



HAL
open science

Zone de transition vers les vagues irrégulières dans une cavité barocline

Anthony Randriamampianina, Peter L. Read, Wolf-Gerrit Früh, Robin Wordsworth

► **To cite this version:**

Anthony Randriamampianina, Peter L. Read, Wolf-Gerrit Früh, Robin Wordsworth. Zone de transition vers les vagues irrégulières dans une cavité barocline. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. <hal-03391397>

HAL Id: hal-03391397

<https://hal.science/hal-03391397v1>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Zone de transition vers la turbulence géostrophique dans une cavité barocline

A. RANDRIAMAMPINANINA^a, P. L. READ^b, W.-G. FRÜH^c, R. WORDSWORTH^b

a. Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Procédés Propres (M2P2), UMR 6181 CNRS, Technopôle de Château-Gombert, 38, rue F. Joliot-Curie, 13451 MARSEILLE cedex 13

b. Atmospheric, Oceanic and Planetary Physics (AOPP), University of Oxford, Clarendon Laboratory, OXFORD OX1 3PU (UK)

c. School of Engineering and Physical Sciences (SEPS), Heriot Watt University, Riccarton, EDINBURGH EH14 4AS (UK)

Résumé :

Une simulation numérique directe est associée à une expérience pour décrire la zone de transition vers la turbulence géostrophique dans une cavité barocline remplie d'un mélange liquide. Contrairement à une étude précédente utilisant de l'air (Read et al. (2008)), la dynamique de la vacillation structurelle obtenue est principalement gouvernée par les ondes d'inertie-gravité. Ces dernières sont générées spontanément à travers une instabilité de couche limite thermique résultant d'une stratification plus importante due à une valeur plus grande du nombre de Prandtl.

Abstract :

Direct numerical simulation is combined with laboratory experiments to describe the transition zone within a liquid-filled baroclinic cavity. Unlike a previous study using air as working fluid (Read et al. (2008)), the dynamics of the observed structural vacillation is mainly governed by inertia-gravity waves developing on top of large-scale baroclinic instabilities. The mechanism responsible for the spontaneous generation of these inertia-gravity waves was found to stem from a thermal boundary layer instability, inferred from the large value of the Prandtl number inducing a stronger thermal stratification.

Mots clefs : Vacillation structurelle, ondes d'inertie-gravité, instabilités baroclines, simulation numérique directe, turbulence géostrophique

1 Introduction

Les ondes d'inertie-gravité sont omniprésentes dans l'atmosphère et les océans et jouent un rôle fondamental dans une large variété de procédés. Diverses études observationnelles et théoriques ont mentionné le transfert d'une partie significative d'énergie et de quantité de mouvement, l'initiation et la modulation de la turbulence, la modification de la circulation moyenne et de la structure thermique (Fritts & Alexander (2003)). D'un autre côté les instabilités baroclines sont reconnues pour être un des procédés énergétiques dominant les circulations atmosphériques et océaniques à grande échelle (Pierrehumbert & Swanson (1995)). Les instabilités baroclines sont également sources d'ondes de gravité (Plougonven *et al.* (2005), Plougonven & Snyder (2006)). Ainsi une meilleure compréhension des comportements chaotiques de ces mouvements revêt une grande importance pour la prédictabilité des systèmes climatiques. La zone de transition vers les vagues irrégulières demeure peu comprise bien qu'il soit admis qu'elle résulte de la destruction progressive de l'écoulement à grande échelle par des fluctuations intervenant à travers divers mécanismes comme la croissance de modes radiaux supérieurs, les instabilités barotropes, ou les instabilités secondaires de petite échelle (Read (2001)). Dans le cas présent, ces dernières ont été identifiées comme des ondes d'inertie-gravité. Cependant, les principales questions concernent leurs interactions avec les instabilités baroclines lors du développement de chaos spatio-temporels, ainsi que les variabilités de leurs caractéristiques au cours du temps.

