

Caractérisation spatio-temporelle d'une spirale de Couette-Taylor

N. Abcha, N. Latrache, O. Crumeyrolle & I. Mutabazi

25 rue Philippe Lebon, BP 540, 76058 Le Havre cedex
nizar.abcha@univ-lehavre.fr

Résumé. La vélocimétrie par imagerie de particules (PIV) a été mise en œuvre pour caractériser le comportement spatio-temporel des régimes de vortex spirales observés dans l'écoulement de Couette-Taylor. A partir des mesures de vitesses obtenues par PIV, les variations spatio-temporelles des composantes de vitesses radiale et axiale sont établies. Nous rapportons les principales caractéristiques (nombre d'onde, fréquences) ainsi que la déstabilisation de ces régimes vers des comportements désordonnés. Par ailleurs, nous décrivons le comportement observé dans les zones des défauts de spirales qui se manifestent dans l'écoulement.

Abstract. Particles Image Velocimetry (PIV) was implemented to characterize the space-time behaviour of the of spirals vortices modes observed in Couette-Taylor flow. From the velocity measurements obtained by PIV, the variations space-time of the radial and axial velocities components are established. We report the principal characteristics (wave number, frequencies) as well as the destabilization of these modes towards disordered behaviours. In addition, we describe the behaviour observed in the zones of the defects of spirals which appear in the flow.

1 Introduction

Le système de Couette-Taylor est composé de deux cylindres coaxiaux en rotation différentielle et est le siège de plusieurs modes d'instabilités [1]. Pour de faibles vitesses de rotation des cylindres, on observe un écoulement purement azimutal, laminaire et cisailé dans la direction radiale, appelé écoulement de Couette circulaire. Dans le cas où les cylindres tournent en contrarotation, l'écoulement de Couette circulaire subit une bifurcation de Hopf supercritique et transite vers un écoulement avec des structures tourbillonnaires, appelées spirales, qui s'enroulent en hélice autour du cylindre intérieur. Pour une vitesse de rotation Ω_e du cylindre extérieur fixée, ce régime d'écoulement spiralé évolue vers des régimes plus complexes lorsque en augmentant la vitesse de rotation Ω_i du cylindre intérieur.

Si le système de Couette-Taylor est largement étudié expérimentalement, par visualisation [1], par vélocimétrie laser Doppler [2], ou par vélocimétrie ultrasonore [3], il existe très peu de travaux présentant des mesures quantitatives de vitesses par PIV [4].

Dans cet article, nous vous présentons les principaux résultats obtenus par PIV appliquée au régime de spirales de Taylor. En particulier, nous avons mesuré le champ de vitesses au voisinage des défauts (collisions, sources)

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental comporte un cylindre intérieur de rayon $a = 4$ cm, un cylindre extérieur de rayon $b = 5$ cm, et de hauteur $L = 45,9$ cm. Le rapport des rayons est $\eta = a/b = 0,8$ et le rapport d'aspect $\Gamma = L/d = 45,9$, où $d = b - a$ est la taille de l'entrefer. Le cylindre extérieur est isolé thermiquement de l'extérieur par un bain rectangulaire en plexiglass rempli d'eau. La géométrie rectangulaire du bain favorise les observations optiques.

Les vitesses de rotation Ω_e et Ω_i du cylindre extérieur et intérieur permettent de définir les nombres de Reynolds associés, respectivement $Re_e = \Omega_e b d / \nu$ et $Re_i = \Omega_i a d / \nu$, où ν est la viscosité de l'eau. L'erreur sur les nombres de Reynolds est inférieure à 2%.

Le fluide emprisonné entre les deux cylindres est constitué d'eau (démminéralisée) ensemencée, pour la PIV, par des particules sphériques creuses de verre de diamètre moyen de 8 à 11 μm avec une concentration en masse inférieure à 10^{-4} . Le système PIV est constitué d'un double laser NdYAG (Quantel) piloté par un contrôleur MasterPIV (Tecflow), l'intervalle de temps entre les pulses lasers varie de 2,5 à 32 ms, en fonction des valeurs des nombres de Reynolds. Les paires d'images sont collectées à une fréquence de 2Hz par une caméra CCD de 1034x779 pixels, à 17 cm de la limite inférieure de l'expérience et sur une hauteur de 28 mm. Les intercorrélations entre images d'une même paire sont calculées avec le logiciel Corélia-V2IP avec une fenêtre d'interrogation de 32x32pixels, afin d'obtenir les champs de vitesse dans le plan (r, z) . A partir des champs de vitesse nous pouvons extraire les profils $v_r(z)$ de vitesse radiale dans la direction axiale à différentes position radiale. De même les profils $v_r(r)$, $v_z(z)$, $v_z(r)$ sont extraits à différentes positions. L'extraction de ces profils pour chaque champs de vitesse au cours du temps permet de former les profils spatio-temporels $v_r(z, t)$, $v_r(r, t)$, $v_z(z, t)$, $v_z(r, t)$.

