
Session Turbulence en rotation - Turbulence stratifiée, compte-rendu des travaux

Réunion du GDR turbulence au Centre Paul Langevin, Aussois, du 7 au 11 décembre 2009

GDR Structure de la Turbulence et Mélange du CNRS, compte-rendu compilé par Pierre Augier

1 La turbulence en rotation pour les nuls, par Frédéric Moisy (FAST)

Après une introduction générale de Frédéric Moisy axée sur la turbulence en rotation (le fichier pdf est sur la page web du gdr), huit présentations libres et courtes se sont succédées.

2 Étude paramétrique sur les écoulements fortement hélicitaires en rotation, par Julien Baerenzung (LEGI)

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés au rôle que joue l'hélicité cinétique dans les écoulements en rotation. Dans de récents travaux (Mininni, Pouquet arXiv :0909.1272 (2009), arXiv :0909.1275v1 (2009)) il a été montré que dans les écoulements en rotation présentant une forte hélicité, la cascade directe était dominée par l'hélicité. De plus si on suppose que le spectre d'énergie se comporte en k-e et que le spectre d'hélicité se comporte en k-h dans leurs zones inertielles respectives, alors Mininni et Pouquet ont pu observer que $e+h=4$. C'est donc dans le but de déterminer le domaine de validité de cette loi que nous avons décidé de mener une étude paramétrique. Pour ce faire nous avons réalisé 19 simulations LES (Baerenzung et al. Phys. Rev. E 77 (2008) 04303) d'écoulements en rotation et entretenus par le forçage ABC. Nous avons fait varier le nombre de Reynolds de ces écoulements entre 3600 et 125500, et le nombre de Rossby entre 0.003 et 11.6. Nous avons ainsi pu montrer que cette loi n'est pas robuste à tout régime, mais que dans certains cas la turbulence de type Kolmogorovienne l'emporte sur la turbulence d'onde. Nous avons également pu déterminer le paramètre crucial dont dépendent ces écoulements, à savoir, le produit du nombre de Reynolds avec le nombre de Rossby.

3 Présentation de la nouvelle plateforme tournante GYROFLOW, par Cyril Lamriben (FAST)

Le laboratoire FAST s'est doté d'une nouvelle plateforme tournante (GYROFLOW) pour l'étude expérimentale de la turbulence en rotation. Livrée en avril 2009, elle est opérationnelle depuis octobre. Elle permet d'embarquer 1 tonne de matériel (camera et laser pour la PIV, moteur de la grille, ordinateur de pilotage du système d'acquisition), et peut tourner jusqu'à 30 tours par minutes avec un excellent contrôle de la vitesse de rotation. Les premières mesures de turbulence de grille (études de l'énergie en déclin en PIV 2D) ont mis en évidence la présence de deux modes d'inertie, excités de façon systématique au passage de la grille. L'écoulement généré peut alors être décomposé en une composante "reproductible" instationnaire associée à ces modes, accessible expérimentalement par moyenne d'ensemble, et une

composante turbulente. Au sens strict, on ne peut donc pas qualifier le déclin de l'énergie turbulente de libre : l'écoulement moyen est susceptible de réinjecter de l'énergie turbulente. Se pose alors la question du couplage entre modes d'inertie et turbulence en rotation c'est-à-dire de la dynamique du transfert de l'énergie entre ses deux formes. En particulier, il est observé expérimentalement que l'énergie totale se trouve principalement sous forme turbulente à temps courts, ce qui s'explique par le fait que le Rossby de grille, de l'ordre de 100, est trop grand pour que la grille soit sensible à la rotation du fluide. En revanche, au cours du déclin, l'énergie turbulente et l'énergie associée au modes d'inertie ont des contributions du même ordre à l'énergie totale.