2 La cavité barocline et l'approche numérique

Le modèle physique correspond au dispositif expérimental utilisé à l'université d'Oxford (Wordsworth (2009)). Il consiste en un domaine annulaire tournant en bloc autour de son axe de symétrie vertical, soumis à un gradient thermique horizontal et fermé par deux parois adiabatiques, "la cavité barocline". La géométrie est définie par un paramètre de forme $A = d/(b-a) = 2,476$ et un paramètre de courbure $R_c = (a+b)/(b-a) = 1,857$, avec $a = 4,5\text{cm}$ et $b = 15\text{cm}$ les rayons interne et externe et $d = 26\text{cm}$ la hauteur. Elle est remplie d'un mélange liquide eau-glycerol caractérisé par un nombre de Prandtl $Pr = 16$. Dans la présente étude, nous nous

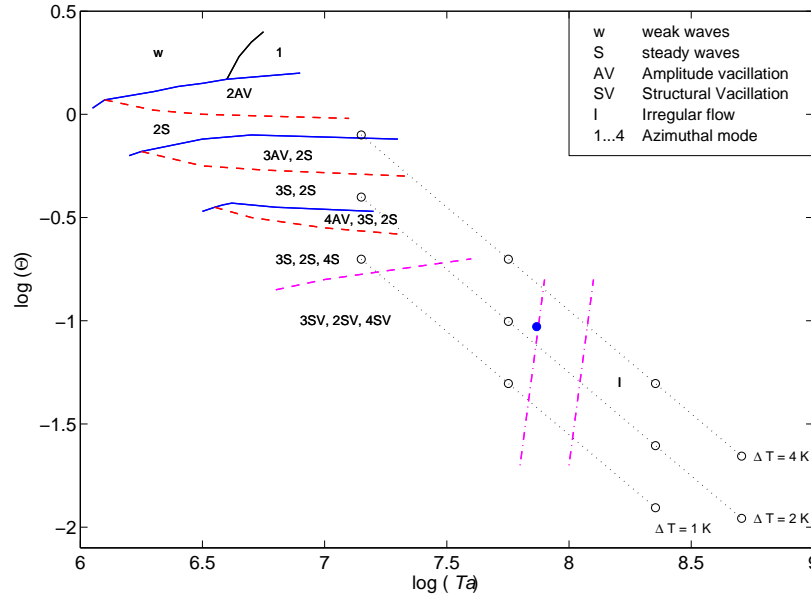


FIG. 1 – Diagramme de régimes établi à partir de mesures expérimentales (Wordsworth (2009)). Les lignes en diagonale correspondent aux valeurs obtenues en faisant varier le taux de rotation pour un écart de température fixé ΔT (ici 1K, 2K et 4K). Les lignes continues (en bleu) indiquent la transition entre deux régimes ayant des modes azimutaux dominants différents, tandis que les traits discontinus (en rouge) délimitent la transition entre deux types de dépendance temporelle (régime permanent S , vacillation d’amplitude AV , vacillation structurelle SV , irrégulier I : pour les définitions voir Randriamampianina *et al.* (2006))

sommes intéressés à une différence de température entre les deux cylindres fixée à $\Delta T = T_b - T_a = 2K$, donnant une valeur du nombre de Rayleigh $Ra = g\alpha\Delta T(b-a)^3/\nu\kappa = 2,77 \times 10^7$. Dans le dispositif expérimental, le rayon extérieur est légèrement différent de la valeur mentionnée et correspond à $b_{exp} = 14,3cm$, ce qui modifie également la valeur du nombre de Rayleigh.

La simulation est réalisée avec un code pseudospectral associant des développements en polynômes de Chebyshev dans le plan méridien (r, z) et en séries de Fourier dans la direction azimutale avec un schéma temporel semi-implicite d’ordre 2. Le code résout les équations de Navier-Stokes couplées à celle de la température via l’approximation de Boussinesq dans un référentiel relatif tournant avec la cavité (Randriamampianina *et al.* (2006)). Les techniques de mesure et de visualisation ainsi que les détails du dispositif expérimental sont donnés dans Wordsworth (2009).

