



Étude par la PIV des structures à la périphérie d'une cavité rotor–stator aspirée

David Rémy, Nicolas Pérenne, Jean-Marc Foucaut, Daniel Buisine

Laboratoire de mécanique de Lille, UMR 8107, Université des sciences et technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

Reçu le 22 septembre 2003 ; accepté après révision le 19 janvier 2004

Présenté par René Moreau

Résumé

On étudie expérimentalement la structure tridimensionnelle de l'instabilité spirale observée à la périphérie d'une cavité rotor–stator ouverte aspirée. Pour cela on utilise la technique de la Velocimétrie par Images de Particules stéréoscopique qui donne des séquences de cartes des trois composantes de vitesse des particules fluide localisées dans un plan méridien. Cette séquence est acquise à basse fréquence lors du défilement d'un grand nombre de structures. L'originalité de l'étude consiste en un reclassement temporel optimisé des cartes sur une période unique qui permet de donner une reconstitution tridimensionnelle de l'instabilité. *Pour citer cet article : D. Rémy et al., C. R. Mecanique 332 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Study of structures on the periphery of a rotor–stator cavity with suction by means of PIV. We experimentally study the three-dimensional structure of the spiral instability observed on the periphery of a opened rotor–stator cavity with suction. We use the stereoscopic Particles Images Velocimetry technique which gives sequences of maps of the three velocity components of fluid particles located in a meridian plane. This sequence is acquired with a low frequency during the running of a great number of structures. The originality of this study consists in an optimized temporal reclassifying of the maps on a single period that allows a three-dimensional reconstitution of the instability. *To cite this article: D. Rémy et al., C. R. Mecanique 332 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Mécanique des fluides ; Instabilité ; Expérimental ; PIV ; Rotor–stator ; Aspiration

Keywords: Fluid mechanics; Instability; Experimental; PIV; Rotor–stator; Suction

Abridged English version

Flows in rotor–stator cavities generate a particular instability in a spiral rolls form growing on the stationary disk on the periphery of the Bödewadt layer. These structures, called RS1, have been highlighted in a closed cavity

Adresses e-mail : david.remy@univ-lille1.fr (D. Rémy), nperenne@nordnet.fr (N. Pérenne), jean-marc.foucaut@ec-lille.fr (J.-M. Foucaut), daniel.buisine@univ-lille1.fr (D. Buisine).

by Gauthier [1,2] and Schouveiler [3–5]. In this study we consider a cavity with axial suction, opened by a radial gap between the rotating disk and the fixed cylindrical wall. We are interested in the experimental description of the three-dimensional structure using 2D3C PIV which gives sequences of maps of the three velocity components of fluid particles located in a meridian plane.

Fig. 1 presents the scheme of the stereoscopic set-up where the meridian laser sheet crossing the stationary cylindrical wall is observed by two cameras through the stationary disk. Sequences of 100 acquisitions coded in 256 grey levels on a 1280×1024 CCD matrix with a frequency of 4 double pictures per second are filtered and analysed. An FFT for which the power spectrum is presented Fig. 2, gives a local peak $f_{\text{FFT}} = 1.3878$ Hz that corresponds to 2.88 pictures per structure and excludes direct access to harmonics of rank greater than 2. To reach these harmonics, we reclassify on a period all the maps acquired during a given time. So, we use the relative stationarity hypothesis, which allows us to allocate to each picture acquired at acquisition time t_n greater than Δt , the supposed period of the structure ($\Delta t = 1/f_S$), a reclassification time $t'_n = \text{mod}(t_n, \Delta t)$, and a new list can be determined, classed by time (or phase modulo 2π), called list(n). We represent in Fig. 3 two temporal sequences before and after reclassification. We adjust, at the same time, the signal frequency f_S around f_{FFT} , the sample origine n_0 (Fig. 4(a)) and its size N (Fig. 4(b)) by minimizing the noise B given by Eq. (1) and evaluated between two reclassified consecutive maps k and $k + 1$. After a new local Fourier transform and a truncation at the harmonic 5, we suggest a three-dimensional reconstruction of the structure based on optimum sample. The result of this operation is applied for the following parameters: aspect ratios $H/R = 0.2$ and $j/R = 0.008$, non-dimensional suction $V_z/(\Omega R) = 0.454$ and Reynolds number $Re = (\Omega R^2)/\nu = 8948$. Comparisons with numerical results (Fig. 5) show an excellent agreement on the velocity field structure and a satisfactory agreement at the field values level.