Nous avons utilisée aussi la visualisation par addition d'une suspension de 2% de Kalliroscope à l'eau déminéralisée. La lumière réfléchiée par les paillettes est collectée le long d'un axe parallèle à l'axe du système par une caméra CCD linéaire. L'éclairage est assuré par un tube fluorescent positionné parallèlement à la zone enregistrée afin d'assurer une illumination homogène. L'intensité est enregistrée sur 25 à 29 cm de long, ce qui correspond à une résolution de 40 à 30 pixels par cm. Chaque ligne $I(x)$ collectée à un temps donné est assemblée aux autres lignes acquises au cours du temps afin de former un diagramme spatio-temporel $I(x, t)$.

3 Résultats

Différents régimes spiralés ont été observés au sein de la plage de valeurs de nombres de Reynolds $201 < Re_i < 276$ et $251 < Re_e < 376$, Nous présentons les résultats obtenus pour $Re_o = -299$ et différentes valeurs de Re_i . Le régime observé pour $Re_i = 201$ est constitué de spirales de forme très régulière, et est proche du seuil de déstabilisation de l'écoulement de Couette circulaire. Les champs de vitesse (Fig. 1) mesurés dans le plans (r, z) sont réguliers et mettent en évidence le mouvement des structures tourbillonnaires, avec une alternance du sens de rotation dans la direction axiale.

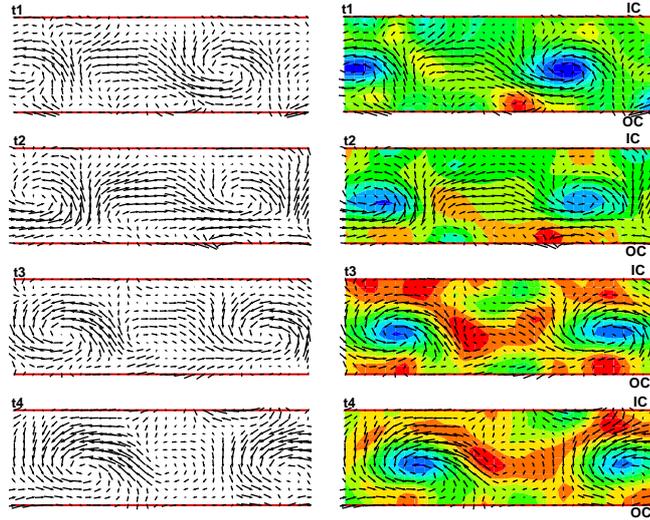


Fig.1. Champs de vitesse dans le plan (r, z) (flèches) et vorticité (échelle de couleurs) pour quatre acquisitions successives ($t_{i+1} = t_i + 0.5s$) à $Re_i = 201$. Le cylindre intérieur correspond à la ligne supérieure des images.

Le profil de vitesse instantanée correspondant à la Fig. 1 est illustré sur la Fig. 2.

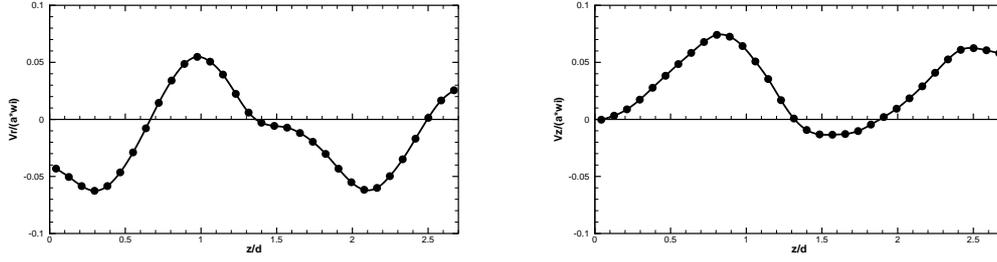


Fig.2. Profil de vitesse extrait du champs de vitesse dans le plan (r, z) , mesuré à $r = a + 0.5d$, $Re_i = 201$.

