



**HAL**  
open science

## Identification de structures tourbillonnaires par PIV dans un écoulement de cavité

Thierry M. Faure, Gaëlle Lefèvre, Luc R. Pastur, François Lusseyran

► **To cite this version:**

Thierry M. Faure, Gaëlle Lefèvre, Luc R. Pastur, François Lusseyran. Identification de structures tourbillonnaires par PIV dans un écoulement de cavité. 13ème Congrès Français de Visualisation et de Traitement d'Images en Mécanique des Fluides, Nov 2009, Reims, France. 8 p. hal-00515632

**HAL Id: hal-00515632**

**<https://hal.science/hal-00515632>**

Submitted on 7 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.

# IDENTIFICATION DE STRUCTURES TOURBILLONNAIRES PAR PIV DANS UN ECOULEMENT DE CAVITE

Thierry M. FAURE <sup>a,\*</sup>, Gaëlle LEFÈVRE <sup>a</sup>, Luc R. PASTUR <sup>a</sup>, François LUSSEYRAN <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur, Université Pierre et Marie Curie Paris 6 et Université Paris-Sud 11, B.P. 133, 91403 Orsay

\* [thierry.faure@limsi.fr](mailto:thierry.faure@limsi.fr)

---

## Résumé

L'interaction d'un écoulement de couche limite avec une cavité ouverte développe une instabilité de Kelvin-Helmholtz et une recirculation dans la cavité. Apparaissent alors, pour certaines conditions, des instabilités centrifuges induites par la courbure de l'écoulement imposée par le confinement des parois. Une exploration du champ de vitesse par PIV dans deux plans orthogonaux fournit la structure de l'écoulement incompressible pour une gamme de nombres de Reynolds compris entre 1 900 et 10 000. L'utilisation d'un critère d'identification de structures tourbillonnaires permet de déterminer la présence de ces instabilités centrifuges, à partir de mesures PIV. Par ailleurs, le discriminant de Rayleigh indique l'étendue des zones potentiellement instables dans la cavité. Enfin, la mesure d'un paramètre de contrôle du degré de stabilité de l'écoulement donne le seuil d'apparition des instabilités centrifuges. Une comparaison avec un entraînement du fluide par un couvercle mobile achève l'étude.

**Mots Clés :** PIV / instabilité / cavité

---

## 1. Introduction

Les écoulements de cavité se rencontrent dans de nombreuses configurations industrielles, le mécanisme moteur de l'entraînement pouvant être une paroi mobile (paliers hydrodynamiques) ou le développement d'une couche de cisaillement au dessus d'une cavité ouverte (césure de portière automobile, rue bordée d'immeubles, refroidissement de composants électroniques, riblets, ...). Une instabilité de Kelvin-Helmholtz se développe à la frontière entre le fluide extérieur et intérieur. Cette interaction est à l'origine de la recirculation dans la cavité. La recirculation induit une courbure de l'écoulement et dans certains cas, l'apparition d'instabilités centrifuges. Cette étude a pour objectif de caractériser l'apparition de ces instabilités dans une cavité ouverte, à partir de mesures PIV obtenues en écoulement incompressible pour une gamme de nombres de Reynolds compris entre 1 900 et 10 000.

Après une présentation du dispositif expérimental et du système de mesure, une première partie de l'étude s'attache à caractériser les instabilités centrifuges à travers leur vitesse de migration vers les parois latérales, leur nombre et leur longueur d'onde. Une seconde partie traite de la localisation des zones instables à partir du discriminant de Rayleigh et de l'utilisation d'un paramètre de contrôle de stabilité de l'écoulement. Une confrontation des résultats avec ceux issus de visualisations est conduite et permet de mettre en évidence un seuil d'apparition des instabilités. La comparaison de la présente configuration avec un entraînement du fluide réalisé par un couvercle mobile, permet de mettre en évidence les différences entre ces deux cas dont les morphologies du champ de vitesse sont très semblables.

## 2. Dispositif expérimental

L'écoulement est engendré par une soufflerie basse vitesse en circuit ouvert. La section d'essais est entièrement réalisée en verre antireflet de 2 mm d'épaisseur, et rend possible son

exploration par des méthodes optiques. La cavité est modulaire, ses dimensions sont variables ce qui permet de considérer plusieurs rapports de forme  $L/H$  compris entre 0,5 et 2. Les extrémités de la cavité selon son envergure sont les parois latérales fixes de la soufflerie. La vitesse caractéristique de l'écoulement est la vitesse extérieure à la couche limite amont  $U_e$ . Le nombre de Reynolds  $Re_H$  est construit sur la hauteur  $H = 5$  cm de la cavité.

