

Titre du projet : Focalisation des ondes internes

Volet : Recherche (AO4)

Porteur du projet : Bruno Voisin

Laboratoires impliqués : LEGI

Bilan du projet pour les années 2014 à 2016

Bilan d'activité (1 page max)

La marée interne (ou barocline) est une forme particulière d'onde interne de gravité, engendrée par l'oscillation de la marée de surface (ou barotrope) sur les reliefs sous-marins. Elle contribue pour un tiers (soit 1 TW) à la dissipation de la marée de surface à l'échelle du globe. Par son déferlement, elle redistribue cette énergie à la turbulence et au mélange. Il s'agit donc d'une composante essentielle de la dynamique océanique, faisant office de pont entre les grandes échelles, supérieures à la centaine de kilomètres, et les petites échelles, inférieures à la centaine de mètres.

Le projet s'est intéressé à la focalisation de la marée interne par la courbure horizontale des reliefs, et à son effet sur le déferlement. Des expériences ont été réalisées avec des tores reproduisant un relief annulaire, à différentes échelles : des tores de diamètres 10 et 15 cm dans une petite cuve stratifiée de 1 m³ (illustration 1), générant des ondes unimodales dominées par la viscosité (illustration 2) ; et un tore de diamètre 1,5 m sur la grande cuve Coriolis de 13 m de diamètre (illustration 3), stratifiée et/ou tournante, générant des ondes bimodales peu affectées par la viscosité (illustration 4). Les mesures ont combiné les méthodes LIF (Laser-Induced Fluorescence) pour la détermination des déplacements verticaux à haute résolution, et PIV (Particle Image Velocimetry) pour la détermination de la vitesse et de la vorticité à moindre résolution. Une théorie linéaire a été développée pour des reliefs annulaires de profils radial et azimutal quelconques.

La focalisation est effective dès les faibles amplitudes d'oscillation, amplifiant les ondes dans la zone focale où elles forment un système d'ondes stationnaires. Passé une certaine amplitude d'oscillation, les ondes déferlent et rayonnent des harmoniques d'ordre supérieur hors de la zone focale. Le seuil pour le déferlement est d'autant plus bas que les ondes sont bimodales. En présence de rotation, le déferlement ne reste pas confiné dans la zone focale et envahit toute la colonne d'eau.

Des expériences additionnelles mettant en jeu des sphères et des sphéroïdes dans la petite cuve ont permis de préciser les conditions d'émission et la structure des harmoniques. En parallèle une collaboration avec le laboratoire FAST de l'université Paris Sud a permis d'analyser la transition entre les régimes bimodal et unimodal.

Il ressort de cette étude qu'une courbure même faible des dorsales océaniques est susceptible de provoquer focalisation et déferlement, comme observé récemment au Déroit de Luçon en Mer des Philippines et dans le Canyon de la Petite Sole sur la Marge Celtique.

Co-responsable : J.-B. Flór (LEGI).

Collaborateurs : N. Shmakova (doctorante), J. Somméria (LEGI) ; E. Ermanyuk (ENS de Lyon) ; N. Machicoane (post-doctorant), P.-P. Cortet, F. Moisy (Université Paris-Sud).

Assistance technique : S. Viboud (LEGI).

Illustrations - avec légende et crédit (à envoyer également séparément)