1. Introduction

Les écoulements dans les cavités rotor–stator engendrent un type d’instabilité particulier se développant sur le disque fixe à la périphérie de la couche de Bödewadt sous la forme de rouleaux spiraux stables. Ces structures appelées RS1 ont été mises en évidence dans une cavité fermée par Gauthier [1,2] et Schouveiler [3–5] qui en ont donné une image moyennée dans la hauteur de la cavité à l’aide de particules anisotropes. Leurs seuils d’apparition et de disparition ainsi que leurs fréquences ont été caractérisés par [3,5] en fonction du nombre de Reynolds et du nombre d’onde. Une étude numérique [6] a apporté des informations complémentaires sur la localisation de l’origine de la structure et sur le détail du champ de vitesse propre à cette instabilité. [7] a également présenté des résultats numériques sur les profils de vitesse de structures spirales se développant dans la couche de Bödewadt.

Le cas des cavités ouvertes aspirées a été étudié expérimentalement à haut nombre de Reynolds mais assez peu sous l’angle de la stabilité à bas nombre de Reynolds. Dans cette étude on considère une cavité ouverte par un jeu radial situé entre le disque tournant et la paroi cylindrique fixe. Une aspiration située au centre du disque fixe permet d’ensemencer l’écoulement et d’utiliser la Velocimétrie par Images de Particules stéréoscopique (PIV 2D3C) qui donne les cartes des trois composantes de vitesse des particules fluide, mais en même temps exclut le traitement dans le cas à débit nul. Notre objectif est de reconstituer la structure tridimensionnelle qui exige une description temporelle fine. Cependant la fréquence d’acquisition n’est que de l’ordre du double de la fréquence de la structure. Le traitement brut ne pourrait donner que le fondamental temporel et le premier harmonique de la structure. Pour extraire plus d’information de l’acquisition on se base sur l’hypothèse de stationnarité relative de l’instabilité par rapport à un observateur tournant pour effectuer un reclassement temporel de ces cartes sur une période unique, à une fréquence fondamentale donnée. Ceci exige une connaissance précise de cette fréquence fondamentale qui sera obtenue par optimisation du bruit généré par le reclassement. Une reconstitution après filtrage est présentée et comparée avec le résultat numérique.

