



HAL
open science

Book of Abstract of Symposium OGOA : "Ondes de Gravité dans l'Océan et l'Atmosphère", 23-24 mai 2013

Achim Wirth, Louis Gostiaux, Pascale Bouruet-Aubertot, François Lott,
Riwal Plougonven

► **To cite this version:**

Achim Wirth, Louis Gostiaux, Pascale Bouruet-Aubertot, François Lott, Riwal Plougonven. Book of Abstract of Symposium OGOA : "Ondes de Gravité dans l'Océan et l'Atmosphère", 23-24 mai 2013. 2014. hal-00925239

HAL Id: hal-00925239

<https://hal.science/hal-00925239v1>

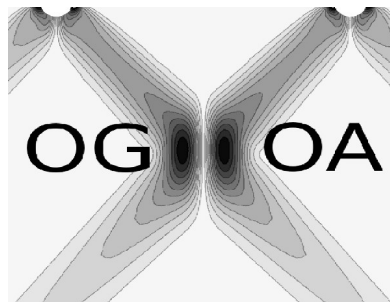
Preprint submitted on 7 Jan 2014

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.

Journées OGOA
"Ondes de Gravité dans l'Océan et l'Atmosphère"

23-24 mai 2013
Lyon



The objective of the OGOA project is to bring together the French research community working in the field of gravity waves in the atmosphere and the ocean, using observations, laboratory experiments, numerical simulations and analytical calculations. The subjects studied include the generation of gravity waves (tidal, spontaneous, topographic, by instability, by air-sea interaction, by convection and other sub-meso-scale processes), their turbulent dynamics (cascades: direct, inverse, local and non-local), their interaction with the vortical circulation, their separation from the vortical circulation, and their parameterization. The aim of the project is to identify possible future collaborations and project submissions (LEFE, ANR, H202) in the field of gravity waves.



The contributions at the OGOA meeting held in Lyon on May 23 and 24, 2013 were grouped in three different fields: atmosphere, ocean and physics. The first two considered the dynamics of gravity waves in the environment using observations, numerical calculations and laboratory experiments dedicated to a specific area, while the third focused on the physics of gravity waves in general, studied by means of laboratory experiments, numerical simulations and theory.

Ocean

One of the major questions in ocean dynamics is to explain and model the temperature and salinity distributions in time-and-space within the ocean. It is a result of the combined action of air-sea fluxes, currents, waves and nonlinear interactions between them and turbulent mixing. Temperature and salinity determine the density structure which constrain the basin-scale currents and overturning circulation. The transport due to internal gravity waves is usually considered as negligible and the focus is on the mixing of water-masses due to the breaking of gravity waves. To determine the spatio-temporal pattern of mixing of water masses in the ocean we have to determine:

1. where and how gravity waves are generated,
2. where and how they propagate,
3. where and how they break.

When the above questions are answered the representation of gravity waves in today's ocean models can be considered. In the talks during the OGOA meeting these questions were addressed from different angles.

The generation of gravity waves by the roughness of topography ([C. Muller et al.](#)) and small topography as well as spontaneous generation by vortical flow ([A. Wirth](#)) was discussed. In the former it is shown that abyssal hills, unresolved in state of the art topographic products, can have a strong impact on internal tides generation, especially over mid-ocean ridges and can locally double the energy flux. While the latter demonstrates that the sub-synoptic scales in the vortical dynamics contribute little to the spontaneous generation of gravity waves.

The generation of solitons by tidal motion is investigated by numerical models and laboratory experiments. In idealized numerical experiments ([F. Auclair et al.](#)) investigated the tidal generation of gravity waves and the role of hydraulic control. Simulations on the internal tides dynamics using model calculations with varying resolution and domain size and a realistic topography off the coast of southern California were presented ([A. Ponte](#)). High-frequency observations in the Bay of Biscay, one of the most energetic regions for internal tides, evidenced the mechanisms of generation of a train of solitary waves and a parameterization of turbulent mixing induced by internal tides based on microstructure measurements was proposed ([Y. Cuypers](#)).

Observations collected in the Mediterranean Sea revealed the presence of strong baroclinic near-inertial waves within anticyclonic eddies, increased dissipation at the top and base of the eddies associated with these waves ([P. Bouruet-Aubertot](#)) and increased vertical turbulent diffusivity in these regions and in the weakly stratified eddy core.

Laboratory and numerical experiments on the non-linear dynamics of gravity waves in the Luzon strait were presented ([M. Mercier](#)).

Analytical and numerical results on the instability of gravity waves were given ([F. Lefevre](#)). It is shown that for internal waves generated by geostrophic motions over small scale topography the vertical distribution of turbulent kinetic energy dissipation is set by the vertical structure of inertial oscillations generated during internal lee wave breaking ([P. Labreuche et al.](#)).

In the Ionian sea, where stratification is weak, the vertical component of the earth's rotation vector is found to lead to vertical oscillations. This component is usually neglected in the traditional approximation ([L. Gostiaux et al.](#)).

Atmosphere

Today, climate and weather prediction models attempt to well represent the dynamics of the middle atmosphere. For this purpose they need to have about the right amount of gravity waves, which drive a substantial part of the global Brewer-Dobson circulation that builds up the large-scale winds in mid-latitudes. The gravity waves also participate to the forcing of the quasi-biennial oscillations in the tropics. These waves, occurring on rather short scales, are not well resolved in global models and hence need to be parametrized. The present-day parameterizations try to relate the waves to their sources in the troposphere, like convection ([P. Maury et al.](#)), and these relations with the sources are clearly beneficial. We need now to relate the GWs to their potential sources in the mid-latitudes, and for this theoretical works are now completed to do this in closed mathematical form ([Lott et al.](#)). One problem when we adjust models and parameterizations, is that the parameterized waves can replace large-scale waves, e.g. that we correct a systematic error on the waves, that models should explicitly represent. In these two respects, the relation with the sources and the realism of the parameterized GWs field, observations are crucial. Nevertheless, operational radiosondes observations do not reach the altitudes of interest and satellites do not have access to the entire spectra of the small-scale gravity waves. For this reason, the long-duration super-pressure balloons flying in the lower stratosphere and presented by [A. Hertzog et al.](#) provide information of great significance. On top of characteristic zonal mean values of the GWs drag, they also provide informations on gravity wave sources, and also on their intermittency. In this sense they support the stochastic approach used in the present day parameterizations ([P. Maury et al.](#)). In this process of using observations to guide and assess parameterizations in models, an important step is also done in term of regional modeling with high resolution models ([Plougonven et al.](#)). Simulations carried out for the period and domain where the super-pressure balloons flew provide a complementary description of the wave field, but also of the tropospheric flow generating the waves, allowing the investigation of non-orographic sources.

Results on the dynamics of gravity waves in deep alpine valleys were presented by ([Staquet et al.](#)) They found that the oscillatory motions associated with the IGWs generated by katabatic winds are distinct from those of the katabatic winds. The IGW frequency was found to be independent of the slope angle and about $0.8N$. [Paci et al.](#) presented results of laboratory experiments performed in Toulouse on the interaction of flow with topography, the rotor dynamics and the wave capture above the topography.

Physics

Internal waves in the atmosphere and in the ocean raise fundamental questions to the physicists. There is now a strong activity in that field, in laboratories directly affiliated to INSU but also to INP and INSIS. Internal gravity waves are hence a subject potentially driving interdisciplinarity in the French research framework.

A first set of presentations used a newly designed wavemaker to study the fate of internal waves in a stratified medium. [Venaille et al.](#) measured the mean flow induced by the viscous dissipation of the waves, which is in principle the analogy of the deposit of momentum by breaking waves in the upper atmosphere. [H. Scolan et al.](#) studied the fate of internal waves in a closed domain, and the instability occurring in the presence of an attractor. [B. Bourget et al.](#) observed for the first time in

the laboratory the detailed process of the parametric subharmonic instability (PSI), which is one of the mechanism of dissipation and energy transfer to smaller scales for internal waves.

The wake of moving objects in a stratified medium is also studied as a model for topographically induced internal waves (mountain lee waves in the atmosphere or in the oceans, as recently shown in the Antarctic Circumpolar Current). [B. Voisin et al.](#) and [P. Meunier et al.](#) have studied analytically and experimentally the wave pattern emitted by an oscillating torus and an inclined cylinder respectively. [M. Bosco et al.](#) have numerically studied the latter problem.

The influence of rotation on geophysical flows needs the use of rotating tanks. [Mercier et al.](#) have presented amazing laboratory experiments performed in the Coriolis Platform, Grenoble, where a scaled model of the Luzon Strait, reproducing tidal forcing, stratification and rotation was designed. [Odier et al.](#) have shown first results from the new rotating tank PERPET at ENS de Lyon, on the influence of rotation on convection. A similar study was presented by [Le Gal et al.](#) at the rotating platform of IRPHE, as well as the behaviour of a buoyant jet under the influence of the Coriolis force. [Flor et al.](#) have presented results on front instabilities in a rotating-stratified tank.

The fundamental aspect of stratified turbulence is studied in DNS by [A. Delache et al.](#), and statistical models applied to large scale geophysical flows using St Venant's (shallow water) equations were presented by [F. Bouchet](#). History of science, on the conflation between two distinct definitions of the Doppler shift occurring in the oceanographic literature, was presented by [T. Gerkema](#).

Conclusions

The two days of the conference led to active discussion between the 42 participants. The interaction between the different communities is now reinforced and all participants agreed to pursue this effort further. The abstracts of this proceedings book have been published on <http://hal.archives-ouvertes.fr/OGOAO>. We are grateful to LEFE/INSU/CNRS for the funding provided, that allowed to pay the travel expenses for all the participants working in France and the conference organization.

December 2013,

Achim Wirth, Louis Gostiaux, Pascale Bouruet-Aubertot, François Lott and Riwal Plougonven

Liste des communications

Physique 1

Philippe Odier (ENS de Lyon)	
Première expérience sur la plateforme tournante PERPET : convection pénétrative en rotation.....	9
Antoine Venaille (ENS de Lyon)	
Écoulement moyen induit par l'atténuation d'une onde de gravité.....	10
Hélène Scolan (ENS de Lyon)	
Attracteurs d'ondes internes: génération et instabilité	11
Bruno Voisin (LEGI)	
Focalisation linéaire d'ondes internes par un tore oscillant.....	12
Patrice Meunier (Irphe)	
Ondes internes dans un sillage incliné.....	13
Jan-Bert Flor (LEGI)	
Ondes et instabilités de fronts en milieu tournant et stratifié.....	14
Mickaël Bosco (Irphe)	
Dynamique du sillage d'un cylindre stratifié	15

Atmosphère

Chantal Staquet (LEGI)	
Caractérisation des mouvements oscillants dans l'atmosphère stable d'une vallée encaissée...17	
Alexandre Paci (Meteo France)	
Veine hydraulique stratifiée de Toulouse: quelques expériences de laboratoire sur les ondes internes topographiques dans l'atmosphère.....	18
Riwal Plougonven (LMD)	
Simulations of gravity waves over Antarctica and the Southern Ocean: comparison to balloon observations and investigation of non-orographic sources.....	19
P. Maury (LMD)	
A stochastic parameterization of the gravity waves due to convection and impact on the equatorial stratosphere	20
A. Hertzog (LMD)	
Gravity-wave characteristics derived from quasi-Lagrangian balloon flights in the stratosphere	21
François Lott (LMD)	
Gravity Waves Produced by Potential Vorticity Anomalies.....	22

Océan 1

Caroline Muller (LadhyX)	
Abysal Hill Roughness Impact on Internal Tide Generation: Linear Theory.....	24
Francis Auclair (LA)	
Régimes d'ondes internes topographiques: génération de solitons et contrôle hydraulique....	25
Aurélien Ponte (LPO)	
Modélisation de la marée interne en Californie du Sud.....	26
Yannis Cuyper (LOCEAN)	
Marées internes, ondes solitaires et turbulence dans le golfe de Gascogne.....	27
Matthieu Mercier (MIT)	
De Luzon au laboratoire : modéliser la marée interne.....	28
François Lefeuvre (LadHyX)	
Le rôle des ondes internes dans le mélange océanique	29

Océan 2

Achim Wirth (LEGI)	
Inertia-Gravity Waves generated by near Balanced Flow in 2 Layer Shallow Water Turbulence on the beta Plane	31

Pierre Labreuche (LEGI)	
Dissipation of internal waves generated by geostrophic motions over small scale topography	32
Pascale Bouruet-Aubertot (LOCEAN)	
Characterization of turbulence from a fine-scale parameterization and microstructure measurements in the Mediterranean Sea during the BOUM experiment.....	33
Louis Gostiaux (LMFA)	
Observation d'ondes inertielles profondes en Méditerranée : aspects non-traditionnels.	34
Physique 2	
Theo Gerkema (NIOZ, Netherlands)	
Les courant moyens - quel rôle jouent-ils dans l'effet Doppler ?.....	36
Alexandre Delache (LMFA)	
Sur la restauration des caractéristiques isotropes 3D universelles en turbulence de rotation : scénario de Zeman/Ozmidov.....	37
Baptiste Bourget (ENS de Lyon)	
Étude expérimentale de l'instabilité paramétrique subharmonique des ondes internes de gravité.....	38
Patrice Le Gal (Irphe)	
Génération d'ondes gravito-inertielles par la turbulence.....	39
Freddy Bouchet (ENS de Lyon)	
Mécanique statistiques des équations de Saint Venant et dissipation d'énergie par les modes agéostrophiques.....	40
Posters	
Yannis Cuypers (LOCEAN)	
Tropical storm-induced near-inertial internal waves during the Cirene experiment: energy fluxes and impact on vertical mixing.....	42
F. Lott (LMD)	
Equatorial waves in some CMIP5 coupled models (with stratosphere)	43

Réunion OGOA, 23-24 mai 2013, session : Physique 1

Physique 1

Philippe Odier (ENS de Lyon)

Première expérience sur la plateforme tournante PERPET : convection pénétrative en rotation

P. Odier, S. Joubaud, Laboratoire de Physique, ENS Lyon
T. Alboussiere, S. Labrosse, Laboratoire de Géologie de Lyon

Notre laboratoire s'est doté récemment d'une plate-forme tournante de 2 m de diamètre (PERPET, Plate-forme d'Études en Rotation des Phénomènes et Écoulements de la Terre), pouvant tourner jusqu'à 1 tour/s tout en portant une charge utile de 750 kg. Elle est équipée d'un contacteur tournant permettant à la fois la transmission de la puissance électrique nécessaire aux expériences embarquées et la transmission des signaux mesurés. Cette plate-forme a été conçue en concertation avec plusieurs équipes sur la région lyonnaise, afin qu'elle puisse servir non seulement aux desseins des équipes de notre Laboratoire mais aussi à d'autres projets. En collaboration avec Thierry Alboussière et Stéphane Labrosse, du Laboratoire de Géologie de Lyon, une première campagne d'expériences a déjà été effectuée sur la plate-forme, depuis son installation en janvier 2013. Elle concerne une étude de l'influence de la rotation sur le phénomène de convection pénétrante, qui existe probablement dans le noyau liquide terrestre et que l'on peut reproduire en refroidissant de l'eau par le bas en-dessous de 4°C. En effet l'eau présente un maximum de densité à cette température et par conséquent, la région entre 0 et 4°C sera convective, alors que la région au-dessus de 4°C sera stratifiée de manière stable. Dans un tel dispositif, on peut donc étudier la pénétration de la région convective dans la région stratifiée.

