

Vitesses ioniques et instabilité d'une colonne de plasma magnétisé

C. Rebont, N. Claire, Th. Pierre, F. Doveil, S. Jaeger, A. Ajendouz, & A. Escarguel

CNRS UMR6633, LPIIM, Aix-Marseille Université, Campus Saint Jérôme, 13397 Marseille Cedex 20
 thiery.pierre@univ-provence.fr

Résumé. Les mécanismes de l'instabilité d'une colonne de plasma magnétisé sont étudiés en analysant l'évolution spatio-temporelle de la fonction de distribution des ions du plasma. Les mesures par sondes montrent que le mode instable correspond à une déformation elliptique en rotation avec des bras spiraux de la colonne de plasma. Ces vitesses ioniques indiquent une rotation différentielle du plasma.

Abstract. The instability of linear magnetized plasma is studied using spatiotemporal evolution of ion velocity distribution function. Langmuir probes measurements exhibit rotation of the column. The column elliptical column is surrounded by two spiral arms. The ion velocities show a differential rotation and a large change in the velocity the spirals.

1 Introduction

Le magnétoplasma d'Argon produit dans une colonne droite en champ magnétique constant par le dispositif Mistral présente des régimes instables, réguliers ou turbulents. Le transport anormal associé a été étudié en détail ces dernières années à la fois par des sondes électriques [1] et par imagerie ultra-rapide. Le contrôle du transport anormal a été réalisé en appliquant aux régimes faiblement turbulents les techniques du contrôle du chaos, réduisant notablement le transport à travers le champ magnétique [2]. Cependant, les modes analysés ont été souvent improprement caractérisés comme des ondes de dérive diamagnétiques [3]. Nous avons montré récemment que, dans la plupart des cas étudiés, ces instabilités se produisent à des fréquences, de 15 kHz supérieures à la fréquence cyclotronique ionique, de 6 kHz , et que, par conséquent, il ne peut pas s'agir d'ondes de dérive. Le travail présenté ici associe aux mesures par sondes la Fluorescence Induite par Laser (FIL) qui permet de déterminer avec une grande précision la fonction de distribution des vitesses ioniques dans l'instabilité. Le paramètre de contrôle de l'instabilité est le potentiel du collecteur placé en bout de colonne. Il contrôle le flux des électrons ionisants injectés dans la colonne et donc les gradients de densité. Le profil du champ électrique détermine une rotation en bloc ou bien différentielle du plasma. La force de Lorentz joue en plasma magnétisé le même rôle que la force de Coriolis dans les écoulements tournants [4]. Le paramètre de contrôle est ajusté de façon à obtenir un mode cohérent fortement nonlinéaire d'ordre $m=2$, correspondant à une déformation elliptique en rotation avec 2 bras spiraux de la colonne. A partir des données de la FIL, le champ de vitesse est calculé. Après avoir présenté le principe de fonctionnement de la FIL et le dispositif expérimental, les résultats sont exposés et discutés.

2 Principe de fonctionnement de la fluorescence induite par laser (FIL)

La FIL, voir l'article de Hill [6] repose sur deux principes l'effet Doppler et le pompage optique d'un atome ou d'un ion. Un faisceau laser, ($\lambda = 611.492nm$), excite un ion du niveau métastable $3d^2G_{9/2}$ vers un niveau a durée de vie courte, $4p^2F_{7/2}$. L'émission de fluorescence émise, par l'ion en se désexcitant vers le niveau inférieur, $3s^2D_{5/2}$, est alors enregistrée. La fluorescence, $\lambda = 460.957nm$, ainsi récupérée est proportionnelle au nombre d'ions excités par le laser donc au nombre d'ions métastables en résonance avec la fréquence du laser Comme les ions dans le plasma ne sont pas immobiles mais animés d'une

vitesse \vec{v} , ils perçoivent une fréquence laser décalée par l'effet Doppler. La pulsation perçue par les ions en fonction de leur vitesse est : $\omega' = \omega_l - \vec{k} \cdot \vec{v}$. Cette pulsation doit correspondre à la pulsation de la transition $1 \rightarrow 2$, ω_{12} . On associe donc la fréquence du laser à la vitesse de l'ion : $\omega_l = \omega_{12} + \vec{k} \cdot \vec{v}$. Pour obtenir dans le plasma la fonction de distribution en vitesse des ions métastables le long du faisceau laser, il faut balayer la fréquence laser pour couvrir l'ensemble des vitesses ioniques.

