

Sur la coalescence des anticyclones dans les écoulements stratifiés tournants

Patrice Le Gal ^a, Arturo Orozco Estrada ^b, Raúl Cruz Gomez ^b, Anne Cros ^b

a. Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Équilibre, UMR7342
Aix Marseille Université, École Centrale de Marseille, CNRS.
legal@irphe.univ-mrs.fr

b. Departamento de Física, CUCEI, Universidad de Guadalajara.
anne.cros@academicos.udg.mx ; rcruzx@gmail.com

...

Résumé :

Nous proposons ici de revisiter l'expérience de Griffiths et Hopfinger (G.H.) de 1987 sur l'appariement de tourbillons lenticulaires dans des écoulements stratifiés tournants. Grâce à des visualisations et des mesures de vitesse par PIV, nous avons déterminé la distance minimale initiale séparant les deux vortex en fonction des taux de stratification et de rotation du fluide. Des comparaisons avec des simulations numériques diverses ainsi qu'avec la seule expérience réalisée (G.H.) sont présentées. Finalement, la possibilité d'émission d'ondes internes pendant le transitoire de l'appariement est discutée.

Abstract :

We propose here to revisit the 1987 Griffiths and Hopfinger experiment (G.H.) on the pairing of lenticular vortices in rotating stratified flows. Through visualizations and velocity measurements by PIV, we determined the initial minimum distance separating the two vortices as a function of the stratification and fluid rotation rates. Comparisons with various numerical simulations as well as with the only former experiment (G.H.) are presented. Finally, the possibility of internal wave emission during the transient of the pairing is discussed.

Mots clefs : structures océaniques mésoéchelles ; écoulement stratifié tournant ; visualisation et PIV ; ondes internes

1 Introduction

Les tourbillons lenticulaires méso-échelles océaniques jouent un rôle important dans la redistribution de chaleur, de sel, d'éléments nutritifs et du plancton dans les océans. Ils contribuent ainsi à

l'équilibre climatique et à la diversité écologique de la Terre. Ces vortex sont régis par des équilibres géostrophiques et hydrostatiques entre gradients de pression, forces de Coriolis et de flottabilité d'où ils tirent leur forme et leur rapport d'aspect [1, 2, 3]. Leurs mouvements mènent à une dynamique quasi-2D qui donne lieu à une turbulence quasi-géostrophique. Comprendre le chemin par lequel l'énergie s'échappe de cette turbulence mésoscopique pour alimenter les plus petites échelles océaniques où la dissipation se produit, fait l'objet d'une intense recherche. En particulier, parmi les différentes voies de dissipation, l'émission d'ondes de gravité internes a été évoquée comme un convoyeur possible de redistribution de l'énergie [4]. D'autre part, les événements d'appariement de vortex sont observés dans les océans [5] où ils participent à la dynamique complexe de la turbulence mésoscopique tout en générant de fins filaments de vorticité tout comme des ondes internes qui pourraient alimenter les petites échelles dissipatives. Le but de la présente étude est de décrire et de paramétrer la fusion de deux anticyclones lenticulaires grâce à des expériences de laboratoire effectuées sur une table tournante. Pour cela, nous générons des paires de tourbillons anticycloniques en injectant doucement un petit volume d'eau de densité adéquate à l'intérieur d'une couche linéairement stratifiée stablement en sel et mise en rotation. Ces expériences sont similaires à celles de Griffiths et Hopfinger [6] réalisées il y a plus de trente ans, mais pour un système à deux couches.

2 Principaux résultats

2.1 Le diagramme des deux   tats

La figure 1 présente une séquence d'une telle fusion dans notre expérience.    notre connaissance, ce problème n'a jamais été revisité expérimentalement depuis 1987 dans le cas de tourbillons lenticulaires cr  s dans une couche continûment stratifiée en sel.

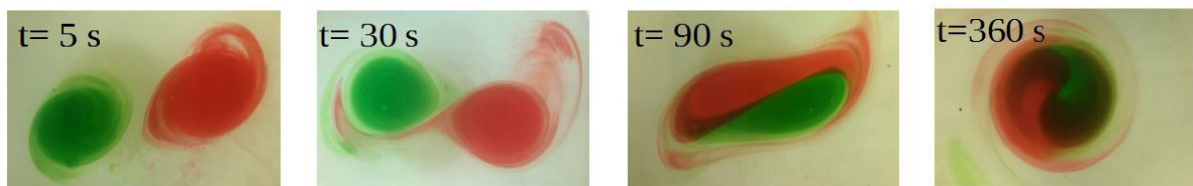


Figure 1: Séquence temporelle de la fusion d'une paire d'anticyclones pour une fréquence de Coriolis $f = 1.57 \text{ rad / s}$, une fréquence de flottabilité $N = 3.3 \text{ rad / s}$ et une séparation initiale $d_0 = 8 \text{ cm}$.