Les premiers résultats de cette expérience montrent une forte influence de la rotation sur le phénomène de convection : l'organisation habituelle en grands rouleaux est remplacée, lors du cas avec rotation, par des colonnes montantes et descendantes à plus petite échelle. Une étude plus précise de l'évolution des températures, que nous avons mesurées dans la cuve sur une ligne verticale, et du front convectif, permettra d'obtenir des informations plus quantitative sur le rôle de la rotation dans ce phénomène.

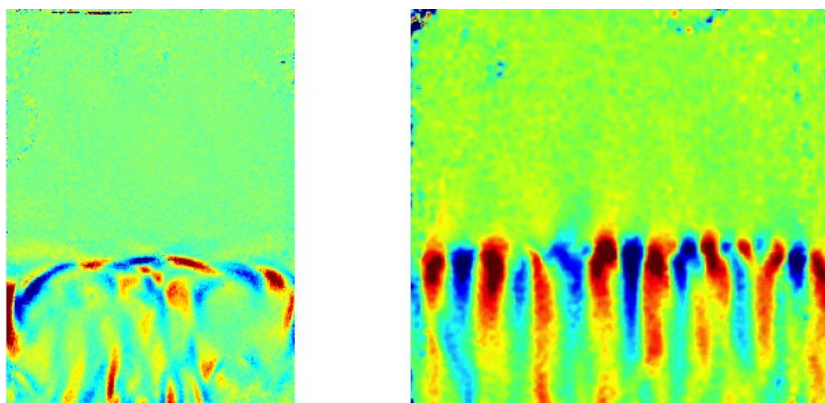


Figure 1: Observation de la zone convective (en bas) et de la zone diffusive (en haut) par la technique de Schlieren synthétique. Gauche: sans rotation - Droite : avec rotation à 15 rpm.

B. Bourget, T. Dauxois, S. Joubaud, and P. Odier. Experimental study of parametric subharmonic instability for internal plane waves. *J. Fluid Mech.*, 723:1–20, 2013.

Antoine Venaille (ENS de Lyon)

Écoulement moyen induit par l'atténuation d'une onde de gravité.

Antoine Venaille, Guilhem Bordes, Sylvain Joubaud, Philippe Odier, Thierry Dauxois
Laboratoire de Physique de L'ENS de Lyon

Nous présenterons un dispositif expérimental qui permet d'observer la formation d'un vortex dans un fluide stratifié forcé par un générateur d'ondes internes de gravité.

Nous proposerons une explication pour la formation de ce vortex à l'aide d'un développement asymptotique en échelles multiples. Les deux ingrédients essentiels pour la formation de l'écoulement moyen sont :

1. une source localisée en espace
2. un mécanisme d'atténuation de l'amplitude de l'onde.

Cela nous amènera à discuter du rôle de la viscosité et de la diffraction.

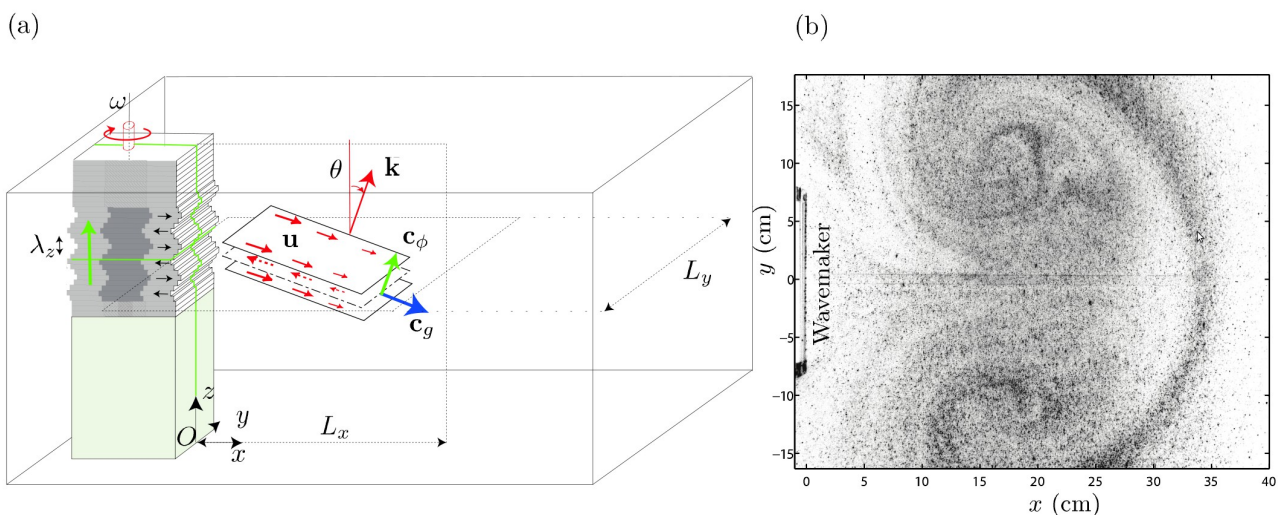


Figure 1: a) Dispositif expérimental. b) Observation du dipole dans une coupe horizontale

Bordes, Guilhem; Venaille, Antoine; Joubaud, Sylvain; Odier, Philippe; Dauxois, Experimental observation of a strong mean flow induced by internal gravity waves, *Physics of Fluids*, Volume 24, Issue 8, (2012)

Hélène Scolan (ENS de Lyon)

Attracteurs d'ondes internes: génération et instabilité

Hélène Scolan (Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, Lyon, France)

Eugeny Ermanyuk (Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Novosibirsk State University, Novosibirsk)

Thierry Dauxois (Laboratoire de Physique de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon, Lyon, France)

helene.scolan@ens-lyon.fr

Dans le cas d'un domaine confiné, les réflexions successives des faisceaux d'ondes internes sur les limites rigides peuvent converger vers une trajectoire fermée : un attracteur d'ondes internes [1]. Les trajectoires pour un domaine de forme arbitraire ne sont en général pas fermées et l'énergie injectée dans le domaine est répartie uniformément. Au contraire, quand un attracteur est présent, l'énergie est concentrée essentiellement sur les quelques faisceaux associés au cycle limite où on peut s'attendre au développement d'instabilités non-linéaires.

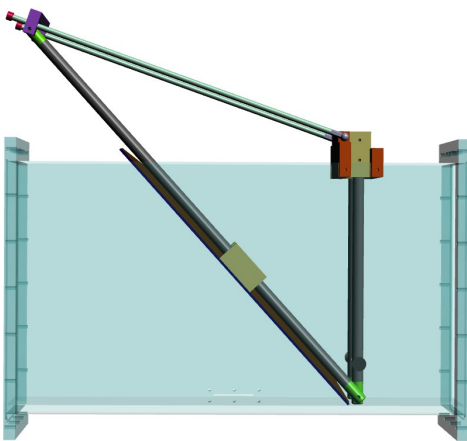


Figure 1
océans.

Jusqu'à présent, les attracteurs observés expérimentalement [2, 4, 5] ont relativement peu d'énergie injectée et leur comportement a été expliqué par des mécanismes linéaires étudiés aussi numériquement [3]. Nous présentons une étude en laboratoire de l'instabilité d'un attracteur d'ondes internes de gravité dans un domaine trapézoïdal rempli de fluide uniformément stratifié. L'attracteur d'ondes internes est obtenu selon une nouvelle méthode d'injection d'énergie dans le système avec un générateur d'ondes internes [6] par l'intermédiaire d'ondes stationnaires de type mouvement d'une paroi verticale. En outre, nous montrerons que les attracteurs deviennent instables au dessus d'un certain seuil d'amplitude du générateur ce qui fournit une explication possible à la difficulté d'observer les attracteurs dans les

1. L.R.M. Maas and F.-P.A. Lam, *J. Fluid Mech.* 300, 1 (1995).
2. L.R.M. Maas, D. Benielli, J. Sommeria, and F.-P.A. Lam, *Nature* 388, 557 (1997).
3. N. Grisouard, C. Staquet, and I. Pairaud, *J. Fluid Mech.* 614, 1 (2008).
4. J. Hazewinkel, P. van Breevort, S.B. Dalziel, and L.R.M. Maas, *J. Fluid Mech.* 598, 373 (2008).
5. J. Hazewinkel, C. Tsimitri, L.R.M. Maas, S.B. Dalziel, *Phys. Fluids* 22, 107 (2010).
6. L. Gostiaux, H. Didelle, S. Mercier, and T. Dauxois, *Exps. Fluids* 42, 123 (2007).

Bruno Voisin (LEGI)

Focalisation linéaire d'ondes internes par un tore oscillant

Bruno Voisin (LEGI, CNRS & Université de Grenoble)

Evgeny Ermanyuk (Institut d'Hydrodynamique Lavrentyev (Branche sibérienne de l'Académie des Sciences de Russie, Novossibirsk)

Natalia Shmakova et Jan-Bert Flór (LEGI, CNRS & Université de Grenoble)

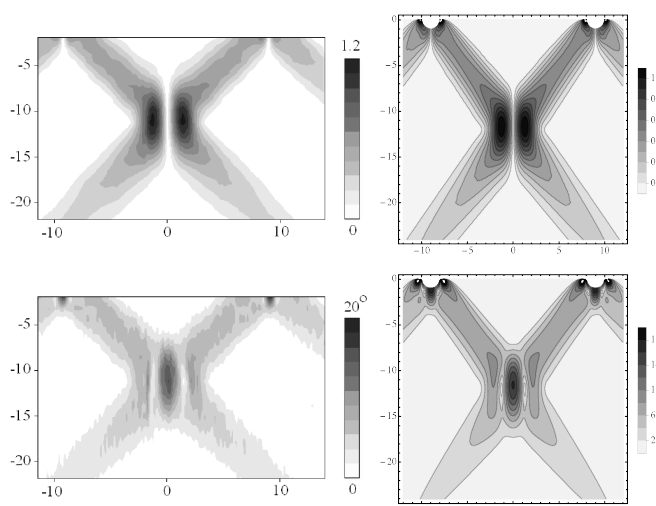


Figure 1: Déplacement (en haut) et pente (en bas) des lignes isopycnales dans le plan vertical de symétrie d'un tore oscillant horizontalement, mesuré expérimentalement (à gauche) et prédit théoriquement (à droite).

Parmi les phénomènes susceptibles de provoquer localement une intensification de l'amplitude des ondes internes dans un fluide stratifié, et ainsi de conduire au mélange, figure un phénomène spécifiquement tridimensionnel : la focalisation géométrique causée par la forme de l'émetteur. Cette configuration a reçu récemment quelque attention, aussi bien théoriquement pour l'émission de la marée interne par une topographie de fond gaussienne circulaire (Bühler & Muller 2007) ou en forme de fer à cheval (Grisouard & Bühler 2012), qu'expérimentalement et numériquement pour l'émission des similaires ondes inertielles par un tore oscillant horizontalement (Duran-Matute et al. 2013).

Nous nous intéressons à cette dernière configuration du tore oscillant horizontalement dans un fluide stratifié, expérimentalement et théoriquement. Sont présentés dans cet exposé les résultats relevant du régime linéaire, où l'amplitude des ondes est faible. Les expériences mettent en œuvre une technique inédite permettant la visualisation et la mesure directe de la déformation des surfaces isopycnales. La théorie, elle aussi inédite, repose sur l'hypothèse d'un tore fin, dont le rayon principal est grand devant le rayon secondaire. La comparaison entre les deux montre que la théorie reproduit les mesures de façon satisfaisante, aussi bien qualitative que quantitative, et permet en particulier de prédire la pente des lignes isopycnales, cruciale pour le déferlement.

Bühler, O. & Muller, C. J. (2007) *J. Fluid Mech.* 588, 1–28.

Duran-Matute, M., Flór, J.-B., Godeferd, F. S. & Jause-Labert, C. (2013) *Phys. Rev. E* 87, 041001(R).

Grisouard, N. & Bühler, O. (2012) *J. Fluid* 708, 250–278

Patrice Meunier (Irphe)

Ondes internes dans un sillage incliné

Patrice Meunier (Irphe)

Je présenterai la structure des ondes générées par le sillage d'un objet incliné par rapport à la stratification.

Dans un premier temps, je présenterai le cas fondamental d'un cylindre qui génère des ondes de lee invariantes selon l'axe du cylindre. Contrairement au cas classique d'un cylindre horizontal, la présence de l'inclinaison génère une vitesse transverse (c'est à dire axiale), indiquée en niveaux de gris sur la figure ci-jointe. Cette vitesse axiale peut être prédite théoriquement pour des grands nombres de Froude ou pour des cylindres quasi-verticaux.

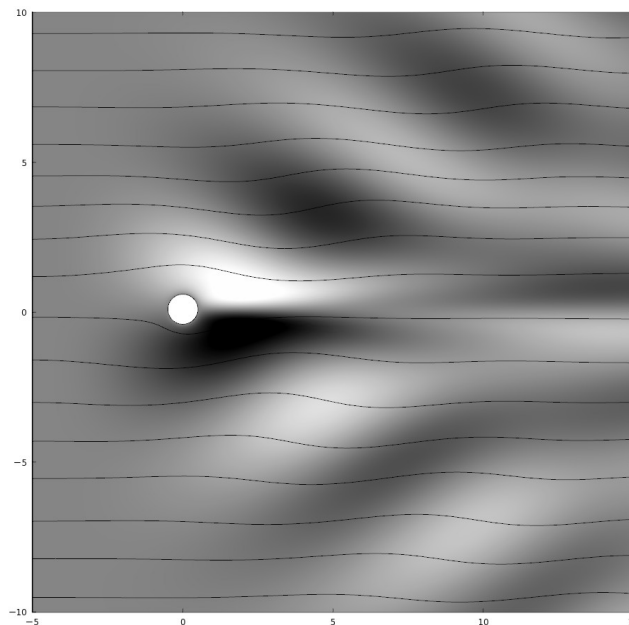


Figure 1: Vitesse axiale obtenue numériquement dans le sillage d'un cylindre incliné à 80 degrés par rapport à la verticale. $Re=40$, $F=1$.

