# Transport de particules par ondes internes.

Ernesto Horne<sup>1,2</sup>, Diane Micard<sup>1,2</sup>, Pascal Metz<sup>1</sup>, Marc Moulin<sup>1</sup>, Philippe Odier<sup>1</sup> & Sylvain Joubaud<sup>1</sup>

Résumé. Nous étudions expérimentallement l'effet des ondes internes et des particules sédimentant lentement dans un milieu stratifié. La colonne granulaire formée par les particules oscille autour d'une position d'équilibre. Ces oscillations sont causées par le mouvement du fluide associé à la présence de l'onde. Pour une certaine gamme de paramètres (fréquence et amplitude de l'onde), la colonne est de manière inattendue globalement déplacée dans le sens opposé au sens de propagation des ondes. Cé déplacement suit un comportement résonant en fréquence des ondes internes.

**Abstract.** We study experimentally the effect of internal waves on slowly settling particles in a stratified environment. The granular column formed by the particles oscillates around an equilibrium position due to the presence of the internal gravity waves. Depending on the frequency and the amplitude of the internal waves, the column can even be displaced as a whole. Surprisingly, this displacement is directed towards the source of the waves. A resonant behavior of this displacement with the frequency of the internal waves is observed.

## 1 Introduction

La sédimentation de particules organiques ("neige marine") vers l'océan profond joue un rôle dans l'équilibre global des océans. Elle est nécessaire pour le développement de la biodiversité océanique mais peut également séquestrer du CO<sub>2</sub> provenant de l'atmosphère. La dispersion et concentration de cette neige va dépendre fortement de la dynamique océanique. Les ondes internes omniprésentes dans les océans peuvent soit resuspendre des particules situées sur le fond océanique [1] ou générer un transport de cette neige marine et ainsi influer dans le comportement des espèces marines [2].

Des études expérimentales et numériques ont été faites pour comprendre la dynamique d'un objet sédimentant dans un fluide stratifié [3], tout comme la dynamique collective de particules sédimentant [4]. Les ondes internes de gravité sont des ondes atypiques se propageant dans les fluides continûment stratifiés. Leur originalité se trouve particulièrement dans leur relation de dispersion. À une pulsation donnée, les ondes sont contraintes de se propager selon une direction donnée, i.e. selon un angle  $\beta$  avec l'horizontale  $\sin \beta = \omega/N$ . N est la fréquence de flottabilité typique caractérisant la stratification  $\rho_0(z)$ :  $N^2 = -g/\bar{\rho}\partial\rho_0/\partial z$  où  $\bar{\rho}$  est la densité moyenne. Dans le travail décrit dans ce papier, nous souhaitons mettre en évidence les effets principaux apparaissant lors de l'intéraction entre des ondes internes et une colonne de particules sédimentant lentement.

## 2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est schématisé sur la figure 1(a). Une cuve de 160 cm de large et 17 cm de profondeur est remplie d'un fluide linéairement stratifié avec une pulsation de flottabilité constante N sur toute la hauteur du fluide (40 cm). Le déplacement du fluide est caractérisé par les variations du gradient de densité  $(\partial_x[\rho(x,z,t)-\rho_0(z)], \partial_z[\rho(x,z,t)-\rho_0(z)]$  mesurées à l'aide de la technique de Schlieren Synthétique [5].

Les ondes internes se propageant dans le fluide sont produites à l'aide d'une évolution du générateur développé précédemment à l'ENS de Lyon [6,7]. Le but principal de cette évolution est de produire

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Univ Lyon, Ens de Lyon, Univ Claude Bernard, CNRS, Laboratoire de Physique, F-69342 Lyon, France

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, École Centrale de Lyon, CNRS, Écully, France sylvain.joubaud@ens-lyon.fr