3 Caractéristiques de la vacillation structurelle

Pour un fluide donné dans une géométrie fixe, les régimes d’écoulement sont déterminés par deux paramètres principaux (Fowles & Hide (1965)) : le nombre de Taylor $Ta = 4\Omega^2(b-a)^5/\nu^2d$ et le nombre de Rossby thermique ou de Hide $\Theta = g\alpha\Delta T/\Omega^2(b-a)^2$. Nous avons reporté sur la figure 1 un diagramme de régimes établi à partir des données expérimentales dans le plan (Θ, Ta) . Pour la simulation numérique nous avons considéré une vitesse de rotation $\Omega = 1,25rd/s$ alors que pour l’expérience $\Omega = 1,3rd/s$. Nous pouvons vérifier sur le diagramme de régimes établi expérimentalement (Wordsworth *et al.* (2008), Wordsworth (2009)) que les valeurs correspondantes des paramètres de contrôle, ($\log(Ta) = 7,87, \log(\Theta) = -1,029$ pour la simulation, marquée par un rond plein sur la figure 1, et $\log(Ta) = 7,75, \log(\Theta) = -1,003$ pour l’expérience, marquée par un rond avec $\Delta T = 2K$ sur la figure 1) conduisent au même régime caractérisé par une vacillation de structure SV . Le léger écartement par rapport à la ligne $\Delta T = 2K$ obtenue expérimentalement provient de la différence entre les valeurs du rayon externe. Cependant on peut noter que le point correspondant à la simulation dans le diagramme de régimes est très proche de la zone de transition délimitée par les deux traits discontinus rapportés par l’expérience. Sur une coupe de la structure d’écoulement à mi-hauteur de la cavité, l’expérience montre une structure avec quatre vagues, caractérisée par un nombre d’onde azimutal dominant $m = 4$, tandis qu’on obtient trois vagues avec la simulation (Figure 2), à cause du phénomène d’intransitivité inhérent aux systèmes en rotation. Cependant la simulation indique que la solution à trois vagues $3SV$ possède la plus grande probabilité de persister. Bien que l’écoulement ne corresponde pas à un régime turbulent pleinement développé, il présente un comportement chaotique caractérisé par la dissymétrie des cellules principales due à la présence de petites fluctuations, qui vont détruire progressivement la régularité de ces

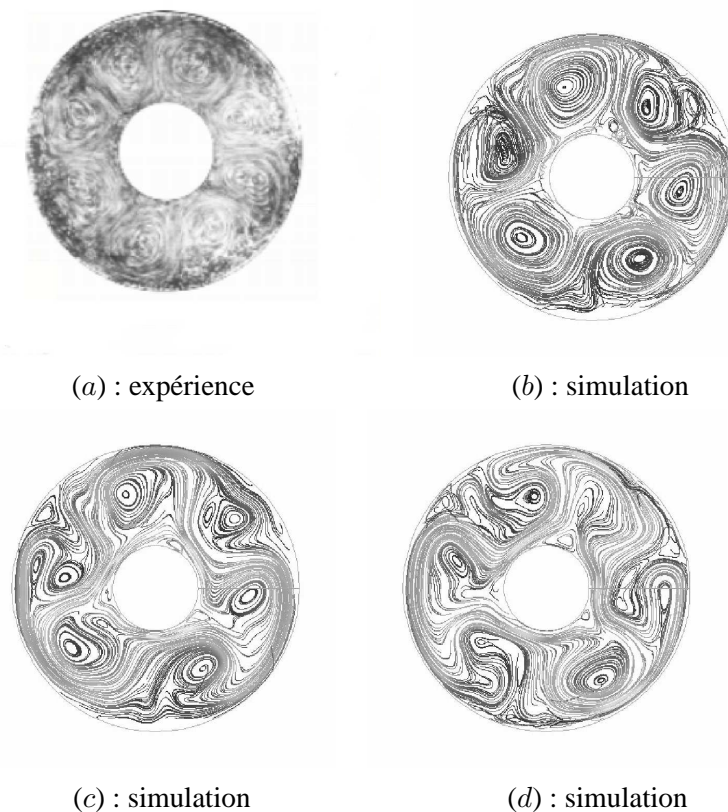


FIG. 2 – Visualisation de l'écoulement à mi-hauteur de la cavité $z/d = 0,5$: (a) et (b) et à deux hauteurs symétriques (c) ($z/d = 0,25$) et (d) ($z/d = 0,75$)

structures à grande échelle représentant les instabilités baroclines. Cela est visible sur les coupes présentées à deux hauteurs différentes sur la même figure 2. On observe en particulier l'apparition et la croissance de structures supplémentaires, qui brisent complètement la symétrie des grandes vagues de manière aléatoire et qui vont conduire ultérieurement au régime complètement désordonné. Ce phénomène est bien caractéristique de la vacillation structurelle.

