

Evolution de la turbulence vers un régime quasi-bidimensionnel en fluide stratifié et tournant

Olivier Praud, Joël Sommeria et Adam Fincham

Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) CNRS-UJF-INPG

BP 53, 38041 Grenoble cedex9, France

<http://www.legi.grenoble-inp.fr/web/spip.php?rubrique188>

La turbulence des fluides géophysiques comme l'air et l'eau est influencée par la gravité et par la force de Coriolis. La densité du fluide diminuant avec l'altitude, ce que l'on dénomme *stratification*, la gravité tend à confiner l'écoulement en galettes horizontales. Au contraire la force de Coriolis tend à structurer les écoulements en colonnes alignées selon l'axe de rotation. Alors que, dans l'atmosphère et dans les océans, l'influence de la force de Coriolis ne devient significative qu'à des grandes échelles, la plaque tournante du LEGI, connue sous le nom de *plate-forme Coriolis*, permet de l'observer dans des bassins d'eau de dimension modérée (quelques mètres). Cette plaque permet de faire varier les paramètres caractérisant respectivement les effets de gravité et de Coriolis, le nombre de Froude et le nombre de Rossby. Elle permet de mesurer avec précision le champ de vitesse turbulent, de déceler les influences spécifiques de ces deux effets, et de mettre en évidence à partir de quelles conditions la force de Coriolis devient prépondérante.

La plaque Coriolis est un gros équipement de 13 mètres de diamètre, pesant 300 tonnes, porté sur un rail circulaire par un ensemble de galets, dont certains comportent les moteurs électriques qui peuvent la mettre en rotation. Sa vitesse angulaire peut atteindre 2 tours par minute, alors que celle de la Terre est de 1 tour par jour. En conséquence, le nombre de Rossby d'un écoulement dont les échelles de longueur et de vitesse sont voisines, respectivement, du mètre et du centimètre par seconde, peut être inférieur à 10^{-1} , ce qui signifie que la force de Coriolis peut être 10 fois plus grande que les forces d'inertie.

Sur cette plaque, un bassin rectangulaire de 8 x 4 m est rempli d'eau sur une profondeur de 0,9 m (voir Figure 1).

Cette eau est maintenue à température constante à mieux de 1°C près. Sa stratification en densité est réalisée par ajout de sel marin et régulièrement contrôlée grâce à des mesures de conductivité électrique. La stratification ainsi créée peut persister plusieurs jours sans mélange significatif. Le fluide estensemencé de petites particules pour visualiser l'écoulement. La turbulence est engendrée en tractant d'un bout à l'autre du bassin, à une vitesse réglable entre 0,5 et 8 cm s⁻¹, un chariot portant une sorte de râteau dont les dents sont des plaques planes de 10 cm de large, espacées de 45 cm. L'intérêt de ces dents planes, par rapport à des tiges circulaires, tient au fait que le point de décollement de la couche limite qui se développe sur chacune est fixé sur les bords anguleux, ce qui minimise les perturbations initiales tridimensionnelles. Une mince tranche horizontale est éclairée par un faisceau laser, de sorte que les images des particules entraînées par le mouvement turbulent dans cette tranche peuvent être filmées par une caméra représentée sur la figure 1. Cette tranche est de plus balayée verticalement pour obtenir des champs de vitesse dans un volume 2,48 x 2,48 x 0,60 m. Le traitement numérique des déplacements de ces particules conduit aux composantes de vitesse instantanées et à leurs dérivées avec une précision suffisante pour permettre d'en déduire le déclin de l'énergie cinétique turbulente en fonction du temps et pour caractériser la distribution de la vorticité instantanée dans le plan horizontal.