Dans un deuxième temps, je présenterai le système d'ondes de lee créées par une topographie sinusoidale dans un écoulement de couche limite. La présence de l'inclinaison génère de nouveau une vitesse transverse qui diverge au point critique où la fréquence Doppler des ondes est égale à la fréquence de Brunt-Väisälä calculée selon la direction normale au sol. Une théorie de couche critique visqueuse permet de prédire l'amplitude et la forme de cette vitesse transverse.

Stratified wake of a tilted cylinder. Part 2. Lee internal waves, Patrice Meunier†, J. Fluid Mech. (2012), vol. 699, pp. 198-215

Jan-Bert Flor (LEGI)

Ondes et instabilités de fronts en milieu tournant et stratifié.

J.-B. Flor (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels, Grenoble, France)

H. Scolan (Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon, Lyon, France)

R. Verzicco (R. Verzicco, Dipartimento IM, Università di Roma "Tor Vergata", Roma, Italy)

Fronts occur in the Earth oceans and atmosphere and separate masses of air or fluid of different temperature and different velocities. Their instabilities are relevant to the transport of heat and energy in the oceans and atmosphere, and are therefore very relevant for climate modeling. In this study, a front is generated in the laboratory in a density stratified and differentially rotating fluid, and the corresponding flow is investigated numerically using DNS. In former studies of fronts, mainly the frontal instability has been discussed and baroclinic instability and newly found Rossby Kelvin instability were reported (Flor et al 2011, Scolan 2011, and Scolan et al 2013). The exact state of the interface is very relevant for the type of instability and waves we may expect. We therefore focus on the interfacial dynamics, and consider the diffusion of vorticity and density at an interface as a function of Rossby and Schmidt number. We note the existence of interfacial Ekman layers, observe Kelvin-Helmholtz instability and discuss Hölmboe instability as well as other wave types near the interface.

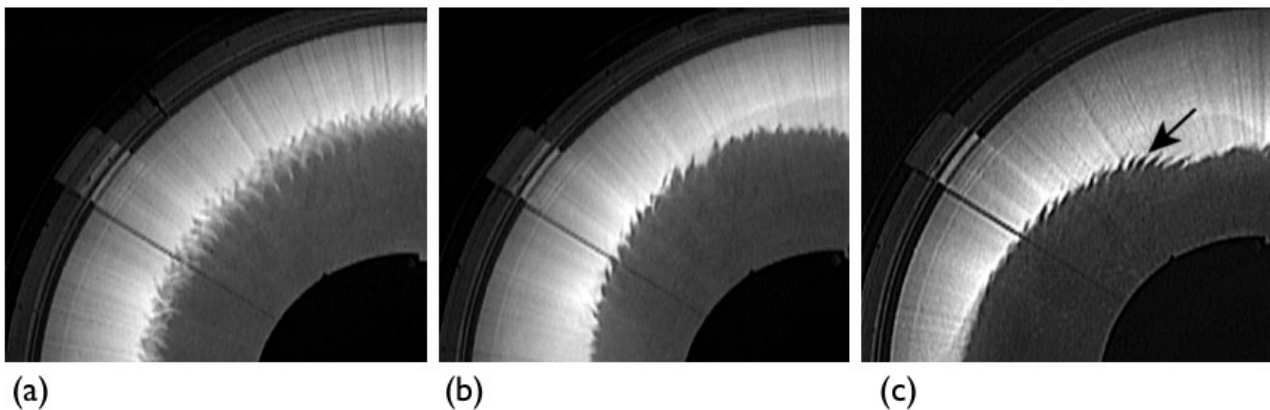


Figure 1: Typical observations of small scale waves at the frontal region with (a) Holmboe waves, and (b) Kelvin-Helmholtz waves. In (c) necessary conditions for Kelvin-Helmholtz and Holmboe waves are not satisfied. The waves are observed in (a) the stable regime (b), the Rossby-Kelvin regime, and (c) the baroclinic unstable regime.

1. Scolan H., (2011). Dynamique et stabilité de fronts : phénomènes géostrophiques. PhD Thesis, Université de Grenoble, Grenoble.
2. J.-B. Flor, H. Scolan and J. Gula (2011) Frontal instabilities and waves in a differentially rotating fluid. *J. Fluid Mech.* 685, p532- 542
3. H. Scolan, J.-B. Flor, and R. Verzicco (2013) Frontal instabilities at a density-shear interface in a rotating two-layer stratified fluid.
4. Modeling Atmospheric and Oceanic Fluid Flows: Insights From Laboratory Experiments, AGU Books. In press.

Mickael Bosco (Irphe)

Dynamique du sillage d'un cylindre stratifié

Mickael Bosco (Irphe)

Bien que la dynamique du sillage d'un cylindre est connue et largement étudiée pour un fluide homogène, peu d'études ont été mené sur les sillages stratifiés malgré les nombreuses applications géophysiques comme les écoulements atmosphériques ou les sillages océaniques. Une étude expérimentale et numérique est réalisée afin de comprendre comment une stratification linéaire modifie la dynamique du sillage stratifié d'un cylindre incliné. L'étude des instabilités 3D a montré que dans le cas du sillage d'un cylindre vertical, le mode A, bien connu pour des sillages homogènes, est également présent pour une faible stratification. Cette dynamique est fortement modifiée pour des sillages inclinés - pour une stratification modérée - puisqu'un nouveau mode instable, probablement du à une instabilité de couches critiques, apparait. Une étude plus récente sur des cylindres fortement inclinés - très proche du cas géophysique - a montré l'apparition d'un mode instable pour de fortes stratifications semblant correspondre aux ondes de Lee, caractérisé par de très petites longueurs d'onde.

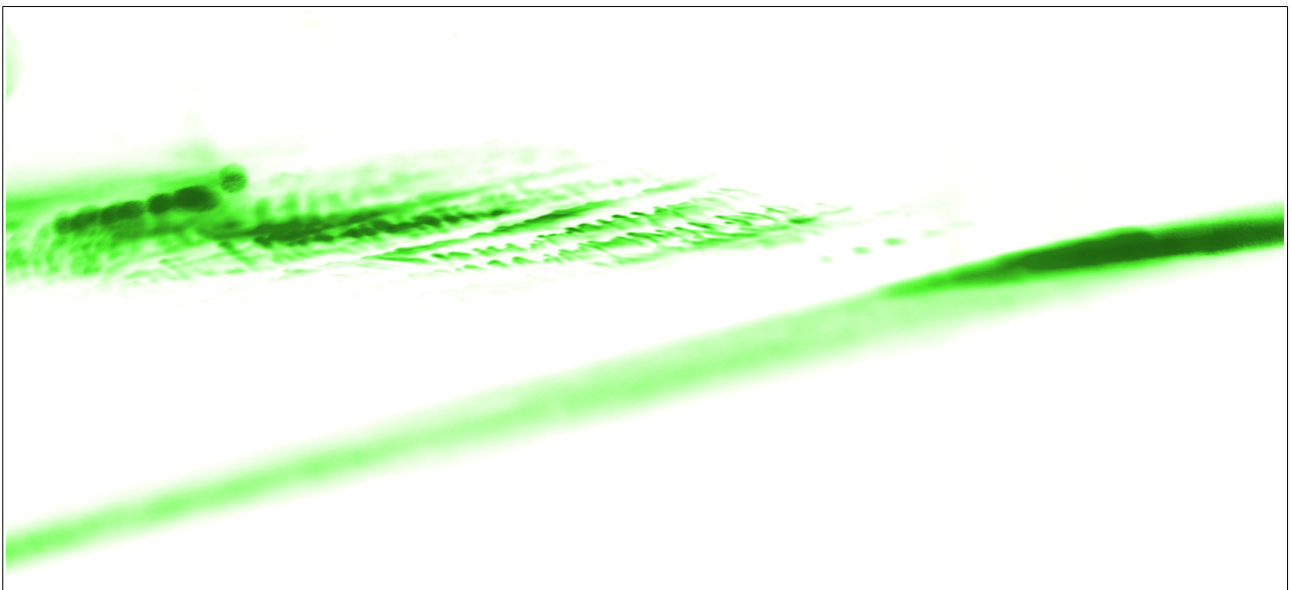


Figure 1: Visualisation à la fluoresceine du Mode L ($Re=195$, $F=0.65$).

Atmosphère

Chantal Staquet (LEGI)

Caractérisation des mouvements oscillants dans l'atmosphère stable d'une vallée encaissée

C. Staquet, Y. Largeron (University of Grenoble & LEGI, Grenoble, France)

C. Chemel (NCAS-Weather, University of Hefordshire, UK)

In a valley sheltered from strong synoptic effects, the dynamics of the valley atmosphere at night are dominated by katabatic winds. In a stably stratified atmosphere, these winds undergo temporal oscillations, whose frequency is given by $N \sin \theta$ for an infinitely long slope of constant slope angle θ , N being the buoyancy frequency. Such an unsteady flow in a stably stratified atmosphere may also generate internal gravity waves (IGWs) (Figure 1). The numerical study by Chemel et al. (Meteorol Atmos Phys 203:187-194, 2009) showed that, in the stable atmosphere of a deep valley, the oscillatory motions associated with the IGWs generated by katabatic winds are distinct from those of the katabatic winds. The IGW frequency was found to be independent of α and about $0.8N$.

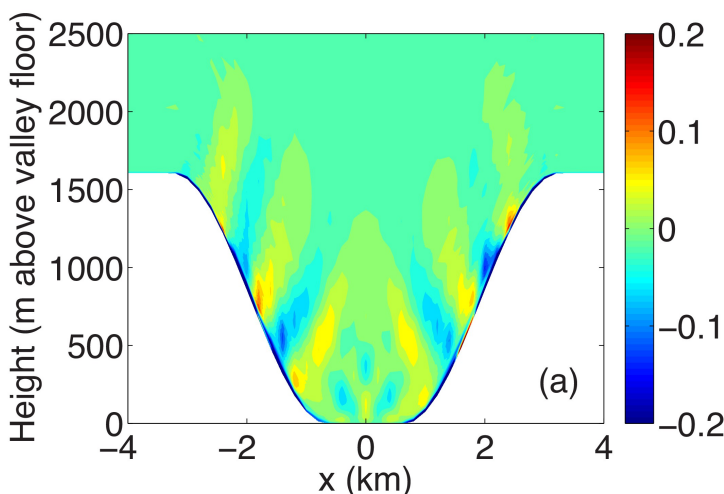


Figure 1: Vertical cross-section of a valley of idealized shape in a stably-stratified atmosphere. Contours of the vertical component of the velocity field are displayed, which attest of the generation of an internal gravity wave field from the katabatic flow (flowing along the slopes but hardly visible on the figure). The wave amplitude is about ten times smaller than the katabatic flow amplitude.

Their study did not consider the effects of the background stratification and valley geometry on these results. These effects are investigated in the present study for a wide range of stratification and slope angles, through numerical simulations for a deep valley. The two oscillatory systems are reproduced in the simulations. The frequency of the oscillations of the katabatic winds is found to be equal to N times the sine of the maximum slope angle. Remarkably, the IGW frequency is found to also vary as $C_w N$, with C_w in the range $0.7 - 0.95$. These values for C_w are similar to those reported for IGWs radiated by any turbulent field with no dominant frequency component. Results suggest that the IGW wavelength is controlled by the valley depth.

1. Largeron Y., Staquet C. & Chemel C. 2013 Characterization of oscillating motions in the stable atmosphere of a deep valley. Boundary Layer Meteorology, DOI 10.1007/s10546-013- 9825-y.

Alexandre Paci (Meteo France)

Veine hydraulique stratifiée de Toulouse: quelques expériences de laboratoire sur les ondes internes topographiques dans l'atmosphère

Alexandre Paci (CNRM-GAME, Météo-France & CNRS)

Le laboratoire de mécanique des fluides géophysiques du CNRM-GAME (UMR3589 CNRS et Météo-France) dispose d'un ensemble expérimental unique pour l'étude des écoulements stratifiés en densité et cisailés (une veine hydraulique, deux canaux hydrauliques et une table tournante). Les activités de l'équipe se concentrent sur les interactions écoulement/topographie dans l'atmosphère et dans l'océan (couche limite atmosphérique, ondes de gravité internes générées sur une topographie). La veine hydraulique est en particulier reconnue comme une installation hydraulique majeure en Europe à travers son insertion, en partenariat avec la plaque tournante Coriolis du LEGI, dans le réseau du programme européen HYDRALAB. Cette veine hydraulique de 30 m de long peut aussi être utilisée en mode canal fermé. Elle a été conçue pour produire en laboratoire, donc dans des conditions parfaitement contrôlées, des jeux de données précis et complets sur des écoulements semblables à ceux d'un certain nombre de processus de l'atmosphère et de l'océan. Elle permet donc de compléter les observations du milieu naturel, limitées par leur dispersion et l'impossibilité de contrôler les conditions de l'écoulement.

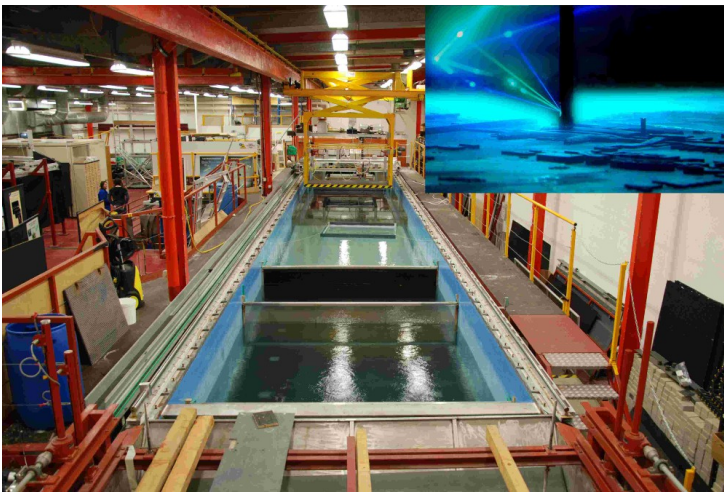


Figure 1: Vue de la grande hydraulique stratifiée de Toulouse (déferlement...) sera donné.