4 Instabilité radiative des écoulements stratifiés tournants, par Xavier Riedinger (ENS Lyon)

X. Riedinger, S. Le Dizès, P. Meunier

Nous avons réussi à mettre en évidence un nouveau mécanisme d'instabilité actif dans les écoulements tournants stratifiés. Cette instabilité est présente lorsqu'un tourbillon vertical, qui est stable dans un fluide homogène, est placé dans un fluide stratifié de manière stable le long de l'axe du tourbillon. Nous avons montré que cette instabilité est associée une émission spontanée d'ondes internes. Plusieurs tourbillons modèles ont été considérés permettant de décrire des écoulements présents dans l'océan et l'atmosphère ainsi que ceux plus exotiques des disques d'accrétion. Dans chacun des cas, nous avons obtenu les caractéristiques des modes les plus instables en fonction des paramètres de l'écoulement. Sur la figure est illustrée l'instabilité pour l'écoulement potentiel généré par un cylindre en rotation.

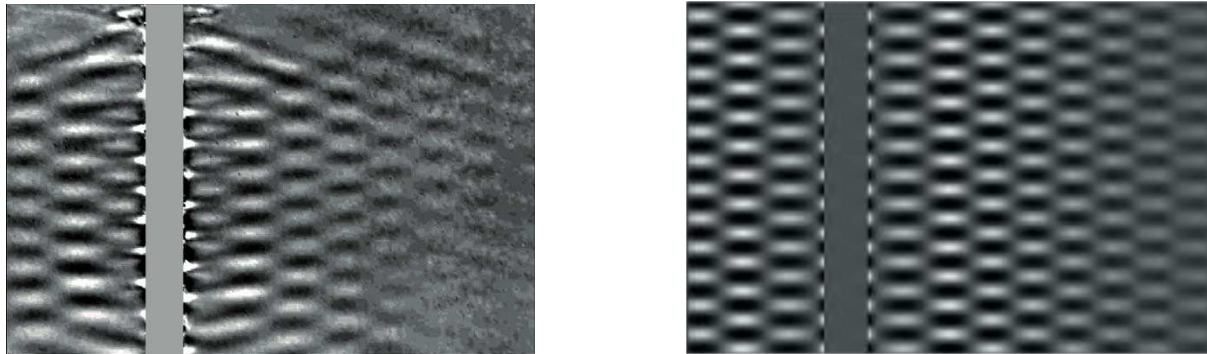


Fig. 1.

Les résultats expérimentaux (à gauche) représentent les gradients de densité, moyennés selon la profondeur, obtenus à l'aide de la technique de « Synthetic Schlieren ». Les résultats numériques (à droite) qui montrent la structure du mode d'instabilité le plus instable pour les conditions expérimentales sont en très bon accord avec l'expérience. Les expériences sur un vortex colonne montrent que celui-ci présente une couche critique dans sa structure pour les nombres de Froude supérieurs à 1. Lorsque le nombre de Froude devient inférieur à 1, la colonne de vorticité est déformée suivant une ondulation conformément à l'évolution linéaire due au mode le plus instable à faible Reynolds, obtenu numériquement. Les résultats obtenus lors de cette étude pourraient avoir d'importantes conséquences dans la modélisation des écoulements atmosphériques car ils montrent qu'un écoulement équilibré peut spontanément émettre des ondes internes. Ils indiquent également que cette instabilité radiative pourrait intervenir dans la dynamique des disques d'accrétion.

