

Dynamique chaotique de l'écoulement dans un cylindre en précession

Meunier Patrice¹, Lagrange Romain¹, Nadal François², & Eloy Christophe¹

¹ Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre, CNRS, Aix-Marseille Université, 13384, Marseille

² CEA/CESTA, 15 av. des Sablières, 33114 Le Barp

meunier@irphe.univ-mrs.fr

Le mouvement de précession correspond au mouvement d'un objet en rotation autour de son axe, qui est lui même en rotation autour d'un deuxième axe, incliné par rapport au premier. Lorsque l'objet est rempli d'un fluide, la précession engendre un écoulement qui devient fortement turbulent pour des angles de précession élevés. C'est le cas par exemple de l'écoulement à l'intérieur du noyau terrestre, car la terre est en précession lente avec un angle de 23.5 degrés. Le champ magnétique terrestre étant généré par les mouvements du fer liquide dans le noyau, il est possible qu'une part importante de l'énergie du champ magnétique de la terre provienne de son mouvement de précession. Dans le domaine aéronautique, la précession est un mouvement néfaste pour les satellites, car il peut être amplifié par résonance entre l'écoulement de précession et le mouvement propre du satellite et provoquer ainsi de fortes déviations de sa trajectoire. Ces deux applications rendent ainsi l'étude de l'écoulement de précession intéressante en plus de son aspect fondamental.

Dans cette étude, nous analysons l'écoulement modèle d'un fluide dans un cylindre en précession pour de faibles angles de précession. Aux faibles nombres de Reynolds, la précession force les modes propres de l'écoulement dans le cylindre (appelés modes de Kelvin) à la fréquence de précession[1]. Lorsque la fréquence de précession est égale à la fréquence d'un mode de Kelvin libre, l'amplitude de ce mode de Kelvin diverge et il est donc nécessaire d'introduire les effets visqueux et non-linéaires pour prédire la saturation de ce mode de Kelvin. Cette analyse théorique a été confirmée expérimentalement[2] et permet de prédire correctement l'écoulement de base pour de faibles nombres de Reynolds.

Lorsque le nombre de Reynolds augmente, l'écoulement devient fortement turbulent. Nous avons montré que cette transition vers la turbulence peut être expliquée par une résonance triadique entre le mode de Kelvin forcé par la précession et deux autres modes de Kelvin libres qui croissent exponentiellement[3]. Le taux de croissance de cette instabilité peut être prédit par une analyse de stabilité linéaire incluant les effets visqueux, qui est en excellent accord avec les résultats expérimentaux.

De plus, il est possible d'ajouter les couplages non-linéaires entre ces différents modes, qui font ainsi apparaître un mode supplémentaire possédant une symétrie cylindrique. Ce mode est primordial car il sature le taux de croissance de l'instabilité par des effets de 'detuning'. La dynamique de l'écoulement de précession est alors entièrement déterminée par les amplitudes de ces 4 modes, pour lesquelles on peut obtenir quatre équations d'amplitude non-linéaires. La résolution de ces équations montrent que l'instabilité est sous-critique, mais qu'elle sature à une amplitude stationnaire juste au dessus du seuil. L'amplitude devient intermittente pour des nombres de Reynolds plus élevés, puis chaotique pour de très grands nombres de Reynolds. Cette dynamique est confirmée par les expériences, qui montrent de plus que l'écoulement moyen dans le cylindre est proche du point fixe (instable) des équations d'amplitude. Il est donc intéressant de voir que l'évolution d'un écoulement turbulent à grand nombre de degrés de liberté est ici bien représentée par un système dynamique à petit nombre de degrés de liberté.

Références

1. A. D. McEWAN, Inertial oscillations in a rotating fluid cylinder, *J. Fluid Mech.*, **40**, 603-640 (1970).
2. P. MEUNIER, C. ELOY, R. LAGRANGE, F. NADAL, A rotating fluid cylinder subject to weak precession, *J. Fluid Mech.*, **599**, 405-440 (2008).
3. C. ELOY, R. LAGRANGE, F. NADAL, P. MEUNIER, , Instability of a fluid inside a precessing cylinder *Phys. Fluids* **20** (8), 081701 (2008).