Cette installation fut initialement conçue pour l'étude du vent à petite échelle sur des structures ou des topographies complexes. Elle est maintenant largement utilisée pour mener des travaux de recherche sur des thématiques océan-atmosphère. Des expériences y sont conduites depuis quelques années pour étudier différents aspects des ondes de gravité internes générées sur une topographie dans l'atmosphère et dans l'océan. Un aperçu des expériences menées dans le contexte atmosphérique (rotors en aval d'une chaîne de montagne, ondes piégées au dessus d'un mont isolé,

1. Knigge C., D. Etling, A. Paci and O. Eiff (2010) : Laboratory experiments on mountain induced rotors, Quarterly Journal Royal Meteorological Society, 136 : 442-450, doi :10.1002/qj.564
2. Dossmann Y., A. Paci, F. Auclair and J. W. Floor (2011) : Simultaneous velocity and density measurements for an energy-based approach to internal waves generated over a ridge, Experiments in Fluid, 51 (4) : 1013-1028, doi :10.1007/s00348-011-1121-3
3. Dossmann Y., F. Auclair and A. Paci (2013) : Topographically induced internal solitary waves in a pycnocline : primary generation and topographic control, Phys. Fluids 25 (066601), doi :10.1063/1.4808163

Riwal Plougonven (LMD)

Simulations of gravity waves over Antarctica and the Southern Ocean: comparison to balloon observations and investigation of non-orographic sources

Riwal Plougonven, Albert Hertzog and Lionel Guez (LMD, Paris)

Gravity waves in the lower stratosphere above Antarctica and the Southern Ocean have been characterized from observations by superpressure balloons from the Vorcore campaign (Hertzog et al 2008). Mesoscale simulations with the WRF (Weather Research and Forecast Model) are carried out to analyze further the gravity-wave field, with an emphasis on non-orographic waves.

First, the realism of the simulated waves is assessed by comparison to the observations. A satisfactory overall agreement is found, but different behaviour is noted for orographic waves (overestimation in the simulations relative to the observations) and non-orographic waves (underestimation).

Second, the gravity-wave field is analyzed in more detail. It is necessary to quantify orographic and non-orographic waves separately. Orographic waves are larger and more intermittent, yet affect only a limited geographical region. Hence their overall contribution to momentum fluxes entering the stratosphere is comparable to that of non-orographic sources. A diagnostic for intermittency, the Gini coefficient, is proposed.

Third, in order to better identify non-orographic sources, case studies are carried out for episodes of intense momentum fluxes over the Southern Ocean, far from islands. The emitted gravity waves occur over intense and rapid cyclogenesis events (polar lows). It appears that, despite the high latitude, moist effects play a crucial rôle in the emission of the gravity waves.

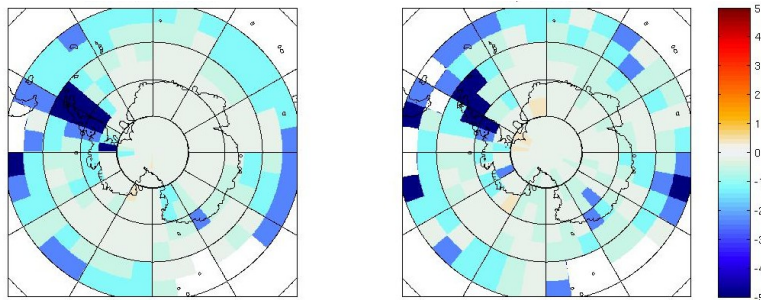


Figure 1: Zonal momentum fluxes at ~19 km from the simulations (left) and the balloon observations (right), averaged over the period 21/10 - 18/12/2005. The simulations are sampled at times and locations where balloons were present (see Plougonven et al 2013). Color range is voluntarily limited to $[-5 ; 5]$ hPa, in order to reveal the spatial structure over the ocean.

1. Hertzog, A., et al (2008) : Estimation of gravity-wave momentum fluxes and phase speeds from long-duration stratospheric balloon flights. 2. Results from the Vorcore campaign in Antarctica, J. Atmos. Sci., 65, p3065-3070.
2. Plougonven, R., et al (2013) : Gravity waves over Antarctica and the Southern Ocean: consistent momentum fluxes in mesoscale simulations and stratospheric balloon observations, Q.J. Roy. Met. Soc., 139, p101-118.

P. Maury (LMD)

A stochastic parameterization of the gravity waves due to convection and impact on the equatorial stratosphere

P. Maury, L. Guez, and F. Lott (LMD, Paris)

A formalism is proposed to represent the gravity waves due to convection in a General Circulation Model that includes a well resolved stratosphere. It is based on a stochastic approach, where an ensemble of monochromatic waves is built up, by launching few waves at each time step, and by cumulating the effect of these waves via an AR1 relation between the GWs tendency at a given time step and that at the next time step. Some properties of each waves are chosen randomly, like their wavenumbers and frequencies and with fixed probability distribution. Their amplitude nevertheless, is directly related to the precipitation, translating it in an heating rate and using linear theory to predict the amplitude of the waves such a heating can produce.

First, off-line tests are done using re-analysis and global precipitation data. They illustrate that the scheme launches GWs momentum fluxes that are much more erratic then when uniform sources are considered. This makes that the scheme has a tendency to act at lower level then when uniform sources are considered. We then verify that the parameterization, when applied to a General Simulation Model (GCM) with high vertical resolution in the stratosphere ($dz \sim 500m$) is able to produce a Quasi-Biennial Oscillation (QBO), and to improve the Semi-Annual Oscillation (SAO).

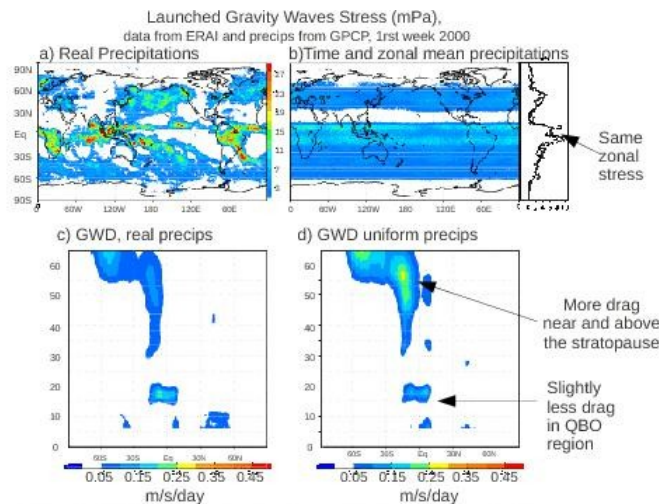


Figure 1: When the GWs amplitude is related to precipitations, the launched fluxes become much more erratic, fewer GWS of larger amplitude are launched than when the sources are uniform and un-specified (b and d).

1. Lott, F., L. Guez, and P. Maury 2012: A stochastic parameterization of non-orographic gravity waves: Formalism and impact on the equatorial stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06807, doi:10.1029/2012GL051001.
2. Lott, F and L. Guez 2013: A stochastic parameterization of the gravity waves due to convection and impact on the equatorial stratosphere, *J. Geophys. Res.*, Submitted.

A. Hertzog (LMD)

Gravity-wave characteristics derived from quasi-Lagrangian balloon flights in the stratosphere

A. Hertzog, R. Plougonven, V. Jewtoukoff (LMD)
R. A. Vincent (U. of Adelaide)

Most of our observational knowledge of gravity waves in the atmosphere comes from vertical profiles performed by ground-based instruments (radar, lidar), radiosoundings or space-borne instruments. Superpressure balloon flights on the other hand provide the opportunity to sample the atmosphere along quasi-Lagrangian trajectories, like drifters in the oceans.

The presentation will be devoted to presenting elements describing how gravity-wave characteristics are deduced from observations collected during those specific long-duration balloon flights. This technique will be applied to recent measurements over Antarctica and the surrounding oceans during the framework of the international Concordiasi project. The Concordiasi observations have in particular enabled us to estimate gravity-wave momentum fluxes, which are a useful constraint to gravity-wave drag parameterization used in atmosphere general circulation models. Momentum flux maps produced with this dataset are also used to identify major wave sources and to emphasize the large spatial heterogeneity of wave activity in the southern polar regions.

Last, by constructing probability distribution functions of momentum fluxes, we will show observational evidence that gravity-wave activity in the stratosphere is highly intermittent. Yet, the wave intermittency varies significantly according to the wave sources, and is higher over mountain ranges than everywhere else. Future similar balloon flights will be performed in the tropics, and will particularly address the problem of wave generation by tropospheric convection. Laboratory experiments would likely be very helpful to study the efficiency of such wave source, and to provide the characteristics of the generated waves.

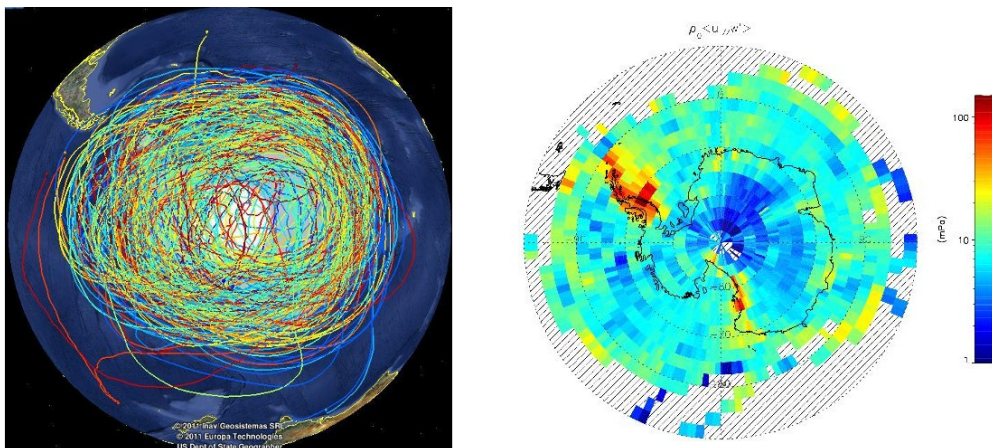


Figure 1: Left :Trajectories of the 19 long-duration balloons launched from McMurdo, Antarctica in September-October 2010; right : Gravity-wave absolute momentum flux derived from the balloon observations over the whole campaign (September-January)

1. Boccara, G., A. Hertzog, R. A. Vincent, et F. Vial, Estimation of gravity wave momentum flux and phase speeds from quasi-Lagrangian stratospheric balloon flights. 1: Theory and simulations, J. Atmos. Sci., 65, 3042-3055, 2008.

Francois Lott (LMD)**Gravity Waves Produced by Potential Vorticity Anomalies**

Francois Lott, R. Plougonven (LMD, Paris)

J. Vanneste (University of Edimburg)

The gravity waves (GWs) produced by potential vorticity (PV) anomalies in a vertical wind shear are evaluated for an unbounded rotating stratified flow. In this set-up, the disturbances have two inertial layers, one on each side of the PV anomaly that produces them. Between these layers the disturbance is well predicted by the quasi-geostrophic theory, beyond these layers it corresponds to propagating GWs.

This GW signal is predicted analytically using a Green's function method. The Green's functions used belong to the continuum of solutions of the non-geostrophic Eady problem of baroclinic instability. We find that the non-dimensional EP-flux of the GWs in the far field is approximately $\exp(-\pi N/Uz)/8$, where N is the Brunt-Vaisala frequency and Uz the wind shear. Between the two inertial layers the EP-flux is twice that outside of them, which means that substantial wave-flow interactions occur in the inertial layers. This formula is found to be useful for a large range of PV distribution, is easy to translate in dimensional form and from the large scale flow characteristics. The case of a PV disturbance with amplitude 1PVU and depth 1km is then analysed. When this disturbance enters in the troposphere, the EP-fluxes are between 0.1mPa and 100mPa when the Richardson number $J=N/Uz$ is between 1 and 10. These values compare with those observed in the low stratosphere, which suggests that we have identified a substantial GW source, and that this source can be parameterized in GCMs.

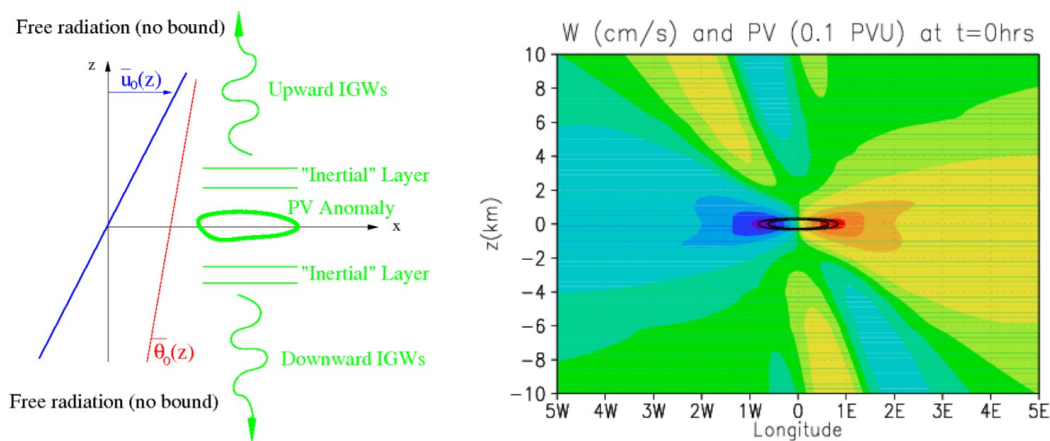


Figure 1: L'anomalie de tourbillon potentiel (en traits noirs) produit un champ de vitesse verticale, qui loins des niveaux critiques inertiels devient un champ d'ondes de gravité.