Le résultat principal de notre étude réside dans la détermination de la distance initiale maximale d_0 séparant les deux tourbillons en fonction des deux paramètres expérimentaux que sont la fréquence de Brunt-Väisälä N caractérisant la stratification linéaire en densité et la vitesse angulaire Ω (qui donne le paramètre de Coriolis $f = 2\Omega$) de la couche fluide en rotation.    partir de ces deux fréquences, nous construisons le rayon de déformation de Rossby $\lambda = (g \Delta\rho H/\rho)^{1/2} f^{-1}$ où H est la hauteur des lentilles anticycloniques qui va permettre de mesurer en particulier l'effet de la stratification sur l'appariement comme il a été fait numériquement en utilisant des modèles QG [7] ou des modèles non QG à nombre de Rossby fini [8]. La figure 2 présente ce diagramme où nos résultats expérimentaux sont superposés aux résultats de l'expérience bi-couche (G.H.) [6] (ligne bleue) ainsi qu'aux simulations numériques de Dritschel et al. [7] (ligne noire) et de Verron et al. [9] (ligne rouge). Comme présenté sur la figure 2, nos résultats expérimentaux sont en excellent accord avec la simulation numérique de Verron et al. bien que celle-ci ait été effectuée avec un modèle QG à deux couches. Cependant, comme précisé par les auteurs de [9], le système à deux couches, tel qu'étudié expérimentalement par Griffiths et Hopfinger [6] est sensible aux conditions initiales. Cette sensibilité semble donc expliquer le désaccord entre les résultats (G.H.) [6] et les simulations numériques. Il apparaît donc que notre expérience en couche continûment stratifiée soit (contrairement à l'expérience G.H.) en très bon

accord avec les conditions initiales utilisées pour l'analyse numérique. En conséquence et comme présenté sur la figure 2, nos expériences (numérotées sur la figure 2) permettent une bien meilleure comparaison avec les prédictions numériques, montrant en particulier une grande variation de d_0/R lorsque λ/R est proche de 2. Précisons ici que nous n'avons gardé dans ce diagramme que les expériences menées avec deux tourbillons parfaitement symétriques en taille et en forme comme ceux présentés en figure 1.

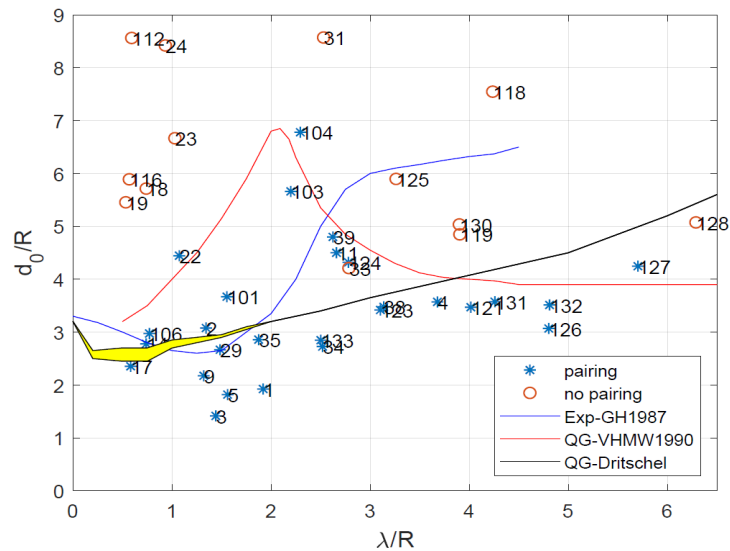


Figure 2: Diagramme d'existence des deux états (* appariement ; o pas d'appariement) qui montre la frontière séparant les conditions qui permettent ou non l'appariement de deux anticyclones lenticulaires dans l'espace d_0/R et λ/R , où d_0 est la distance initiale de séparation des deux vortex de rayon R dans un milieu caractérisé par un rayon de déformation de Rossby λ .