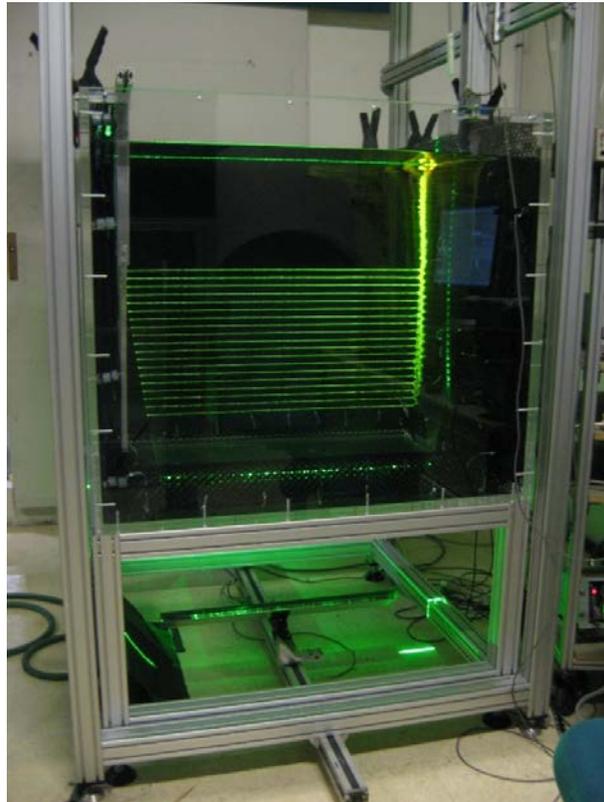


Illustration 1 : Mesure LIF des déplacements verticaux en cuve stratifiée de 1 m^3 , par déformation de plans horizontaux de fluorescéine éclairés par un plan laser vertical. Le fluide est ici au repos avant l'expérience, et le tore oscillant, de diamètre 10 cm, n'a pas encore été placé dans la cuve. Crédit : E. Ermanyuk, LEGI.

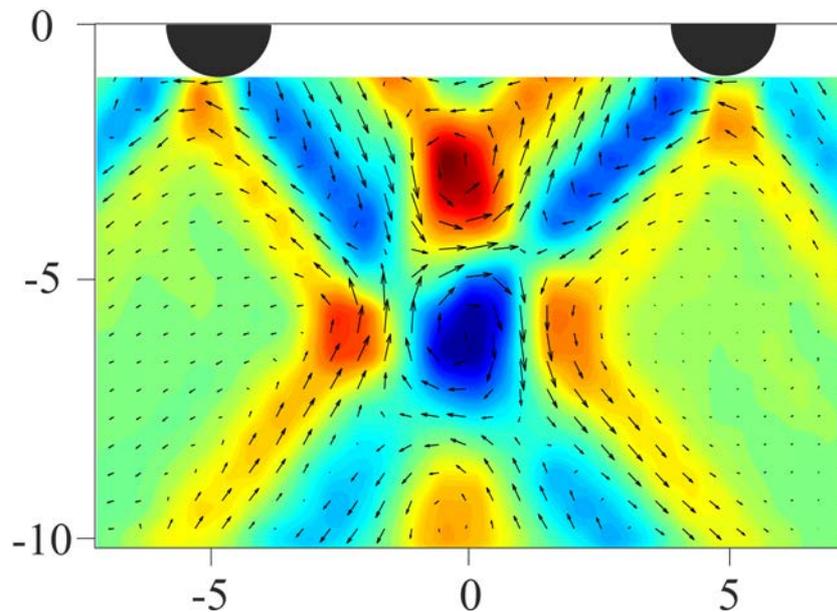


Illustration 2 : Vitesse (vecteurs) et vorticité (couleurs) dans le plan vertical, mesurées par PIV en cuve stratifiée. Le tore est visible par ses deux sections (en noir) et oscille horizontalement. Les ondes se focalisent à l'intersection des faisceaux émanant de chaque section, et y forment un système d'ondes stationnaires. Crédit : N. Shmakova, LEGI.