1. Lott F., R. Plougonven, and J. Vanneste, Gravity waves generated by sheared potential-vorticity anomalies, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67, 157-170, 2010. doi: 10.1175/2009JAS3134.1
2. Lott, F., R. Plougonven, and R. Vanneste, 2012: Gravity waves generated by sheared three dimensional potential vorticity anomalies, 69, 2134–2151. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-11-0296.1>

Océan 1

Caroline Muller (LadhyX)

Abyssal Hill Roughness Impact on Internal Tide Generation: Linear Theory

Caroline Muller (LadhyX), Angélique Melet (Princeton University/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), Maxim Nikurashin (Institute for Marine and Antarctic Studies, University of Tasmania)

Internal tide driven mixing plays a key role in sustaining the deep ocean stratification and meridional overturning circulation. Internal tides can be generated by topographic horizontal scales ranging from hundreds of meters to tens of kilometers. State of the art topographic products hardly resolve scales smaller than ~ 10 km in the deep ocean, over which abyssal hills are the dominant ocean floor roughness fabric. An evaluation of the impact of abyssal hill roughness on internal-tide generation is presented in this study. The conversion of the M2 barotropic to baroclinic tidal energy is calculated based on the linear wave theory using the Shuttle Radar Topography Mission SRTM30_PLUS bathymetric product at 1/120 degree resolution with and without the addition of synthetic abyssal hill roughness. Internal tide generation by abyssal hills integrates to 0.1 TW globally (i.e. $\sim 10\%$ of the energy flux due to larger topographic scales resolved in standard products) and is dominated by mid-ocean ridges, where abyssal hills roughness is large. Focusing on two regions located over the Mid-Atlantic Ridge and the East Pacific Rise, it is shown that regionally the increase of the energy flux due to abyssal hills can reach up to 100%, or 50% when a crude correction for supercritical slopes contribution is attempted, and that small scales of the bathymetry strongly contribute to the energy conversion. Therefore, abyssal hills, unresolved in state of the art topographic products, can have a strong impact on internal tides generation, especially over mid-ocean ridges.

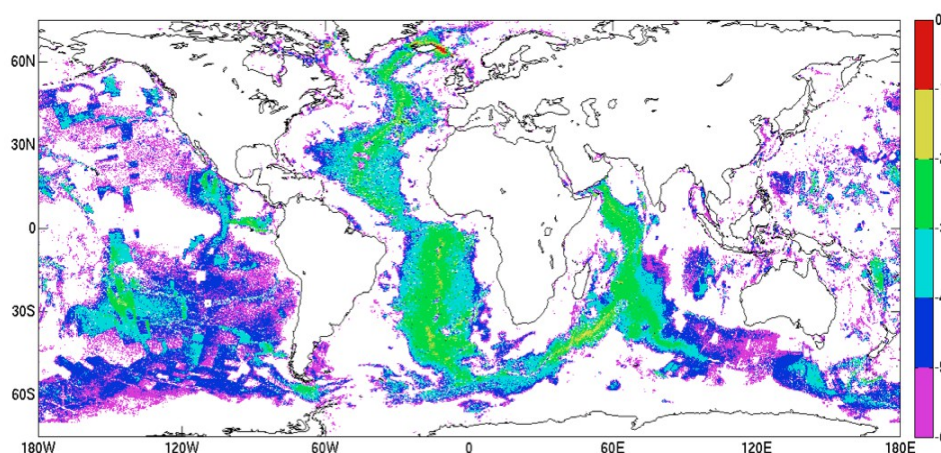


Figure 1: Abyssal Hills contribution to the energy flux from the M2 tide into internal tides (in \log_{10} , W/m²)

1. A. Melet, M. Nikurashin, C.J. Muller, S. Falahat, J. Nycander, P. Timko, B. Arbic, J. Goff (2013) "Abyssal Hill Roughness Impact on Internal Tide Generation: Linear Theory", Journal of Geophysical Research - Oceans, Submitted

Francis Auclair (LA)

Régimes d'ondes internes topographiques: génération de solitons et contrôle hydraulique

Francis Auclair (LA), Alexandre PACI (CNRM-GAME, Météo-France & CNRS), Lucie Bordoï, Yvan Dossmann (LA)

L'étude des cascades d'échelles aboutissant au mélange turbulent de l'océan constitue le fil rouge de nos travaux. En associant étroitement simulation numérique et simulation physique, nous avons en particulier exploré le rôle joué par les marées internes générées au dessus d'un talus, d'une dorsale océanique et plus récemment au passage d'un détroit. Nous avons pour cela été amenés à implémenter voire à développer de nouveaux outils expérimentaux (stéréo-corrélation...) et numériques (modèle océanique à toit libre non-hydrostatique et non-Boussinesq...). Nous présenterons plus spécifiquement deux régimes d'ondes internes topographiques: la génération d'ondes solitaires au dessus d'une dorsale océanique et le contrôle hydraulique des ondes au passage d'un détroit.

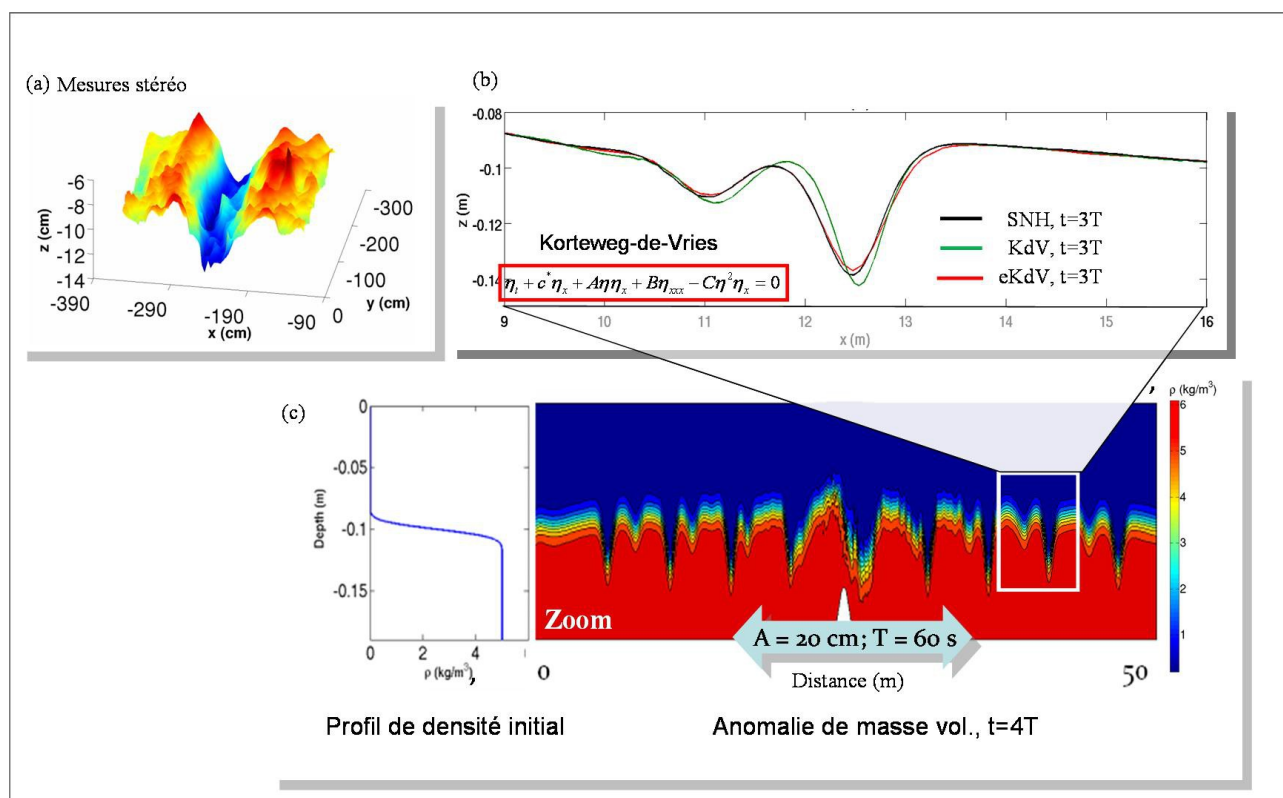


Figure 1: Génération d'ondes solitaires au-dessus d'une dorsale océanique: évolution de la pycnocline. (a) Simulation physique dans la veine hydraulique stratifiée de Toulouse, visualisation par stéréo-corrélation, (b) Simulation numérique d'une isopycne à partir du modèle KdV et du modèle SNH, (c) Section verticale de masse volumique simulée numériquement (SNH).

Aurélien Ponte (LPO)

Modélisation de la marée interne en Californie du Sud.

Aurélien Ponte (LPO)

Les ondes de marée interne sont produites lorsque les courants de marée rencontrent des variations bathymétriques et perturbent la stratification océanique. Une fois générées, ces ondes peuvent ensuite se propager sur des distances considérables $O(1000\text{km})$. Les raisons motivant l'étude de la marée interne sont multiples. Elle affecte, entre autre, notre habilité à interpréter les données altimétriques et le fonctionnement des sonars. Elle contribue également au mélange océanique. Je montrerais les résultats d'une série de simulations numériques qui met en lumière le problème posé par la propagation à longue distance de la marée interne pour la simulation régionale de marée. Cette propagation se traduit concrètement par une sensibilité des simulations de marée à la taille du domaine numérique utilisé. Plus fondamentalement, ceci motive le besoin de comprendre les modalités de propagation et de dissipation de la marée interne.

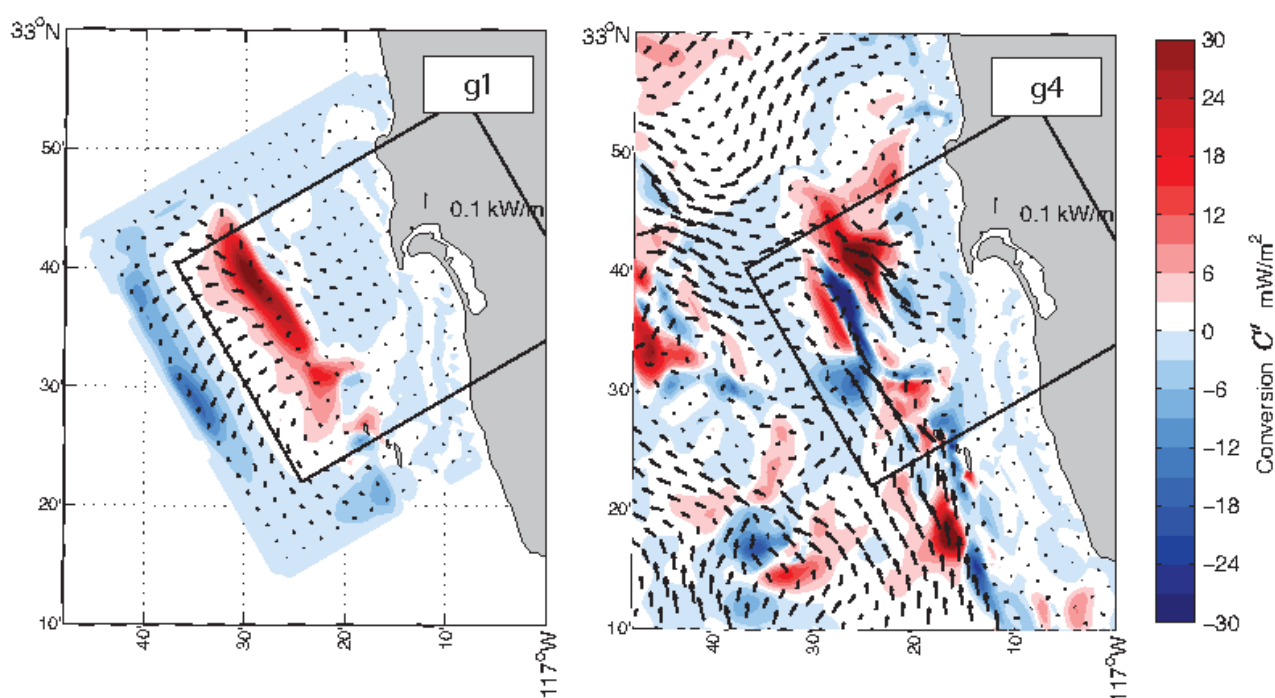


Figure 1: Flux d'énergie barocline d'une simulation dans un domaine de 64km x 64km (gauche) et dans un domaine 512km x 512km. La conversion d'énergie barotrope en énergie barocline est indiquée par les contours de couleur.

1. Coastal numerical modelling of tides: sensitivity to domain size and remotely generated internal tide. A. L. S. Ponte, B. Cornuelle. Ocean Modelling, 62:17-26, 2013.

Yannis Cuypers (LOCEAN)**Marées internes, ondes solitaires et turbulence dans le golfe de Gascogne**

Y. Cuypers, P. Bouruet-Aubertot, X. H. Xie, A. Lourenço (LOCEAN), B. Ferron, N. Cortes, (LPO), A. Pichon (SHOM)

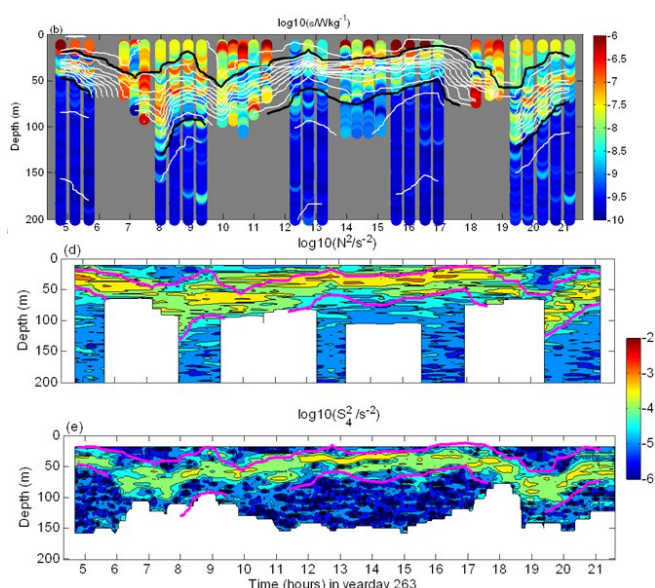


Figure 1: Panneau du haut: taux de dissipation (W/kg) les lignes blanches sont des isothermes, panneau du milieu : fréquence Brunt Väisälä, panneau du bas : cisaillement à la puissance 4., les lignes violettes représentent les isothermes $17.3^{\circ}C$ and $12.9^{\circ}C$ qui délimitent la thermocline

dissipation important. Ce taux de dissipation est encore amplifié par le passage des ondes solitaires. En dehors des périodes d'observation d'ondes solitaires le taux de dissipation mesuré est en bonne accord avec la paramétrisation fine échelle de MacKinnon et Gregg (MG 2003). Celle-ci s'applique à un champ d'ondes internes dominés par des ondes basse fréquence, ce qui est cohérent avec un signal de marée interne dominant. En revanche les observations du taux de dissipation sont en désaccord avec la paramétrisation de Gregg-Henyey (GH 1989) qui s'appuie sur l'hypothèse d'un champ d'ondes internes modélisé par le continuum d'ondes de Garrett et Munk. La paramétrisation MG est connue pour être valable en milieu côtier, nos observations montrent que celle-ci peut également s'appliquer à l'océan profond lorsque le champ d'ondes internes est dominé par quelques modes basse fréquence associé à la marée interne.

