

# GDR Structure de la turbulence et mélange

## Thème 2 : Écoulements tournants 3D

9-10 novembre 2005 à Nantes

**Animateur : Frédéric Moisy (FAST)**

**Compilé par Sébastien Poncet (IRPHE)**

Cette session aborde quelques aspects de l'état de l'art des écoulements tournants 3D. Deux configurations ont été plus particulièrement abordées : celle de la "machine à laver" et celle des écoulements de type rotor-stator avec faible entrefer.

### 1 Partie I : la "machine à laver"

Olivier Cadot (ENSTA) a présenté l'état d'avancement d'une revue sur la "machine à laver" intitulée *Advances in turbulence using the Von Kármán closed flow geometry* qui doit être soumise pour publication dans l'édition de 2006 (ou de 2007) de *Ann. Rev. Fluid Mech.*. Cet article regroupe, pour l'instant, près de 100 références et se décompose ainsi :

1. Basic flow (12 références)
2. Vorticity filament-pressure statistics (18)
3. Velocity gradient statistics (16)
4. Energy injection rate statistics (19)
5. Drag reduction by polymer additives (4)
6. Passive scalar statistics (4)
7. Lagrangian turbulence (11)
8. Superfluid turbulence (3)
9. MHD turbulence (12)

Romain Monchaux et Bérengère Dubrulle du laboratoire GIT au CEA Saclay ont développé de nouveaux principes variationnels pour étudier la structure et la stabilité des états d'équilibre des écoulements axisymétriques. Ils montrent que les équations d'Euler axisymétriques pour les écoulements inviscides admettent une infinité de solutions stationnaires. Ils exhibent leur forme générale et développent quelques solutions particulières. Ils montrent que les états stationnaires stables maximisent une H-fonction (non universelle) tout en conservant l'énergie, l'hélicité, la circulation et le moment cinétique (contraintes robustes). Ceci peut être vu comme une sorte de principe de "selective decay" généralisé. Ils calculent les équations de relaxation qui peuvent être utilisées comme un algorithme pour construire des solutions non-linéaires dynamiquement stables des écoulements axisymétriques. Ils développent également une approche thermodynamique des états d'équilibre à une certaine échelle de coarse-graining. Ils montrent que les distributions correspondantes peuvent être rangées en deux parties : une part universelle issue de la conservation des contraintes robustes et une part non universelle déterminée par les conditions initiales au travers des contraintes faibles (pour les systèmes évoluant librement) ou par une distribution a priori prenant en compte les effets non-idéaux tels que la viscosité, le forçage à petite échelle et la dissipation (pour les systèmes forcés). Finalement, ils calculent une paramétrisation du mélange sans viscosité pour décrire la dynamique du système à une certaine échelle de coarse-graining. Un des grands intérêts de ce modèle axisymétrique est sa situation intermédiaire entre les cas 2D et 3D. Ils présentent de plus une confrontation des prédictions relatives aux états stationnaires de l'équation d'Euler axisymétrique à des mesures expérimentales effectuées dans un écoulement de Von Kármán. Dans ce cas, les états stationnaires sont censés être décrits par

des relations simples entre la vorticité, le moment cinétique et la fonction de courant. Les mesures sont faites à l'aide d'un système de vélocimétrie laser doppler (LDV). Une comparaison entre le comportement de l'écoulement de von K rm n et l'écoulement de Beltrami quand le nombre de Reynolds augmente est aussi présentée.

*Monchaux R., Leprovost N., Ravelet F., Dubrulle B., Chavannis P.H., Daviaud F. (2005), Statistic Mechanical of axisymmetric turbulent flows, soumis à Phys. Rev. Lett.*