Ces structures sont également visibles sur les isocontours instantanés de la composante axiale de la vorticité et de la vitesse azimutale sur la figure 3. Nous avons présenté les visualisations obtenues expérimentalement et celles de la simulation. Il est à remarquer la structure à trois vagues indiquant le mouvement azimutal des instabilités baroclines à grande échelle pour les deux approches. Nous pouvons en particulier relever les instabilités de petite échelle proches de la paroi interne froide pour la simulation, qui correspondent à la présence d'ondes de gravité. Ces ondes vont se propager dans toute la cavité, d'abord le long des parois comme on peut le voir sur ces isovaleurs instantanées. Les différences observées entre les visualisations et les résultats de simulation proviennent principalement de niveaux considérés, mais on peut noter une bonne concordance qualitative entre les deux approches, en particulier sur les grandes structures de l'écoulement.

4 Ondes d'inertie-gravité

Nous avons détecté et identifié les ondes d'inertie-gravité dès l'apparition de solutions tridimensionnelles caractérisées par des vagues régulières. Ces ondes ont été générées à travers une instabilité de couche limite thermique (Gill & Davey (1969)), due en particulier à la valeur élevée du nombre de Prandtl et également celle du nombre de Rayleigh. Pour la valeur du nombre de Prandtl considérée et dans les conditions utilisées de stratification thermique, cette instabilité produit des fluctuations de propagation (Bergholz (1978)) qui ont des caractéristiques d'ondes de gravité (Fritts & Alexander (2003)). Nous présentons sur la figure 4 les isocontours instantanés dans un plan méridien de la température et de l'intensité des ondes de gravité représentée par la "divergence horizontale", un des critères couramment utilisés pour quantifier la présence de ces ondes. Comme cela a été observé sur les isocontours dans un plan (r, θ) sur la figure 3, nous voyons la formation de l'instabilité vers la paroi interne froide de la cavité qui va générer les ondes d'inertie-gravité qui vont se propager au cours du temps dans la cavité avec deux extrema concentrés le long des parois. La vérification des caractéristiques propres aux ondes de gravité a été faite auparavant lors de leur première apparition.

Sur la figure 5, nous montrons l'évolution temporelle le long de la direction azimutale de la température pour r

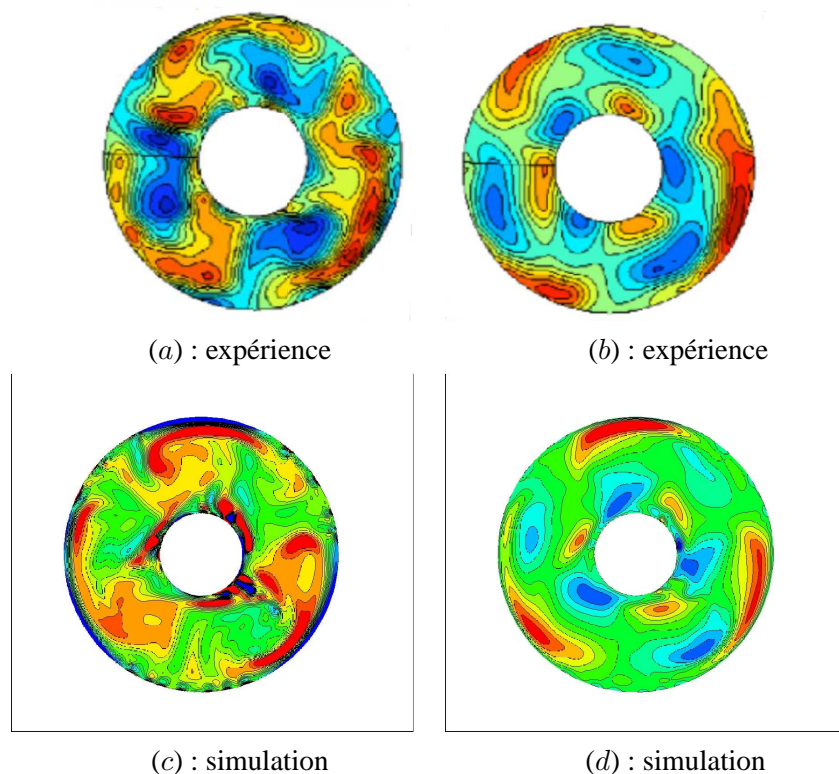


FIG. 3 – Isocontours instantanés à mi-hauteur de la cavité de la composante axiale de la vorticité (a) et (c) et de vitesse azimutale (b) et (d)