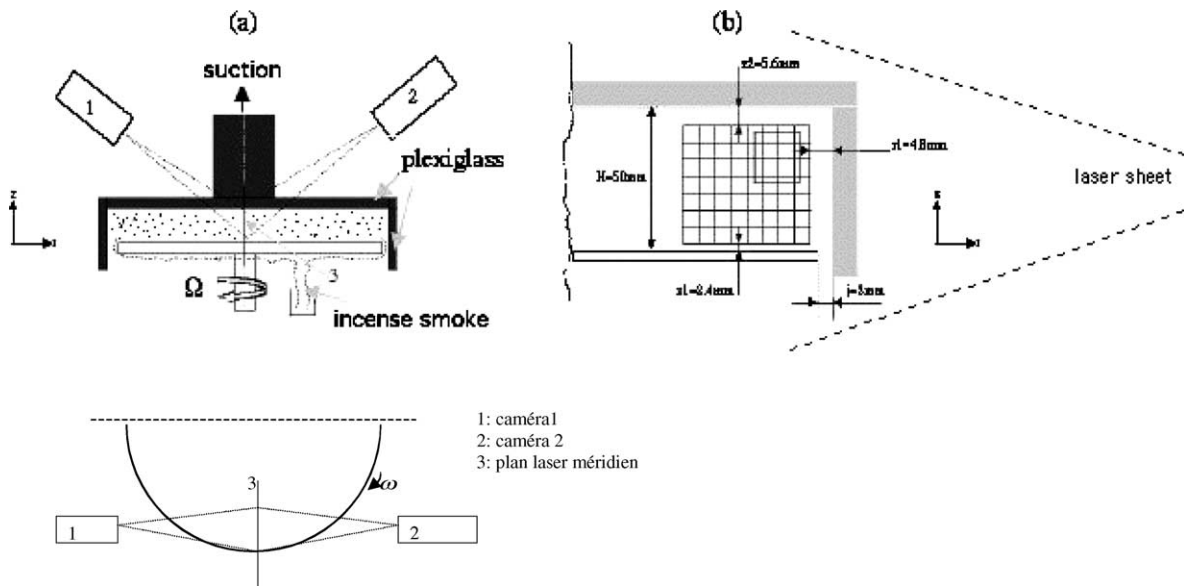


Fig. 1. (a) Schéma de la cavité et du montage stéréoscopique ; (b) Maillage limitant le champ de vitesse étudié.

Fig. 1. (a) The cavity and stereoscopic set-up; (b) the mesh restricting the studied velocity field.

2. Dispositif expérimental

La PIV stéréoscopique est une technique de mesure qui est maintenant bien développée ; pour plus de détails le lecteur peut se référer au Chapitre 7.1 du livre de [8] ou à l'article de synthèse de [9].

Le dispositif expérimental est présenté Fig. 1. On appelle H la hauteur de la cavité, j le jeu radial et R le rayon du disque mobile ($R = 250$ mm). Le nombre de Reynolds Re est défini à partir de la rotation Ω , de la vitesse axiale moyenne $V_z = Q/(2\pi Rj)$ et de la viscosité cinématique de l'air ν , $Re = \Omega R^2/\nu$. La Fig. 1(a) présente le schéma du montage stéréoscopique dans lequel la nappe laser méridienne traversant le cylindre fixe est observée dans toute la hauteur de la cavité et sur une largeur radiale équivalente par les deux caméras à travers le disque fixe.

La mesure de la métrique et de la transformation mathématique qui restitue le champ de vitesse dans le maillage cartésien local est réalisée à l'aide de prises de vue d'une mire maillée placée dans la cavité et confondue avec la nappe laser méridienne. Des détails sur cette procédure ainsi qu'une validation des programmes de PIV stéréoscopique effectivement utilisés au cours du présent travail, peuvent être trouvés dans [10].

L'acquisition à la fréquence de 4 doubles images par seconde, par séquence de 100, est codée en 256 niveaux de gris sur une matrice CCD de 1280×1024 pixels. L'éclairement à travers le plexiglass engendrent de nombreux reflets permanents que nous filtrons en soustrayant de chaque image de particules la moyenne temporelle du signal local qui est supposée ne contenir statistiquement que les tâches permanentes. L'image des particules ainsi que le contraste sont alors nettement améliorés, la plage réduite aux 256 niveaux de gris passant de 0.867 à 0.996.

3. Analyse et compression temporelle

Après filtrage et traitement « PIV », nous obtenons une séquence de 100 champs de vitesse obtenue avec une fréquence d'acquisition f_{PIV} de 4 Hz. Une première analyse par PIV 2D2C à plat non détaillée ici montre une périodicité azimutale de 19. Des transformations de Fourier à la fois moyenne et locales donnent les spectres de puissance représentés Fig. 2. Ces spectres présentent un pic $f_{FFT} = 1.3878$ Hz ce qui correspond à 2.88 images par structure et exclut l'accès direct aux harmoniques temporels de rang supérieur à deux.

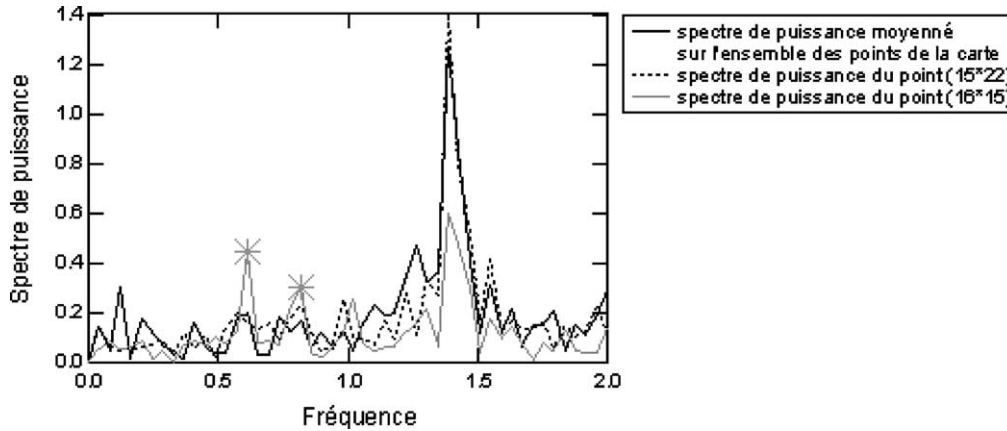


Fig. 2. Spectres de puissance moyen et pour deux points du maillage.