3 Dispositif expérimental

3.1 La définition temporelle et spatiale du diagnostic

Pour collecter la lumière de fluorescence, nous utilisons un objectif avec un filtre interférentiel centré sur la longueur d'onde de fluorescence. Une fente placée dans le plan image de l'objectif permet d'avoir une définition spatiale de 1cm, de l'ordre de ρ_i le rayon de Larmor des ions thermiques, le long du faisceau laser. La lumière est transmise à un photomultiplicateur à l'aide d'une fibre optique. Le signal du photomultiplicateur est traité par un analyseur multicanaux (MCS). Le MCS permet d'échantillonner les photons de fluorescence en se synchronisant avec le phénomène à étudier, qui doit donc être répétitif. Pour avoir un rapport signal (fluorescence) sur bruit (émission spontanée) suffisant, des cumuls sont effectués.

3.2 Le dispositif MISTRAL

Le dispositif est composé de deux chambres : une chambre source, où les électrons primaires ionisants sont produits à partir de 32 filaments et une colonne droite placée dans un solénoïde, dans laquelle les mesures sont faites à champ magnétique constant (Fig. 1).

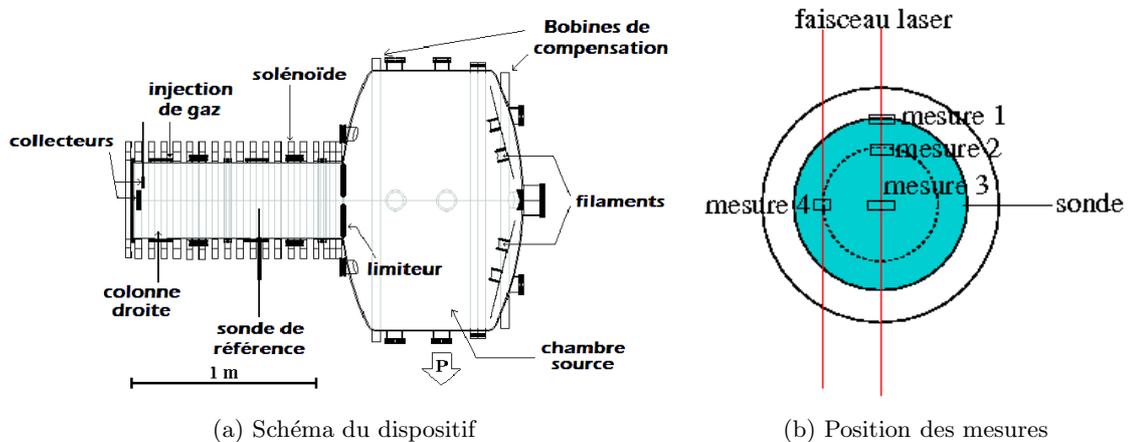


Fig.1. (a) Schéma de principe du dispositif MISTRAL. (b) Position des mesures par FIL et de la sonde de synchronisation dans une section droite de la colonne magnétique de plasma.

Les électrons primaires ionisants sont produits par émission thermoélectronique des filaments portés à une température supérieure à 2000K. L'anode recouvrant l'ensemble de la chambre source est constituée d'une grille sur laquelle est placée un ensemble d'aimant pour former une chambre multipolaire. Cette configuration permet d'augmenter le libre parcours moyen des électrons primaires, en les réfléchissant sur le champ magnétique. En polarisant l'anode par rapport aux filaments, les électrons sont accélérés pour que leur énergie soit suffisante pour ioniser le gaz d'Argon. Dans nos conditions expérimentales, un courant de 114A traverse les filaments chauffés sous 16V et la décharge est produite sous une tension de décharge de 50V et un courant de 7A. La colonne droite de MISTRAL mesure 1m de long pour un diamètre de 40cm. Le solénoïde qui permet le confinement du plasma par champ magnétique est constitué

de 20 bobines régulièrement espacées. Le champ magnétique uniforme peut varier de 0 à 30 mT. Dans notre cas, le champ magnétique est fixé à 16 mT.

La colonne droite est séparée de la chambre source par un diaphragme de 10 cm de diamètre et d'une grille séparatrice qui peut être polarisée. Au bout de la colonne se trouve un collecteur également polarisable. La tension du collecteur a été fixée à 20V et celle de la grille séparatrice à 4V. Nous travaillons en plasma d'Argon à une pression de 2.10^{-4} mbar.

