - \tan\alpha_2} = \frac{V_1 - V_2}{\tan\beta_1 - \tan\beta_2}$$

Si les caméras sont placées le long de l'axe *y*, alors les angles α_1 et α_2 sont faibles et une meilleure estimation des composantes de vitesses est obtenue par :

$$U_x = \frac{U_1 + U_2}{2} - \frac{V_1 - V_2}{2} \frac{\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2}{\tan\beta_1 - \tan\beta_2}$$

$$U_y = \frac{V_1 \tan\beta_2 - V_2 \tan\beta_1}{\tan\beta_2 - \tan\beta_1}$$

$$U_z = \frac{V_1 - V_2}{\tan\beta_1 - \tan\beta_2}$$

Ainsi, pour une erreur de mesure ε_1 sur la première caméra et ε_2 pour la seconde avec des angles $\beta_1 \approx 0°$ et $\beta_2 \approx 20°$ on obtient les incertitudes suivantes :

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

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

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

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

$$\varepsilon_{U,x} \approx \varepsilon \,;\, \varepsilon_{U,y} \approx \varepsilon \,;\, \varepsilon_{U,z} \approx 6\varepsilon$$

Avec ce réglage, la précision relative sur la composante de vitesse perpendiculaire au plan de mesure est de 0,9%.

6 Résultats

Pour les mesures réalisées dans le plan (*x*,*y*), et $L/H = 1$, la première caméra est placée perpendiculairement au plan laser (Figure 4) et l'angle entre les deux caméras est $\theta \approx 20°$. Les lignes de courant instantanées montrent clairement le tourbillon d'axe transverse inscrit à l'intérieur de la cavité (Figure 5-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 5-b). 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.

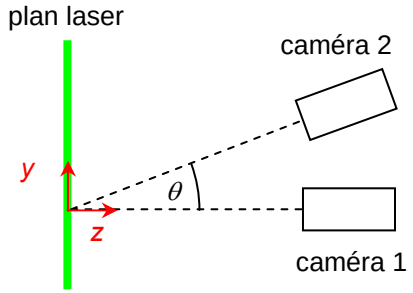

Figure 4 : Positions des caméras pour la comparaison entre la PIV 2C et 3C.

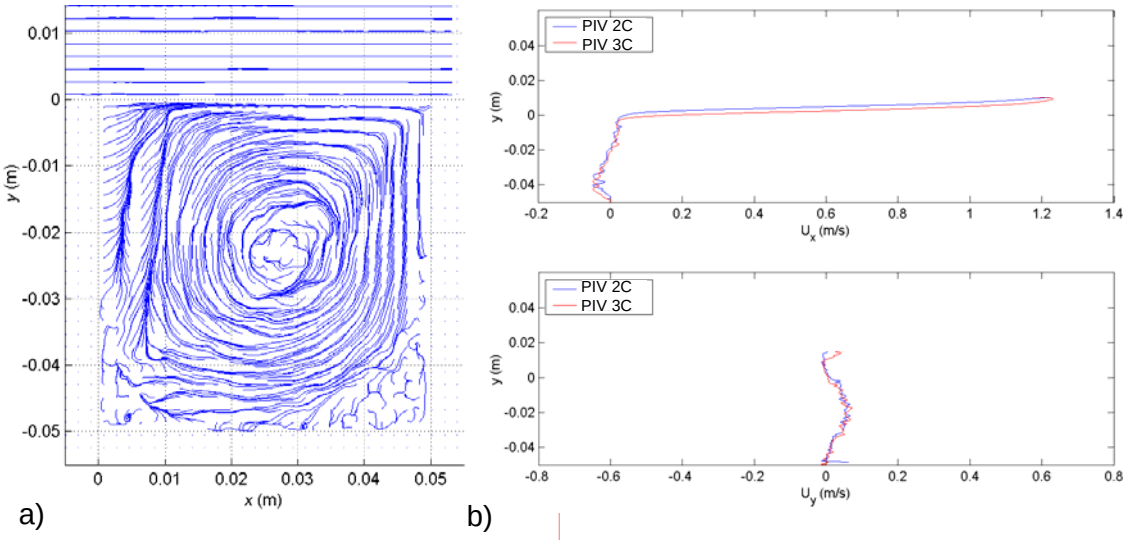

Figure 5 : a) Lignes de courant pour Re_H = 4 230 et L/H = 1, b) Comparaison des profils de vitesse instantanée des composantes U_x et U_y le long d'un axe passant par le centre du tourbillon, obtenus par PIV 2C et PIV 3C stéréoscopique.

