



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Mécanique 332 (2004) 653–658



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

David Rémy^a, Georges Gauthier^b, Daniel Buisine^a

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

^b Laboratoire FAST, bâtiment 502, campus universitaire, 91405 Orsay cedex, France

Reçu le 8 août 2003 ; accepté après révision le 23 mars 2004

Disponible sur Internet le 20 mai 2004

Présenté par René Moreau

Résumé

Les structures spirales observées à la périphérie d'une cavité rotor–stator ouverte aspirée, sont étudiées et caractérisées par tomographie. Une fente radiale située entre le disque mobile et le cylindre fixe permet l'aspiration d'un flux extérieur composé d'une nappe mince de fumée à fort contraste produite dans la couche d'Ekman extérieure à la cavité et d'un jet d'air frais. Des séquences de tomographies permettent de caractériser les seuils d'apparition et de disparition des structures en fonction du débit et du nombre d'onde. *Pour citer cet article : D. Rémy et al., C. R. Mécanique 332 (2004).*

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

Abstract

Study of spiral structures at the periphery of an aspirated rotor–stator cavity. The influence of suction on the spirals pattern that appear on the periphery of an aspirated opened rotor–stator cavity is studied by means of tomography. A radial gap, located between the rotating disk and the fixed cylindrical wall allow the suction of an outer flux made up of a jet of fresh air and a high contrasted smoke thin sheet produced in the outside cavity Ekman layer. Sequences of tomographies allow the characterization of the apparition and disappearance thresholds according to Reynolds number, suction and wave number. *To cite this article: D. Rémy et al., C. R. Mécanique 332 (2004).*

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

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

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

Abridged English version

Flows between rotating disks show a large variety of instabilities. In the case where the cavity is closed, [2] and notably [3–5] have characterized the apparition and disappearance thresholds of a spiral structure named RS1.

Adresses e-mail : david.remy@univ-lille1.fr (D. Rémy), gauthier@ariane.fast.u-psud.fr (G. Gauthier), daniel.buisine@univ-lille1.fr (D. Buisine).

In this study, the objective is to extend the known results for closed cavities to aspirated opened cavities and to characterize the location together with the structure size.

A sketch of the cell is presented in Fig. 1. It consists of a rotating disk of radius $R = 250$ millimeters enclosed by a cylinder of height 200 millimeters and of radius slightly larger than the rotating disk, closed by a top disk. The gap j between the bottom disk and the cylinder can be adjusted using a set of cylinders in the range: $j \in [2, 5.4]$ millimeters. Similarly, the thickness of the cell H can be adjusted in the range $H \in [10, 150]$ millimeters by slipping the cylinder along its axis. Finally, in some cases, a hub of radius $0.7 \times R$ and of height $0.8 \times H$ is fixed on the bottom disk. Visualization is allowed by the use of incense smoke which is generated underneath the bottom rotating disk. It is centrifuged in the Ekman boundary layer and then realizes a thin sheet which is aspirated through the gap between the bottom disk and the cylindrical wall (cf. Fig. 1). The structures are visualized by flat meridian tomographies. The structures are represented close to their apparition and disappearance threshold on Fig. 2; the rolls are due to the detachment of the fresh air layer which is caught and advected through the stationary disk boundary layer. The ratio between the structures thickness L and the thickness of the fresh air flux l is found to be constant and comprised between 3.9 and 4.2. In the case of zero suction and without hub, the results are good, compared with the ones of Schouveiler [5] who realized comprehensive studies of the threshold for closed cavities. When suction is applied the appearance threshold is found to decrease rapidly. Increasing further the suction, the spiral structures disappear. Then in the case of suction the spiral pattern has a domain of existence which is presented in Fig. 3 in the plane $(Re, V_z/(\Omega R))$ for 3 cavities of different aspect ratio H/R . It is clear from Fig. 4 that the spiral pattern azimuthal wave number varies with the suction by increments of one or two units. Finally, these results suggest a domain of existence of spiral pattern (Fig. 3) layered in a surface of equal wavenumbers.

1. Introduction

Les écoulements entre disques tournants montrent une grande variété d'instabilités. Depuis les premiers travaux d'Ekman (1905), ces écoulements ont fait l'objet de nombreuses études à la fois expérimentales, numériques et théoriques. Les premières études s'intéressaient au cas d'un disque unique et ce n'est que plus récemment que le cas avec deux disques a été considéré. De nombreuses études [1,2] et [3–5] ont mis en évidence l'existence d'une instabilité visqueuse dans la couche limite du disque fixe (couche limite de Bödewadt) conduisant à la formation de rouleaux axisymétriques. En augmentant la vitesse de rotation, une seconde instabilité se manifeste par l'apparition de structures spirales (RS1) localisées à la périphérie de la cavité interdisques. Ces structures ont été étudiées numériquement par [6,7] et [8]. Notons que de tels écoulements ont également été étudiés avec flux radial, voir par exemple [9] et [6].