4 Mesures et Résultats

Les précédents travaux réalisés sur la machine MISTRAL indiquent que la colonne de plasma est en rotation. Cette rotation a pu être mise en évidence aussi bien à l'aide de sondes que par imageries. Grâce à la FIL, les mesures précédentes peuvent être vérifiées par une analyse quantitative des vitesses ioniques. Les fluctuations de densité observées par une sonde placée au bord du plasma sont interprétées comme la rotation de la colonne de plasma à une fréquence de $15kHz$, déformée elliptiquement et possédant des bras spiraux le long du grand axe de l'ellipse, Figure 5. Nous allons voir que le mouvement ionique est plus complexe qu'une simple rotation en bloc du plasma. Nos quatre points mesures sont synchronisés à partir du signal d'une sonde placée au bord du plasma, à la limite radiale du diaphragme (voir Figure 1). Nous enregistrons, sur une période de rotation de la structure, 20 points correspondant à une définition temporelle de $5\mu s$. La Figure 2 montre le signal de sonde correspondant à la densité électronique. Les valeurs minimales correspondent à un maximum de densité se situant dans les bras spiraux.

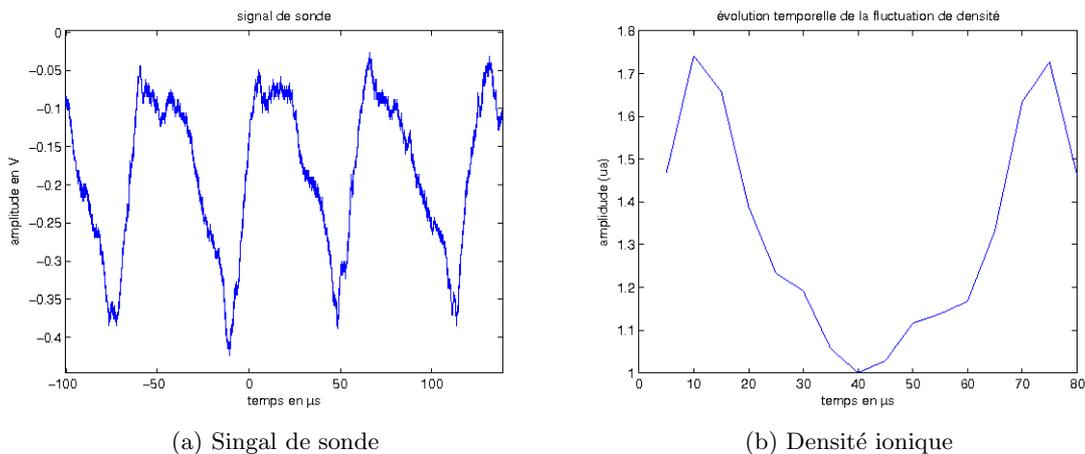


Fig.2. Signal de sonde au bord de la colonne de plasma et évolution temporelle de la densité ionique mesurée avec la FIL.

Sur la Figure 3, nous pouvons visualiser l'effet de la structure, sur l'ensemble des mesures,. La fluctuation des vitesses ioniques associée à la structure augmente avec la position radiale, la structure est plus importante au bord du plasma qu'au centre, où elle est quasiment nulle. Cette fluctuation en vitesse est également accompagnée d'une fluctuation en densité. A un rayon de 3cm, la densité ionique varie d'environ 30% (Figure 2). La différence du niveau fluctuation ionique et électronique s'explique par une légère différence de positionnement des deux types de mesures. Le phénomène que nous observons n'est donc pas seulement un phénomène de bord mais il correspond à une fluctuation dans la colonne de plasma également. Nous avons également aussi des mesures axiales des fonctions de distribution. Dans ce cas, aucune fluctuation en vitesse n'est observée, mais une fluctuation de la densité de l'ordre de 10% dans l'axe de la colonne à la même fréquence que la fréquence rotation, $15kHz$. Si une fluctuation de densité radiale est enregistrée. Elle s'accompagne obligatoirement d'une

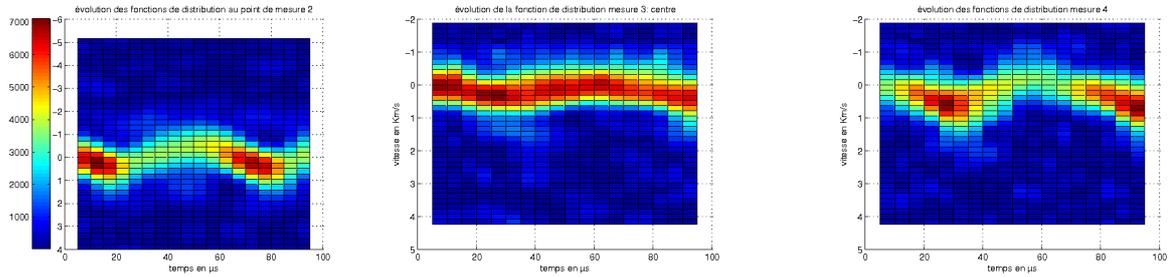


Fig.3. Evolution des fonctions de distribution en vitesse au cours du temps.

