

Ondes générées par une topographie dans une pycnocline : ondes piégées et ondes solitaires dans la grande veine hydraulique stratifiée de Toulouse

A. Paci^a, J. Colin^a, F. Stoop^a, E.R. Johnson^b, L. Lacaze^c, Y. Dossmann^{a,d,e}, L. Bordoïs^{d,a}, F. Auclair^d

^a CNRM-GAME, UMR3589 Meteo-France/CNRS, Toulouse, France

^b Department of Mathematics, University College London, London, U.K.

^c Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, UMR5502 CNRS/INPT/UPS, Toulouse, France

^d Laboratoire d'Aérodynamique, UMR5560 CNRS/UPS, Toulouse, France

^e Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Canberra, Australia

Résumé:

Des expériences ont été conduites récemment dans la grande veine hydraulique stratifiée de Toulouse (CNRS et Météo-France) sur l'interaction d'une topographie avec un écoulement stratifié comportant une pycnocline.

La première série d'expériences présentée concerne les ondes orographiques générées au dessus d'un mont isolé et piégées à un certain niveau de l'atmosphère (par exemple le sommet d'une couche limite marine). Ces expériences ont été inspirées par un modèle théorique, développé à partir des équations de Kadomtsev–Petviashvili, qui prévoit la forme des ondes et la traînée exercée par le mont sur l'atmosphère à partir d'un jeu de paramètres réduit. L'interaction entre la couche limite et les ondes est explorée à partir de simulations numériques complémentaires dans le but de déterminer l'origine des différences observées entre les prévisions de la théorie et les résultats des expériences.

La deuxième série d'expériences présentée concerne les ondes internes solitaires générées au dessus d'une dorsale océanique. Ces ondes sont assez fréquentes dans certaines zones de l'océan et peuvent avoir un impact important sur les structures offshore (plateformes pétrolières par exemple). Elles influencent aussi la dynamique de l'océan et sont difficiles à paramétrer. Plusieurs régimes d'écoulement ont été étudiés, ceux-ci résultent soit de l'interaction directe de la dorsale avec la pycnocline, soit de l'interaction indirecte via un rayon d'onde interne généré sur la dorsale impactant la pycnocline.

Mots clés : onde interne, pycnocline, onde orographique, marée interne, veine hydraulique Toulouse

Abstract:

Experiments have been recently carried out in the CNRS and Meteo-France large stratified water flume located in Toulouse in order to investigate stratified flow-topography interactions when a pycnocline is present.

First set of experiments deals with orographic waves generated over an isolated mountain which are trapped at a given level in the atmosphere (for example the top of a marine boundary layer). These experiments have been inspired by a theoretical model, based on Kadomtsev–Petviashvili, which predicts wave field and drag exerted by the mountain on the atmosphere from a small set of parameters. Boundary layer and internal waves interactions are explored from complementary numerical simulations in order to investigate the cause of some discrepancies between predictions of the theory and results of the experiments.

Second set of experiments deals with internal solitary waves generated over an oceanic ridge. These waves are quite frequent in some areas, and can have a strong impact on sea structures (e.g. offshore platform). They also influence the oceanic dynamics and are difficult to parameterize. An extensive dataset has been collected on waves generated in a pycnocline by direct interaction of a barotropic tide with a ridge (primary generation) and by an internal wave beam generated over a ridge impinging on a pycnocline (secondary generation). Various flow regimes have been observed, including soliton and train of solitons.

Keywords : internal wave, pycnocline, orographic wave, internal tide, stratified water flume Toulouse