Nous étendons l'étude de ces structures spirales RS1 au cas d'une cavité de type rotor–stator ouverte grâce à un jeu radial entre le disque tournant et la paroi extérieure fixe permettant un flux axial le long du cylindre fixe. Précisons que dans notre cas, les rouleaux axisymétriques n'ont pas été observés. Un dispositif d'aspiration d'air au centre du disque fixe permet d'ensemencer l'écoulement à l'amont de la cavité. Le nuage de fumée d'encens généré sous le disque mobile est centrifugé et laminarisé dans la couche limite d'Ekman extérieure à la cavité, et produit une nappe mince de fumée homogène d'un millimètre d'épaisseur (voir Fig. 1). Cette nappe à fort contraste permet de réaliser des tomographies et de décrire localement les structures dans plusieurs plans, complétant les études antérieures qui en donnaient une visualisation globale moyennée dans la hauteur de la cavité. On suppose que la couche d'Ekman sous le disque mobile n'a pour but de générer qu'une nappe mince de fumée laminaire dont les fluctuations, non étudiées ici, sont filtrées par la fente radiale.

L'objectif de l'étude est de préciser la topologie de ces structures spirales engendrées ici avec la conjugaison de la couche d'Ekman issu du dessus du disque mobile et du jet axial, d'étendre les résultats connus pour des cavités fermées aux cavités ouvertes avec l'introduction du paramètre débit et d'étudier le rôle de ce paramètre sur les seuils d'apparition et de disparition ainsi que sur la fréquence des ondes en fonction du nombre d'onde.

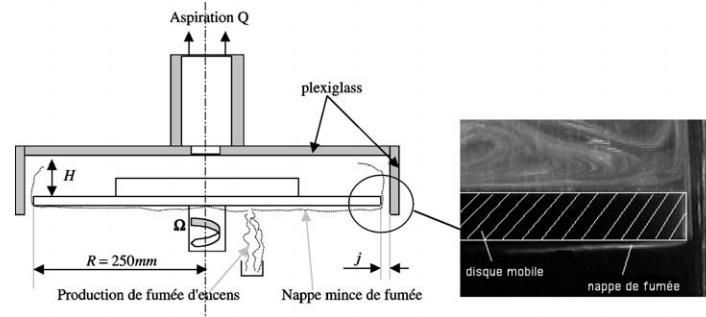


Fig. 1. Schéma en coupe du dispositif expérimental et visualisation de la nappe mince de fumée sous le disque tournant et dans la fente radiale.

Fig. 1. Experimental set-up and visualization of the thin sheet of incense smoke under the rotating disk and in the radial gap.

2. Dispositif expérimental pour la tomographie

Le schéma en coupe du montage expérimental est représenté en Fig. 1. Le jeu j est ajustable ($j/R \in [0,008, 0,0216]$) ainsi que la hauteur H de la cavité ($H/R \in [0,04, 0,6]$). Dans certains cas, un moyeu de rayon $0,7 \times R$ et de hauteur $0,8 \times H$ est fixé sur le disque tournant. La rotation Ω est réglable entre 2,2 et 6,9 rad/s, le débit d'aspiration est réglable entre 0 et 4 l/s.

Le nombre de Reynolds $Re = (\Omega R^2)/\nu$ 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 . La plage du nombre de Reynolds Re étudiée sera limitée à [8545, 27340]. Nous définissons également f comme étant la fréquence de passage des structures et m_θ la périodicité azimutale.

3. Description de la structure

Le plan laser méridien permet d'observer les structures dans la circulation générale régnant dans la cavité : flux centrifuge sur le disque tournant ascendant sur le cylindre fixe et centripète sur le disque fixe. Le plan laser horizontal situé à une distance de $0,028R$ du disque du haut permet de décrire les instabilités dans la partie aval localisée dans la couche de Bödewadt.

