

Génération de solitons dans une pycnocline par un faisceau d'une onde interne

T. GERKEMA^a, L. GOSTIAUX^b, M. MATHUR^c, M. MERCIER^d, N. GRISOUARD^e, J. MAGELHÃEN^f, T. DAUXOIS^g, J. C. B. DA SILVA^f, C. STAQUET^e

a. Royal Netherlands Institute for Sea Research, PO Box 59, 1790 AB Den Burg, Texel (Pays-Bas)

b. Coriolis-LEGI, 21 rue des Martyrs, 3800 Grenoble

c. Department of Mechanical Engineering, MIT, 77 Massachusetts Ave., Cambridge, MA 02139 (USA)

d. Laboratoire de Physique, ENS, 46 allée d'Italie, 69007 Lyon

e. LEGI, BP 53, 38041 Grenoble.

f. Instituto de Oceanografia, FCUL, Campo Grande, 1749-016 Lisboa (Portugal)

Résumé :

Des observations dans le Golfe de Gascogne montrent qu'un faisceau de marée interne peut générer des solitons lors de son entrée dans la thermocline (c.-à-d. la pycnocline saisonnière). Nous avons réalisé des expériences sur la plateforme Coriolis à Grenoble pour étudier ce processus, et son efficacité en fonction de paramètres comme l'épaisseur de la pycnocline. Nous en montrerons ici les premiers résultats.

Abstract :

Observations in the Bay of Biscay have shown that an internal tide beam can generate solitons as it impinges on the thermocline (i.e. the seasonal pycnocline). To study this process in a laboratory setting, we have carried experiments on the rotating platform in Grenoble ; this makes it possible to examine the role of parameters such as the thickness of the pycnocline. Here we will show the first results.

Mots clefs : solitons, ondes internes

1 Introduction

Les ondes internes doivent leur existence à la stratification verticale de densité. Dans l'océan, on peut distinguer essentiellement trois couches. Au-dessous de la surface de l'océan se trouve en général une couche mince où la température et la salinité sont presque uniformes, de sorte que la stratification y est très faible. Cette couche de mélange surmonte la thermocline, région où la température diminue rapidement avec la profondeur, de sorte que la stratification y est forte. Enfin, dans l'abysse de l'océan, la température varie peu, et la stratification y est donc faible.

Dans la littérature océanographique, on utilise souvent des descriptions schématiques pour rendre compte de ce type stratification. Les deux descriptions qui suivent sont les plus simples du point de vue mathématique. La première, accentuant la thermocline, représente la stratification par une distribution delta. Cela crée une interface horizontale, et les ondes internes ont donc un caractère interfacial ; elles se propagent horizontalement, comme les ondes de gravité à la surface (même si leur vitesse est beaucoup plus petite que celle de ces dernières). Dans la deuxième description, qui accentue plutôt l'abysse, on suppose que la stratification est partout constante. Dans ce cas, l'énergie des ondes internes se propage suivant une trajectoire rectiligne et oblique, comme un faisceau. Cette façon de propagation diffère donc fondamentalement de celle d'un système interfacial.

Or, en réalité on rencontre une combinaison de ces deux formes. Un exemple clef est fourni par des observations effectuées dans le Golfe de Gascogne, qui ont mis en évidence un processus de génération dans lequel un faisceau d'une marée interne (onde interne d'une période semi-diurne) génère des solitons lors de son entrée dans la thermocline depuis l'abysse ([1]). Ces solitons sont ainsi générés loin de la pente continentale, région où la marée interne elle-même est générée (voir Figure 1).

Ce processus a déjà été l'objet de plusieurs analyses théoriques ([2, 3]). Jusqu'au présent, il n'avait pourtant pas encore été étudié dans le laboratoire. Ce projet a eu pour but de réaliser ceci ; les résultats feront l'objet de l'article [4]. Ils seront complétés par des modélisations numériques, [5].