Durant la campagne MOUTON des mesures hydrologiques et du courant à fine échelle ont été réalisées conjointement à des mesures de microstructure au centre du golfe de Gascogne afin de caractériser la dynamique des ondes internes de marée et le mélange associé. Ces mesures ont été réalisées à un soixantaine de km du point de résurgence du rayon de marée interne ou études théoriques et numériques prédisent une conversion du rayon de marée en ondes interfaciales de mode relativement élevé (mode 3) ainsi qu'une évolution non linéaire et non hydrostatique de ce mode en ondes solitaires. Des ondes de marée interne de grande amplitude qui se projettent principalement sur les modes 3 et 4 sont mises en évidence par nos observations, celles-ci génèrent des ondes solitaires de mode 1 piégées dans la thermocline. Ces ondes sont à l'origine d'une fine bande de cisaillement dans la thermocline qui est associé à un taux de

1. Gregg, M. C. (1989). Scaling turbulent dissipation in the thermocline. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 94(C7), 9686-9698.
2. MacKinnon, J. A., and M. C. Gregg (2003), Mixing on the late-summer New England Shelf—Solibores, shear, and stratification, *J. Phys. Oceanogr.*, 33(7), 1476–1492.
3. Xie, X. H., Cuypers, Y., Bouruet-Aubertot, P., Ferron, B., Pichon, A., Lourenço, A., & Cortes, N. (2013). Large-amplitude internal tides, solitary waves, and turbulence in the central Bay of Biscay. *Geophysical Research Letters*.

Matthieu Mercier (MIT)

De Luzon au laboratoire : modéliser la marée interne.

Matthieu Mercier, ENDIlab, MIT

<http://web.mit.edu/mmercier/www/>

La marée interne est issue de l'interaction d'un écoulement oscillant (la marée barotrope) avec une topographie dans un fluide stratifié. Différents modèles décrivent les mécanismes mis en jeu et des outils numériques sont disponibles pour prédire les ondes internes générées et les comparer aux observations. Cependant des limitations existent lorsque l'on considère des effets tridimensionnels ou non-linéaires.

Le détroit de Luçon (The Luzon Strait), situé entre Taïwan et les Philippines, est un parfait exemple de génération d'ondes internes non linéaires par une topographie complexe. Des observations in situ et via imagerie satellite ont mis en évidence que des ondes solitaires s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres se propagent depuis le détroit vers la mer de Chine. Ces ondes solitaires sont les plus fortes observées jusqu'à aujourd'hui, avec des déplacements verticaux allant jusqu'à 200m et des vitesses horizontales de l'ordre du mètre par seconde. De nombreuses études (océanographiques, numériques et théoriques) cherchent à identifier l'origine de ces ondes, et l'influence des différents facteurs tels que la stratification, le forçage de la marée, etc. [2]

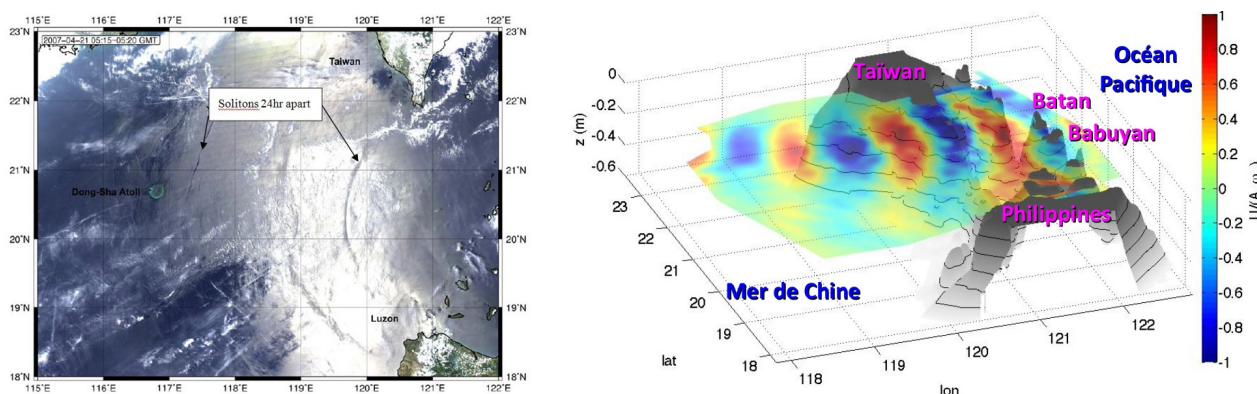


Figure 1 : Gauche :Image satellite MODIS illustrant deux trains d'ondes solitaires s'éloignant du détroit de Luzon (RC Lien, croise plan 2011). Droite :Observation expérimentale des ondes internes rayonnées

Afin de compléter les études précédentes, nous avons réalisé une expérience à grande échelle à la plateforme Coriolis, table tournante de 13m de diamètre, la plus grande au monde. Nous avons reproduit le forçage de la marée, générant un écoulement oscillant sur une maquette réaliste du détroit, avec une stratification similaire aux observations océaniques. La mise à l'échelle du laboratoire a été réalisée tout en préservant le régime dynamique associé au problème océanique (nombre de Froude, criticalité, excursion de la marée, etc.). Je présenterai les principaux résultats obtenus en lien avec les observations existantes.

1. Mercier, M. J.; Gostiaux, L.; Helfrich, K.; Sommeria, J.; Viboud, S.; Didelle, H.; Ghaemsaidi, S. J.; Dauxois, T. & Peacock, T. Large-scale, realistic laboratory modeling of M2 internal tide generation at the Luzon Strait Geophys. Res. Lett., 2013GL058064
2. Farmer, D.M., M.H. Alford, R.-C. Lien, Y.J. Yang, M.-H. Chang, and Q. Li. 2011. From Luzon Strait to Dongsha Plateau: Stages in the life of an internal wave. Oceanography 24(4):64–77, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2011.95>.

François Lefeuvre (LadHyX)

Le rôle des ondes internes dans le mélange océanique

François Lefeuvre (LadHyX)

Afin d'améliorer les modèles climatiques actuels, il est nécessaire de mieux comprendre les mécanismes d'instabilité de la marée interne. En effet, le mélange induit par l'instabilité, donc le déferlement, des ondes internes n'est pas bien compris et quantifié. Ce déferlement peut avoir plusieurs causes:

- l'instabilité de KelvinHelmoltz,
- l'instabilité convective,
- l'instabilité due aux interactions ondesondes.

Le but de ce projet est donc de pouvoir prédire précisément la déperdition énergétique associée à ces ondes internes en fonction de la topographie sousmarine de la zone considérée. Pour ce faire, une cartographie des zones d'instabilités sera étudiée. L'étude se limite tout d'abord au cas idéalisé d'un domaine 2D dans lequel on considère la génération des ondes internes induites par la marée barotrope. Ce domaine, périodique dans la direction zonale, est composé d'une topographie aléatoire aux petites échelles au niveau du sol marin. Le travail est alors de mener une étude d'instabilité afin de déterminer les zones instables. Ensuite, l'étude de leurs causes sera abordée. Le travail sera mener à la fois sur un modèle numérique DNS (le code MITgcm) et à la fois sur un modèle analytique dans le but de pouvoir comparer les résultats du modèle analytique avec le modèle numérique.

Océan 2

Achim Wirth (LEGI)

Inertia-Gravity Waves generated by near Balanced Flow in 2 Layer Shallow Water Turbulence on the beta Plane

Achim Wirth (LEGI)

Using a fine resolution numerical model (2×4000^2 grid-points) of the two layer shallow-water equations of the mid-latitude beta plane dynamics, it is shown that there is no sudden breakdown of balance in the turbulent enstrophy-cascade but a faint and continuous emission of inertia gravity waves. The wave energy accumulates in the equator-ward region of the domain due to the Coriolis parameter depending on latitude and the dispersion relation of inertia gravity waves.

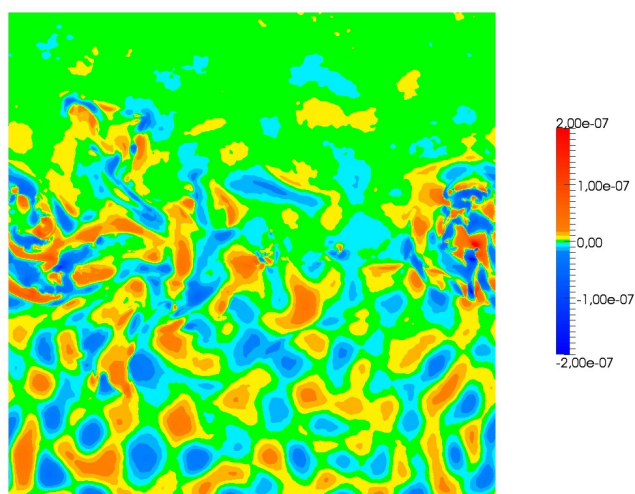


Figure 1: Divergence of the upper layer (in s^{-1}) after 250 days. The accumulation of wave-activity is clearly visible in the southern part of the domain. As is the dominance of structures of scale above the (baroclinic) deformation radius.

1. Wirth, A., Inertia-Gravity Waves generated by near Balanced Flow in 2 Layer Shallow Water Turbulence on the beta-plane, *Nonlin. Processes Geophys.*, 20, 25-34, 2013.

Pierre Labreuche (LEGI)**Dissipation of internal waves generated by geostrophic motions over small scale topography**

Pierre Labreuche (LEGI)

Deep reaching geostrophic flows in the Southern Ocean are suspected to energize internal lee waves close to bottom topography. Recent studies suggest that these internal lee waves generated in the Southern Ocean could largely be dissipated close to bottom topography. Nikurashin and Ferrari (2010b) proposed from two-dimensional numerical simulations that such bottom intensification may result from coupling between these waves and inertial oscillations. We have studied the spatial distribution of turbulent kinetic energy dissipation resulting from this coupling. For this purpose, we performed a series of two-dimensional non-hydrostatic numerical simulations of a geostrophic flow over an idealized topography for a range of physical and numerical parameters. We have shown that, in this particular flow configuration, the vertical distribution of turbulent kinetic energy dissipation is set by the vertical structure of inertial oscillations generated during internal lee wave breaking. We also extended the theory of Nikurashin and Ferrari (2010b) in order to predict the vertical structure of these inertial oscillations from large scale parameters (Labreuche et al. 2013, submitted). The presentation will focus on the critical height below which most of the dissipation occurs, as well as the amount of dissipation taking place.

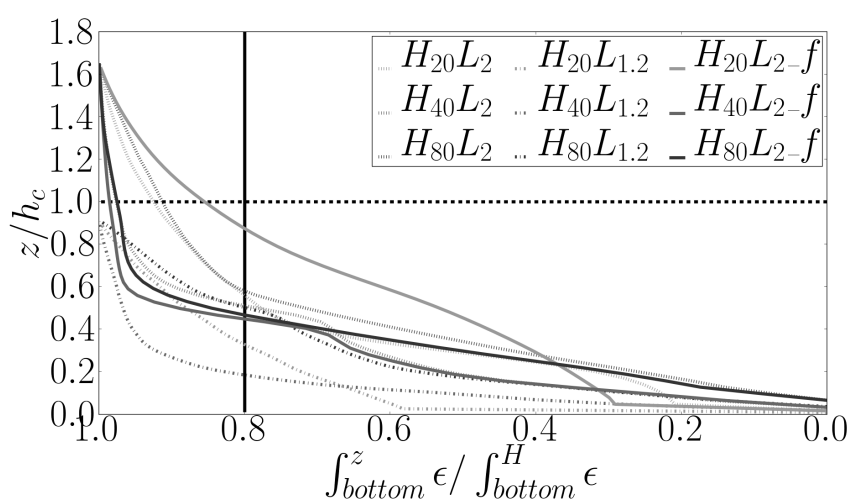


Figure 1: Fraction of the dissipated energy that is dissipated under a given height. The height z is normalized by the theoretical height of bottom dissipation hc , and a horizontal black line is drawn at $z = hc$.

1. Labreuche P., Le Sommer J. and Staquet C., Dissipation of internal waves generated by geostrophic motions over small scale topography. Submitted to Journal of Physical Oceanography.
2. Nikurashin, M. and Ferrari, R. Radiation and dissipation of internal waves generated by geostrophic motions impinging on small-scale topography: Theory. Journal of Physical Oceanography, 40, 1055-1074 (2010)

Pascale Bouruet-Aubertot (LOCEAN)**Characterization of turbulence from a fine-scale parameterization and microstructure measurements in the Mediterranean Sea during the BOUM experiment**

One of the main purposes of the BOUM experiment was to find evidence of the possible impact of submesoscale dynamics on biogeochemical cycles. To this aim physical as well as biogeochemical data were collected along a zonal transect through the western and eastern basins of the Mediterranean sea. Along this transect 3 day fixed point stations were performed within anticyclonic eddies during which microstructure measurements of the temperature gradient were collected over the top 100m of the water column. We focus here on the characterization of turbulent mixing.

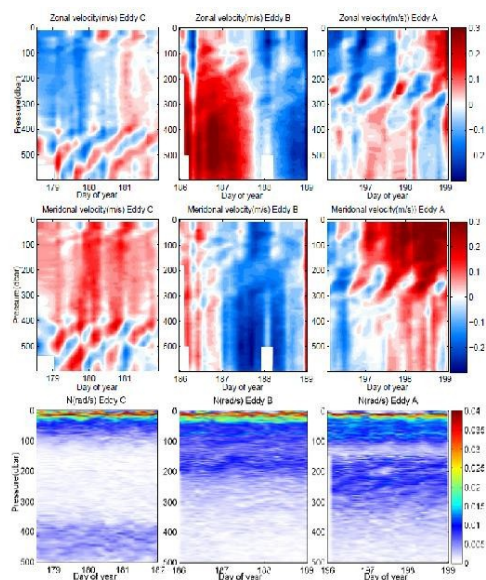


Figure 1: Time depth plots of (a) zonal velocity (b) meridional velocity (c) stratification profiles

and vertical turbulent diffusivity over a latitudinal section of the Mediterranean sea. Strong TKE dissipation rate are found within the first 500m and up to 1500 m above the bottom. Close to the bottom where the stratification is weak the inferred vertical turbulent diffusivity can reach $K_z \sim 10^{-3} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ and may therefore have a strong impact on the upward diffusive transport of deep waters masses.