La Fig. 2 montre la structure dans un plan horizontal ainsi qu'une séquence dans le plan méridien, de l'évolution sur une période de cette structure au seuil d'apparition en débit (Fig. 2 (a) et (c)) et au seuil de disparition (Fig. 2 (b) et (d)), dans une cavité avec moyeu où $H/R = 0,16$ et $j/R = 0,0164$, pour un nombre de Reynolds $Re = 12427,2$. Nous montrons la structure dans une cavité avec moyeu car c'est dans ce cas qu'elle apparaît avec le plus de contraste. Cependant, par la suite, tous les résultats présentés sont relatif à des cavités sans moyeu.

Sur les Fig. 2 (c) et (d), on observe un repliement de la nappe de fumée et l'enfermement d'une zone de fluide frais constituant le noyau des rouleaux spiraux qui prennent naissance juste à l'amont du coin fixe. Ces rouleaux s'atténuant dans la couche limite de Bödewadt ont été observé expérimentalement par [2–5] et numériquement par [8]. L'origine spatiale de l'instabilité est assimilable à un rectangle, représenté sur une image des Fig. 2 (c) et (d), de hauteur L limitée par le disque fixe et le point bas du rouleau. L'épaisseur l de la couche de fluide frais limitée au pied de la structure par la nappe et le cylindre fixe (ligne blanche verticale) est également représentée.

La taille L des structures, dans le plan méridien, est entièrement déterminée par l'épaisseur de la couche se développant sur la paroi cylindrique. En effet, nous avons mesuré le rapport L/l pour quatre cavités différentes ; une sans moyeu avec un rapport d'aspect $j/R = 0,008$ et trois de différentes hauteurs avec moyeu pour lesquelles la vitesse de rotation, le jeu j ainsi que le débit d'air ($V_z/\Omega R$) sont identiques. Pour ces 4 cavités, L/l est compris entre 3,9 et 4,2. Ce résultat est en accord avec l'étude numérique réalisée par [8].

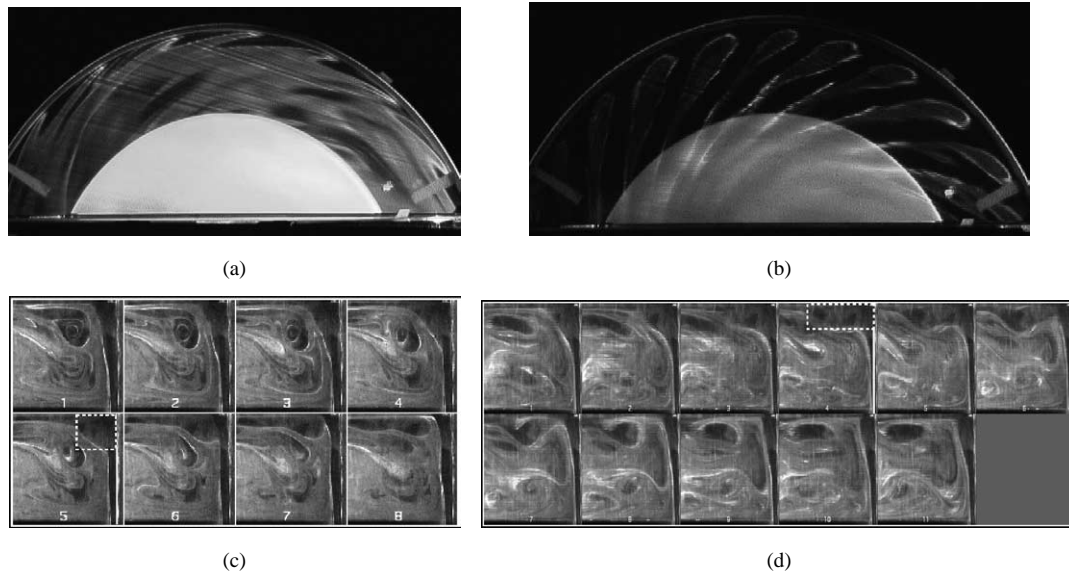


Fig. 2. Visualisations axiales et séquences méridiennes de l'évolution de la structure près des seuils d'apparition et de disparition en terme de débit : (a) et (c) $V_z/(\Omega R) = 0,127$, périodicité azimutale de 21 et fréquence de 2,5 Hz; (b) et (d) $V_z/(\Omega R) = 0,302$, périodicité azimutale de 25 et fréquence de 1,66 Hz. Pour (c) et (d) chaque image est limitée en bas par le disque tournant, en haut par le disque fixe, à droite par la ligne verticale brillante marquant l'intersection du cylindre vertical et du plan laser.