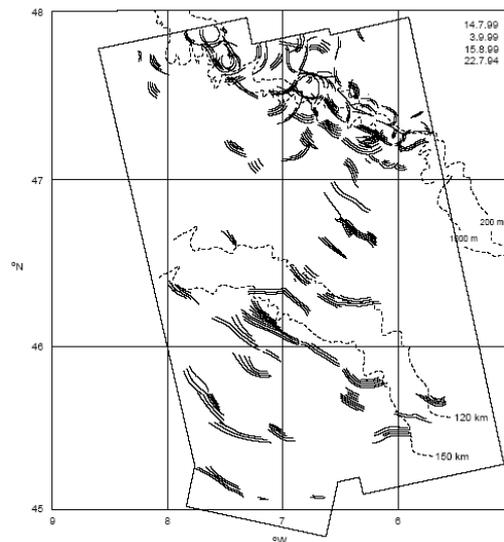


FIG. 1 – Composition d’images de SAR (Satellite Aperture Radar) dans le Golfe de Gascogne montrant des signaux à la surface dus aux solitons internes. Près de la pente continentale (où la ligne pointillée indique une profondeur de 200 m) il y a beaucoup de solitons, mais plus loin il n’y en a presque plus, jusqu’à une distance d’environ 150 km de la pente, où l’on trouve à nouveau un grand nombre de solitons. Ces derniers sont générés par un faisceau d’une marée interne, le processus qui fait l’objet de cette étude. D’après [6].

2 Dispositif experimental

Pour les mesures, nous avons utilisé deux techniques complémentaires, à savoir la PIV et des sondes ultrasoniques (voir Figure 2). La première est particulièrement appropriée à mettre en évidence le faisceau dans la couche inférieure, alors que cette dernière permet de reconstruire les mouvements dans la pycnocline. En combinant les deux, nous obtenons donc une vue assez complète.

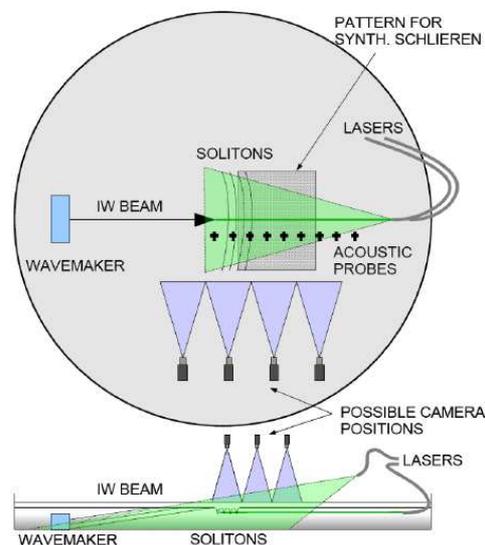


FIG. 2 – Dispositif experimental construit sur la plate-forme Coriolis à Grenoble. Un exciteur génère un faisceau d’une onde interne dans la couche inférieure, et crée des ondes internes quasi interfaciales lors de son entrée dans la pycnocline. (Ici la stratification est réalisée par un gradient vertical de salinité, et on a donc une halocline au lieu d’une thermocline ; le terme ‘pycnocline’ est le terme général, indiquant un fort gradient de densité.) Les mesures PIV (Particle Image Velocimetry) sont faites dans un plan vertical dans lequel un laser illumine les particules qui ont été mises dans l’eau ; leurs positions sont enregistrées par deux cameras, ce qui permet de reconstruire le champ de vitesse. On a également utilisé des sondes ultrasoniques qui permettent de reconstruire les mouvements verticaux au sein de la pycnocline.

L'excitateur que nous avons pu utiliser est une invention très récente et remarquable (voir [7, 8]). Il se compose essentiellement d'un empilement de plaques avec, au centre, deux arbres à cames excentrées, qui à la manière d'une vis d'Archimède, propagent le cisaillement le long de leurs axes lorsqu'ils sont mis en rotation. Ces arbres sont inclinés par rapport à la verticale pour mieux correspondre à la structure de l'onde. Cet excitateur est donc parfaitement ajusté aux propriétés d'un seul faisceau, et ainsi permet d'éviter la génération des effets secondaires (comme des harmoniques ou un faisceau additionnel aillant dans l'autre sens).

3 Premiers résultats

La structure de la stratification verticale ressemble celle de l'océan : une couche inférieure (dans laquelle N est quasi constante), surmontée par une pycnocline, qui est, à son tour, surmontée par une couche de mélange. On a fait varier l'épaisseur et l'amplitude de la pycnocline (Figure 3). Ici on va se focaliser sur les résultats du 19 septembre (ligne en rouge).