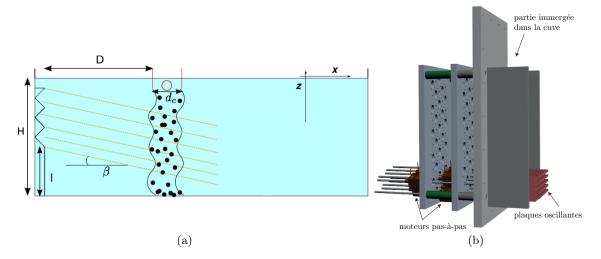


Figure 1. (a) Schéma du dispositif expérimental. La colonne, de largeur  $d_c$  est créée à une distance D du générateur d'ondes situé à gauche du dessin. Les ondes internes générées se propagent selon un angle  $\beta$  avec l'horizontale. (b) Schéma du générateur d'ondes. Il est formé d'un empilement de 50 plaques, chacune étant contrôlée indépendamment des autres à l'aide d'un moteur pas-à-pas linéaire.

des conditions aux limites totalement contrôlées en forme, amplitude et temps [voir fig 1(b)]. Chacune des plaques du générateur est contrôlée électroniquement de manière indépendante. Plus précisément, le générateur est divisé en deux parties. La première partie est constituée de 50 plaques de 6.5 mm d'épaisseur s'intégrant dans la cuve et étant ainsi immergées dans le fluide stratifié. La seconde partie permet de contrôler continûment le déplacement des plaques et est composée de 50 moteurs pas-à-pas linéaires contrôlés par un automate. Le déplacement horizontal de chaque plaque est donné par une fonction temporelle  $x_i = X_i(t)$ . Dans le travail présenté dans ce papier,  $X_i$  est une fonction sinusoïdale dont l'amplitude, fréquence et phase peuvent être ajustées

$$X_i(t) = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i). \tag{1}$$

Les phases entre chaque plaque sont choisies de telle sorte que les ondes internes générées sont des ondes planes sur une largeur de faisceau de 3 longueurs d'onde

$$x(z,t) = A\cos(\omega t - mz)$$
 pour  $\ell < z < \ell + 3\lambda$  (2)  
 $x(z,t) = 0$  sinon

Un exemple d'ondes générées est présenté sur la figure 2.

La seconde partie expérimentale est la formation d'une colonne verticale de particules en suspension granulaire. L'objectif est de réaliser une colonne dont on peut contrôler la largeur  $d_c$ , l'écart D avec le générateur dans la direction x et la fraction volumique de particules  $\varphi = V_{\rm grains}/V_T$ , définie comme le volume occupé par les grains,  $V_{\rm grains}$ , dans un volume total  $V_T$ . Comme la propagation des ondes est quasi-bidimensionnelle, nous souhaitons garder la même symétrie pour la sédimentation des grains, c'est-à-dire obtenir une colonne quasi-homogène dans la direction transverse (y) dans la cuve. Pour cela, le protocole suivant a été mis en point. Des grains polydisperses et non sphériques de polystyrène (Goodfellow, diamètre moyen 200  $\mu$ m, densité  $\rho_g = 1050$  kg/m³) sont tout d'abord mélangées dans un fluide porteur. Afin d'éviter une formation d'agrégats, le fluide porteur est de l'eau pure (densité  $\rho_P = 998$  kg/m³) à laquelle quelques gouttes de surfactant (antistatique, Tetenal Mirasol 2000) ont été ajoutées. Ce fluide traverse ensuite un tube de cuivre entaillée dans la direction transverse sur la totalité de la largeur de la cuve. Deux pompes péristaltiques imposent que le débit d'entrée du fluide dans le tube

soit égal à celui de sortie. Ce tube est placé 2 cm en dessous de la surface libre. Les particules plus lourdes sédimentent dans le fluide stratifié tandis que le fluide porteur, moins dense que le fluide environnant, reste dans le tube ou remonte à la surface. Les particules vont tout d'abord former un nuage de particules (dont la dynamique a été décrite par [4]). L'extension du nuage est contrainte à l'aide de deux plaques de PVC fixant la largeur de la colonne  $d_c$ . Une fois le nuage formé, les particules sédimentent sous celui-ci en formant une colonne granulaire, quasi-homogène dans la direction y. Au bout d'un certain temps, cette colonne est stationnaire; la fraction volumique, constante dans le temps, est de l'ordre de 0.2%. Cette valeur peut être modifiée en changeant la concentration, c, des grains dans le fluide porteur et le débit d'injection. Elle sera inférieure à 1% dans les expériences décrites dans cet article. Un exemple de colonne ainsi créée, observé par ombroscopie, est montré sur la figure 2.