Les diagrammes spatio-temporels des deux composantes de vitesses de $v_r(r, t)$ et $v_z(r, t)$ (Fig. 3a) montrent l'alternance régulière du sens de rotation des tourbillons, ceci confirme le faite que les spirales sont des ondes radiales stationnaires formées par des paires de tourbillons contrarotatifs. Les diagrammes de $v_r(z, t)$ et $v_z(z, t)$ réalisé à $r = a + 0.5d$ (Fig. 3b) montrent que le premier mode d'instabilité se manifeste sous forme d'un motif de spirales se propageant à droite dans la direction axiale. A partir du diagramme de $v_r(z, t)$ à $r = a + 0.5d$, la périodicité spatiale et temporelle de la spirale ont été mesurée. La fréquence adimensionnée est $f^* = f d^2 / \nu = 5.2$ tandis que le nombre d'onde axial vaut $0,3 \text{ rad.mm}^{-1}$. Juste au-dessus du seuil d'instabilité, ces deux spirales contrapropagatives sont souvent séparées par une source ou un puits. Ceci est mis en évidence par le diagramme spatio-temporel obtenu par la visualisation à l'aide de paillettes de Kalliroscope, rapporté sur la figure 4 pour $Re_o = -299$ et $Re_i = 201$, qui montre clairement la position du puits et la variation de l'intensité correspondant au déplacement des ondes spirales gauche et droite. On remarquera que la zone étudiée par PIV se situe dans la partie inférieure de l'expérience. On remarque aussi que le motif du diagramme spatio-temporel de la composante radiale de la vitesse $v_r(z, t)$ et le motif du diagramme spatio-temporel obtenu par visualisation à l'aide des paillettes de Kalliroscope sont semblables.

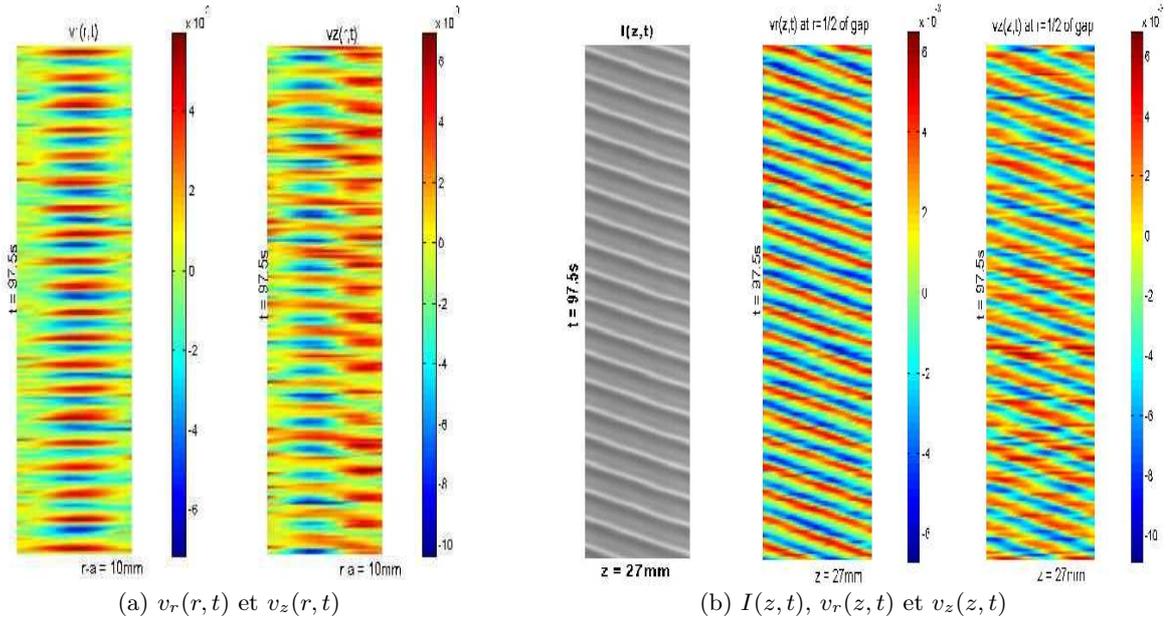


Fig.3. Diagrammes spatio-temporels pour $Re_i = 201$.

