

GDR Structure de la turbulence et mélange

École Centrale de Lyon, 5-6 avril 2005

Compte-rendu du thème 2 **Turbulence couplée avec effets d'ondes**

Thierry Alboussière

Claude Cambon a été l'animateur de ce thème et a présenté un exposé introductif.

Il se place dans le cadre de la turbulence statistiquement homogène et anisotrope. Son analyse porte sur la décomposition des écoulements en modes propres ondes/vortex et peut s'appliquer aux écoulements en rotation, stratifiés, MHD, etc, qui sont le siège d'ondes inertielles, de gravité, d'Alfvén. Elle a aussi été appliquée à des écoulements moyens non homogènes, tels qu'un gradient de vitesse moyenne.

Les interactions non linéaires entre modes se concentrent sur des ondes dites résonnantes, dont les taux de croissance vérifient $\sigma(k) + \sigma(p) + \sigma(q) = 0$ où les vecteurs d'ondes satisfont à l'égalité $k + p + q = 0$. De ce fait, la turbulence d'onde est un objet d'étude privilégié pour les méthodes de fermeture statistique en deux points tels que EDQNM.

Claude Cambon considère ensuite les propriétés Lagrangiennes de dispersion des particules, liées aux corrélations en deux temps des fluctuations de vitesses (Taylor 1921, Kaneda 2000). En faisant l'hypothèse de l'identification de la corrélation Eulérienne et Lagrangienne, on peut montrer que la capacité d'un écoulement à capturer des particules dépend de la loi de dispersion des ondes : la dispersion turbulente est liée à la dispersion des ondes. La relation de dispersion des ondes conditionne également l'aspect de la turbulence, qui fait qu'en présence de rotation elle s'organise en "cigares" et qu'en présence de stratification, elle s'organise en "galettes".

Les triades résonnantes mentionnées ci-dessus sont capables d'engendrer des cascades angulaires d'énergie dans l'espace spectral, qui font que pour la turbulence en rotation les vecteurs d'ondes parallèles à la direction de rotation sont dépeuplés alors qu'en turbulence stratifiée les vecteurs d'ondes perpendiculaires à la gravité sont dépeuplés. Claude Cambon rappelle brièvement les bases des modèles EDQNM qui reposent essentiellement sur une fermeture des corrélations quadruples des fluctuations de vitesses qui sont exprimées à l'aide des corrélations doubles par la relation exacte des distributions normales. L'EDQNM rend compte de la cascade angulaire de l'énergie et dans une forme anisotrope asymptotique peut conduire à des spectres de la forme $E(k_{\parallel}, k_{\perp}) \sim k_{\parallel}^{-1/2} k_{\perp}^{-7/2}$ (Galtier, 2003), qui moyennés angulairement produisent $E(k) \sim k^{-3}$, sans qu'il s'agisse de turbulence bidimensionnelle ($k_{\parallel} = 0$).

De plus, l'EDQNM rend compte non seulement de la directivité des vecteurs d'ondes mais

également de la polarisation des ondes et produit une dissymétrie cyclones/anticyclones en fluides tournants.

En conclusion, Claude Cambon mentionne la complémentarité de la DNS (maintenant capable d'aborder des régimes asymptotiques) et les méthodes analytiques du types EDQNM (qui nécessitent un fort investissement numérique dans leur mise en œuvre). Enfin, il engage une discussion sous forme de polémique humoristique entre les descriptions statistiques des structures de la turbulence et les arguments de stabilité des dites structures, qu'il estime trop "molles", pas assez rigoureusement définies, pour subir une étude de stabilité.

Olivier Praud présente une expérience de turbulence en fluide stratifié (eau salée) en référentiel tournant effectuée sur la plaque CORIOLIS. La turbulence est engendrée par un peigne de barreaux verticaux, l'objectif étant de créer des mouvements surtout horizontaux et de ne pas introduire d'échelle verticale, afin précisément de mesurer le développement des échelles verticales dans cette turbulence.