fluctuation longitudinale, la vitesse ionique ayant trois composantes : radiale et tangentielle dans la section droite de la colonne et longitudinale.

Dans la suite de notre étude, l'évolution du vecteur vitesse en deux dimensions pour un rayon donné est analysée, et le champ électrique en est déduit. Nous utilisons les mesures 2 et 4 enregistrées pour un même rayon. La mesure des vitesses ioniques au point 2 correspond à une mesure des vitesses radiales en ce point. Avec une hypothèse de rotation, nous considérons la mesure des vitesses ioniques le long du faisceau laser au point 4 comme la mesure des vitesses tangentielles au point 2 par rotation de $\frac{\pi}{2}$. La synchronisation temporelle est réalisée en juxtaposant les maximums de perturbation de densité ionique mesurés en 2 et 4. La Figure 4 montre les deux composantes, radiale et tangentielle, de la vitesse fluide \vec{v}_f au point de mesure 2 en fonction du temps.

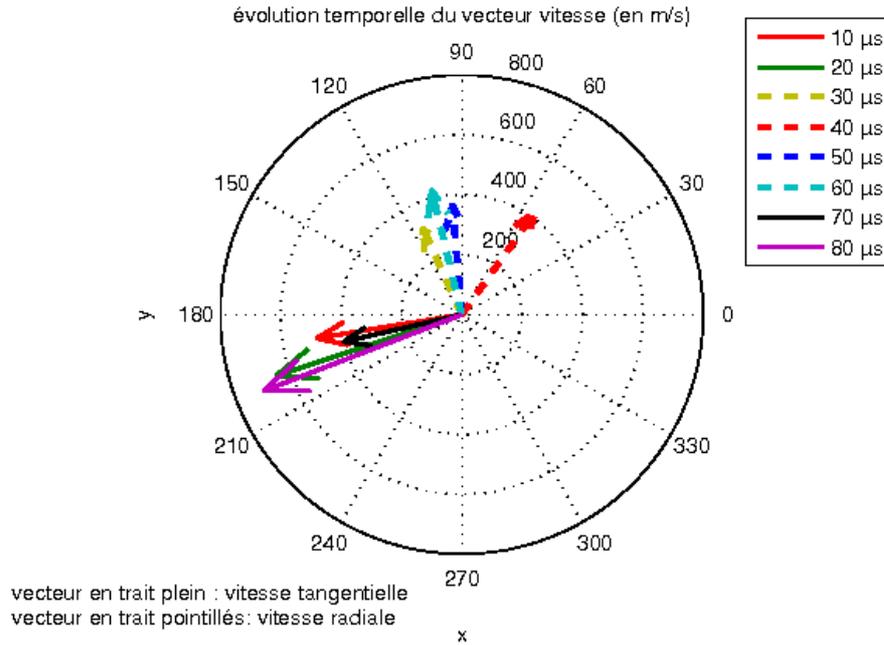


Fig.4. Hodographe

Nous pouvons remarquer que la vitesse est principalement soit tangentielle soit radiale. Le minimum de densité correspond aux vitesses radiales alors que le maximum de densité correspond aux vitesses tangentielles. On pourrait a priori conclure que l'éjection du plasma (vitesses ioniques radiales) se produit

dans les bras spiraux. Cependant lors des précédentes études [9] par sonde de Langmuir (Fig. 5), les bras spiraux indiquaient le maximum de densité se situe le long du grand axe de l'ellipsoïde.