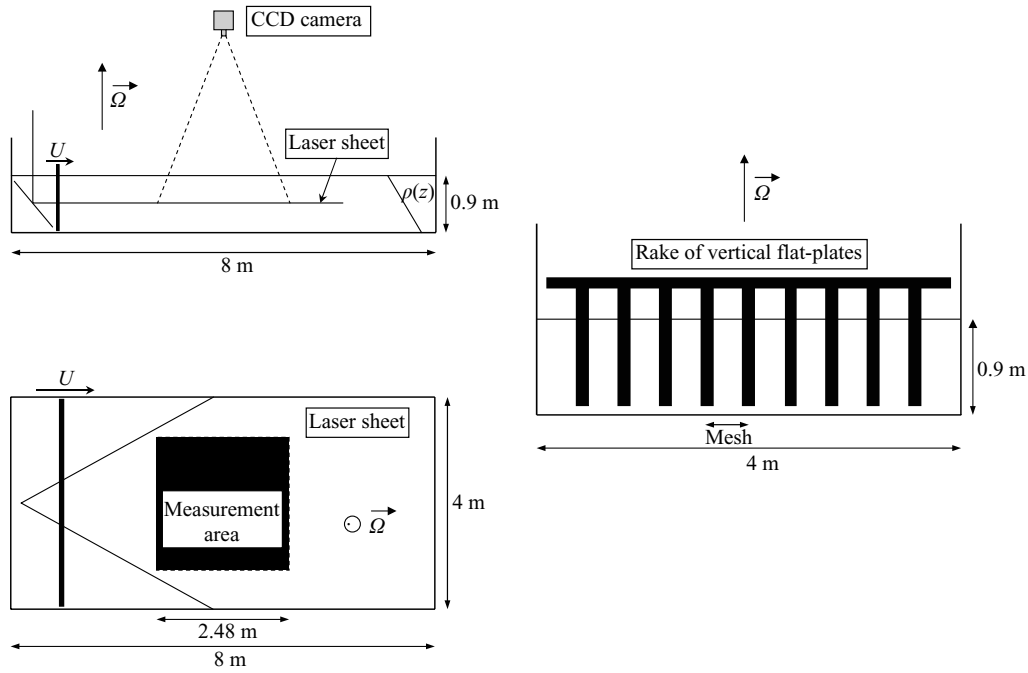


Figure 1. Représentation schématique du dispositif expérimental : (a) vue de côté montrant les positions du faisceau laser et de la caméra, et la distribution linéaire de la masse volumique $\rho(z)$, (b) vue de dessus mettant en évidence l'aire observée (2,48 x 2,48 m), (c) vue de face du râseau générateur de la turbulence.

Les principaux paramètres adimensionnels de chaque expérience, le nombre de Rossby Ro_M et le nombre de Froude Fr_M , sont définis à partir de la vitesse du râseau U , de sa maille $M = 0,45\text{m}$, du paramètre de Coriolis $f = 2\Omega$, où Ω désigne la vitesse angulaire de la plaque tournante, et de la

fréquence de Brunt-Väisälä $N = \left(\frac{g}{\rho_0} \left| \frac{\partial \rho}{\partial z} \right| \right)^{\frac{1}{2}}$, par les relations

$$Ro_M = \frac{U}{Mf}, \quad Fr_M = \frac{U}{MN}.$$

On pourra remarquer que la fréquence de Brunt-Väisälä n'est autre que l'inverse de l'échelle de temps caractéristique de la stratification et que M/U est le temps de retournement des tourbillons engendrés par le mouvement du râseau. En conséquence, le nombre de Rossby représente le rapport entre la durée d'un tour complet du référentiel (la plaque Coriolis) et le temps de retournement M/U , et le nombre de Froude représente le rapport entre le temps de stratification $1/N$ et ce même temps de retournement.

L'influence des paramètres Ro_M et Fr_M est mise en évidence sur la figure 2.

Celle-ci montre, en coordonnées logarithmiques, l'évolution de l'énergie cinétique turbulente, rendue adimensionnelle en la rapportant à celle engendrée par le râseau, en fonction du temps, lui aussi rendu adimensionnel en le rapportant au temps M/U . En l'absence de rotation ($f = 0$), la stratification maintient déjà les mouvements turbulents dans le plan horizontal, mais les tourbillons se comportent comme des sortes de disques plats qui glissent aisément les uns par rapport aux autres. Cette turbulence est donc encore tridimensionnelle (3D) et son énergie suit une loi de dissipation classique proche de $1/t$. Par contre, en présence d'une force de Coriolis suffisante ($Ro_M = 0,14$; courbes du haut sur la figure 2), la dissipation est presque annulée pendant la durée d'observation. Un régime intermédiaire, où les dynamiques 2D et 3D coexistent, est observé lorsque

$Ro_M = 0,56$. La prépondérance de la force de Coriolis par rapport aux autres forces d'inertie requiert en effet que $Ro \ll 1$.