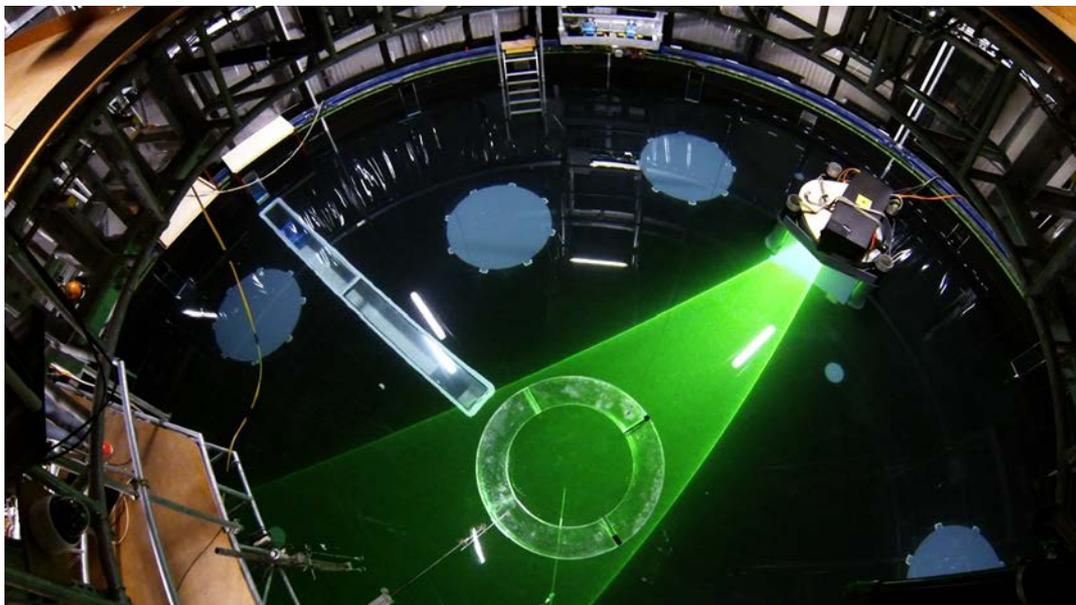


Illustration 3 : Mesure PIV de la vitesse sur la plateforme Coriolis, par suivi de particules éclairées par un plan laser horizontal ou vertical. Le tore, de diamètre 1,5 m au centre de la plateforme de diamètre 13 m, est mis en oscillation par un système bielle-manivelle. La chaîne de mesure est rassemblée sur une plateforme que l'on devine sur la gauche. Crédit : S. Viboud, LEGI.