François Daviaud (GIT - CEA Saclay) a discuté de l'influence de la turbulence sur le seuil de la dynamo. L'effet dynamo est la génération d'un champ magnétique par le déplacement d'un milieu conducteur. Quand le milieu conducteur est un fluide, l'effet dynamo résulte d'une competition entre les étirements et repliements de champ par le fluide, et la diffusion, quantifiée par un nombre sans dimension, le nombre de Reynolds magnétique  $Rm$ . Quand le fluide est laminaire, l'effet dynamo peut être traité comme une instabilité classique, avec apparition de la dynamo dès que  $Rm$  dépasse un certain seuil  $Rm_c$ . Lorsque le fluide est turbulent, les approches numérique et analytique du problème se heurtent aux mêmes problèmes que pour la turbulence classique. Ceci a motivé la mise en route d'expériences de laboratoire utilisant du sodium liquide pour étudier l'influence de la turbulence sur le seuil de l'effet dynamo. Il y a cinq ans, deux expériences à Riga et à Karlsruhe ont démontré que lorsque la turbulence n'était qu'à petite chelle (rendant l'écoulement instantané proche de l'état moyen), les seuils d'apparition de dynamo étaient très proches des seuils calculés avec l'écoulement moyen. Deux expériences plus récentes utilisant des écoulements non-constraints (  Madison et à Cadarache) semblent montrer qu'au contraire, lorsque l'écoulement turbulent possède des instationarit s à grande échelle, le seuil est plus élevé que celui calculé avec l'écoulement moyen. Motivés par ces remarques, François Daviaud a entrepris une étude numérique simplifiée du système en remplaçant la turbulence par un bruit d'amplitude, de temps de corrélation et d'échelle arbitraire. Il a observé qu'un bruit à petite échelle ne modifie pratiquement pas le seuil d'apparition de la dynamo, alors qu'un bruit à grande échelle augmente sensiblement le seuil de l'effet dynamo, et ce d'autant plus que son temps de corrélation est élevé. Ce résultat confirme donc qualitativement les premières mesures expérimentales, et semble suggérer que les dynamos naturelles n'opèrent que grâce à la présence de la force de Coriolis, qui dompte les fluctuations à grande échelle.

## 2 Partie II : les écoulements de type rotor-stator

Olivier Daube (LIMSI) a présenté des simulations numériques axisymétriques des écoulements transitionnel et chaotique dans une cavité de type rotor-stator de rapport d'aspect 1/8 pour un nombre de Reynolds global allant jusqu'à  $Re = 10^6$ . Les limitations et les conséquences de l'hypothèse d'axisymétrie ont d'abord été discutées. La dynamique de l'écoulement consiste principalement en des ondes se propageant dans les couches limites liées au rotor et au stator et en des ondes inertielles dans le coeur de l'écoulement. Pour  $Re = 3 \times 10^5$ , la couche liée au rotor est stationnaire, alors que des fluctuations de large amplitude sont observées du côté du stator. L'évolution des moments d'ordre 2 confirme le rôle fondamentalement axisymétrique des 2 couches limites. L'analyse de la contribution des différents termes intervenant dans l'équation de l'énergie cinétique fait apparaître quelques traits spécifiques attribués aux effets de la rotation et à l'hypothèse d'axisymétrie.

*Jacques R., Le Quéré P., Daube O. (2002), Axisymmetric numerical simulations of turbulent flow in rotorstator enclosures, International Journal of Heat and Fluid flow, 23, p.381-397.*

Éric Serre (MSNM) a fait une synthèse de ses recherches sur les instabilités et la turbulence dans les écoulements de fluide en cavité en rotation étudiés par simulation numérique haute précision (approximation spectrale, algorithmes non itératifs).

Un éclairage récent sur le processus de transition dans les couches limites, qui se développent sur les parois, a été apporté en considérant la réponse à une perturbation brève et localisée dans la région instable de la couche limite. Les travaux théoriques récents consacrés aux couches limites en rotation laissent supposer que le mode absolu d'instabilité joue un rôle important dans le processus d'apparition de la turbulence. Une cavité en rotation d'ensemble soumise à un flux de masse forcé radial centrifuge a été considérée car elle correspond au cadre théorique des instabilités convectives/absolues.

Le travail expérimental et théorique de Lingwood (JFM 95-97) a été étendu au cas interdisque. Les modes I et II convectifs ont été complètement caractérisés et les premières informations concernant le mode I absolu ont été présentées, mais demandent de très grandes résolutions numériques. En régime turbulent, des résultats de DNS et de LES ont été présentés et confirment la présence de vortex d'instabilité de grande échelle dans le coeur de l'écoulement, persistants à très hauts Reynolds d'après des études expérimentales complémentaires réalisées à l'Université de Manchester. D'un point de vue statistique, l'analyse du tenseur de Reynolds présente toutes les caractéristiques d'une couche limite turbulente et montre l'anisotropie de la turbulence dans ces écoulements. Une analyse comparative avec des résultats issus d'une approche statistique (Univ. Manchester) montre que des modèles du second ordre sont nécessaires pour reproduire assez fidèlement les calculs issus de la simulation directe.