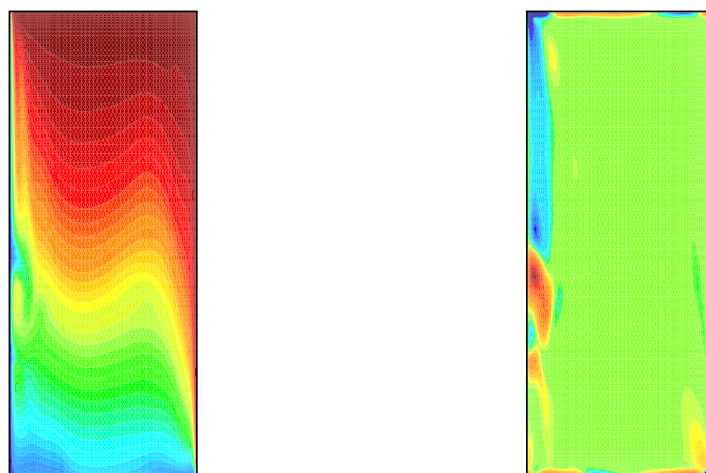


FIG. 4 – Isocontours instantanés dans un plan méridien (r en abscisse et z en ordonnée) de la température et de l'intensité des ondes de gravité représentée par la divergence horizontale

et z fixés. Les ondes de gravité suivent l'évolution des structures à grande échelle caractérisées par un nombre d'onde azimutal dominant $m = 3$ mais avec des caractéristiques différentes, tant au niveau temporel que spatial. Ces fluctuations présentent un comportement spatio-temporel chaotique, qui va entraîner progressivement une dégénérescence de l'écoulement vers le régime irrégulier.

Une technique de décomposition des variables a permis d'isoler les contributions de chaque composante en séparant les différentes échelles. Nous reportons sur la figure 6 les variations au cours du temps de la température et des fluctuations durant environ une période des instabilités baroclines de grande échelle. Les fluctuations apparaissent avec une période intrinsèque de l'ordre de 20 fois plus faible que celle due aux instabilités baroclines, et avec une amplitude inférieure d'au moins une décade. Ces oscillations vont avoir elles-mêmes un comportement chaotique au cours du temps et vont progressivement agir sur les grandes échelles des instabilités baroclines.

Lors d'une étude expérimentale antérieure avec une cavité remplie d'un liquide ($Pr = 26,4$), Read (1992) avait déjà mentionné la possibilité de la présence de ces ondes de gravité dans la transition vers le régime

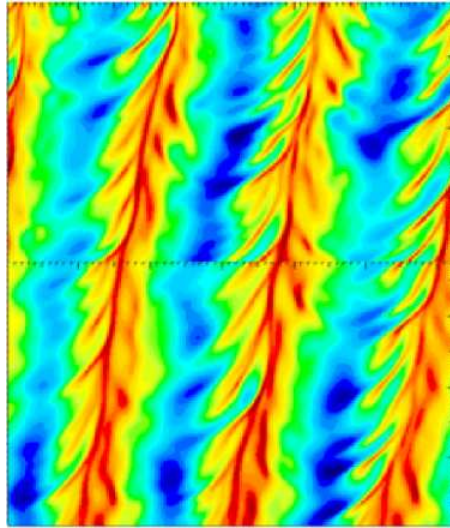


FIG. 5 – Evolution spatio-temporelle selon l’azimut de la température à r et z fixés : azimut en abscisse $\in [0, 2\pi]$, temps adimensionné en ordonnée $\in [0, 4500]$