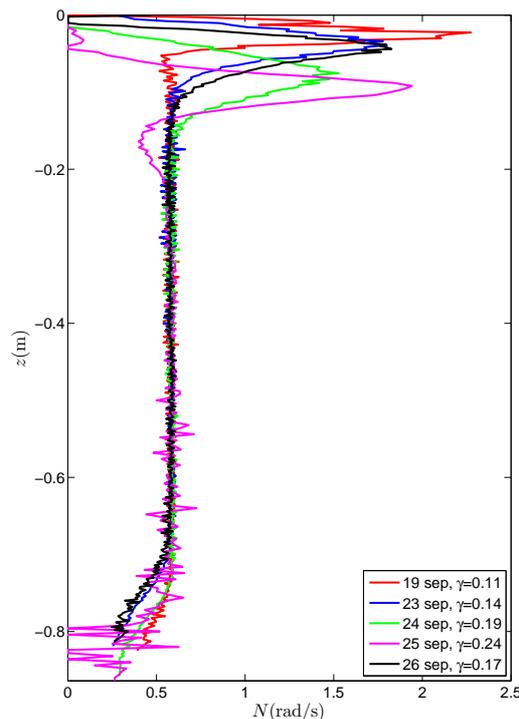


FIG. 3 – Profils de stratification (c'est-à-dire N) avec lesquelles on a réalisé des expériences. (Le paramètre γ vient d'une analyse théorique et indique la mesure dans laquelle les conditions favorisent la génération de solitons. A priori le cas du 19 septembre semble le plus favorable.)

3.1 Faisceau

Pour une période de forçage de 21.66 s, le faisceau a un angle de 30° par rapport à l'horizontale, dans la couche inférieure. Les images obtenues par PIV confirment qu'un faisceau net a été créé (voir Figure 4). Après la réflexion à la surface libre, et la traversée de la pycnocline, le faisceau est devenu un peu plus faible. Une interprétation possible est d'attribuer cette perte à un transfert d'énergie aux ondes quasi interfaciales qui sont piégées dans la pycnocline. On peut vérifier cette hypothèse en se référant aux sondes ultrasoniques.

3.2 Solitons

Or, celles-ci mettent en évidence un signal clair tout le long de la horizontale (dans la direction de propagation), même où le faisceau lui-même s'est éloigné de la surface libre. Figure 5 montre un signal faible au dessus de l'excitateur (ligne verte en bas); ici le faisceau n'a pas encore rencontré la pycnocline. Un peu plus loin de l'excitateur, on voit cependant un signal fort (ligne purple); c'est ici que le rayon traverse la pycnocline. Le signal est quasiment sinusoïdal et l'onde a donc un caractère linéaire. Les sondes qui sont encore plus loin (les lignes noire, bleue etc) montrent le fait qu'il reste toujours un signal important dans la pycnocline, même si le faisceau s'en est éloigné. C'est preuve qu'il y a eu un transfert d'énergie du faisceau vers les ondes quasi interfaciales, c'est-à-dire les ondes qui sont piégées dans la pycnocline. Si l'on considère maintenant le caractère de ces ondes, on voit clairement qu'elles ne sont plus sinusoïdales, signe que des effets non linéaires