Des résultats récents encourageants ont été également présentés concernant une LES d'un écoulement rotor-stator, basée sur une technique de stabilisation (Spectral Vanishing Viscosity) qui permet de conserver la précision spectrale de notre solveur.

Enfin, Eric Serre s'est intéressé à la convection de Rayleigh-Bénard en rotation qui est depuis longtemps un des sujets favoris dans la dynamique des fluides non linéaire. En effet, l'addition de la force de Coriolis dans les équations du mouvement (Navier-Stokes) rend le système non potentiel, même au seuil. Un des phénomènes fascinants est le chaos spatio-temporel où les structures de convection possèdent une dynamique complètement désordonnée. Il a présenté des résultats relatifs à des structures de convection carrées, obtenues pour la première fois numériquement avec des conditions de bord réalistes.

*Serre E., Bontoux P., Launder B. (2004) Transitional-turbulent flow with heat transfer in a closed rotor-stator cavity, J. of Turbulence, 5, p.008.*

*Séverac E., Serre E., Pasquetti R., Launder B. (2004), A stabilization technique to study turbulent rotating flows using high-order numerical method, Advances in Turbulence X, 861, CIMNE, Eds. H.I. Andersson, P.A. Krogstad, Barcelona.*

*Serre E., Tuliska-Sznitko E., Bontoux P (2004), Coupled theoretical and numerical study of the flow transition between a rotating and a stationary disk, Phys. Fluids, 16(3), p.688-706.*

*Sanchez J.J., Serre E., Crespo del Arco E., Busse F. (2005), Square patterns in rotating Rayleigh-Bénard convection, Phys. Rev. E, 72, 036307.*

Sébastien Poncet (IRPHE) a proposé une étude expérimentale et numérique sur la caractérisation des écoulements turbulents de type rotor-stator soumis à un flux axial. Des mesures de vitesse par LDA sont comparées aux prévisions d'un modèle avancé de transport des tensions de Reynolds essentiellement pour les écoulements turbulents à couches limites séparées. Cette confrontation a permis d'approfondir les propriétés des écoulements confinés soumis à une forte rotation. Dans le cas d'une cavité fermée ou lorsqu'un flux centripète est imposé, la structuration de l'écoulement est de type Batchelor : la couche limite du rotor et celle du stator sont séparées par un noyau central en rotation. La vitesse tangentielle dans le noyau est proportionnelle à la vitesse locale du disque avec un coefficient de proportionnalité  $K$ . Ce coefficient peut être déterminé à partir d'un coefficient local de débit selon une loi analytique dont les deux coefficients dépendent uniquement du taux de prérotation du fluide. Cette loi est indépendante de la géométrie de la cavité. La même démarche a été appliquée aux écoulements laminaires et aux écoulements turbulents avec rotor rugueux. Pour de forts flux centrifuges, la structuration de l'écoulement devient de type Stewartson avec une couche limite unique sur le rotor. La transition entre ces deux structururations peut être caractérisée par un nombre de Rossby basé sur l'espace radial entre le rotor et le cylindre extérieur. Cette transition est continue et indépendante de la géométrie de la cavité. La turbulence est concentrée dans les couches limites et augmente du centre vers la périphérie du disque. Lorsqu'un flux est imposé, la zone relaminarisée proche de l'axe observée en cavité fermée, disparaît et la turbulence est maximale près des zones d'entrée et de sortie du fluide. La turbulence est fortement anisotrope au sens des vitesses dans les couches limites et devient quasi isotrope dans le coeur près de la couche limite du rotor. L'analyse de l'anisotropie directionnelle montre que la turbulence est 2D avec des structures orientées selon l'axe de rotation.

*Poncet S., Chauve M.-P., Le Gal, P. (2005), Turbulent Rotating Disk Flow with Inward Throughflow, J. Fluid Mech., 522, p.253-262.*

*Poncet S., Chauve M.-P., Schiestel R. (2005), Batchelor versus Stewartson flow structures in a rotor-stator cavity with throughflow, Phys. Fluids, 17 (7).*