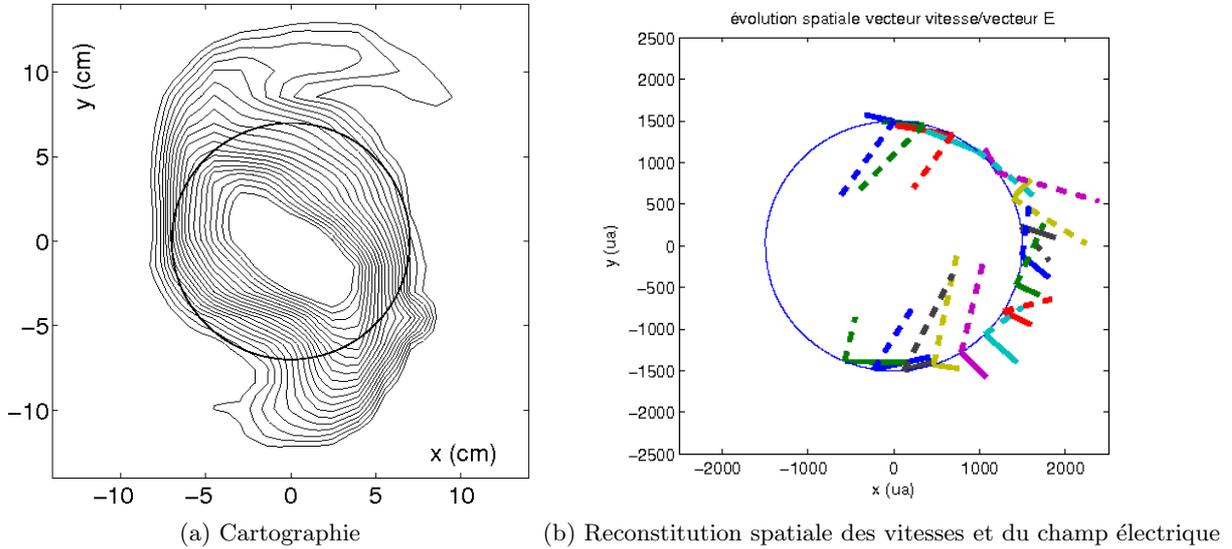


Fig.5. (a) Cartographie 2D de la colonne de plasma réalisée par sonde. La densité au centre est supérieure à la densité au bord. Sur un cercle, la densité est maximale au niveau du bras. (b) Reconstitution spatiale des vitesses et du champ électrique. Les vecteurs en trait plein représentent les vitesses et en pointillés le champ électrique. Les longueurs des vecteurs sont caractéristique de leurs normes.

La mesure semble indiquer l'éjection de plasma en dehors des bras spiraux. Au passage des bras, certains ions pourraient être piégés ou réfléchis, ce qui pourrait expliquer le maximum de densité dans ces bras accumulant les ions. Il est toutefois à noter que la vitesse de rotation des bras est de 1.5 km/s à une fréquence de 15 kHz , alors que les ions ont une vitesse fluide de rotation (vitesse tangentielle) dans les bras de 700 m/s . Il faut donc s'intéresser non plus à l'aspect fluide du problème mais bel et bien à son aspect cinétique, en regardant la forme des fonctions de distribution. Cette étude est en cours. A partir des vitesses fluides, nous pouvons calculer l'évolution temporelle du champ électrique en utilisant le principe fondamentale de la dynamique pour un ion fluide, $m \frac{d\vec{v}_f}{dt} = q\vec{E} + \vec{v}_f \times \vec{B}$ où $m = 6.6 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ est la masse de l'Argon; \vec{v}_f la vitesse fluide calculée avec les fonctions de distributions; $\vec{B} = B_z \vec{z}$ le champ magnétique axial dans la colonne droite.

La Figure 6 représente la norme du champ électrique et son angle en degrés en par rapport à la vitesse en fonction du temps. Nous observons un champ électrique moyen de 18 V/m . La norme du champ électrique est modulée par la structure, avec des variations brutales de l'angle à $t=20 \mu\text{s}$. Cette fluctuation est à rapprocher de la fluctuation de la densité électronique visible en Figure 2. Celle-ci est dissymétrique avec un front raide. Ce front raide se produit au passage des bras spiraux. La référence temporelle est différente sur ces figures, la carte de densité est à tourner de 60° , sens horaire.

L'angle formé par le vecteur \vec{E} et \vec{v}_f oscille autour $-\pi/2$, qui correspond à l'angle d'une dérive $\vec{E} \times \vec{B}$. Il est possible ainsi de reconstruire les évolutions temporelles de la vitesse fluide et du champ électrique, et d'obtenir une image instantanée d'une section droite du plasma. Moyennant l'hypothèse de rotation de la structure à la vitesse de $1.5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, les évolutions temporelles sont transformées en évolutions spatiales le long d'un cercle, $\delta s = 1.4 \cdot 10^3 * \delta t$, où s est l'abscisse curviligne le long du cercle de rayon $R=3\text{cm}$, correspondant au mesure 2 et 4. La Figure 5 montre une image de la vitesse fluide et du champ électrique dans une section droite de la colonne.