5 Formation de structures, effet lineaire ou non ? MHD quasi-statique et rotation, par Claude Cambon (LMFA)

Le cas très simplifié de MHD pour un métal liquide turbulent, dit “quasi-statique” (QS) offre une analogie forte avec la turbulence en rotation, en ce qui concerne les tendances à la bi-dimensionalisation et la description fine (multi-échelle, multi-modale) de l’anisotropie qui lui est associée. En MHD QS, le couplage avec le champ magnétique fluctuant dans l’équation de Navier-Stokes se réduit à un simple opérateur de dissipation ohmique anisotrope, relatif à la direction imposée par un fort champ magnétique externe. L’opérateur purement linéaire est suffisant en QS MHD pour créer une bi-dimensionalisation de type Taylor-Proudman, avec disparition progressive de la dépendance vis à vis de la coordonnée axiale, mais en gardant une composante axiale de la vitesse, et donc des “jets” aussi bien que des “tourbillons” de Taylor. Cet état est parfois qualifié de 2D-3C (2 dimensions, 3 composantes) pour le champ de vitesse. Des simulations pseudo-spectrales récentes avec support théorique (Favier et al., PRL, soumis en 2009) montrent comment les non-linéarités induisent une cascade très différente sur la composante transverse (2C) et la composante (1C) axiale de la vitesse dans la limite quasi-2D. On retrouve le scénario d’une composante axiale se comportant comme un scalaire passif convecté par le champ 2D-2C, qui lui-même est dominé par la cascade inverse conventionnelle. Toute l’évolution à partir d’un champ initial isotrope 3D est confirmée par DNS en QS MHD et quantifiée par une description spectrale anisotrope qui contient la distribution angulaire du spectre d’énergie (directivité, aspect “ring to ring” et pas seulement “shell to shell” utilisé par d’autres équipes en MHD) et sa polarisation en liaison avec une décomposition toroidale-poloidale dans l’espace physique, qui revient à transverse-axial en quasi 2D. La deuxième partie de ma présentation a montré, en utilisant les mêmes outils, que le scénario de bi-dimensionalisation pour la turbulence “hydro” en rotation ne présente que des analogies qualitatives avec le cas QS-MHD précédent. En particulier, toutes les phases de la transition 2D-3D sont dominées par la cascade non-linéaire modulée par les ondes d’inertie, car la force de Coriolis ne produit pas directement d’énergie, avec une bi-dimensionalisation qui reste partielle. Comme en QS MHD, la description spectrale “directivité-polarisation” permet de quantifier ces effets pour une très large gamme de nombres de Rossby, donc de paramètre d’interaction “linéaire/non linéaire”, avec un accord complet des différentes modélisations (DNS, LES, EDQNM anisotrope multi-modal et sa limite asymptotique de turbulence d’ondes, cf. chapitre 4 du livre Sagaut & Cambon, CUP, 2008).

6 Turbulence anisotrope en présence de stratification stable, par Fabien Godefert (LMFA)

Un écoulement soumis à un gradient vertical stabilisant de densité ou de température supporte la propagation d’ondes internes de gravité, dont la relation de dispersion est anisotrope. C’est à dire que l’orientation de propagation dépend de la fréquence de l’onde. Ce mode d’échange d’énergie s’ajoute au mode de vorticité verticale dans une décomposition du champ de vitesse de type poloïdale/toroïdale (aussi connue sous le nom de décomposition de Craya-Herring). Cette décomposition s’avère très utile pour interpréter la structuration de la turbulence stablement stratifiée, puisqu’elle permet d’identifier la dynamique triadique qui est responsable de la structuration en feuillets horizontaux. Il s’agit des échanges triadiques toroïdaux, les transferts d’énergie entre modes ondes participant uniquement au mélange de phase (“phase-scrambling”). Ce mécanisme, pourtant valable uniquement pour la turbulence initialement isotrope en décroissance libre soumise brutalement à la stratification, aboutit à une longueur caractéristique des structures verticalement aplaties de l’écoulement qui est du même ordre de grandeur que celle observée dans des contextes très différents : instabilité zig-zag de paires de tourbillons en milieu stratifié (Billant & Chomaz), turbulence forcée (Lindborg & Bretouwer). La décomposition ondes/vortex permet cependant de proposer un modèle simplifié, pour la turbulence stratifiée, à base de modes toroïdaux uniquement.

7 Experimental study of forced stratified turbulence, Pierre Augier

P. Augier, P. Billant, E. Negretti and J.-M. Chomaz (LadHyX)

Recent results show that strongly stratified turbulence has a three dimensional dynamic instead of a quasi-two dimensional dynamic conjectured previously. A direct cascade associated with a $k^{-5/3}$ horizontal kinetic energy spectrum has been predicted when the buoyancy Reynolds number is sufficiently large [Lindborg, 2006].