Fig. 2. Axial visualization and meridians sequences of the structure evolution near the apparition and disappearance thresholds in terms of suction; for (c) and (d) each picture is bounded at the bottom by the rotating disk, at the top by the stationary disk and at the right by the bright line locating the intersection between the the laser sheet and the cylindrical wall.

Dans le plan horizontal, la longueur caractéristique dépend du nombre d'onde azimutal. Comme l'ont observé [3,5], ce nombre d'onde n'est pas unique pour chaque couple $(Re, V_z/(\Omega R))$. Ceci nous amène à séparer l'étude des seuils absolus pour tous les nombres d'onde en fonction du nombre de Reynolds, et l'étude des seuils et de la fréquence des structures en fonction du paramètre d'aspiration pour un nombre d'onde donné.

4. Seuil global d'apparition et de disparition des structures

La Fig. 3 présente la courbe d'instabilité dans le plan $(Re, V_z/(\Omega R))$ pour des cavités sans moyeu de différentes hauteurs ($H/R = 0,14, 0,112$ et $0,088$). Les seuils en débit pour les cavités plus hautes ne sont pas portés sur le diagramme car ils sont atteints pour des Re plus faibles non accessibles.

Par ailleurs, on a pu détecter le seuil d'apparition pour des cas à débits très faibles, que l'on compare à celui mesuré par [5] (symbole * sur la Fig. 3) pour une cavité de hauteur $H/R = 0,112$. On peut immédiatement constater un très bon accord, ce qui limite le rôle joué par le jeu en l'absence de débit.

Lorsque la cavité est aspirée, les seuils d'apparition et de disparition sont fortement modifiés. Sur la Fig. 3, on constate une rapide décroissance du nombre de Reynolds au seuil d'apparition lorsque le débit croît pour atteindre la limite inférieure accessible dès que $V_z/(\Omega R)$ prend la valeur 0,2. On constate aussi l'existence d'un seuil de disparition en débit pour des Reynolds comparables à ceux du seuil d'apparition.

Pour les petits nombres de Reynolds, on peut observer sur la Fig. 3 une jonction des courbes seuils pour la plus petite hauteur. Il est vraisemblable que pour les deux autres hauteurs, les deux courbes se rejoignent au delà des limites accessibles pour donner un Reynolds seuil absolu inférieur à $Re = 8545$. Pour les grands Re , nous pouvons

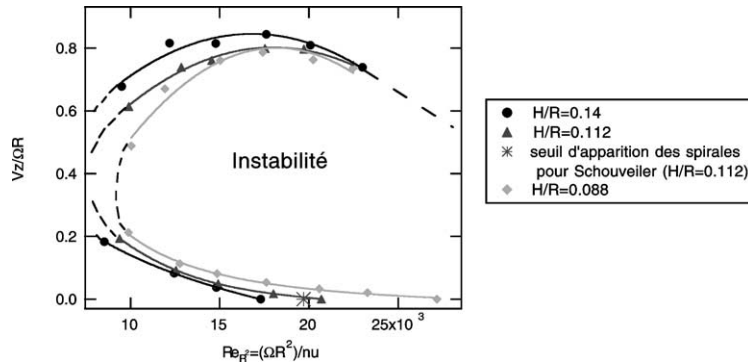


Fig. 3. Courbes d’instabilité dans le plan $(Re, V_z/(\Omega R))$ pour des cavités de différentes hauteurs sans moyeu et pour tout nombre d’onde.

Fig. 3. Instability graph in the $(Re, V_z/(\Omega R))$ plane for cavities of different heights without hub and for all wave numbers.

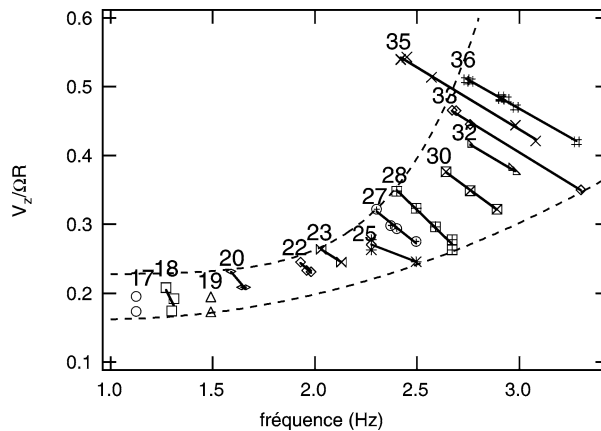


Fig. 4. Différents couples (f, m_θ) des structures en fonction de l’aspiration et pour $Re = 10978$.