Les mesures PIV sont effectuées avec un laser YAG pulsé qui émet à 532 nm une nappe lumineuse de 0,25 mm d'épaisseur maximum. Les séquences de photogrammes sont enregistrées par une caméra 10 bits de résolution 1 032×778 pixels à une fréquence de 20 Hz. Les champs de vitesse sont déterminés avec une technique qui utilise un algorithme de flot optique par programmation dynamique orthogonale, fournissant des champs à haute résolution (1 vecteur par pixel) particulièrement adaptés pour les zones de fort gradient de vitesse comme les couches de cisaillement et les recirculations. La résolution en vitesse est de  $1/32^\circ$  de pixel soit une précision relative de 0,15 % (Faure et al. [2006]). Dans ce qui suit, les résultats sont présentés pour deux plans d'observation : un plan  $(x,y)$ , pour appréhender la morphologie de l'écoulement principal, et un plan  $(x,z)$ , pour décrire le développement des instabilités secondaires qui se superposent à cet écoulement (figure 1). Dans chaque cas, la caméra a une vue complète de la cavité, selon sa longueur ou son envergure. Dans le premier cas, le plan  $(x,y)$  est placé à mi-envergure de la cavité. Dans le second cas, le plan  $(x,z)$  est placé à une position verticale relative  $y^* = y/H = -0,3$ .

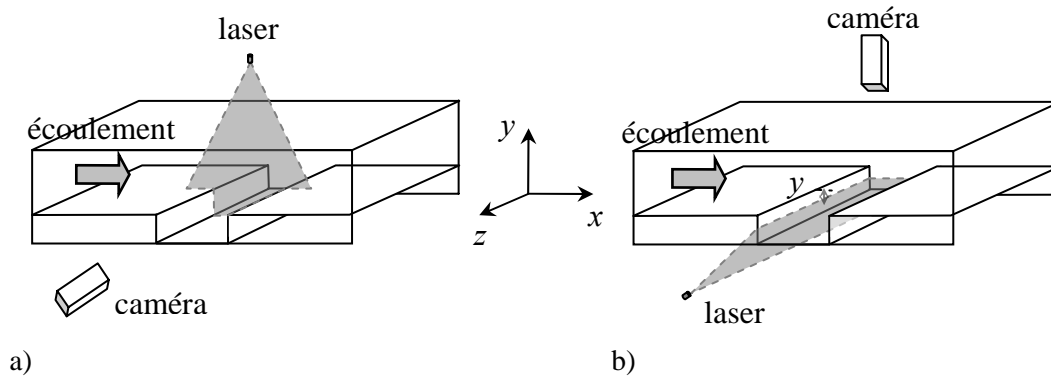


Fig. 1. Visualisations dans a) un plan  $(x,y)$  ou b) un plan  $(x,z)$  à l'intérieur de la cavité

### 3. Caractérisation des instabilités centrifuges

#### 3.1. Critère d'identification des tourbillons

Des instabilités centrifuges se développent, dans certaines conditions, selon l'envergure de la cavité et ont été identifiées sur des visualisations (Faure et al. [2007], Faure et al. [2009]) et des mesures PIV (Faure et al. [2008]). Cependant, ces mesures PIV à deux composantes sont réalisées avec une forte vitesse perpendiculaire au plan de mesure et sont par conséquent fortement bruitées. Afin de permettre d'identifier les structures tourbillonnaires, on applique un critère de détection des tourbillons aux champs PIV instantanés. Ce critère  $\Gamma_2$  (Graftieux et al. [2001], Michard et Favelier [2004]) est un moment cinétique normalisé qui considère le mouvement relatif autour d'un point donné, il est défini par :

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

Dans l'équation (1),  $S$  est un domaine contenant le point d'observation  $\vec{x}$  et l'angle  $\theta$  est formé par les deux vecteurs du produit vectoriel. L'avantage de  $\Gamma_2$  sur d'autres critères

d'identification tourbillonnaires est qu'il est un invariant galiléen. L'application de ce critère à un champ PIV instantané met en évidence les paires d'instabilités centrifuges contrarotatives sous la forme de zones où le niveau de  $\Gamma_2$  est voisin de  $-1$  et de  $1$  (figure 2). On retrouve en particulier, une rangée d'instabilités au voisinage du bord amont de la cavité, qui est également observée sur les visualisations (Faure et al. [2009]).