Fig. 2. Power spectrum mean and for two mesh points.

On constate également sur les spectres de puissance correspondant à des points situés au centre des cartes de vitesse, la présence marquée par (*) d'autres pics de plus faible intensité à 0.612, 0.816 et 1.02 Hz. Ces fréquences très proches, compte tenu du pas en fréquence, des rapports 8/19, 11/19 et 14/19 pourraient être dues à des sous-harmoniques spatiaux attachés à la structure principale de périodicité azimutale 19. Dans le spectre moyen étendu cette fois à toute la carte de vitesse, ces sous-harmoniques sont beaucoup plus discrets ce qui nous amène à faire l'hypothèse selon laquelle la structure serait animée d'une rotation solide de période azimutale 19 et de fréquence f_S proche de f_{FFT} .

Cette hypothèse de stationnarité relative permet de faire correspondre à toute image d'un échantillon acquise à la date t_n supérieure à Δt , période supposée de la structure ($\Delta t = 1/f_S$), un temps reclassé $t'_n = \text{mod}(t_n, \Delta t)$, ce qui détermine une liste nouvelle ordonnée par dates (ou phases modulo 2π) reclassées croissantes notées $\text{list}(k) = n$ de cet échantillon. La Fig. 3 représente deux suites temporelles des six premières cartes : (a) de l'échantillon initial de 100 cartes non reclassées ; et (b) d'un échantillon de 33 cartes reclassées sur une période. Pour la suite non reclassée le pas de temps est de $1/f_{PIV}$ et pour la suite reclassée il est de $\Delta t/32$. Pour chaque série, le numéro au dessus de chaque image représente le numéro de la carte avant reclassement. Sur la Fig. 3(a) on remarque qu'il n'y a aucune cohérence dans l'enchaînement des cartes alors qu'il y a une cohérence pour la Fig. 3(b) malgré la présence de quelques vecteurs faux qui sont dues au fait qu'il n'y ait pas encore eu de filtrage sur les champs de vitesse.

Outre les sous-harmoniques mentionnés plus haut, nous avons pu observer des variations de fréquence intempêtes au cours de l'acquisition ainsi que des bouffées de fumée à contraste modifié. Par ailleurs la fréquence f_{FFT} ne s'est pas avérée assez précise pour réaliser un reclassement cohérent sur une durée longue ce qui nous a amené à ajuster non seulement la fréquence du signal f_S voisine de f_{FFT} , mais aussi la taille N et l'origine n_0 de l'échantillon, en minimisant le bruit dû au reclassement. Le bruit B est évalué en moyenne sur les cartes, en fonction de f_S , de N et de n_0 par comparaison entre cartes voisines reclassées k et $k + 1$ de la façon suivante :

$$B(f_S, N, n_0) = \sum_j \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^3 \text{abs}[u_l(j, \text{list}(k)) - u_l(j, \text{list}(k+1))] \quad (1)$$

où j représente le point courant du maillage réduit et u_l les trois composantes de la vitesses suivant (z, r, θ) . La Fig. 4 représente le bruit B en fonction de la fréquence pour (a) deux échantillons ayant le même nombre de cartes mais d'origine différente et (b) deux échantillons de même origine avec un nombre de cartes différent. A l'issue de