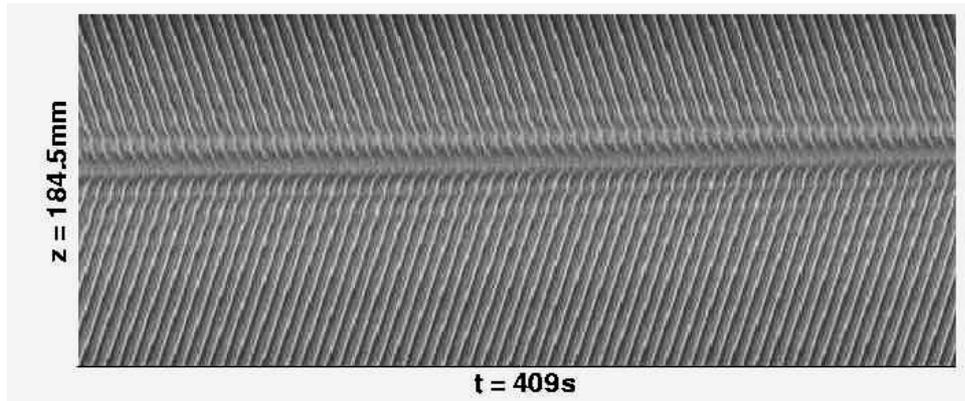


Fig.4. Diagrammes spatio-temporels (z, t) obtenu par visualisation à l'aide de Kalliroscope (paillettes réfléchissantes), $Re_i = 201$.

Pour $Re_i = 214$, nous avons observé un régime formé par des spirales ondulantes. Les diagrammes spatio-temporels des composantes radiales et axiales dans le plan (z, t) sont rapportées Fig. 5. La fréquence et le nombre d'onde principaux sont $f^* = 3$ et $0,22 \text{ rad.mm}^{-1}$, tandis que l'ondulation se caractérise par une période temporelle du même ordre que le temps d'acquisition (environ 90 s).

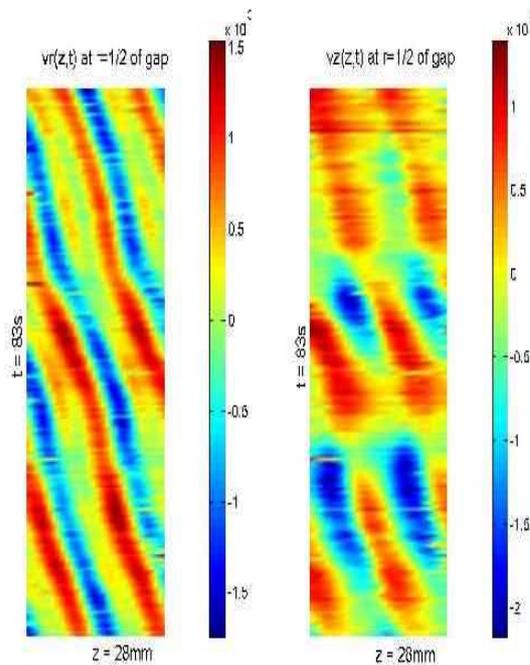


Fig.5. Diagrammes spatio-temporels (z, t) des composantes de vitesse en régime ondulant, $Re_i = 214$.

Pour $Re_i > 214$, la source entre les deux spirales devient très faible et disparaît de l'écoulement, ce qui permet aux spirales d'interférer dans ce petit espace Fig. 8. Ce motif possède des zones d'interpénétrations où on a coexistence de deux ondes gauche et droite et zones sans interpénétration avec une seule onde. Ces

spirales subissent une instabilité d'Ekhaus-Benjamin-Feir qui se manifeste par l'appariation des défauts ponctuels de phase dans le motif sous forme de dislocation ou collision entre deux spirales [5] Fig. 8.

Nous rapportons le comportement observé dans les zones de défauts de spirales dans l'écoulement pour $Re_i = 227$. Les diagrammes spatio-temporels des composantes radiales et axiales dans le plan (z,t) , rapportés Fig. 6a, présentent un défaut vers $t = 42s$. On note que la composante radiale s'annule pour $t = 42s$ à $z = 10$ mm. Ceci se confirme sur l'ensemble de l'entrefer sur le diagramme $v_r(r,t)$ et $v_z(r,t)$ pris à $z = 10$ mm, rapporté Fig. 6b. On remarque en effet des valeurs particulièrement faibles autour de $t = 42$ s, entre deux structures tourbillonnaires présentant un écoulement radial rentrant. Ceci est mis en évidence par l'évolution de deux composantes de vitesses au cours de temps, où ils s'annulent a travers le défaut, rapporté Fig. 7.