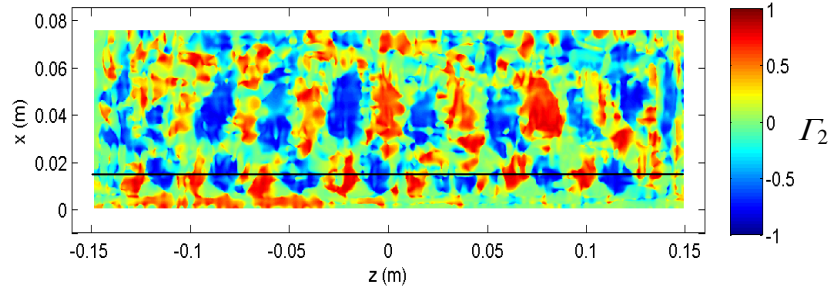


Fig. 2. Critère  $\Gamma_2$  sur un champ PIV instantané pour  $L/H = 1,5$  et  $Re_H = 2\,300$

### 3.2. Mesures des caractéristiques des instabilités centrifuges

À partir de l'identification des structures tourbillonnaires sur tous les instants PIV, on extrait une ligne passant par l'allée d'instabilités, dans chaque champ de  $\Gamma_2$  (ligne noire, figure 2) ce qui permet de construire un diagramme spatio-temporel (figure 3). On observe la migration des paires d'instabilités vers les parois latérales de la cavité. Il est alors possible de mesurer leur vitesse de dérive transverse  $W_s$  à partir de la pente maximum des iso-valeurs du diagramme, leur nombre  $N$  et leur longueur d'onde  $\lambda$ .

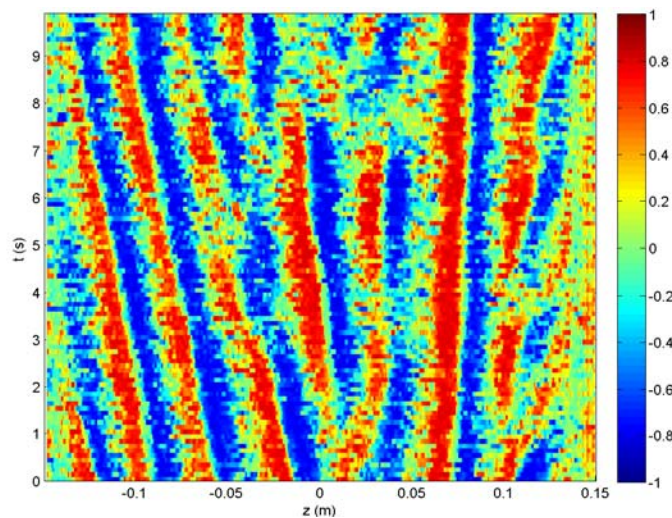


Fig. 3. Diagramme espace-temps du critère  $\Gamma_2$  pour  $L/H = 1,5$  et  $Re_H = 2\,300$

L'ensemble de ces résultats est confronté aux valeurs obtenues à partir des visualisations (Faure et al. [2009]). La figure 4 présente cette comparaison pour la vitesse  $W_s$ . On observe un bon accord entre ces deux méthodes expérimentales, les écarts étant de l'ordre de grandeur des barres d'incertitude. Le comportement général est un regroupement global de  $W_s / U_e$  avec  $L/H$ , et une légère décroissance avec le nombre de Reynolds suivi d'une remontée pour  $Re_H > 6\,000$ . La comparaison du nombre d'instabilités présentes selon l'envergure de la cavité est aussi en accord avec les résultats issus de l'analyse des visualisations (figure 5). Un nombre maximum de tourbillons est observé pour  $L/H = 1$ , ce qui peut s'expliquer par le fait que le tourbillon d'axe transverse est inscrit dans une cavité carrée et présente un rayon de courbure optimal dans toute la recirculation, favorisant le développement des instabilités

centrifuges. Les instabilités se développent selon l'envergure de la cavité, ainsi leur nombre est fortement lié à leur longueur d'onde. Néanmoins, les paires de tourbillons ne sont pas toujours jointes les unes aux autres, et la mesure d'une longueur d'onde moyenne semble intéressante (figure 6). L'allure générale de l'évolution de la longueur d'onde des instabilités en fonction de  $Re_H$  et du rapport  $L/H$  montre une croissance avec le rapport  $L/H$ . La création des instabilités est donc liée à un couplage tridimensionnel entre les directions axiales et transverses. Ces résultats corroborent à nouveau les visualisations.