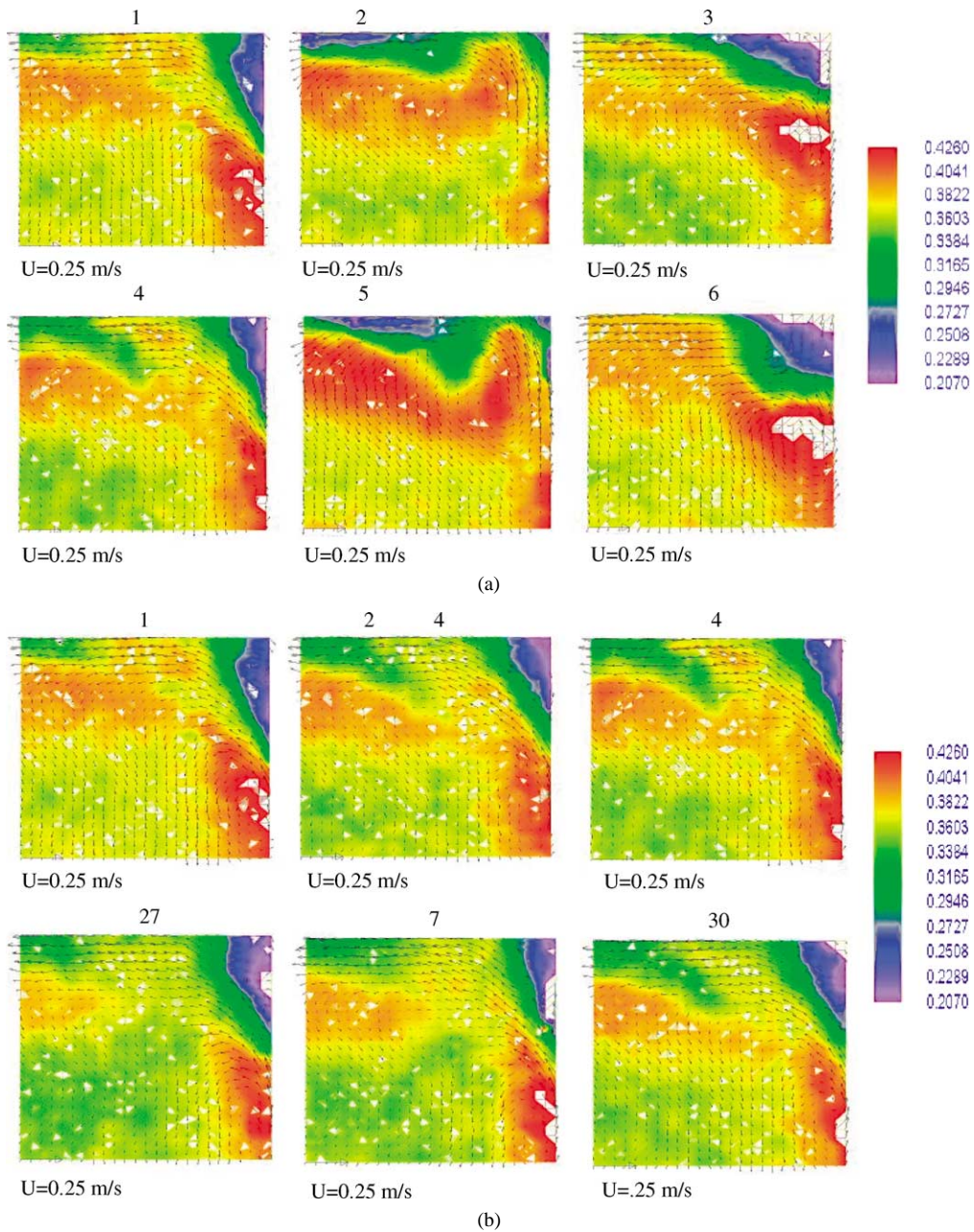


Fig. 3. Suites temporelles de six cartes : (a) non reclassées ; et (b) reclassées.
 Fig. 3. Temporal sequences of six maps: (a) non reclassified; and (b) reclassified.

nombreux essais portant sur la taille et l'origine de l'échantillon, il apparaît en définitive que l'échantillon allant des cartes 1 à 33 pour une fréquence $f_s = 1.395$ Hz est celui qui minimise le bruit dû à l'interclassement.