# 3 Influence de la colonne sur la propagation d'ondes internes

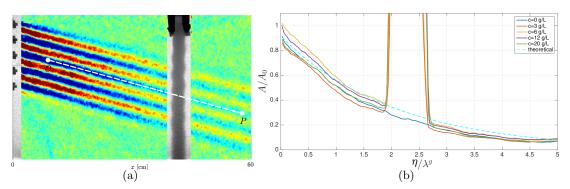


Figure 2. (a) Image typique de l'expérience. Le générateur et la colonne sont observés par ombroscopie. Le champ du gradient vertical de densité est présenté comme fond de l'image. La ligne pointillée OP indique une ligne isophase. (b) Amplitude de  $\partial_z[\rho-\rho_0(z)]$ , normalisée par l'amplitude au point O, est tracée en fonction la distance au point O le long de (OP), notée  $\eta$ , normalisée par la longueur d'onde verticale imposée par le générateur,  $\lambda_g$ . Les différentes courbes sont obtenues pour différentes fractions volumiques (modifiées par la concentration c des grains dans le fluide porteur). Le décroissance théorique de l'amplitude due à la viscosité est tracée en pointillé.

Nous allons dans un premier temps nous concentrer sur les effets de colonne sur la propagation des ondes. Si la densité de particules est élevée, les ondes internes se réfléchiront sur la colonne comme sur un mur. Au contraire, si la densité est faible, les ondes traverseront la colonne sans voir les particules. Dans le cas intermédiaire, il y aura coexistence d'ondes transmises à travers la colonne et d'ondes réfléchies. Les ondes transmises auront une amplitude plus faible car une partie de l'énergie aura été donnée aux ondes réfléchies. La figure 2 montre que, dans la gamme des paramètres expérimentaux étudiés, les ondes internes sont uniquement transmises. Afin de quantifier une éventuelle réflexion, une transformée de Hilbert est réalisée. Une telle méthode permet de séparer des ondes s'éloignant du générateur (ondes incidentes) des ondes s'en rapprochant (ondes réfléchies) [8]. Seul le bruit de mesure est visible indiquant que l'énergie réfléchie est inférieure à 1 % de l'énergie incidente. Par ailleurs, la ligne pointillée (OP) tracée sur la figure 2 indique une ligne isophase. Cette ligne montre que la phase n'est pas modifiée dans la direction de propagation de les ondes après le passage dans la colonne. Ceci indique que la fréquence de flottabilité N dans la colonne est identique avec ou sans particules.

Nous terminons cette étude en regardant si la colonne a un effet sur l'amplitude des ondes. Pour cela, nous mesurons celle-ci dans la direction de propagation de l'onde le long du segment (OP) indiqué par une ligne pointillée sur la figure 2; la distance au point O le long de ce segment est notée  $\eta$ . L'amplitude des ondes normalisées par l'amplitude au point O,  $A/A_0$ , est tracée en fonction de la distance  $\eta$  normalisée par

#### 4 Horne et al.

la longueur d'onde imposée par le générateur,  $\eta/\lambda_g$  sur la figure 2(b). Dans le cas sans colonne, l'amplitude de des ondes décroît par dissipation visqueuse. La décroissance mesurée est compatible avec celle prédite théoriquement, qui est de la forme  $\exp(-\Lambda\eta)$  où  $\Lambda = \frac{|\kappa^3|}{2\sqrt{N^2-\omega^2}}$  [7]. La variation de l'amplitude avec  $\eta$  n'est pas modifiée en présence de la colonne pour la gamme de fraction volumique utilisée, *i.e.* inférieure à 1 %.

Nous avons montré que la colonne n'avait aucune influence observable sur les ondes. Nous allons désormais nous intéresser à la colonne en elle-même et étudier les modifications engendrées par la présence de l'onde.