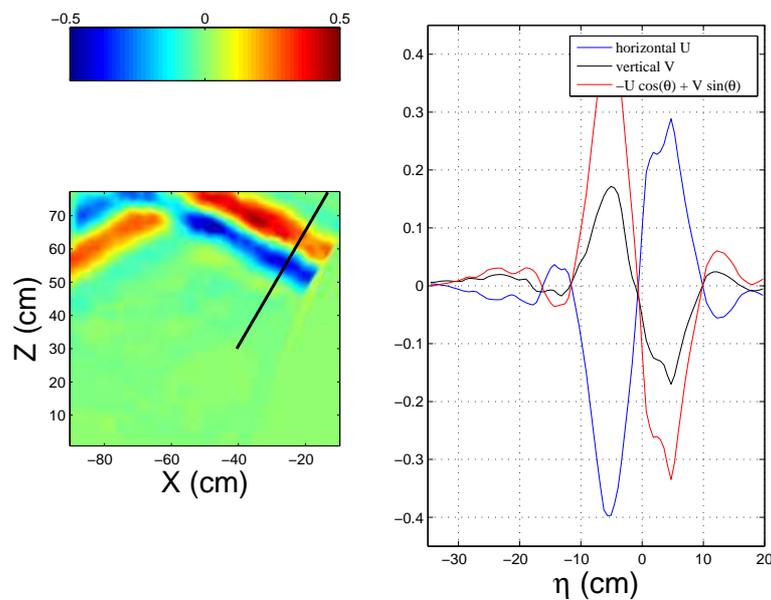


FIG. 4 – Le faisceau issu de l’excitateur ; l’énergie se propage vers la gauche. Vitesses (en couleur) en cm/s.

sont intervenus. Pour la ligne noire, en particulier, on voit (dans un agrandissement, non montré ici) des fronts raides souvent suivi d’un groupe d’ondes d’un amplitude de plus en plus petit ; cette observation suggère que des groupes de solitons se sont formés.

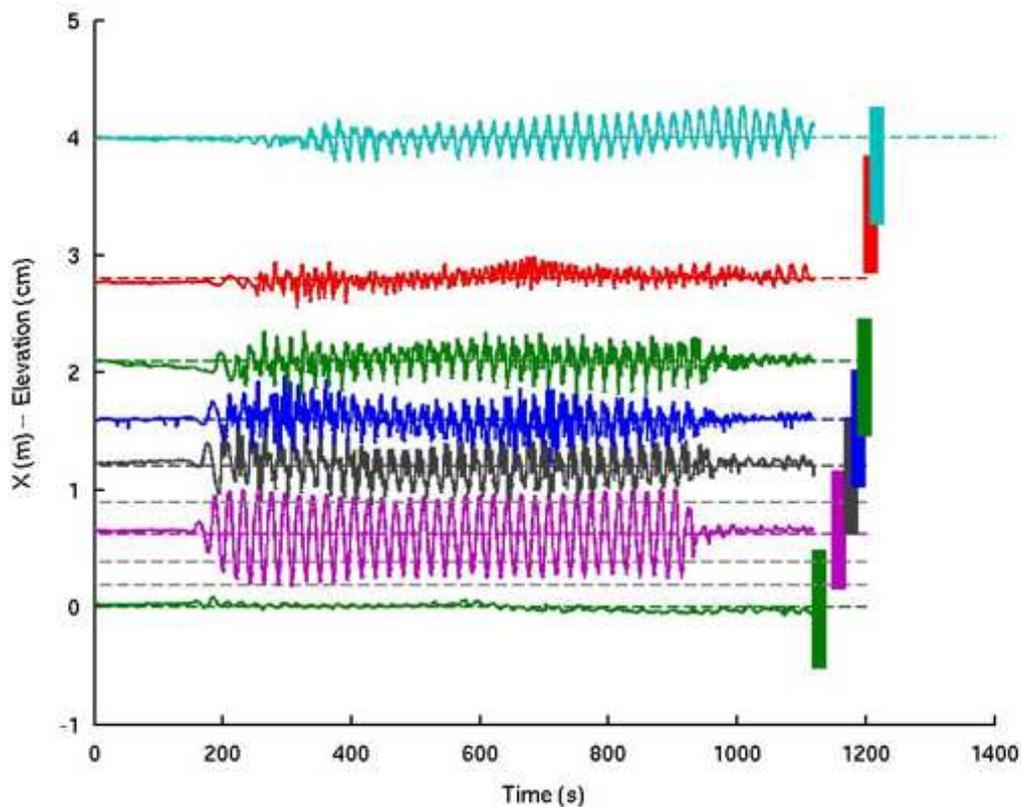


FIG. 5 – Signaux des sondes ultrasoniques indiquant les oscillations verticales de la pycnocline ; les différentes couleurs représentent des différentes positions suivant l’horizontale. Ici l’axe vertical a un double sens : il sert à indiquer les positions des sondes (distance de l’excitateur, en mètres), mais aussi, pour chacun de ces sondes, à indiquer l’élévation de la pycnocline (en cm).