1. Cuyppers, Y., Bouruet-Aubertot, P., Marec, C., Fuda, J.L. Characterization of turbulence and validation of a fine-scale parametrization in the Mediterranean Sea during the BOUM experiment *Biogeosciences Discuss.*, 8, 8961–8998

The analysis of microstructure measurements revealed a high level of turbulent kinetic energy (TKE) dissipation rate in the seasonal pycnocline and a moderate level below with mean values of the order of $10^{-6} \text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $10^{-8} \text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. The Gregg Henyey (Gregg 1989) fine-scale parameterization of TKE dissipation rate produced by internal wave breaking, and adapted here following Polzin (1995) to take into account the strain to shear ratio was first compared to these direct measurements with favorable results. The parameterization was then applied to the whole data set. Within the eddies, a significant increase of dissipation at the top and base of eddies associated with strong near inertial waves is observed. Vertical turbulent diffusivity is increased both in these regions and in the weakly stratified eddy core. The stations collected along the East West transect provide an overview of parameterized TKE dissipation rates

Louis Gostiaux (LMFA)**Observation d'ondes inertielles profondes en Méditerranée : aspects non-traditionnels.**

Nous avons déployé 103 capteurs de température indépendants (NIOZ-High Sampling Rate Thermistors, NIOZ-HST) dans la mer Ionienne sur un des sites potentiels du télescope à Neutrinos Km3Net. Les capteurs étaient espacés de 1m entre 3980m et 4080m (profondeur totale 4450m) et ont échantillonné la température à 1Hz pendant une année. À ces profondeurs, la stratification en température est un ordre de grandeur plus faible que le gradient adiabatique (0.19mK/m). Grâce à la sensibilité des capteurs NIOZ-HST (0.1mK), les données de température révèlent, une fois ce gradient supprimé, des mouvements verticaux de grande amplitude (>200m) à une période proche de la période inertielle ($T=2\pi\Omega/f\approx 20h$, avec $f=2\Omega\sin\phi$, Ω la vitesse de rotation de la Terre sur elle-même par rapport aux étoiles et ϕ la latitude). Traditionnellement (en présence de stratification, i.e. pour $f < N$) les ondes inertielles de fréquence proches de f sont associées à des déplacements horizontaux. Il est donc surprenant d'observer des mouvements verticaux de si large amplitude à la fréquence inertielle. Nous interprétons nos observations dans le cadre de la propagation non-traditionnelle des ondes d'inertie-gravité. En l'absence de stratification, il n'est plus nécessaire de décomposer la force de Coriolis en ses composantes horizontales et verticales, et les mouvements à la fréquence $f=2\Omega\sin\phi < 2\Omega$ peuvent alors avoir des composantes de vitesses alignées avec la gravité.

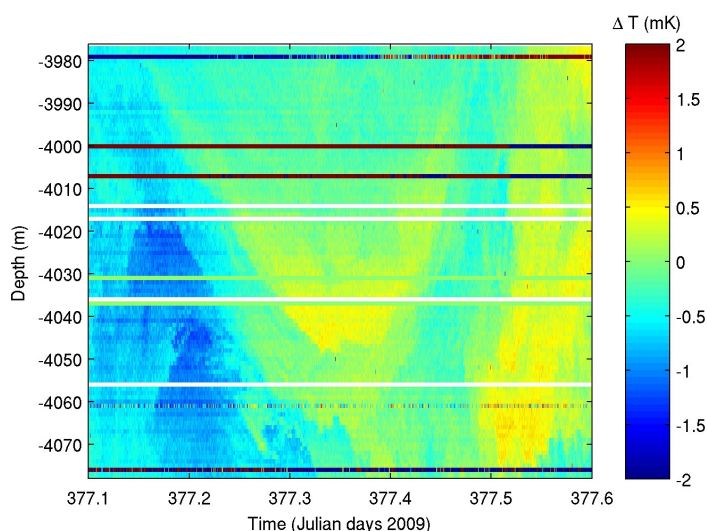


Figure 1: Séries temporelles de température enregistrées par les 103 capteurs NIOZ-HST, exemple représentatif de durée 12h. Chaque ligne horizontale est tracée indépendamment. La couleur représente l'écart de température au gradient adiabatique. Les ondes de grande amplitude (>100m) sont à la période inertielle (f).

1. Haren, H. V. & Gostiaux, L. Large internal waves advection in very weakly stratified deep Mediterranean waters Geophysical Research Letters, 2011, 38, L22603

Physique 2

Theo Gerkema (NIOZ, Netherlands)

Les courant moyens - quel rôle jouent-ils dans l'effet Doppler ?

In the ocean, internal waves commonly occur together with other, large-scale (mean) flows. How are the wave properties affected by such mean flows? In the oceanographic literature, mean flows are often said to create a “Doppler shift”. It has passed unnoticed, however, that the term “Doppler shift” is being employed in an ambiguous way. Upon closer examination, it appears that two quite distinct concepts of “Doppler shifts” feature in the literature; they are sometimes conflated, resulting in erroneous interpretations. One concept refers to the difference in frequencies measured by two observers, one at a fixed position and one moving with the mean flow—here referred to as “quasi-Doppler shifts.” The other concept is the one used in physics, where the frequency measured by an observer is compared to that of the source. In the latter sense, Doppler shifts occur only if the source and observer move with respect to each other; a steady mean flow alone cannot create a Doppler shift. This talk rehashes the classical theory to straighten out some misconceptions. It is also discussed how wave dispersion affects the classical relations and their application.

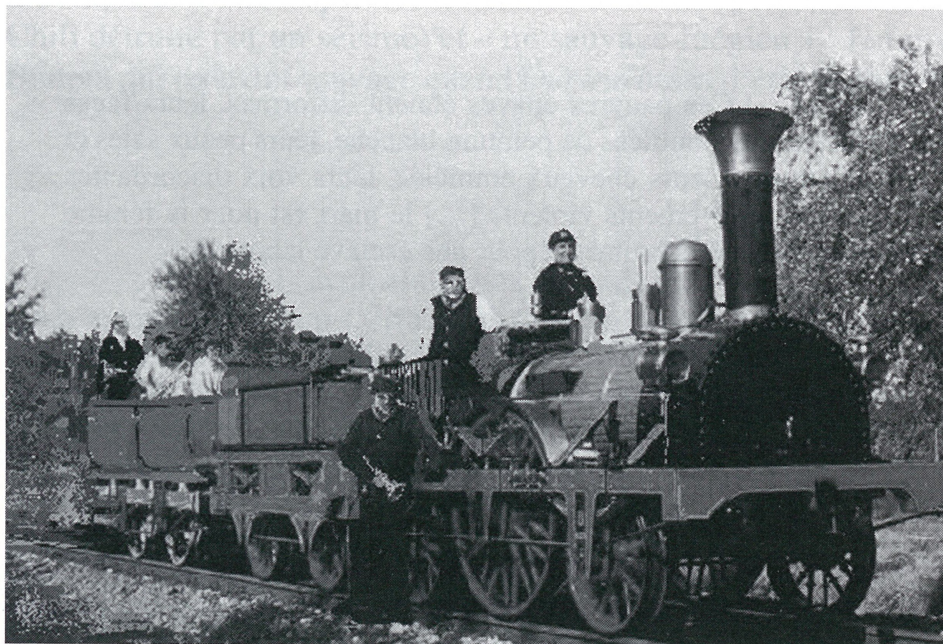


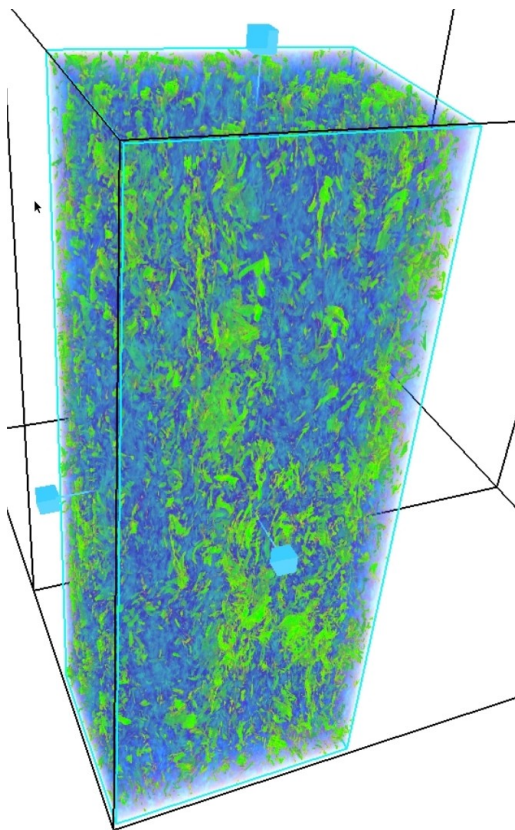
Figure 1: The theory of Doppler shifts is basically 19th century physics (in particular, by the late 19th century it was already textbook knowledge that mean flows do not create Doppler shifts). The first experiment to test Doppler's theory was carried out by Buys Ballot at a newly built railway near Utrecht in 1845. He had musicians, standing on a moving train, playing tones on a trumpet, and other musicians standing along the railway to note the change in pitch at the passage of the train. The result was a triumphant confirmation of Doppler's theory. In the context of this experiment, the point of this talk is to reiterate that a breeze of wind would never create a Doppler shift - only a relative movement of train and observer can. (Figure reproduced from N. Witkowski, Une histoire sentimentale des sciences, Seuil 2003 – origin of the photograph not stated.)

1. T. Gerkema, L.R.M. Maas & H. Van Haren, 2013: A note on the role of mean flows in Doppler-shifted frequencies. *J. Phys. Oceanogr.*, 43 (2), 432-441.

Alexandre Delache (LMFA)

Sur la restauration des caractéristiques isotropes 3D universelles en turbulence de rotation : scénario de Zeman/Ozmidov.

Alexandre Delache (LMFA - UMR 5509 CNRS, site de Saint-Etienne, Université de Lyon, Université Jean Monnet de Saint-Étienne, France),
Fabien Godefert et Claude Cambon (LMFA - UMR 5509 CNRS, École Centrale de Lyon, Université de Lyon, France)



Comme l'échelle d' Ozmidov (1965) en turbulence stratifié stablement, l'échelle de Zeman (1994) a été introduite en turbulence de rotation afin de quantifier le caractère isotropes ou anisotrope de l'écoulement pour différentes échelles: à grandes échelles, l'anisotropie créée par la rotation est dominant, alors qu'à petites échelles, les caractéristiques isotropes 3D universelles de turbulences semblent être restauré. Je présenterai des résultats confirmant ce scénario à partir de simulations numériques directes et pour différente vitesse de rotation. Nous confirmons le retour à l'isotropie des petites échelles par l'analyse du spectres angulaire, par l'analyse du transfert d'énergie et par la décomposition des modes d'énergie poloïdal / toroïdal. L'universalité est rétablie à petite échelle, mais pour des vitesses de rotation élevée.

Figure 1: Simulation numérique directe (1024^3 point) d'une turbulence en rotation pour $Ro=0.03$.

1. Zeman, O. A note on the spectra and decay of rotating homogeneous turbulence Phys. Fluids, 1994, 6, 3221
2. Dillon, T. M. Vertical Overturns: A Comparison of Thorpe and Ozmidov Length Scales J. Geophys. Res., AGU, 1982, 87, 9601-9613

Baptiste Bourget (ENS de Lyon)

Étude expérimentale de l'instabilité paramétrique subharmonique des ondes internes de gravité.

Baptiste Bourget, Thierry Dauxois, Philippe Odier, Sylvain Joubaud. Laboratoire de Physique de l'ENS de Lyon.

L'instabilité paramétrique subharmonique est une instabilité qui permet de former, à partir d'une onde primaire, deux nouvelles ondes de vecteurs d'onde et de pulsations différentes. Cette instabilité semble donc être un bon candidat pour transférer de l'énergie vers de nouvelles échelles et donc participer au mélange océanique. A l'aide d'une méthode de synthetic Schlieren, nous avons observé et mesuré l'évolution d'un faisceau d'onde plane et sa déstabilisation. Il a alors été possible, grâce à l'utilisation de traitements temporels (spectre temps-fréquence) et spatiaux (transformée de Hilbert), de mesurer les fréquences et les vecteurs d'ondes des ondes filles et de comparer ces mesures expérimentales aux prédictions théoriques. Par ailleurs, en modifiant les paramètres de l'onde mère (fréquence et amplitude), nous avons pu caractériser les conditions expérimentales d'apparition de l'instabilité et comparer ce domaine aux différents régimes théoriques de l'instabilité.

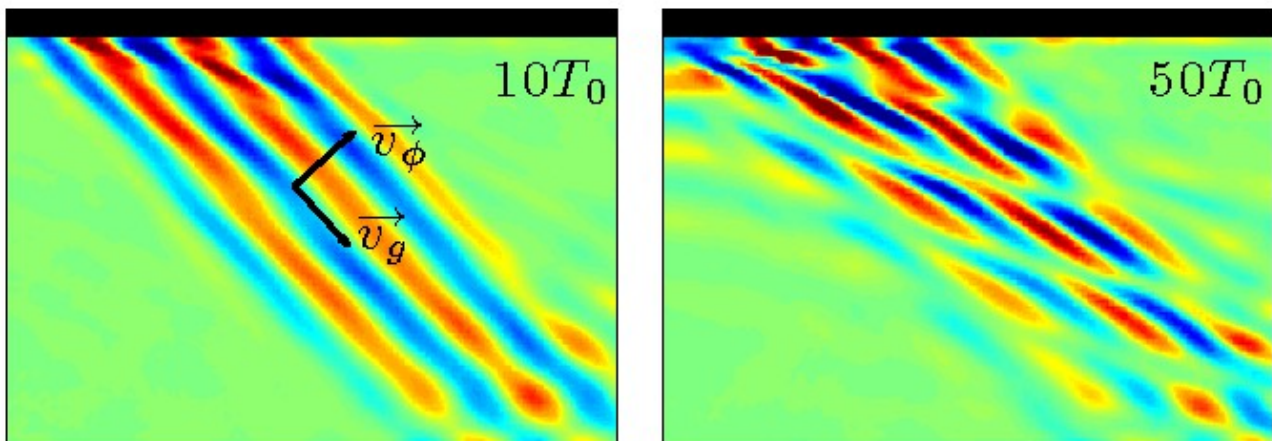


Figure 1: Déstabilisation d'une onde plane de gravité monochromatique.

B. Bourget, T. Dauxois, S. Joubaud, and P. Odier. Experimental study of parametric subharmonic instability for internal plane waves. *J. Fluid Mech.*, 723:1–20, 2013.