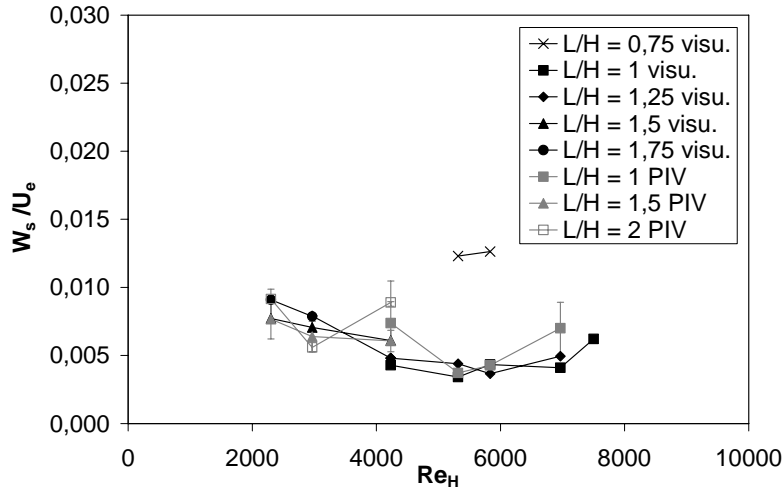


Fig. 4. Vitesse de dérive transverse des instabilités centrifuges : comparaison des mesures PIV (symboles gris) avec les visualisations (symboles noirs)

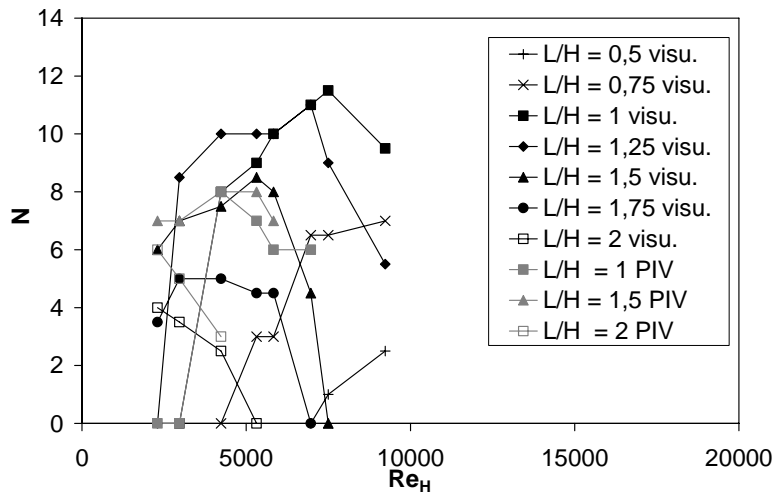


Fig. 5. Nombre d'instabilités centrifuges : comparaison des mesures PIV (symboles gris) avec les visualisations (symboles noirs)

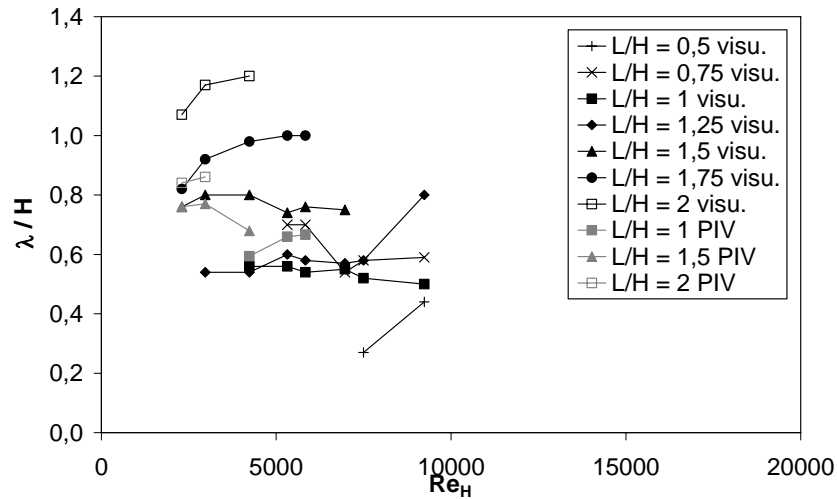


Fig. 6. Longueur d'onde relative  $\lambda/H$  des instabilités centrifuges : comparaison des mesures PIV (symboles gris) avec les visualisations (symboles noirs)