Les spectres des signaux issus des sondes ultrasoniques mettent en évidence la présence des harmoniques (pics à un multiple de la fréquence de forçage). Plus remarquable encore, on trouve aussi une montée plus large à haute fréquence. Elle fait maintenant l'objet d'une étude plus détaillée ; nous cherchons d'établir si cette montée est associée à une présence de solitons ou non.

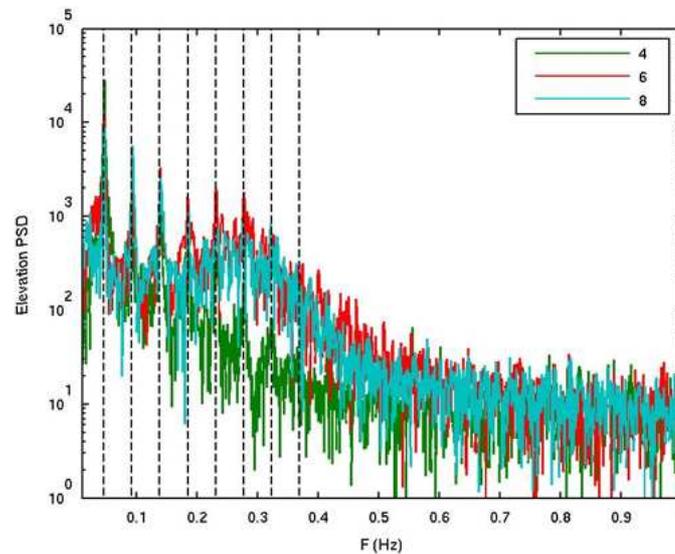


FIG. 6 – Spectres des signaux de quelques sondes acoustiques.

4 Modélisation numérique

Pour les mêmes paramètres, des modélisations numériques sont réalisées qui ont pour but d'identifier plus précisément quelles valeurs favorisent la génération de solitons, ainsi que de mieux comprendre le mécanisme de cette génération. Notamment, il s'agit d'établir quel mode vertical caractérise les solitons, question qui est à peine accessible à travers des mesures dans le laboratoire. Le modèle utilisé ici est celui de MIT (General Circulation Model), qui permet de faire des calculs non hydrostatiques, aspect essentiel pour la génération de solitons.

Remerciements

La partie expérimentale de ce projet a été financée par l'UE (6th EC Framework Programme, HYDRALAB III) sous le titre "Generation of interfacial solitons by internal-wave beams". Nous tenons à remercier MM. Henri Didelle et Samuel Viboud de l'assistance technique pendant les expériences.

Références

- [1] New A. L. and Pingree R. D. Local generation of internal soliton packets in the central Bay of Biscay. *Deep-Sea Res.*, 39(9), 1521–1534, 1992.
- [2] Gerkema T. Internal and interfacial tides : beam scattering and local generation of solitary waves. *J. Mar. Res.*, 59(2), 227–255, 2001.
- [3] Akylas T. R., Grimshaw R. H. J., Clarke S. R., and Tabaei A. Reflecting tidal wave beams and local generation of solitary waves in the ocean thermocline. *J. Fluid Mech.*, 593, 297–313, 2007.
- [4] Gostiaux L., Mercier M., Mathur M., Gerkema T., Magelhães J., Dauxois T., and Da Silva J. C. B. Soliton generation by internal-wave beams impinging on a pycnocline. Part I : Laboratory experiments. *J. Fluid Mech.*, 2009 [en préparation].
- [5] Grisouard N., Staquet C., and Gerkema T. Soliton generation by internal-wave beams impinging on a pycnocline. Part II : Numerical experiments. *J. Fluid Mech.*, 2009 [en préparation].
- [6] New A. L. and Da Silva J. C. B. Remote-sensing evidence for the local generation of internal soliton packets in the central Bay of Biscay. *Deep-Sea Res. I*, 49, 915–934, 2002.
- [7] Gostiaux L. Étude expérimentale des ondes de gravité internes en présence de topographie. Émission, propagation, réflexion. Thèse, ENS, Lyon, 2006.
- [8] Gostiaux L., Didelle H., Mercier S., and Dauxois T. A novel internal waves generator. *Exp. Fluids.*, 42(123), 1–6, 2007.