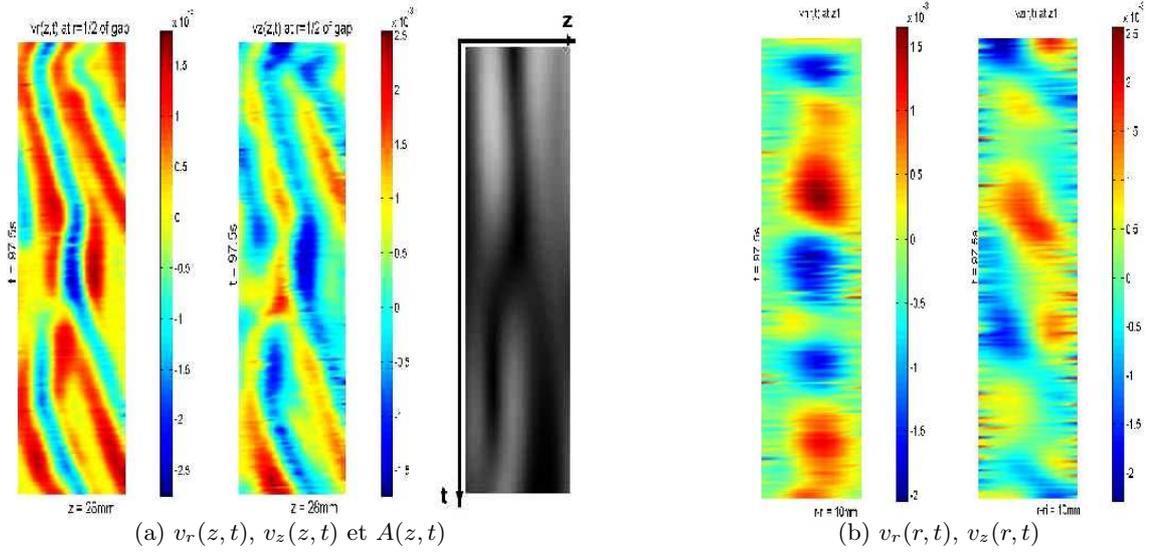


Fig.6. Diagrammes spatio-temporels (z,t) des composantes de vitesse en régime collisionnel, $Re_i = 227$.

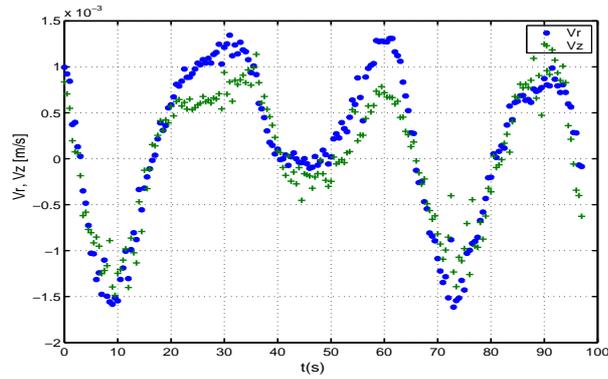


Fig.7. Evolution temporelle de deux composantes de vitesses $v_r(t)$ et $v_z(t)$, $Re_i = 201$, la vitesse s'annule au voisinage du défaut.

Pour étudier le comportement d'un défaut de phase dans le motif des spirales obtenu par visualisation à l'aide de Kalliroscope, nous suivons l'évolution des propriétés spatitemporelles comme la phase, l'amplitude, la fréquence et le nombre d'onde. La Fig. 8 présente les deux premières grandeurs autour de deux défauts, où les motifs présentent un saut de π pour la phase et une dépression ou annulation

représentée par un spot noir correspondant à un minimum pour l'amplitude. Ceci se manifeste par les très faibles composantes de vitesses radiales et axiales au cœur de défaut [6].