#### 4. Critère de stabilité de l'écoulement

##### 4.1. Discriminant de Rayleigh

Les régions de l'écoulement potentiellement instables sont évaluées à partir des champs PIV moyens obtenus dans un plan vertical  $(x,y)$  à l'intérieur de la cavité, à partir du discriminant de Rayleigh (Rayleigh [1916]) :

$$\eta(x, y) = - \frac{\partial \left\| \vec{r}(x, y) \wedge \vec{U}(x, y) \right\|^2}{\partial r} \quad (2)$$

Ainsi, un écoulement réel visqueux est stable si  $\eta < 0$  et potentiellement instable si  $\eta > 0$  (figure 7). On observe que la zone d'écoulement potentiellement instable est la frontière du tourbillon d'axe transverse à la cavité.

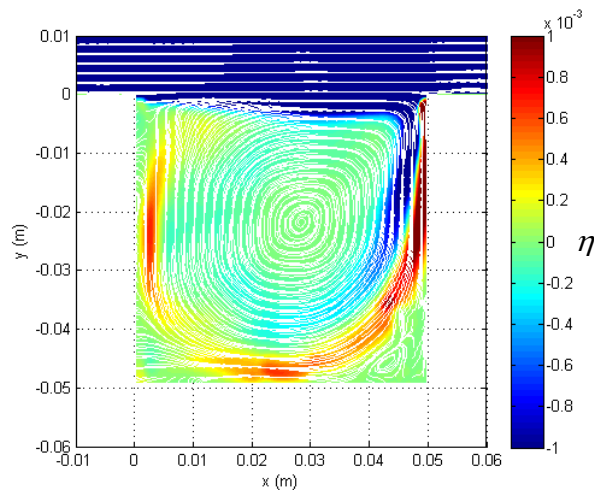


Fig. 7. Discriminant de Rayleigh et lignes de courant pour  $L/H = 1$  et  $Re_H = 4230$

#### 4.2. Paramètre de contrôle

Dans un fluide réel, la viscosité tend à stabiliser l'écoulement et il s'installe alors une compétition entre les forces centrifuges de déstabilisation et les forces visqueuses de stabilisation, chacune d'entre elles essayant de diffuser ses effets. Le temps caractéristique de diffusion dépend de la nature de chaque force et aussi des conditions, telles que la vitesse et le rapport de forme de la cavité. Le rapport du temps caractéristique de stabilisation sur le temps caractéristique de déstabilisation définit le degré de stabilité de l'écoulement. Ce rapport est appelé paramètre de contrôle (Migeon [2000], Migeon [2002]) :

$$C = \frac{\text{temps de stabilisation}}{\text{temps de déstabilisation}} = \frac{U_c d_i}{\nu} \sqrt{\frac{d_i}{R_c}} \quad (3)$$

où  $U_c$  est la vitesse de rotation maximale du tourbillon d'axe transverse,  $R_c$  est le rayon de courbure pour lequel  $U_c$  est mesurée,  $\nu$  est la viscosité cinématique du fluide et  $d_i$  est l'étendue de la zone potentiellement instable. On associe un repère cylindrique dont l'origine est fixée au centre du tourbillon d'axe transverse, et on effectue des coupes radiales selon 8 azimuts, l'angle  $\theta = 0$  correspondant à la droite passant par l'origine de ce repère cylindrique et le bord aval de la cavité (figure 8-a). La distance  $d_i$  est la distance radiale qui sépare le maximum de  $(r U_\theta)^2$  au point d'intersection de  $U_\theta$  avec l'axe des abscisses. Par ailleurs comme l'écoulement n'est pas parfaitement circulaire dans la cavité, le paramètre de contrôle  $C$  est corrigé d'un paramètre de forme  $P_f$  caractérisant en quelque sorte la déformation du tourbillon principal d'axe transverse, tel que pour  $\theta_1$ ,  $P_f = 1$  ; pour  $\theta_2$ ,  $P_f = R_{c,1}/R_{c,2}$ , pour  $\theta_3$ ,  $P_f = R_{c,2}/R_{c,3}$ , pour  $\theta_4$ ,  $P_f = R_{c,3}/R_{c,4}$ , et pour  $\theta_5$ ,  $P_f = R_{c,4}/R_{c,5}$  et s'écrit :