Comme l'écoulement dans la cavité 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 6). Les lignes de courant instantanées dans le plan (*x*,*z*) sont superposées à la composante de vitesse selon l'axe *y* (Figure 7). Les deux bandes blanches latérales sont des zones d'ombre qui ne sont pas observées par les deux caméras. L'écoulement proche du bord amont de la cavité montre des valeurs positives de U_y tandis que le bord aval de la cavité présente des valeurs 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 de structure quasi-annulaire.

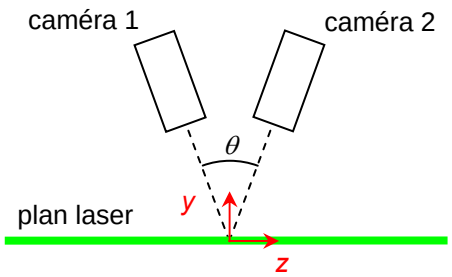

Figure 6 : Positions des caméras pour des mesures PIV-3C dans un plan (x,z).

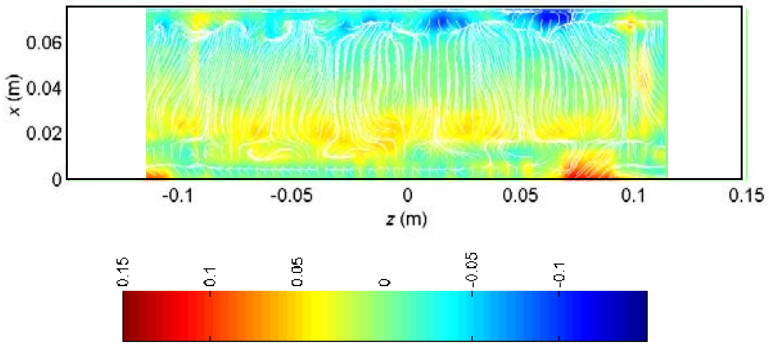

Figure 7 : Lignes de courant des composantes (U_x,U_y) dans un plan (x,z) et composante U_y de vitesse (palette de couleur), mesurées par PIV stéréoscopique pour L/H = 1,5 et Re_H = 4 450 dans un plan situé à y/H = – 0,3.

7 Identification de structures tourbillonnaires

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 [7]. 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 Γ_2 [8]. Il s'agit d'un critère eulérien qui est un moment cinétique normalisé par rapport au mouvement relative par rapport à une position donnée, et il est défini par :

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

Dans cette équation, S est un domaine qui contient la position $\vec{x}$. 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 8). En particulier, la rangée proche du bord amont de la cavité est observée tout comme dans les visualisations de l'écoulement par injection d'un marqueur [3] et les mesures PIV 2C-2D [9].

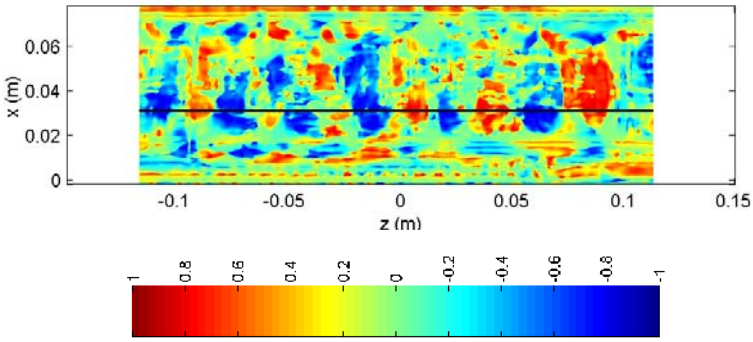

Figure 8 : Critère Γ_2 mesuré par PIV stéréoscopique pour L/H = 1,5 et Re_H = 4 450 dans un plan situé à y/H = – 0,3.