In order to check this hypothesis, we investigate experimentally forced stratified turbulence. The flow is generated by 12 vortex generators (flaps) placed on the side of a large stratified tank. Each generator produces periodically and independently a counter-rotating vertical columnar vortex pair which propagates toward the central part of the tank. The interaction of the randomly produced vortex pairs give rise to a statistically stationary turbulent flow with a low Froude number and a buoyancy Reynolds number \mathcal{R}^t of order unity.

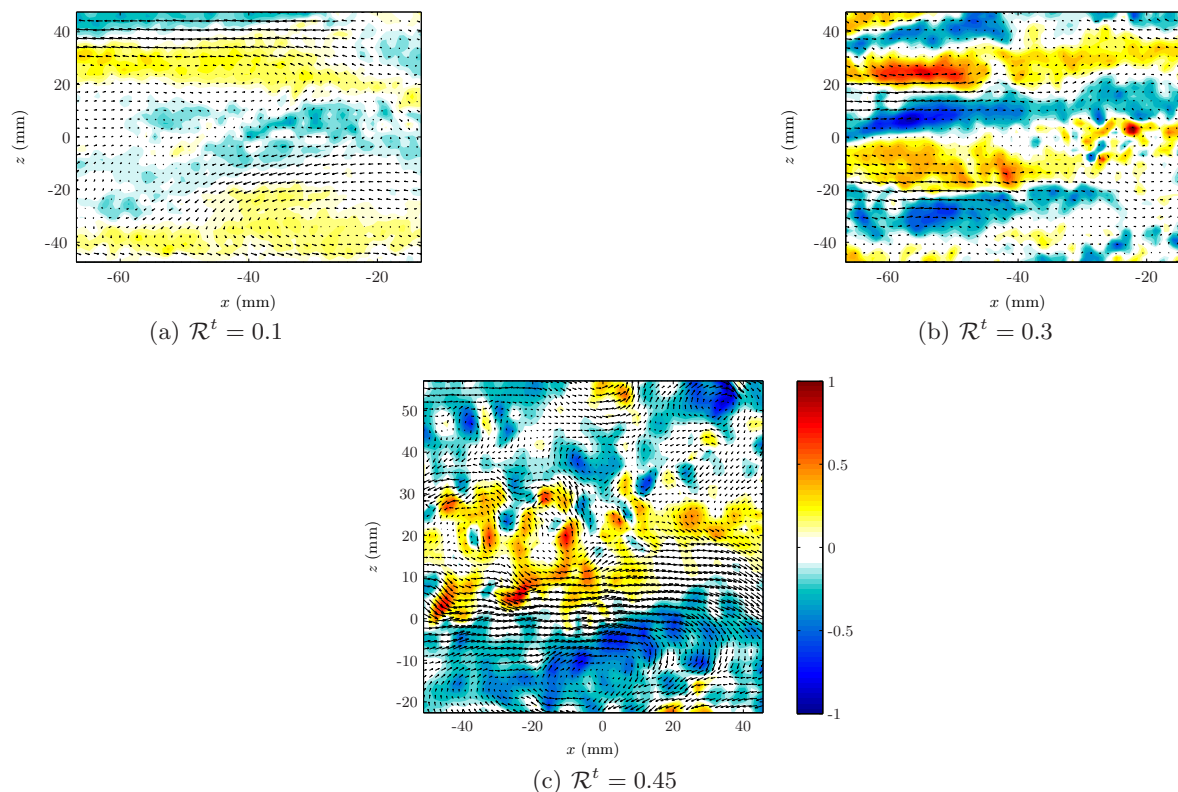


Fig. 2. Vertical cross-sections of the velocity field for three different rotation rates. Background colours represent horizontal vorticity perpendicular to the cross-section normalised by the Brunt-Väisälä frequency.