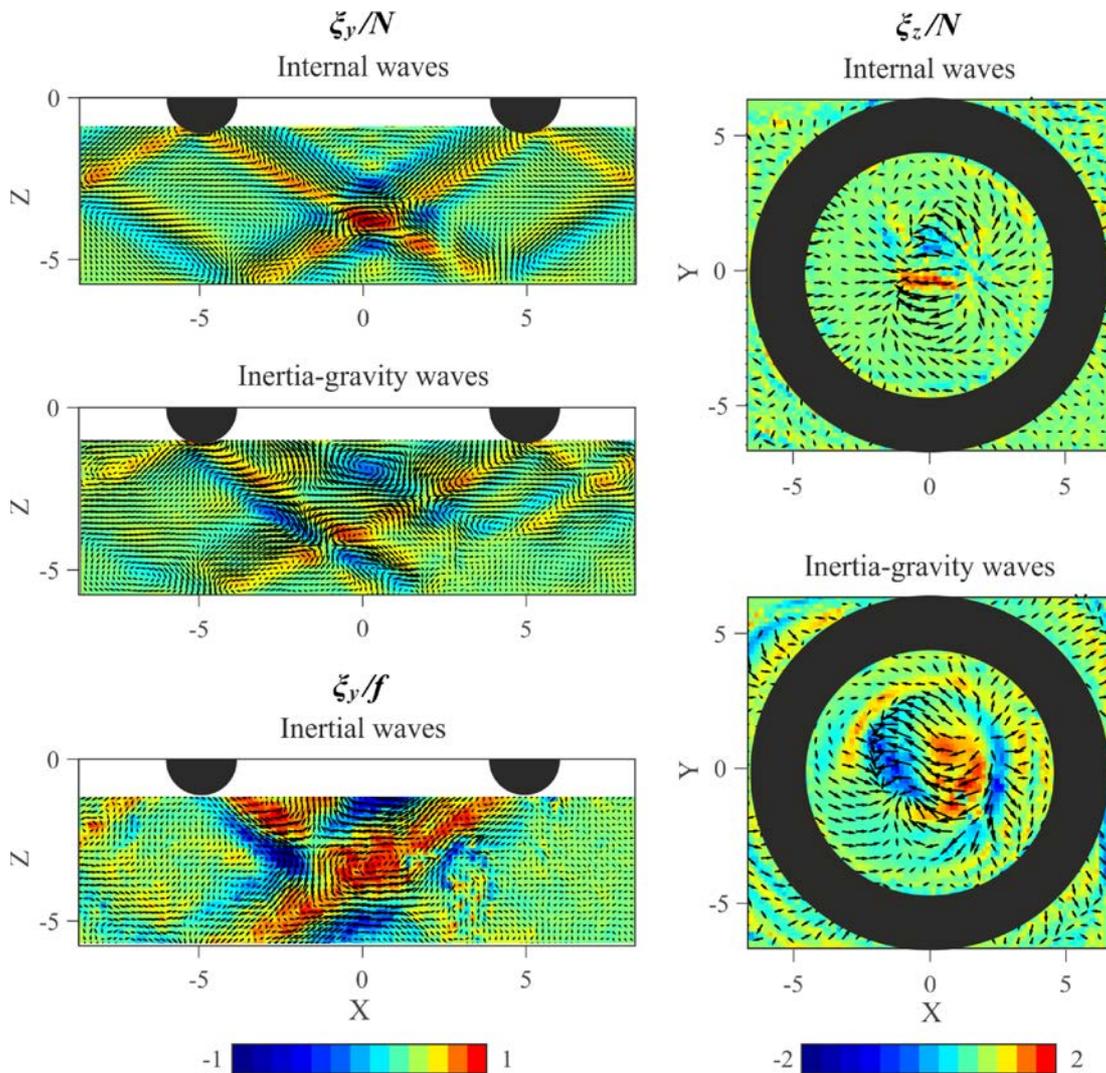


Illustration 4 : Vitesse (vecteurs) et vorticité (couleurs) dans les plans vertical (colonne de gauche) et horizontal (colonne de droite), mesurées par PIV sur la plateforme Coriolis stratifiée et/ou tournante, pour des ondes internes (en présence de stratification seule), inertielles (en présence de rotation seule) et d'inertie-gravité (en présence de stratification et de rotation). Le tore, porté en noir, oscille horizontalement. En sus de la focalisation dans le plan vertical, un tourbillon dipolaire se forme dans le plan horizontal, qui se transforme en une structure de type yin-yang sous l'effet de la rotation. Crédit : N. Shmakova, LEGI.

Production scientifique (articles scientifiques, actes de congrès...)

Articles scientifiques

N. Machicoane, P.-P. Cortet, B. Voisin, F. Moisy (2015) Influence of the multipole order of the source on the decay of an inertial wave beam in a rotating fluid. *Phys. Fluids* **27** (6), 066602. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4922735>.

E. V. Ermanyuk, N. D. Shmakova, J.-B. Flór (2016) Internal wave focusing by a horizontally oscillating torus. En révision pour *J. Fluid Mech.*

N. Shmakova, E. Ermanyuk, J.-B. Flór (2016) Generation of higher harmonic waves on spheroids. En préparation pour *Phys. Rev. Fluids*

B. Voisin (2016) Internal wave focusing by ring forcing. En préparation pour *J. Fluid Mech.*

Actes de congrès

J.-B. Flór (2014) Internal wave focusing in stratified fluids. Présentation invitée au *GKB Laboratory 50th Anniversary Symposium* (Cambridge, Royaume-Uni, 6–8 avril). <http://www.damtp.cam.ac.uk/events/gkbl50>.

B. Voisin, E. Ermanyuk, N. Shmakova, J.-B. Flór (2014) Internal wave focusing from oscillating tori. Présentation orale à la *Nonlinear Effects in Internal Waves Conference* (Ithaca, États-Unis, 9–12 juin). <https://cornellwavesconference.wordpress.com>.

N. Machicoane, P.-P. Cortet, B. Voisin, F. Moisy (2015) Influence of the multipolar order of the source on the viscous decay of inertial waves. Présentation orale au *19th International Couette–Taylor Workshop* (Cottbus, Allemagne, 22–24 juin). <https://www.b-tu.de/fg-aerodynamik-stroemungslehre/aktuelles/tagungen/ictw-2015>.

B. Voisin, E. Ermanyuk, N. Shmakova, J.-B. Flór (2015) Geometric focusing of internal waves: linear theory. Poster à *New Wave: New Challenges in Internal Wave Dynamics* (Lyon, 14–16 octobre). <https://newwave.sciencesconf.org/75006>.

P.-P. Cortet, N. Machicoane, B. Voisin, F. Moisy (2015) Influence of the multipole order of the source on the decay of an inertial wave beam in a rotating fluid. Présentation orale à *New Wave: New Challenges in Internal Wave Dynamics* (Lyon, 14–16 octobre). <https://newwave.sciencesconf.org/74886>.

N. Shmakova, E. Ermanyuk, B. Voisin, J.-B. Flór (2015) Geometric focusing of internal waves: experiments versus theory. Présentation orale à *New Wave: New Challenges in Internal Wave Dynamics* (Lyon, 14–16 octobre). <https://newwave.sciencesconf.org/75003>.

N. Machicoane, P.-P. Cortet, B. Voisin, F. Moisy (2015) Influence of the multipole order of the source on the decay of an inertial wave beam in a rotating fluid. Présentation orale au *68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics* (Boston, États-Unis, 22–24 novembre). <http://meetings.aps.org/Meeting/DFD15/Session/E30.4>.