Fig. 4. Different structures (f, m_θ) pairs according to suction and for $Re = 10978$.

aussi supposer que la courbe de disparition rejoigne le point à $Re \sim 50\,000$ proposé par Schouveiler pour ainsi fermer le domaine d’existence de l’instabilité.

5. Seuils d’apparition et de disparition pour différents nombres d’onde

Nous présentons Fig. 4, pour $Re = 10978$, la fréquence en fonction du paramètre d’aspiration pour différents nombres d’onde. On constate en premier lieu une plage de nombres d’onde possibles globalement plus étendue que pour une cavité fermée. Ces nombres d’onde ont été déterminés en balayant à partir d’un débit donné une plage de Re encadrant la valeur de 10978. Nous pouvons également noter que chaque nombre d’onde possède un seuil d’apparition et de disparition en débit ce qui suggère donc l’existence d’une zone d’instabilité dans le domaine paramétrique Reynolds-fréquence-débit où l’intersection avec le plan à débit nul se confond avec la courbe de stabilité de [3]. Il apparaît sur cette figure que certains nombres d’onde n’ont pas été captés, d’autres chemins notamment à débits variables devraient permettre de trouver ces nombres d’onde. A chaque trajectoire paramétrique dans le plan $(Re, V_z/(\Omega R))$ permettant de rentrer dans la zone d’instabilité correspond un nombre d’onde quasiment unique.

On peut aussi constater que la plage d'existence en débit est à nombre d'onde fixé relativement étroite, ce qui explique que la structure, pour continuer à exister lorsque l'on se déplace dans la zone d'instabilité, s'adapte en nombre d'onde par incrément d'une unité ou deux notamment lorsque le débit ou la vitesse de rotation varient. Le délai de stabilisation des paramètres ne nous a pas permis de tester différents taux de variation temporel aussi bien en débit qu'en vitesse de rotation.

6. Conclusion

Dans cette étude, nous avons étudié les structures de type RS1 dans une cavité de type rotor–stator avec une aspiration centrale. Grâce à l'ensemencement de la couche d'Ekman située sous la cavité, nous avons pu produire une nappe de fumée homogène à fort contraste qui nous a permis d'effectuer des tomographies à la fois méridiennes et parallèles aux disques, pour diverses cavités.

Ceci nous a permis de localiser la zone de déclenchement et de développement de l'instabilité et d'étudier l'influence du débit sur les seuils d'apparition et de disparition de cette instabilité dans une plage allant d'un débit quasiment nul à des débits élevés.

Pour les débits quasi nuls, un bon accord a été constaté avec les résultats de [3–5] en cavité fermée. Dès que la cavité est aspirée, on a observé une rapide décroissance du nombre de Reynolds seuil d'apparition et aussi de disparition lorsque le débit croît. La zone d'instabilité s'étend vers les nombres de Reynolds Re plus petits mais avec, pour un nombre d'onde donné, une plage de débit assez restreinte notamment pour les petits nombres d'onde. On constate comme pour la cavité fermée, mais cette fois à Re constant, que les fréquences s'organisent encore de manière structurée suivant le nombre d'onde et, cette fois, le débit. Ce qui nous amène à suggérer l'existence dans le diagramme $(Re, f, V_z/(\Omega R))$ d'un domaine d'instabilité limité par une surface seuil d'apparition et d'une surface seuil de disparition, ce domaine étant feuilleté par des surfaces d'égal nombre d'onde.

Références

- [1] O. Savas, Stability of Bodewadt flow, *J. Fluid Mech.* 183 (1987) 77–94.
- [2] 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.
- [3] L. Schouveiler, P. Le Gal, M.-P. Chauve, Stability of a travelling roll system in a rotating disk flow, *Phys. Fluids* 10 (1998) 2695–2697.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] E. Serre, S. Hugues, E. Crespo Del Arco, A. Randriamampianina, P. Bontoux, Axisymmetric and three-dimensional instabilities in an Ekman boundary layer flow, *J. Heat Fluid Flow* 22 (1) (2001) 82–93.
- [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] D. Buisine, F. Oble, H. Andrianarainjaka, Étude numérique des structures spirales tridimensionnelles à la périphérie d'une cavité interdisque, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIb* 328 (2000) 237–246.
- [9] M. Firouzian, J.-M. Owen, J.-R. Pincombe, R.-H. Rogers, Flow and heat transfer in a rotating cylindrical cavity with a radial inflow of fluid: Part2: Velocity pressure and heat transfer measurements, *Int. J. Heat Fluid Fl.* 7 (1) (1986) 21–27.