Le bruit résiduel résultant des fluctuations aléatoires observables entre les cartes voisines après reclassement se traduit dans l'analyse de Fourier de l'échantillon reclassé, par un résidu quasiment constant et indépendant du rang de l'harmonique, alors que dans l'étude numérique on observe un comportement de l'amplitude de

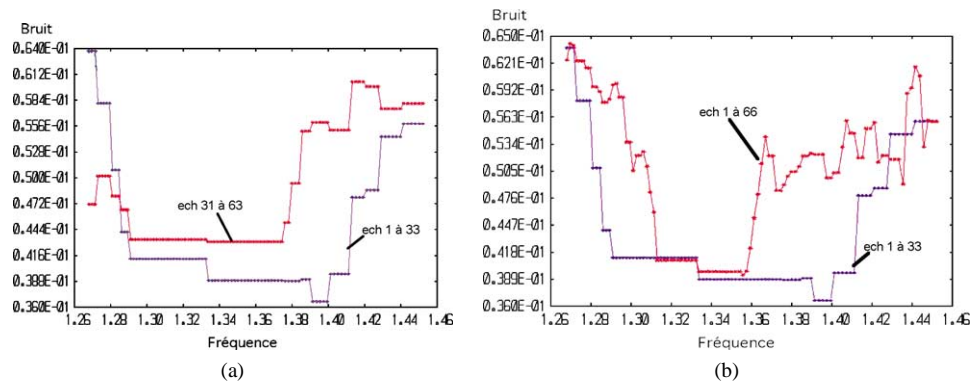


Fig. 4. Représentation du bruit B en fonction de la fréquence pour : (a) deux échantillons ayant le même nombre de cartes mais d'origine différente ; et (b) deux échantillons de même origine avec un nombre de cartes différent.

Fig. 4. Noise B varying with frequency for: (a) two samples with the same map number but a different origin; and (b) two samples with the same origin but a different map numbers.

chaque harmonique variant comme $\exp(-1.2p)$, p étant le rang de l'harmonique. Pour éliminer ce bruit résiduel d'interclassement on propose pour la restitution de la structure tridimensionnelle, un filtrage spectral de l'échantillon reclassé avec troncature à l'harmonique 5.

4. Résultats

Tout d'abord, nous pouvons noter que pour des cas à débits très faibles, on a pu détecter le seuil d'apparition en Re pour une cavité de rapport d'aspect $H/R = 0.112$ ($Re = 20\,697$) que l'on a comparé à celui mesuré par [3] dans le cas d'une cavité fermée ayant le même rapport d'aspect ($Re = 19\,700$). Cette comparaison a révélé un très bon accord.

La démarche expérimentale est appliquée au cas d'une cavité de rapports d'aspect $H/R = 0.2$ et $j/R = 0.008$, à débit adimensionné $V_z/(\Omega R) = 0.454$, pour un nombre de Reynolds $Re = 8948$ où la périodicité azimutale est de 19. Ces paramètres géométriques et cinématiques ainsi que le nombre d'onde 19 ont été adoptés dans l'étude numérique qui utilise un schéma classique que l'on ne peut détailler ici par manque de place mais qui est présenté dans [6].

La Fig. 5(a) et la Fig. 5(b) montrent respectivement les cartes expérimentales et numériques des fluctuations temporelles du champ de vitesse V_r et V_z dans le plan méridien et de V_θ en gris dégradé, pour six stations azimutales également espacées dans une structure (entre chaque image des Figs. 5(a) et 5(b) on a donc un angle de $2\pi/(19*6)$) et un temps de $\Delta t/6$). La comparaison montre un excellent accord sur la structure du champ avec notamment la localisation de l'instabilité et des zones de vitesse maximale dans le coin fixe de la cavité. L'expérience et la modélisation numérique montrent bien la rapide atténuation de la structure lors de son transport dans la couche de Bödewadt. Les fluctuations de vitesse ajoutées à la vitesse moyennée non représentée ici, forment un jet comme mentionné dans [6] pour une cavité fermée et suggèrent l'existence d'un phénomène de repliement de la nappe issue de la fente et de la couche d'Ekman. L'accord est également satisfaisant sur les valeurs du champ : la vitesse maximale méridienne vaut 0.1405 pour l'expérience et 0.1313 au point équivalent pour la modélisation numérique.