Patrice Le Gal (Irphe)

Génération d'ondes gravito-inertielles par la turbulence

P. Le Gal, M. Le Bars, S. Perrard, J. M. Aurnou, A. Ribero

IRPHE (Marseille), Department of Earth & Space Sciences, UCLA (Los Angeles)

Dans de nombreuses situations géophysiques et astrophysiques, une couche de fluide turbulent se situe au dessus ou en-dessous d'une zone stratifiée stable. C'est par exemple le cas des zones convective et radiative des étoiles. Alors que cette zone stratifiée a longtemps été assimilée à une zone immobile, il s'avère qu'elle est en fait le siège de mouvements oscillatoires (ondes gravito-inertielles) excités par la turbulence voisine. Ces ondes sont susceptibles de transporter de la quantité de mouvement et de l'énergie, donc d'influer significativement sur la dynamique du système considéré. Il est donc primordial de comprendre leur génération et leurs caractéristiques. Nous présentons ici 2 études expérimentales destinées à obtenir une description globale des propriétés du champ d'ondes excitées et à quantifier ses interactions avec les mouvements turbulents qui lui ont donné naissance. Dans le premier dispositif, nous utilisons le fait que l'eau a une densité maximale aux environs de 4°C pour étudier simultanément les mouvements convectifs et oscillatoires dans une configuration de type Rayleigh-Bénard avec une plaque inférieure à 0°C et une condition aux limites plus chaude à la surface. Dans le second dispositif, un panache est généré par injection d'eau et vient percuter l'interface entre une couche d'eau pure et une couche linéairement stratifiée d'eau salée. L'ensemble du système est placé sur une table tournante afin de quantifier l'influence de la force de Coriolis. Dans les deux cas, les champs de vitesse sont mesurés de façon non intrusive par vélocimétrie par images de particules. Des mesures locales sont aussi réalisées dans les zones turbulentes et stratifiées, permettant une analyse spectrale des ondes excitées.

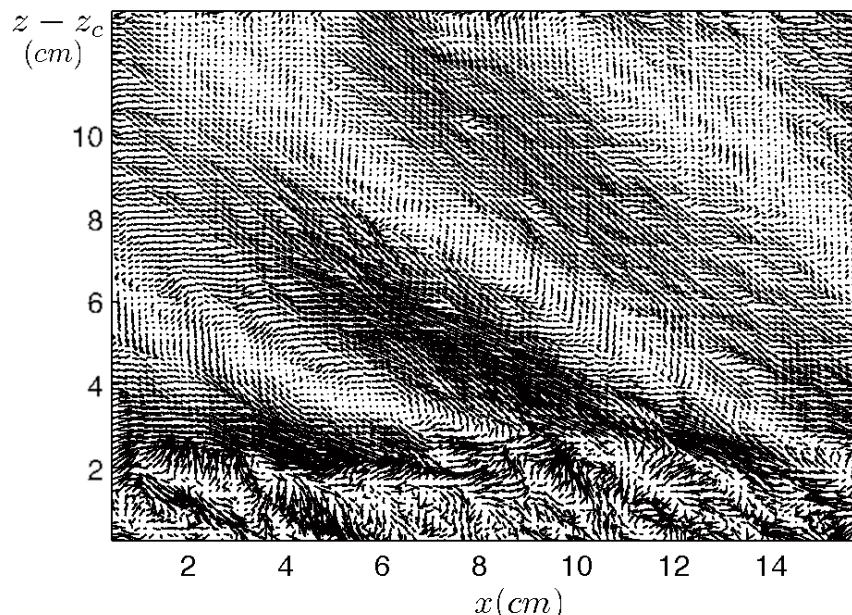


Figure 1: Champ de vitesse instantané mesuré par PIV dans la zone stratifiée. Seules les ondes se propageant vers la droite ont été gardées par notre processus de filtrage par Transformée de Hilbert.

Freddy Bouchet (ENS de Lyon)**Mécanique statistiques des équations de Saint Venant et dissipation d'énergie par les modes agéostrophiques**

Freddy Bouchet et Antoine Venaille, Laboratoire de Physique, ENS de Lyon.

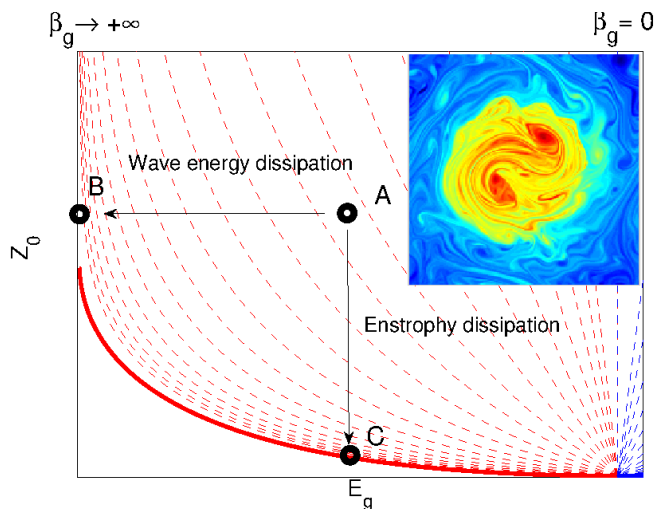


Figure 1: The small insert is a snapshot of the potential vorticity field showing the tendency of a freely quasi-geostrophic flow to self-organize into a large scale anticyclonic vortex above a topographic bump, which is predicted by equilibriums statistical mechanics. This flow is characterized by its microscopic enstrophy Z_0 and its energy E_g . We show that this self-organization phenomenon is robust for shallow water equations, but that some of the energy of the large scale flow is lost into inertial-gravity waves (energy E_w). For an initial enstrophy Z_0 and an initial total energy E , we predict the ratio E_g/E_w . The two key parameters are the enstrophy Z_0 of the flow at rest and the total energy E . The inverse temperature associated with the quasi-geostrophic flow is related to the waves through $\beta g = 1/E_w$. At high temperature, the quasi-geostrophic potential vorticity is fully homogenized. At low temperature, we recover Fofonoff flow that follows topography contours.

geophysical flow energy balance. However, due to difficulties in essential theoretical parts of the statistical mechanics approach, previous methods describing statistical equilibria were up to now limited to the use of quasi-geostrophic models. The current study fills this gap. The new theory we propose describes geophysical phenomena using statistical mechanics applied to the shallow water model, and is easily generalizable to the primitive equations. Invariant measures of the shallow water model are built based on the Hamiltonian structure and the Liouville theorem. The theory predicts a balanced large scale flow that contains only a fraction of the initial energy. The excess of energy is stored among all accessible gravity wave degrees of freedom. The theory thus predicts the fraction of energy dissipated through interaction between the vortical part of the dynamics and wave motions.

1. F. Bouchet, and A. Venaille, 2012, Statistical mechanics of two-dimensional and geophysical flows, *Physics Reports*, 515, 5, June 2012, 227–295

Geophysical flows are highly turbulent, yet embody large-scale coherent structures, such as ocean rings, jets, and large-scale circulations. Understanding how these structures appear and predicting their shape are major theoretical challenges. The statistical mechanics approach to geophysical flows is a powerful complement to more conventional theoretical and numerical methods. In the inertial limit, it allows to describe, with only a few thermodynamical parameters, the long-time behavior of the largest scales of the flow. Recent studies in quasi-geostrophic models provide encouraging results: a model of the Great Red Spot of Jupiter, an explanation of the drift properties of ocean rings, the inertial structure of mid-basin eastward jets, bistability phenomena in complex turbulent flows, and so on. Generalization to more comprehensive hydrodynamical models, which include gravity wave dynamics and allow for the possibility of energy transfer through wave motion, would be extremely interesting. Namely, both are essential in understanding the

Posters

Yannis Cuypers (LOCEAN)**Tropical storm-induced near-inertial internal waves during the Cirene experiment: energy fluxes and impact on vertical mixing**

Yannis Cuypers, Xavier Le Vaillant, Pascale Bouruet-Aubertot, Jérôme Vialard, Mike McPhaden

Near-inertial Internal Waves (NIW) excited by storms and cyclones play an essential role in driving turbulent mixing in the thermocline and interior ocean. Storm-induced mixing may be climatically relevant in regions like the thermocline ridge in the southwestern Indian Ocean, where a shallow thermocline and strong high frequency wind activity enhance the impact of internal gravity wave-induced mixing on sea surface temperature. The Cirene research cruise in early 2007 collected ship-

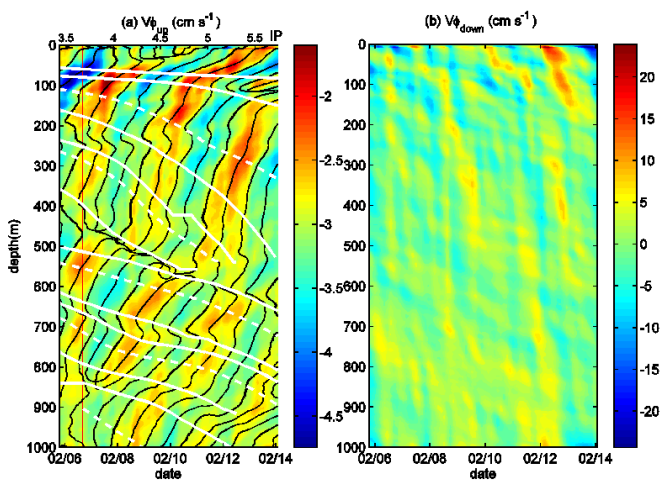


Figure 1: Fixed point station LADCP meridional velocity component during leg 2 separated in upward (left) and downward phase propagation, black lines represent line of constant phase obtained after complex demodulation of rotary current, whites lines represent rays trajectories computed from the vertical group velocity. The time axis below the left panel indicates the dates, while the time axis above the panel indicates the number of inertial periods after the first eyewall passage (e.g. after the 24th of January 2007).

increased to $0.42^{\circ}\text{C month}^{-1}$, indicative of increased shear instability along near inertial wave energy pathways.

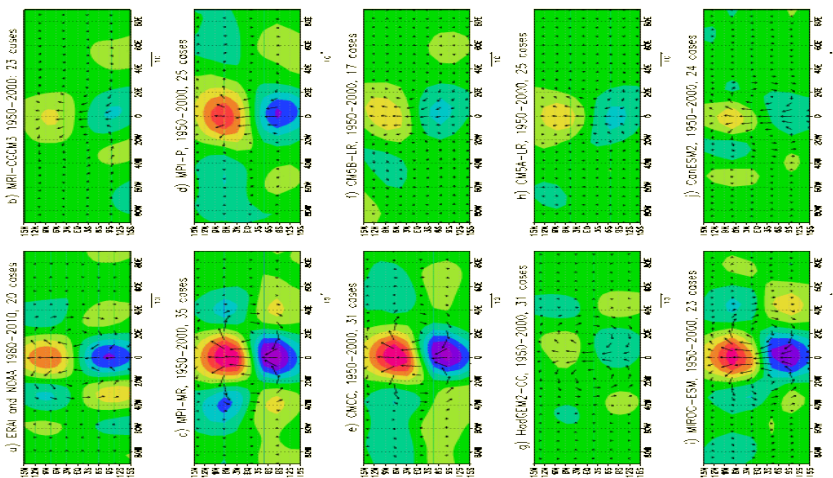
borne and mooring vertical profiles in this region under the effect of a developing tropical cyclone. In this paper, we characterize the NIW field and the impact of these waves on turbulent mixing in the upper ocean. NIW packets were identified down to 1000 m, the maximum depth of the measurements. We estimated a NIW vertical energy flux of up to 2.5 mW m^{-2} within the pycnocline, which represents about 10% of the maximum local wind power input. A non-negligible fraction of the wind power input is hence potentially available for subsurface mixing. The impact of mixing by internal waves on the upper ocean heat budget was estimated from a fine-scale mixing parameterization. During the first leg of the cruise (characterized by little NIW activity), the average heating rate due to mixing was $\sim 0.06^{\circ}\text{C month}^{-1}$ in the thermocline (23-24 kg m^{-3} isopycnals). During the second leg, characterized by strong NIW energy in the thermocline and below, this heating rate

Cuypers, Y., Le Vaillant, X., Bouruet-Aubertot, P., Vialard, J., McPhaden, M.. «Generation and propagation of near-inertial baroclinic waves during Cirene experiment: energy fluxes and impact on vertical mixing», *J. Geophys. Res.*, 118, 358-380

F. Lott (LMD)**Equatorial waves in some CMIP5 coupled models (with stratosphere)**

F. Lott , P. Maury (LMD, Paris)

The Kelvin and the Rossby Gravity Waves (RGWs) packets that dominate the day to day variability in the low equatorial stratosphere (50hPa) are analyzed in 7 ESMs that participate to CMIP5 and that include a well resolved stratosphere. The results are compared to ERAI. Two models are also used to quantify better (i) the impact of the QBO on these waves (MPI-P and MPI-MR), and (ii) the impact of convection (IPSL-CM5A and CM5B).



Drawing 1: Structure caractéristique des ondes de Rossby gravité équatoriale dans la basse stratosphère de 9 modèles participant à CMIP5

In the stratosphere all models present quite coherent Kelvin waves and RGWs packets, which is good think since these waves dominate the day to day variability in the low stratosphere. The errors on these freely propagating waves seem therefore less pronounced than the differences seen by others on the convectively coupled waves in the troposphere. The difference between the models nevertheless stay very large, the models with a QBO have more pronounced waves, and represent better their life-cycle (this is particularly true for the

RGWs). The sensitivity to the convection of the rather slow waves analysed here is not as pronounced as was found in the past for may be faster waves, but is nevertheless confirmed when we look at the same model with two drastically different convection parameterization. In the same spirit, the sensitivity of the RGWs to the QBO is confirmed by comparing almost the same model runs, one with a QBO and one without. Having a QBO nevertheless does not guarantee that the waves are realistic in all respects, as shows for instance the Temperature signature due to the RGWs in the UKMO model. There also seems to have an issue when the resolution changes drastically, the MRI model behaving quite differently from the other models when it comes to the simulations of these equatorial waves.

1. Lott, F. and 10 co-authors, Kelvin and Rossby gravity waves in the lower stratosphere of some CMIP5 models, In preparation.
2. Maury, P. , F. Lott, L. Guez, and J.-P. Duvel, 2011: Tropical variability and stratospheric equatorial waves in the IPSL-CM5 model, *Climate Dynamics*, 31 Dec. 2011, 11-14. DOI 10.1007/s00382-011-1273-0.
3. Lott, F., J. Kuttippurath, and F. Vial, A Climatology of the Gravest Waves in the Equatorial Lower and Middle Stratosphere: Method and comparison between the ERA-40 re-analysis and the LMDz-GCM, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66, 1327-1346, 2009.