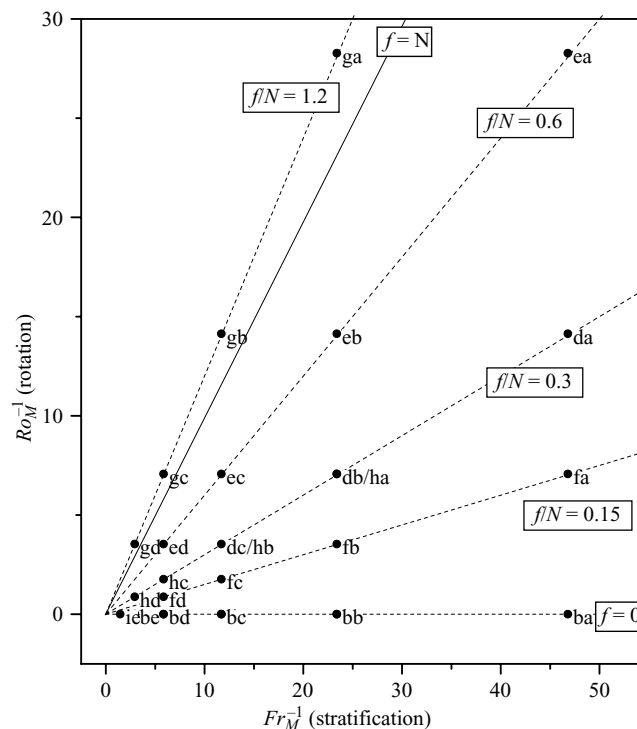


Figure 2. Evolution en fonction du temps de l'énergie cinétique turbulente pour diverses valeurs des paramètres caractéristiques de la stratification (Fr_M) et de la rotation (Ro_M et f).

Dans tous les cas, le nombre de Reynolds est identique ($\frac{UM}{\nu} = 9000$).

Ces résultats peuvent être interprétés de la manière suivante. Lorsque la force de Coriolis est prépondérante, les ondes inertielles décrites au Chapitre 2 (encart E2.5) du [livre](#) structurent ces tourbillons en colonnes et rendent la turbulence réellement bidimensionnelle (2D). Comme expliqué dans l'Annexe (§ 5.2 et 5.3) du [livre](#), la cascade d'énergie est alors inversée, et la dissipation par les très petits tourbillons est pratiquement supprimée. C'est au bout d'une durée plus longue, lorsque la cascade inverse a transporté l'énergie cinétique vers des structures de dimensions voisines de celle du bassin, que l'énergie cinétique turbulente peut être dissipée, dans les couches limites présentes sur les parois du bassin. Dans l'Annexe, la figure A.13, extraite de la vidéo « [Structure en colonnes de tourbillons](#) » présentée sur ce site met en évidence ces structures colonnaires remarquablement alignées dans la direction verticale.

La dynamique turbulente mesurée dans ces expériences est révélatrice des comportements observables dans l'atmosphère et dans les océans, où rotation et stratification sont présentes. Il apparaît que, à vitesse et à rotation données, la tendance à la bidimensionnalité n'intervient qu'au-delà de certaines échelles de longueur. Dans les expériences présentées ici, la maille M doit donc être suffisante ; c'est le cas avec 45 cm. Dans le cas d'une dépression atmosphérique, cette taille minimale est de l'ordre de 500 km. Dans l'océan, dont les écoulements sont 100 fois plus lents, cette échelle est de l'ordre de 10 km.

Référence

Praud O., Sommeria J. & Fincham A., Decaying grid turbulence in a rotating stratified fluid, *J. Fluid Mech.*, (2006), vol. 547, pp. 389-412