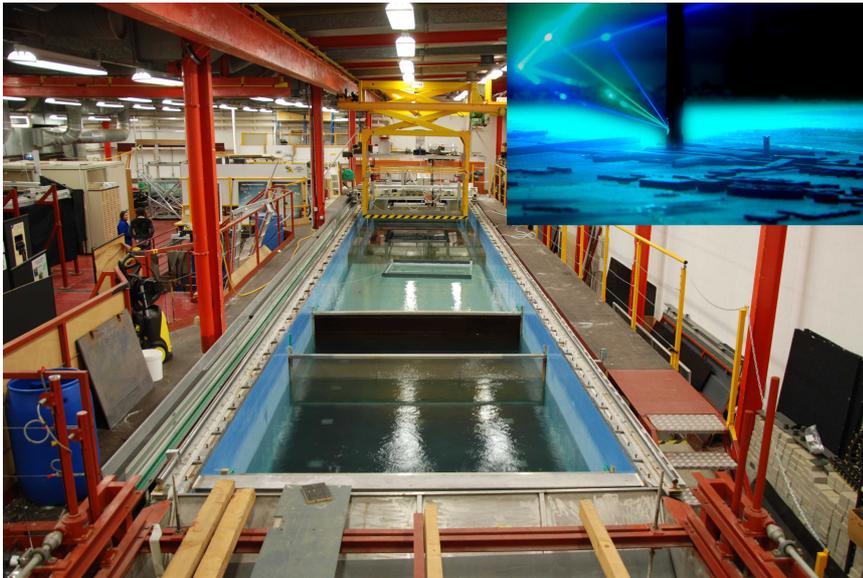


Fig.1 Vue de la grande hydraulique stratifiée de Toulouse

1. La grande veine hydraulique stratifiée de Toulouse

Les installations du laboratoire de simulation hydraulique du CNRM-GAME (une veine hydraulique, deux canaux hydrauliques et une table tournante) constituent un ensemble unique pour l'étude de la dynamique des fluides géophysiques. La veine hydraulique (voir figure 1) est en particulier reconnue depuis plusieurs années comme une des principales installations hydrauliques d'Europe à travers son insertion, en partenariat avec la plate-forme Coriolis du LEGI, dans le réseau du programme européen HYDRALAB.

La taille de la veine hydraulique (30m de long, 3m de large, 1m de haut) combinée à son aptitude à générer des écoulements stratifiés en masse volumique et/ou cisailés en font un instrument unique en Europe, et sans doute dans le monde, pour étudier la dynamique de ces écoulements à grand nombre de Reynolds et avec peu d'effet de confinement.

Elle permet donc d'obtenir des jeux de données complémentaires de l'observation pour l'étude d'un certain nombre de processus dans l'atmosphère et dans l'océan, et ce pour un coût réduit (e.g. Knigge et al 2010 [1]). Elle permet également d'obtenir des données sur des régimes d'écoulement difficiles d'accès par la seule simulation numérique.

Ces caractéristiques uniques ont été mises à profit récemment pour étudier deux configurations d'ondes de gravité internes générées dans une pycnocline par l'interaction d'un écoulement stratifié avec une topographie.

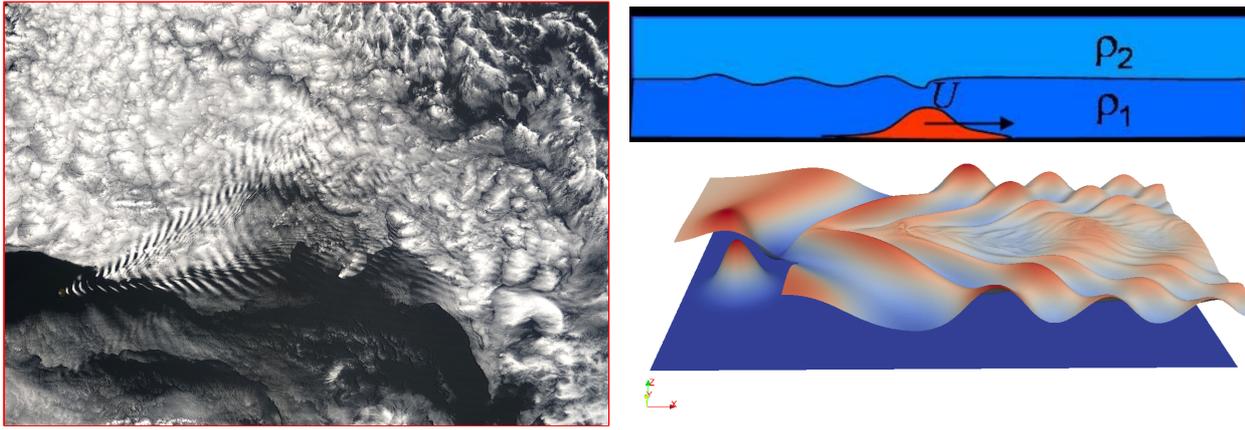


Fig.2 Image de gauche : ondes matérialisées dans les nuages au dessus de l'île Amsterdam dans le sud de l'océan indien. Images de droite : (haut) schéma des expériences sur la configuration atmosphérique ; (bas) ondes matérialisées par la déformation de la pycnocline dans une simulation numérique avec le code Meso-NH reproduisant une des expériences de laboratoire.

2. Une configuration atmosphérique : ondes de relief piégées au dessus d'un mont isolé

Les ondes de gravité internes sont omniprésentes dans l'atmosphère. Une partie importante d'entre elles est générée par l'interaction du vent avec l'orographie en atmosphère stable ; elles sont alors appelées ondes de relief.

Celles-ci peuvent induire des phénomènes dangereux, notamment dans le domaine aéronautique, comme les rotors atmosphériques ou la turbulence en ciel clair. Ces ondes sont également à l'origine d'une force de traînée exercée sur l'atmosphère. L'estimation de cette dernière est particulièrement importante pour la recherche sur le climat et pour les modèles de prévision numérique du temps.