chaotique. Il avait souligné que le niveau très faible de ces fluctuations oscillantes rendait leur observation expérimentale très difficile, et qu’elles pouvaient provenir des appareils de mesure intrusifs comme les thermocouples bien que les caractéristiques obtenues suggéraient leur nature d’ondes d’inertie-gravité. Dans le cas présent, la simulation permet d’éviter ces problèmes d’éventuelles imperfections liées aux mesures intrusives et d’introduire des parois parfaitement lisses sans rugosités. Comme cela a été mentionné, l’expérience n’est pas incapable de détecter ces ondes de gravité mais leurs niveaux très faibles ne permettent pas aux appareils actuels de mettre en évidence leurs visualisations. Les techniques de haute résolution utilisées pour la simulation donnent plus facilement accès à ces fluctuations. Ces phénomènes ont été identifiés comme des ondes gravité en utilisant la relation de dispersion présentée dans Fritts & Alexander (2003). Nous rappelons que ces ondes ont été observées dès l’apparition de solutions tridimensionnelles caractérisées par les vagues.

5 Discussions

Contrairement à la configuration utilisant de l’air (Read *et al.* (2008)) pour laquelle la vacillation structurale résulte d’une instabilité de type Rayleigh-Bénard sous l’effet d’une forte accélération centrifuge ($Fr = \Omega^2 b/g > 10$), la transition vers les régimes turbulents s’effectue à travers les ondes de gravité dans le cas présent. Ainsi, les fluctuations pour l’air apparaissent dans la direction perpendiculaire à la gravité, (donc à l’axe de symétrie de la cavité,) avec une croissance des modes radiaux supérieurs, tandis que pour le liquide elles résultent d’une instabilité de couche limite thermique due à une forte stratification dans le plan méridien. La valeur du nombre de Froude reste faible ($Fr = 1.67 \times 10^{-2}$), mais le nombre de Rayleigh est plus important, malgré la faible différence de température imposée ($\Delta T = 2K$ alors qu’elle était de 30K pour l’air), à cause du nombre de Prandtl plus élevé mais également des dimensions de la cavité ($A = 3.94$ et $R_c = 3.7$ dans Read *et al.* (2008)). On peut également relever l’écart entre les valeurs du nombre de Taylor : $Ta = 4 \times 10^6$ dans Read *et al.* (2008) et $Ta = 7,37 \times 10^7$ dans le cas présent. Lors de la transition avec l’air, les grandes structures présentaient un comportement typiquement barotrope (isobares parallèles aux isothermes) alors que la nature barocline a été préservée dans la configuration actuelle. Nous avons ainsi pu mettre en évidence un autre mécanisme de génération de fluctuations responsables de la transition vers la turbulence. Les deux phénomènes possèdent des natures complètement différentes, comme on peut le voir sur leurs évolutions respectives selon l’azimut au cours du temps (Figure 7). Bien que les durées des deux prélèvements soient différentes, on peut noter un comportement plus “symétrique et moins étiré” mais également chaotique pour l’air dû probablement au caractère barotrope de l’écoulement par rapport au cas présent. Pour ce dernier, les fluctuations sont composées d’ondes de gravité avec leur structure caractéristique similairement à celles obtenues par Plougonven & Snyder (2006) via une instabilité barocline.

6 Conclusions

Nous avons présenté un mécanisme conduisant à la zone de transition vers la turbulence dans une cavité barocline remplie d’un liquide. La vacillation structurale obtenue est caractérisée par la présence des ondes d’inertie-gravité. Ces fluctuations vont se propager au cours du temps dans la cavité, entraînant progressivement une brisure des structures à grande échelle des instabilités baroclines et ultérieurement conduire à un désordre caractérisant la turbulence. La dynamique de la zone de transition est principalement gouvernée par

ces ondes de gravité.

Les simulations ont été réalisées sur les supercalculateurs NEC-SX5 de l'IDRIS (CNRS) et NEC-SX8 du CCRT (CEA) grâce aux attributions d'heures du comité scientifique des centres nationaux.