5. Conclusion

On a montré que l'utilisation de la Vélocimétrie par Images de Particules stéréoscopique et du reclassement temporel des cartes de vitesse rendu possible par l'hypothèse de stationnarité relative, a permis d'accéder à la description expérimentale tridimensionnelle du champ de vitesse de la structure instable se développant à la périphérie d'une cavité rotor–stator ouverte aspirée. La zone de déclenchement et de développement de l'instabilité

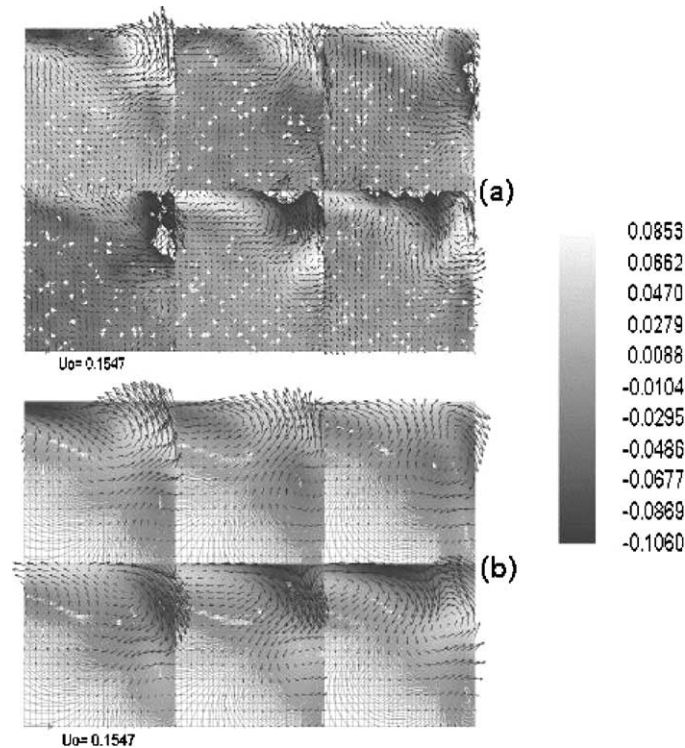


Fig. 5. Champ de vitesse fluctuant obtenu : (a) par PIV stéréoscopique ; et (b) numériquement.

Fig. 5. Fluctuating velocity field obtained: (a) by stereoscopic PIV; (b) numerically.

a pu être localisée sans ambiguïté dans le coin fixe de la cavité confirmant ainsi les résultats numériques antérieurs et présents qui suggèrent une telle localisation.

Outre l'extension de la présente étude à toute la plage paramétrique instable notamment en débit, la technique peut être mise en oeuvre pour d'autres types d'instabilités rencontrées dans les cavités tournantes et présentant la même propriété de stationnarité relative.

Références

- [1] G. Gauthier, P. Gondret, M. Rabaud, Axisymmetric propagating vortices in the flow between a stationary and a rotating disk enclosed by a cylinder, *J. Fluid Mech.* 386 (1999) 105–126.
- [2] G. Gauthier, P. Gondret, F. Moisy, M. Rabaud, Instabilities in the flow between co and counter-rotating disks, *J. Fluid Mech.* 473 (2002) 1–21.
- [3] L. Schouveiler, Sur les instabilités des écoulements entre un disque fixe et un disque en rotation, Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille 2, 1998.
- [4] L. Schouveiler, P. Le Gal, M.-P. Chauve, Spiral and circular waves in the flow between a rotating and a stationary disk, *Exp. Fluids* 26 (1999) 179–187.
- [5] L. Schouveiler, P. Le Gal, M.-P. Chauve, Instabilities of the flow between a rotating and stationary disk, *J. Fluid Mech.* 443 (2001) 329–350.
- [6] D. Buisine, F. Oble, H. Andrianarahinjaka, Étude numérique des structures spirales tridimensionnelles à la périphérie d'une cavité interdisque, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIb* 328 (2000) 237–246.
- [7] E. Serre, E. Crespo Del Arco, P. Bontoux, Annular and spiral patterns in flows between a rotating and a stationary disk, *J. Fluid Mech.* 434 (2001) 65–100.
- [8] M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry – A Practical Guide*, Springer, 1998, p. 253.
- [9] A.K. Prasad, Stereoscopic particle image velocimetry, *Exp. Fluids* 29 (2000) 103–116.
- [10] N. Pérenne, Study of the accuracy of different stereoscopic reconstruction algorithms, in: *Europiv 2 Workshop on Particle Image Velocimetry*, Saragosse, Spain, 2003.