N. Shmakova, E. Ermanyuk, B. Voisin, J.-B. Flór (2015) Geometric focusing of internal waves: experimental study. Présentation orale au *68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics* (Boston, États-Unis, 22–24 novembre). <http://meetings.aps.org/Meeting/DFD15/Session/M31.2>.

B. Voisin, E. Ermanyuk, N. Shmakova, J.-B. Flór (2015) Internal wave focusing by annular forcing: theory. Présentation orale au *68th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics* (Boston, États-Unis, 22–24 novembre). <http://meetings.aps.org/Meeting/DFD15/Session/M31.3>.

B. Voisin (2016) Geometric focusing of internal waves – A linear theory. Poster au *Emil Hopfinger Colloquium* (Grenoble, 11–13 mai). <https://ejh2016.sciencesconf.org/99416>.

N. Shmakova, S. Viboud, J. Sommeria, B. Voisin, J.-B. Flór (2016) High Stokes number wave focusing by a circular ridge: Internal, inertial and inertia–gravity waves. Poster au *Emil Hopfinger Colloquium* (Grenoble, 11–13 mai). <https://ejh2016.sciencesconf.org/99926>.

B. Voisin (2016) A linear approach of internal wave focusing. Présentation orale au *Russian–French Workshop “Mathematical Hydrodynamics”* (Novossibirsk, Russie, 23–26 août). <http://conf.nsc.ru/mathhydro/en/>.

N. Shmakova, J.-B. Flór, B. Voisin, J. Sommeria, S. Viboud (2016) High Stokes number wave focusing by a circular ridge: Internal, inertial and inertia–gravity waves. Présentation orale au *8th International Symposium on Stratified Flows* (San Diego, États-Unis, 29 août–1 septembre). <https://joss.ucar.edu/sites/default/files/meetings/2016/issf/papers/shmakova-natalia-article.pdf>.

B. Voisin (2016) Internal wave focusing by annular forcing. Présentation orale au *8th International Symposium on Stratified Flows* (San Diego, États-Unis, 29 août–1 septembre). <https://joss.ucar.edu/sites/default/files/meetings/2016/issf/papers/voisin-bruno-article.pdf>.

Réunions

B. Voisin (2015) Focalisation des ondes internes : contexte et théorie linéaire. Présentation orale à la *Réunion du GDR Turbulence* (Grenoble, 1–3 Juin). <http://gdr-turbulence.ec-lyon.fr/GRENOBLE2015/Voisin.pdf>.

N. Shmakova (2015) Focalisation des ondes internes : expériences, comparaison avec la théorie linéaire, régime non linéaire et transition vers la turbulence. Présentation orale à la *Réunion du GDR Turbulence* (Grenoble, 1–3 Juin). http://gdr-turbulence.ec-lyon.fr/GRENOBLE2015/Shmakova_Focusing_of_internal_waves.pdf.

Séminaires

B. Voisin (2016) Auto-focalisation des ondes internes annulaires. Séminaire de Mécanique d'Orsay (LIMSI/FAST, 7 avril). https://semmecca.limsi.fr/affiche/20160407_14.html.



Ce projet est soutenu par le Laboratoire d'Excellence OSUG@2020 (ANR10 LABX56) financé par le programme d'Investissements d'Avenir lancé par l'Etat et mis en oeuvre par l'ANR.



Bilan financier succinct (avec suivant les cas : co-financements éventuels, équipements achetés, missions, recrutements divers, fonctionnements divers...)

Montant alloué : 13850 € (dont 11400 € en équipement et 2450 € en fonctionnement)

Dépenses d'équipement :

Caméra ANDOR Zyla sCMOS 5.5 MPixel (et logiciel dédié) : 9500 €

Participation à des achats mutualisés LEGI (disques de stockage des données expérimentales, protection laser) : 1900 €

Dépenses de fonctionnement :

Mission de B. Voisin à la "Nonlinear Internal Waves Conference" : 1900 €

Service Premier Mathematica pour 1 an : 550 €

Annexes si besoin ou lien sur des sites existants et pérennes jusqu'à la fin du Labex (2020)

Campagne expérimentale 15TOP sur la plateforme Coriolis :

<https://servforge.legi.grenoble-inp.fr/projects/pj-coriolis-15top/wiki>