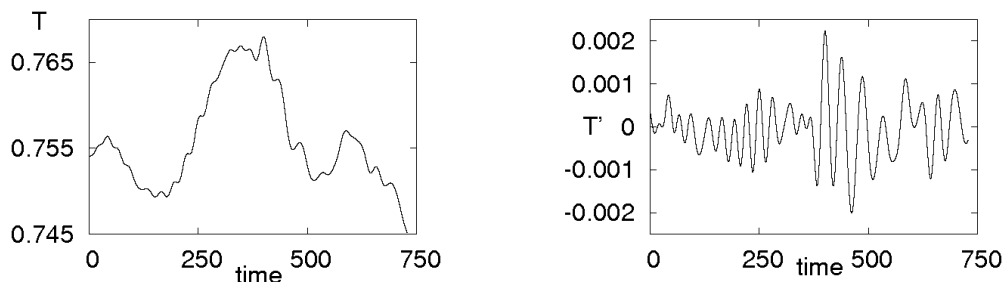


FIG. 6 – Evolution temporelle de la température (T) et des fluctuations de température (T') pour environ une période des instabilités baroclines

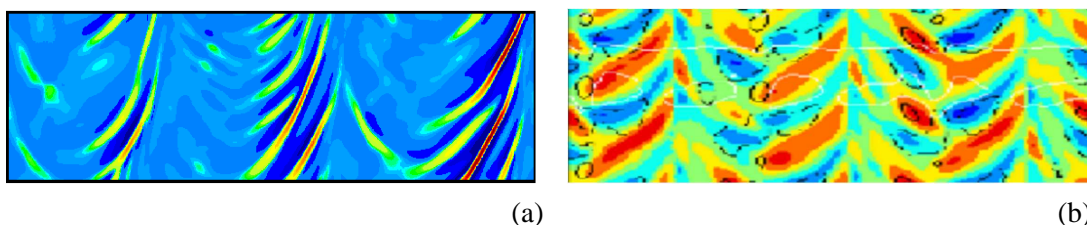


FIG. 7 – Evolution spatio-temporelle le long de la direction azimutale des fluctuations de température (T') : (a) cas présent $Pr = 16$, (b) avec $Pr = 0,7$ (Read *et al.* (2008)) : azimut en abscisse $\in [0, 2\pi]$, temps adimensionné en ordonnée ($\in [0, 728]$ pour (a))

Références

- R. F. Bergholz 1978 Instability of steady natural convection in a vertical fluid layer. *J. Fluid Mech.* **84**(4) 743-768
- W. W. Fowlis and R. Hide 1965 Thermal convection in a rotating annulus of liquid : effect of viscosity on the transition between axisymmetric and non-axisymmetric flow regimes. *J. Atmos. Sci.* **22** 541-558
- D. C. Fritts and M. J. Alexander 2003 Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Rev. Geophys.* **41**(1) 1003
- A. E. Gill and A. Davey 1969 Instabilities of a buoyancy-driven system. *J. Fluid Mech.* **35** 775-798
- R. T. Pierrehumbert and K. L. Swanson 1995 Baroclinic instability. *Ann. Rev. Fluid Mech.* **27** 419-467
- R. Plougonven, D. J. Muraki & C. Snyder 2005 A baroclinic instability that couples balanced motions and gravity waves. *J. Atmos. Sciences* **62** 1545-1559
- R. Plougonven & C. Snyder 2005 Inertia-gravity waves spontaneously generated by jets and fronts. Part I : Different baroclinic life cycles. *J. Atmos. Sciences* **64** 2502-2520
- A. Randriamampianina, W.-G. Früh, P. Maubert and P. L. Read 2006 Direct Numerical Simulation of bifurcations in an air-filled rotating baroclinic annulus. *J. Fluid Mech.* **561** 359-389
- P. L. Read 1992 Applications of singular systems analysis to 'Baroclinic chaos'. *Physica D.* **58** 455-468
- P. L. Read 2001 Transition to geostrophic turbulence in the laboratory, and as a paradigm in atmospheres and oceans. *Surveys in Geophys.* **22** 265-317
- P. L. Read, P. Maubert, A. Randriamampianina and W.-G. Früh 2008 Direct numerical simulation of transitions towards structural vacillation in an air-filled, rotating, baroclinic annulus. *Phys. Fluids.* **20** 044107
- R. D. Wordsworth, P. L. Read & Y. H. Yamazaki 2008 Turbulence, waves and jets in a differentially heated annulus experiment. *Phys. Fluids.* **20** 126602
- R. D. Wordsworth Theoretical and experimental investigations of turbulent jet formation in planetary fluid dynamics. *Ph. D Thesis Linacre College, Oxford University (UK)* 2009