Il a été montré [2] 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 partie centrale de la cavité vers ses extrémités. La vitesse de dérive transverse W_s est mesurée à partir de diagrammes spatio-temporel. 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 (ligne noire sur la Figure 8), pour différents instants. Dans ces diagrammes, des lignes verticales sont associées à des évènements stationnaires, tandis que des lignes obliques sont associées à des structures qui se déplacent (Figure 9). 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 0,0068 ce qui est en bon accord avec la valeur de 0,0064 obtenue par PIV 2C-2D et les visualisations de l'écoulement pour les mêmes conditions expérimentales.

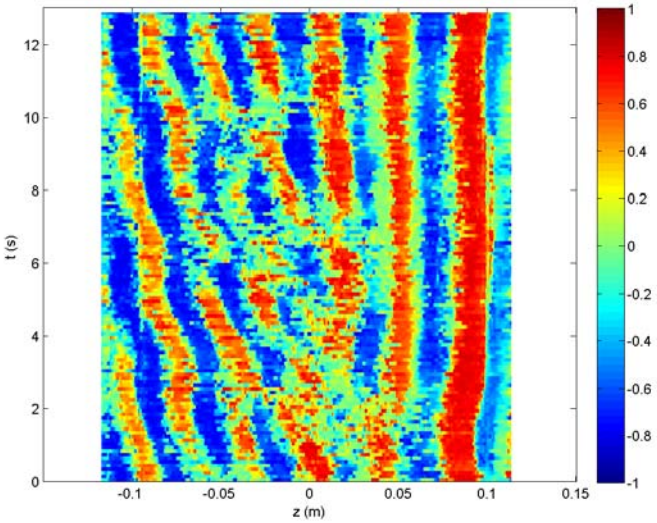

Figure 9 : Diagramme spatio-temporel du critère Γ_2 pour L/H = 1,5 et Re_H = 4 450.

8 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. Bien que des montures de Scheimpflug ne soient pas utilisées dans ce montage, 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 première perspective à cette étude est l'emploi de montures de Scheimpflug sur les caméras, afin d'augmenter l'angle entre les caméras et évaluer l'influence de la mise au point des images. Le

second objectif sera la réalisation de mesures PIV stéréoscopiques simultanées dans deux plans orthogonaux, 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*).

Références

[1] Raffel, M., Willert, C.E., Kompenhans, J. (1998) *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*, Springer

[2] 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

[3] Faure, T.M., Pastur, L.R., Lusseyran, F., Fraigneau, Y., Bisch, D (2009-a) Three-dimensional centrifugal instabilities development inside a parallelepipedic open cavity of various shape, *Exp. Fluids*, Vol. 47, No. 3, pp. 395–410

[4] Quénot, G.M., Pakleza, J., Kowalewski, T.A. (1998) Particle image velocimetry with optical flow, *Exp. Fluids*, Vol. 25, No. 3, pp. 177–189

[5] Scarano, F. (2001) Iterative image deformation method in PIV – Review article – *Meas. Sci. Techno.*, Vol. 12, pp. 1382–1391

[6] 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

[7] 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

[8] Michard, M., Favelier, T. (2004) Développement d'un critère d'identification de structures tourbillonnaires adapté aux mesures de vitesse par PIV, *9ème Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, Bruxelles (Belgique), 14-17 septembre 2004

[9] Faure, T.M., Lefèvre, G., Pastur, L.R., Lusseyran, F. (2009-b) Critères d'apparition d'instabilités centrifuges dans une cavité ouverte, *19ème Congrès Français de Mécanique*, Marseille (France), 24-28 août 2009