$$C_{cor} = P_f \frac{U_c d_i}{\nu} \sqrt{\frac{d_i}{R_c}} \quad (4)$$

L'évolution du paramètre de contrôle en suivant l'écoulement de recirculation dans la cavité est présenté figure 8-b pour différentes valeurs du nombre de Reynolds. On observe une augmentation globale de  $C_{cor}$  en fonction du nombre de Reynolds. On remarque également un pic de  $C_{cor}$  pour  $\theta_4$ . On peut conclure que la région instable de l'écoulement se situe au niveau de cet angle. La comparaison du paramètre de contrôle de l'écoulement avec celui mesuré dans le cas d'un écoulement de cavité entraîné par un couvercle mobile (figure 9), pour le même ordre de grandeur du nombre de Reynolds, montre des niveaux très voisins pour les angles  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_3$ . Cependant, alors que  $C_{cor}$  croît continument jusqu'à  $\theta_3$  pour l'entraînement par couvercle mobile, il y a une décroissance de ce paramètre pour  $\theta_4$  dans le cas de l'entraînement par une couche de cisaillement, avec des valeurs de  $C_{cor}$  plus faibles.



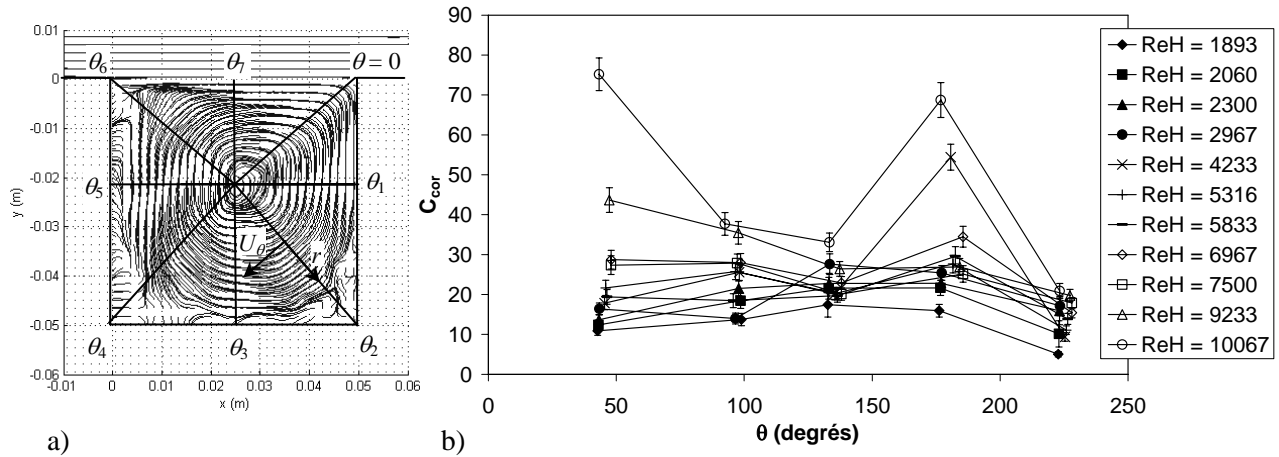


Fig. 8. a) Coupes radiales dans le champ PIV moyen et b) paramètre de contrôle  $C_{cor}$  en fonction des azimuts  $\theta$  pour  $L/H = 1$  et différents nombres de Reynolds

La confrontation de la valeur maximum du paramètre de contrôle  $C_{cor}$  dans la cavité à l'observation des instabilités centrifuges permet de donner un seuil unique d'apparition de ces dernières, lorsque l'on change le nombre de Reynolds et le rapport  $L/H$ . Dans le cadre de cette étude où la recirculation est induite par une couche de cisaillement, le seuil d'apparition est de 30. Si l'on compare cette valeur à celle observée pour une recirculation induite par un entraînement par une paroi mobile, on trouve un seuil de 80 (Migeon [2000]). Cette configuration d'entraînement par une couche de cisaillement est donc plus instable qu'un entraînement par une paroi mobile, ce qui explique la difficulté d'observation des instabilités centrifuges dans ce second cas.