Une théorie récente développée à University College of London prévoit justement la structure du champ d'onde et la valeur de la traînée associée sur un obstacle tridimensionnel en régime transcritique. Une série d'expériences réalisées dans la grande veine hydraulique stratifiée du CNRM-GAME a été inspirée de ces travaux.

Des simulations numériques complémentaires utilisant le code Meso-NH ont été également réalisées dans le but d'estimer l'impact de la couche limite, présente dans les expériences de laboratoire et dans l'atmosphère mais non prise en compte dans la théorie. Cet impact se révèle relativement faible dans l'ensemble en ce qui concerne la traînée exercée au niveau du mont. Les simulations, mises au point en s'appuyant sur les résultats des expériences de laboratoire, sont ensuite exploitées pour comprendre les mécanismes qui pilotent la variation de la traînée en fonction du nombre de Froude.

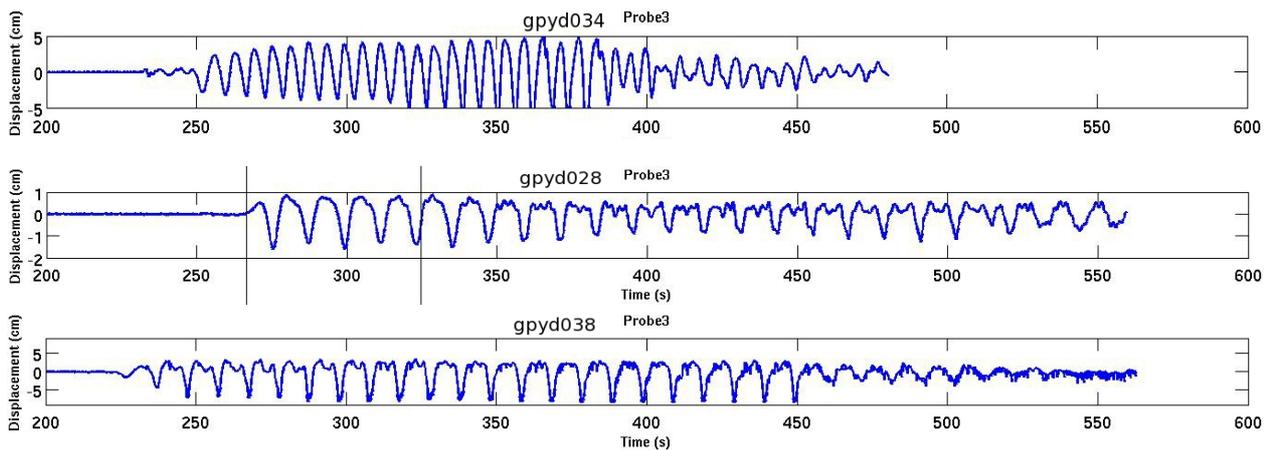


Fig.3 Différents types d'ondes observés au niveau de la pycnocline dans les expériences sur la configuration océanique (déplacement de la pycnocline en fonction du temps). De haut en bas: ondes sinusoïdales, ondes solitaires, trains d'ondes solitaires.

3. Une configuration océanique : ondes solitaires à la base de la couche de mélange

L'interaction de la marée barotrope avec une dorsale océanique peut être à l'origine de différents types d'ondes au niveau de la base de la couche de mélange. Dans certaines conditions, ces ondes peuvent se propager sur de grandes distances en conservant leur énergie et avoir par exemple un impact sur des structures offshores ou sur les échanges air-mer.

Des simulations numériques s'appuyant sur le code Symphonie-NH ont permis d'explorer un certain nombre de régimes d'ondes dans cette configuration (en partie décrits dans Dossmann et al. 2013 [3]). Ces simulations ont guidé la réalisation d'expériences de laboratoire pour explorer en particulier des régimes fortement non-linéaires difficiles à reproduire dans un modèle numérique. Ces expériences de laboratoire apportent en outre des éléments concernant la structure 3D de ces ondes. Cette dernière se révèle particulièrement développée lorsque les ondes au niveau de la pycnocline sont générées non pas par interaction directe de la marée barotrope avec le mont mais par l'intermédiaire d'un rayon d'onde interne généré sur la dorsale.

4. Références bibliographiques

- [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](https://doi.org/10.1002/qj.564)
- [2] Cid E., L. Lacaze, S. Cazin, A. Paci, O.Eiff (2010) : [Mesure d'ondes à l'interface d'un bi-couche par stereo correlation d'images](#), Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2010, Vandoeuvre-lès-Nancy, 14-17 septembre 2010.
- [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](https://doi.org/10.1063/1.4808163)