2.2 Détection des ondes internes

En plus de la description des différents régimes qui conduisent ou non à la coalescence des paires, l'objectif final de cette recherche sera de tenter de quantifier le montant de la perte d'énergie agéostrophique lorsque deux tourbillons lenticulaires sont en train de fusionner. En effet, pendant la période transitoire de leur fusion, la structure dipolaire hors équilibre qui se forme irradie des ondes de gravité internes déjà observées dans les simulations numériques [8, 10]. La figure 3 présente le spectre de Fourier temporel d'une série chronologique enregistrée en un point d'un de nos champs de vitesse mesurés par PIV. Les pics basse fréquence correspondent aux différents modes de Fourier associés à l'appariement des vortex alors que le paquet d'ondes clairement visible dans la bande autorisée entre la fréquence de flottabilité N et la fréquence de Coriolis f est associé à la génération d'ondes de gravité internes au cours du processus d'appariement. Notons de plus, que lors des expériences pour lesquelles $N < f$, la vitesse de phase de ces ondes de gravité internes est centripète alors qu'elle est centrifuge dans les cas où $N > f$. Ce résultat est en accord avec la relation de dispersion des ondes internes. Cependant, nous devons souligner que si nous observons bien des ondes internes comme escomptées, nous devons encore prouver que celles-ci sont bien émises par les anticyclones au cours de leur appariement et non pas uniquement par l'injection du fluide lors de l'initiation des tourbillons eux-mêmes : l'étude de diagrammes espace-temps construits sur les enregistrements de vitesse, semble aujourd'hui bien montrer la persistance de l'émission des ondes bien au-delà de la phase initiale, alors que les deux vortex initiaux ont déjà coalescé pour ne plus former qu'une unique structure cohérente.

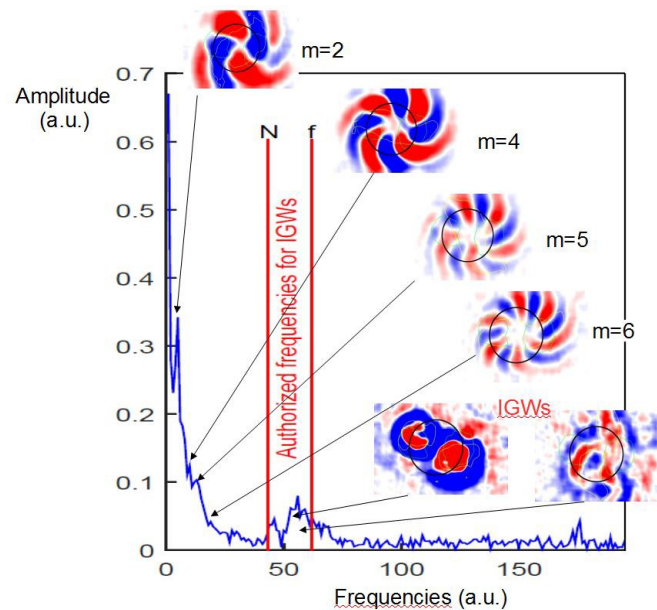


Figure 3: Spectre temporel de Fourier en un point du domaine de vitesse de la PIV et structures spatiales des modes correspondants impliqués lors de l'appariement de vortex avec des instantanés des ondes de gravité internes (IGWs) émises dans leur bande spectrale autorisée.

Références

- [1] P. Hassanzadeh, P. S. Marcus, P. Le Gal, The universal aspect ratio of vortices in rotating stratified flows: theory and simulation, *J. Fluid Mech.* 706, 4657, 2012.
- [2] O. Aubert, M. Le Bars, P. Le Gal, P. S. Marcus, The universal aspect ratio of vortices in rotating stratified flows: experiments and observations, *J. Fluid Mech.* 706, 3445, 2012.
- [3] H.M. De la Rosa Zambrano, A. Cros, R.C. Cruz-Gómez, M. Le Bars, P. Le Gal, A laboratory study of floating lenticular anticyclones. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, 61, 1-8, 2017.
- [4] J.C. McWilliams, Fluid dynamics at the margin of rotational control, *Environmental Fluid Mechanics*, 8(5), 441-449, 2008.
- [5] K.L.S. Tokos, H.H. Hinrichsen, W. Zenk, Merging and migration of 2 meddies, *J. Phys. Oceanography* 24 (10), 2129-2141, 1994.
- [6] R.W. Griffiths, E.J. Hopfinger, Coalescing of geostrophic vortices, *J. Fluid Mech.* 178, 73-97, 1987.
- [7] D.G. Dritschel, Vortex merger in rotating stratified flows, *J. Fluid Mech.* 455, 83-101, 2002.
- [8] J.N. Reinaud and D. Dritschel, The merger of geophysical vortices at finite Rossby and Froude number, *J. Fluid Mech.* 848, 388-410, 2018.
- [9] J. Verron, E. J. Hopfinger, and J. C. McWilliams, Sensitivity to initial conditions in the merging of two-layer baroclinic vortices, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* 2, 886, 1990.
- [10] Á. Viúdez, Spiral patterns of inertia-gravity waves in geophysical flows. *J. Fluid Mech.*, 562, 73-82, 2006.