À l'aval du peigne, une méthode de PIV permet de visualiser les écoulements dans une zone horizontale 3m x 3m, dont la profondeur est variée successivement (de la surface au fond, à 50 cm). Avec stratification et sans rotation, des mouvements quasi-horizontaux se développent, des appariements de structures se forment et les échelles horizontales grandissent jusqu'à occuper tout le champ de visualisation. Les isovaleurs de la vorticité verticales montrent de belles "galettes", et pas de corrélation verticale. Sa distribution est quasiment Gaussienne.

En décomposant la vitesse selon des modes vortex et ondes de gravité, il est montré que l'énergie cinétique est essentiellement due aux modes vortex et ce de plus en plus à mesure que la turbulence décline. Le déclin de l'énergie cinétique est indépendant du nombre de Reynolds et du nombre de Froude. La dissipation s'effectue par les gradients verticaux des vitesses horizontales et l'on observe une croissance visqueuse de l'échelle verticale (Godoy-Diana et al. JFM 2004).

Avec stratification et rotation, les galettes deviennent des cigares et le taux de décroissance de l'énergie cinétique diminue fortement lorsque le nombre de Rossby diminue. L'évolution des échelles horizontales n'est pas affectée par la rotation.

Enfin, la rotation introduit une dissymétrie cyclones/anticyclones visible sur les pdf de vorticité verticale. On voit apparaître une distribution plus probable de forts cyclones par rapport aux anticyclones mais cette tendance s'estompe pour les plus petits nombres de Rossby.

Cyprien Morize intervient ensuite pour présenter deux expériences de turbulence en rotation, l'une effectuée au FAST dans une cuve tournante équipée d'une grille oscillante, l'autre sur la plaque CORIOLIS. L'énergie cinétique décroît plus rapidement lorsque le pompage d'Ekman se met à agir. C'est la raison pour laquelle des expériences complémentaires ont été conduites à CORIOLIS pour éviter le confinement. Une turbulence de grille 3D est organisée

pour voir comment elle évolue en présence de rotation. Sur CORIOLIS, le temps de déclin est d'environ 3 heures et une caméra 2000 x 2000 pixels permet de visualiser l'écoulement.

On observe que les structures grandissent et que les anticyclones sont détruits préférentiellement pour laisser place à de gros cyclones. Ceci se traduit par une dissymétrie de la pdf de la composante de la vorticité alignée avec l'axe de rotation. Le facteur de squewness croît dans le temps mais le pompage d'Ekman l'empêche de dépasser 3.

Le taux de déclin de l'énergie de cette turbulence 3d devient plus faible à mesure que la rotation imposée est plus forte.

Yannick Cuypers expose ses travaux sur les ondes de gravité internes et la turbulence dans le lac du Bourget (18 km de long). Le profil vertical de température est constitué de l'hypolimnion froid en profondeur, de l'épilimnion en surface, séparés par la zone thermocline. Une chaîne de thermistances à différentes profondeurs permet d'observer le passage des ondes internes.

L'analyse des séries temporelles révèle une période de résonance proche de 24h, qui est la période propre d'oscillation des ondes internes dans le lac (une discussion a permis de s'assurer que cette période n'était en rien liée à la durée du jour). On voit également l'interaction avec la topographie en considérant des sondes disposés en diverses parties plus ou moins profondes du lac. L'évolution non-linéaire des ondes, le développement de fronts d'onde et de solitons est également mis en évidence. Le développement de fronts internes et de "déferlement" est associé au mélange des diverses couches d'eau du lac, ce qui a de forte conséquence sur son équilibre écologique.

Les ondes et leur développement non-linéaire sont modélisées par une équation de type KdV qui permet par exemple de suivre la propagation de fronts d'ondes.

Les perspectives envisagées sont de caractériser mieux la zone de déferlement et le mélange associé, notamment par la méthode SCAMP, appareil qui permet de mesurer la turbulence à petite échelle (acquisition rapide des fluctuations de température). L'influence de l'accélération de Coriolis sera estimée et éventuellement prise en compte dans la modélisation.

Thierry Alboussière fait une présentation des recherches de l'équipe "géodynamo" du LGIT de Grenoble qui relèvent de la turbulence dans le noyau liquide de la Terre, du fer liquide pour l'essentiel. La rotation de la planète est très forte par rapport aux faibles vitesses dans le noyau (de l'ordre de 10^{-4} m/s) et le nombre de Rossby est de l'ordre de 10^{-6} . Outre la rotation, le champ magnétique maintenu par effet dynamo affecte également la turbulence.