PIV measurements in vertical cross-sections show that the flow organises itself into horizontal layers via the zigzag instability [Billant & Chomaz, 2000]. This process finally leads to overturning and transfers towards small scales (fig. 2).

Horizontal velocity spectra obtained by PIV measurements in horizontal cross-sections exhibits a narrow inertial domain in agreement with the DNS of forced stratified turbulence performed by Brethouwer *et al.* (2007) for buoyancy Reynolds number larger than unity.

8 Symmetry-breaking susceptibility and fluctuations crisis of a turbulent closed flow around $Re = 10^5$, Pierre-Philippe Cortet (FAST)

Using stereoscopic particle image velocimetry, we experimentally study the susceptibility to symmetry breaking of a turbulent von Kármán swirling flow from $Re = 150$ to $Re \simeq 10^6$. The susceptibility of the mean flow is shown to increase from 1 to 45 as transition to turbulence proceeds from the laminar flow to the highly turbulent flow. We report a peak of the susceptibility to symmetry breaking reaching 200 at an intermediate Reynolds number $Re = Re_\chi = 90\,000 \pm 10\,000$. This peak is associated with large fluctuations of the instantaneous flow symmetry which correspond to intermittencies between several metastable states. These states break spontaneously the symmetry of the forcing while the very long time-averaged mean flow respects the forcing symmetry.

9 Bifurcations turbulentes et changements de topologie de l'écoulement moyen, par Arnaud Chiffaudel (CEA Saclay)

Nous présentons l'écoulement de von Karman turbulent entraîné inertiuellement, dans un cylindre, par des turbines à pales courbes. Le nombre de Reynolds, au moyen de mélanges eau-glycérol en proportion variable, est piloté entre 100 et 10^6 .

Nous observons des bifurcations, dites turbulentes, qui transforment l'écoulement moyen, c'est-à-dire modifient sa symétrie et/ou sa topologie. [Voir présentation précédente de P-P Cortet et Ravelet et al. PRL 93, 164501 (2004)]

Les deux paramètres de contrôle sont le nombre de Reynolds et la dissymétrie de l'entraînement $\theta = (F_1 - F_2)/(F_1 + F_2)$. Si $\theta = 0$, le système expérimental est symétrique par retournement \mathcal{R}_π "comme un sablier". Le groupe de symétrie est $O(2)$. Sinon seul le groupe des rotations $SO(2)$ est conservé. L'écoulement, quant à lui, peut perdre la symétrie \mathcal{R}_π soit spontanément à $\theta = 0$ soit sous l'effet de θ . Selon les cas, il effectue une brisure "faible" de la symétrie $O(2)$, en conservant la topologie de l'écoulement symétrique : deux cellules de recirculation méridienne séparées par une couche de cisaillement, qui est alors décalée par rapport au plan équatorial à mi-chemin des deux turbines. On peut dans ce cas qualifier la symétrie du problème de $O(2)$ "perturbée" avec topologie inchangée. Dans d'autres cas, et en tout cas pour de plus grandes valeurs de la dissymétrie du système ($|\theta| > 0.1$), $O(2)$ est totalement brisée et la topologie change pour ne plus laisser qu'une cellule de recirculation méridienne orientée vers, en général, la turbine la plus rapide.

Nous observons donc trois catégories de transition/bifurcation :

- celles qui brisent la symétrie $O(2)$ (faiblement) sans modifier la topologie (2 cellules),
- celles qui "achèvent" de briser la symétrie "O(2) perturbée" et changent la topologie (2 cellules \rightarrow 1 cellule).
- celles qui à la fois brisent la symétrie et changent la topologie (2 cellules \rightarrow 1 cellule),

Ce résultat élargit le cadre par rapport aux bifurcations classiques (dans des systèmes où les fluctuations certes existent mais sont de faible amplitude par rapport à la structure moyenne) : pour les bifurcations de la structure moyenne d'un système très fluctuant, il apparaît nécessaire de considérer autant les brisures de topologie que les brisures de symétrie.