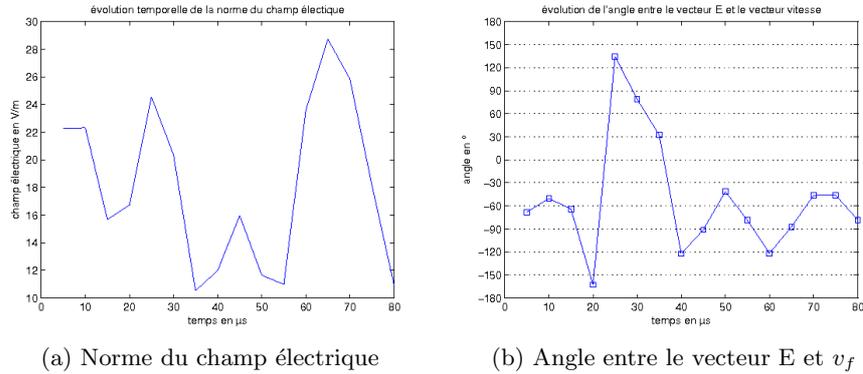


Fig.6. Evolution en fonction du temps de la norme du champ électrique et de l'angle entre le vecteur E et v_f : l'angle change brutalement au passage de la structure.

5 Conclusion

Dans cette étude dans une instabilité fortement non-linéaire, nous avons mis en évidence la complexité des mouvements ioniques. L'image du plasma tournant en bloc est fautive au vu de nos résultats obtenues en FIL. L'extension spatiale des bras spiraux en dehors de la zone d'ionisation délimitée par le diaphragme n'est pas expliquée. La vitesse de rotation de la structure est plus grande que la vitesse de rotation des ions (700 m/s au lieu de 1.5 km/s). Nous observons des vitesses tangentielles lors du passage des bras et des vitesses radiales en dehors. Le bras spiral est caractérisé par un front raide visible sur la variation de densité et sur la variation brutale de l'angle entre le champ électrique et la vitesse, ce qui ressemble à une onde de choc. Une étude fluide n'est pas la meilleure méthode dans notre cas. Une étude plus approfondie de la forme des fonctions de distribution est nécessaire pour étudier différents groupes d'ions : ceux qui sont peu sensibles à la structure tournante et ceux qui le sont. Des mesures à l'extérieur de la zone d'ionisation seront effectuées pour comprendre l'extension spatiale des bras spiraux. La variation des paramètres plasma est en cours pour déterminer l'origine et la nature de la perturbation. En conclusion la mise en oeuvre de ce nouveau diagnostic optique, voisin dans son principe de la PIV, ouvre de nouvelles perspectives et nécessite un approfondissement de l'analyse théorique.

Références

1. TH. PIERRE, *et al.*, Radial Convection of Plasma Structures in a Turbulent Rotating Magnetized-Plasma Column, *Physical Review Letters*, **92**, 065004 (2004).
2. TH. PIERRE *et al.*, Contrôle, *Congrès SFP-Plasmas*, Cadarache (2002).
3. T. KLINGER, A. LATTEN, A. PIEL, G. BONHOMME, TH. PIERRE & T. DUDOK DE WIT, Route to Drift Wave Chaos and Turbulence in a Bounded Low- β Plasma Experiment, *Physical Review Letters*, **79**, 3913 (1997).
4. V. NEZLIN, *Rossby Vortices, Spiral Structures, Solitons*, Springer-Verlag Berlin, (1993).
5. S. CILIBERTO & J. P. GOLLUB, Pattern Competition leads to Chaos, *Physical Review Letters*, **52**, 922 (1984).
6. D. N. HILL, S. FORNACA & M. G. WICKHAM, Single frequency scanning laser as a plasma diagnostic, *Rev. Sci. Instrum.*, **54**, 309 (1986).
7. T.F. JOHNSTON, *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, **17**, 96 (1987).
8. B. PELISSIER & N. SADEGHI, Time-resolved pulse-counting lock-in detection of laser induced fluorescence in the presence of a strong background emission, *Rev. Sci. Instrum.*, **10**, 3405 (1986).
9. M. MATSUKUMA, TH. PIERRE ET AL., Spatiotemporal structure of nonlinear low frequency waves in a magnetized plasma device, *Physics Letters A*, **314** (1-2), 163 (2003).