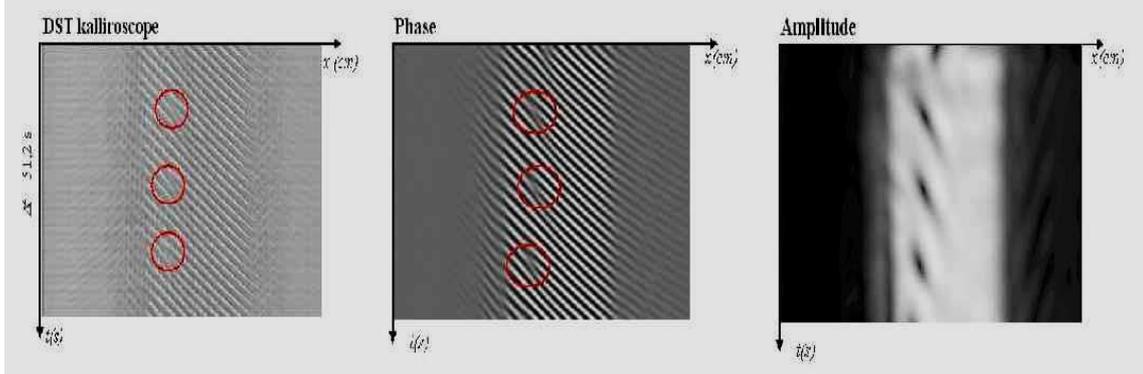


Fig.8. Diagramme spatiotemporels au voisinage de trois défauts : (a) DST, (b) Phase, (c) Amplitude.

L'autocorrélation au cours du temps de la vitesse radiale aux différents z a été calculée à partir des diagrammes spatio-temporels de $v_r(z, t)$ pour les trois régimes observés. Près du seuil (spirales régulières) l'autocorrélation, (Fig. 9a) reproduit la périodicité temporelle des spirales. Les niveaux de corrélation (niveau blanc) ou d'anti-corrélation (zone noire) restent élevés, même pour des décalages temporels importants. Le signal d'autocorrélation est par ailleurs homogène en espace, ce qui indique une propagation très régulière des spirales. Pour le régime des spirales ondulantes, le motif d'autocorrélation, Fig. 9b, est moins régulier et atteint des niveaux élevés plus rarement. En présence d'une collision, le motif d'autocorrélation, Fig. 9c, est irrégulier, et ne présente que peu de zones de forte intensité.

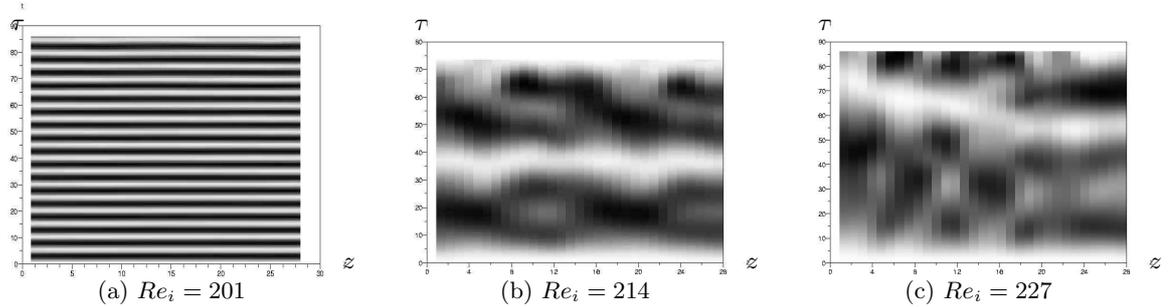


Fig.9. Autocorrélation temporelle de $v_r(z, t)$ à différents z (mm) en fonction du décalage temporel τ (s).

Références

1. C.D. ANDERECK, S.S. LIU, H.L. SWINNEY, Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders, *J. Fluid Mech.*, **164**, 155-183 (1993).
2. Y. TAKEDA, Quasi-periodic state and transition to turbulence in a rotating Couette system, *J. Fluid Mech.*, **389**, 81-99 (1999).
3. W.F. LANGFORD, M. GOLUBITSKY, R. TAGG, E.J. KOSTELICH, AND H.L. SWINNEY, Primary instabilities and bicriticality in flow between counter-rotating cylinders, *Phys. Fluids*, **31**, 776-785 (1988).
4. S.T. WERELEY, R.M. LUEPTOW, Spatio-temporal character of nonwavy and wavy Taylor-Couette flow, *J. Fluid Mech.*, **364**, 59-80 (1998).
5. CH. HOFFMANN, M.LÜCKE AND A. PINTER, Spiral vortices traveling between two rotating defects in the Taylor-Couette system, *Phys. Rev. E*, **72**, 056311 (2005).
6. N. LATRACHE, Etude des instabilités de liquides newtoniens ou viscoélastiques dans le système de Couette-Taylor, *Thèse de doctorat de l'université du Havre*, (2005).