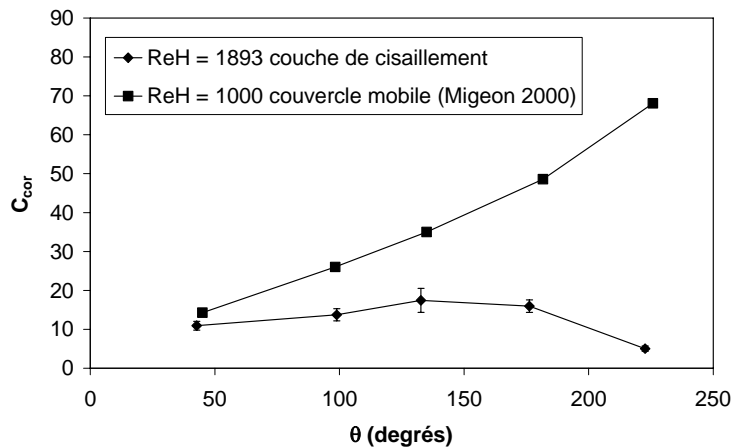


Fig. 9. Comparaison de l'évolution azimutale du paramètre de contrôle entre un écoulement de cavité entraîné par un couvercle mobile et une couche de cisaillement pour  $L/H = 1$

## 5. Conclusion

L'étude du champ de vitesse par PIV dans deux plans d'observation à l'intérieur de la cavité a conduit à un certain nombre de résultats. Tout d'abord, l'utilisation du critère  $I_2$  permet d'identifier les structures tourbillonnaires de l'écoulement à partir de mesures PIV bruitées. Ces instabilités centrifuges sont alors analysées en termes de vitesse de dérive transverse, de nombre et de longueur d'onde. Les résultats de cette étude sont cohérents avec ceux obtenus à partir de visualisations de l'écoulement. L'analyse de stabilité de l'écoulement de cavité à partir du discriminant de Rayleigh montre que la zone potentiellement instable est la partie



extérieure du tourbillon d'axe transverse qui se développe dans la cavité. Un paramètre de contrôle permet de mesurer le degré de stabilité de l'écoulement. La confrontation de ce paramètre avec l'observation des instabilités centrifuges conduit à déterminer leur seuil d'apparition. La comparaison de ce cas avec un entraînement par couvercle mobile explique pourquoi les instabilités centrifuges ne peuvent pas apparaître sans forçage dans ce second cas.

## Références

- Faure Th. M., Adrianos P., Lusseyran F., Pastur L. R. [2007] *Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers*, Experiments in Fluids, Vol. 42, p. 169–184.
- Faure Th. M., Defrasne A., Lusseyran F., Pastur L. R., Fraigneau Y. [2008] *Structure 3D d'un écoulement de cavité ouverte de forme variable*, 11<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Techniques Laser, Futuroscope (France), 15-19 Septembre, p. 433–440.
- Faure Th. M., Lusseyran F., Gougat P., Launay F. [2006] *Experimental investigation of the flow distribution inside a tubular heat exchanger*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 128, p. 1218–1227.
- Faure Th. M., Pastur L. R., Lusseyran F., Fraigneau Y., Bisch, D. [2009] *Three-dimensional centrifugal instabilities development inside a parallelepipedic open cavity of various shape*, Experiments in Fluids, (published online), DOI 10.1007/s00348-009-0671-0.
- Graftieaux L., Michard M., Grosjean N. [2001] *Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows*, Measurement Science and Technology, Vol. 12, pp. 1422–1429.
- Michard M., Favelier Th. [2004] *Développement d'un critère d'identification de structures tourbillonnaires adapté aux mesures de vitesse par PIV*, 9<sup>ème</sup> Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser, Bruxelles (Belgique), 14-17 septembre, D9.
- Migeon Ch. [2000] *Contribution à l'analyse de l'écoulement tridimensionnel instable s'établissant à l'intérieur de cavités cylindriques*, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers.
- Migeon Ch. [2002] *Details on the start-up development of the Taylor-Görtler-like vortices inside a square-section lid-driven cavity for  $1,000 \leq Re \leq 3,200$* , Experiments in Fluids, Vol. 33, p. 594–602.
- Rayleigh J. S. [1916] *On the dynamics of evolving fluids*, Scientific papers, Vol. 6, p. 447–453.