La turbulence pariétale à la limite noyau/manteau est en partie responsable du couplage entre noyau et manteau révélé par les mesures géodétiques de nutation de la Terre. Cette frontière abrite une couche limite de Hartmann/Ekman.

À une échelle plus globale, la turbulence pourrait être fortement dominée par la rotation jusqu'à être quasi-géostrophique. Une expérience de formation d'une colonne de Taylor a été étudiée pour observer comment les sondes inertielles mettent en place la géostrophie. En particulier, le temps de mise en place de la géostrophie est inversement proportionnel au diamètre de la colonne. Ce qui place une contrainte forte pour l'existence de la turbulence quasi-géostrophique à petite échelle si leur temps de retournement doit rester court par rapport à leur temps de mise en géostrophie.

Il est à noter que même en adoptant un modèle quasi-géostrophique, la turbulence qui en résulte est encore dominée par des ondes, les ondes de Rossby dues à la forme sphérique du noyau liquide. La turbulence (en plan bêta) est une turbulence 2D anisotrope (Nathanaël Schaeffer et Philippe Cardin, 2005).

Enfin, la dynamique du noyau pourrait être affectée fortement par les ondes de torsion, un exemple d'onde d'Alfvén. Les cylindres géostrophiques du noyau seraient couplés entre eux par le champ magnétique radial (en coordonnées cylindrique).

Guillevic Lamaison présente ses travaux numériques sur les fermetures en 2 points et la prédiction du bruit aérodynamique. Il passe en revue les différentes méthodes utilisées pour calculer le bruit. Les méthodes directes (DNS ou LES) s'attaquent au problème couplé aérodynamique et acoustique en résolvant simultanément l'ensemble des interactions. Leur coût de calcul constitue un inconvénient majeur. Les méthodes hybrides partent d'un champ de vitesse stationnaire ou instationnaire à partir desquels les termes source de bruits sont calculés après quoi le rayonnement acoustique est calculé.

En conditions isothermes, les termes sources ne dépendent que du champ de vitesse fluctuante. La méthode utilisée est celle des modes de Fourier aléatoires (utilisée par Kraichnan 1970, pour la diffusion turbulente). Si le champ de vitesse moyen est calculé par une fermeture en un point, par exemple k , ϵ , on reconstruit un spectre synthétique à partir de ces valeurs de k et ϵ . Ce spectre est discrétisé et le champ turbulent reconstruit en affectant à chaque mode l'amplitude correspondante du spectre. De plus une pulsation est attribuée à chaque mode par un tirage aléatoire. Les sources des ondes acoustiques sont ensuite calculées (avec un succès mitigé) et le rayonnement acoustique calculé.

Guillevic Lamaison tente d'améliorer la méthode des modes de Fourier aléatoires en partant de résultats de fermetures en deux points pour obtenir une détermination plus correcte des sources acoustiques.

Sébastien Galtier clôt le thème 2 en parlant d'écoulements en rotation rapide et d'écoulements EMHD (Electron Magnétohydrodynamique) pour les applications astrophysiques. Ces deux situations présentent des analogies fortes.

Pour la turbulence en rotation, le nombre de Rossby mesure le rapport entre le temps de retournement des grands tourbillons et le temps d'une révolution. Asymptotiquement, le

spectre classique en $k^{-5/3}$ est retrouvé pour les grands nombres de Rossby et un spectre en $k_{\perp}^{-5/2} k_{\parallel}^{-1/2}$ pour les petits nombres de Rossby (turbulence d'ondes).

Même si la turbulence semble devenir proche de la bidimensionalité, il est important de garder une bonne résolution numérique dans la direction de la rotation, sans quoi les interactions résonnantes sont mal représentées et le spectre énergétique résultant s'en trouve faussé.

En conclusion, Sébastien Galtier insiste sur l'effet de moyenne (angulaire) sur les spectres qui masque des différences de comportement selon les directions considérées. Il indique aussi l'intérêt d'exploiter les lois de décroissance énergétiques en turbulence d'onde.