# 4 Oscillations et transport de la colonne granulaire

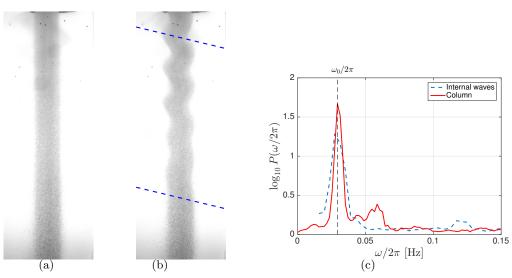


Figure 3. Photographie de la colonne de la particules en sédimentation observée par ombroscopie (a) lorsque qu'aucune onde n'est présente (t=0) et (b) 100 périodes après le démarrage du générateur. Les traits pointillés indiquent la localisation du faisceau d'ondes. (c) Spectre temporel du champ d'ondes internes mesuré par Schlieren synthétique (ligne pointillée bleue) et des contours de la colonne granulaire (ligne continue rouge).

Une comparaison de l'allure de la colonne entre le cas sans ondes et le cas avec ondes est présentée sur la figure 3 (a) et (b). Sur cette dernière figure, les lignes bleues pointillées indiquent la zone où est localisé le faisceau d'ondes internes. La colonne granulaire est affectée par l'onde : en effet les bords de la colonne oscillent avec le temps. Ces oscillations sont générées par le mouvement du fluide associé aux ondes et on peut ainsi voir la projection verticale de la longueur d'onde au niveau des contours de la colonne. De manière contre-intuitive, ces oscillations ont la particularité de s'étendre en dehors de la région atteinte par le faisceau, et aussi de persister après que le faisceau ait disparu, révélant une « élasticité » de la colonne de grains. Ce phénomène est reproductible et il est visible que la composante verticale de la vitesse de groupe soit dans le même sens que la vitesse de sédimentation ou dans le sens opposé.

Pour justifier que le déplacement de la colonne est dû à la présence des ondes internes, le spectre des oscillations des bords de la colonne est comparé à celui des ondes internes [3(c)]. Nous observons, comme attendu, que la colonne oscille à une fréquence,  $\omega_0$ , égale à celle de l'onde. Une seconde fréquence, plus élevée, est visible. Une première exploration (non montrée ici) montre que cette seconde fréquence est indépendante de la fréquence des ondes internes  $\omega_0$  mais qu'elle semble être d'autant plus marquée que l'amplitude des ondes est grande. De plus, elle semble dépendre fortement de la fréquence de flottabilité

N, ou encore de la vitesse de sédimentation des particules. Une étude plus détaillée de ces paramètres est en cours afin de comprendre si cette fréquence « propre » est liée à l'élasticité et si elle est due aux effets collectifs entre particules. Le générateur développé et décrit ici permettra facilement de tester ce phénomène sans modifier les autres paramètres et notamment la fréquence de flottabilité N.

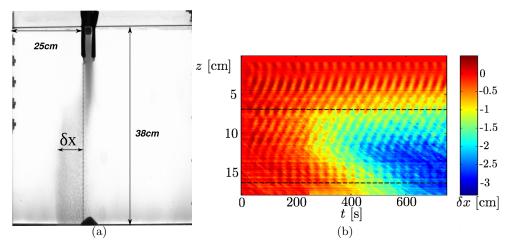


Figure 4. (a) Photographie de la colonne lorsqu'elle est déplacée par les ondes internes. (b) Déplacement de la colonne en fonction de z et du temps t. L'échelle de couleur indique le déplacement en cm. Les deux lignes horizontales représentent la position du faisceau d'ondes internes. L'amplitude du générateur est A=0.9 cm et la fréquence de flottabilité est N=1.1 rad/s.

Pour une certaine gamme de paramètres, on observe également un déplacement global de la colonne dans le sens opposé au sens de propagation des ondes comme présenté sur la figure 4(a). Le déplacement horizontal,  $\delta x$ , peut être déterminé à l'aide d'une détection précise des contours, en fonction de la hauteur z et du temps, i.e.  $\delta x(z,t)$ . Un exemple type de déplacement observé est tracé en fonction de t et de z sur la figure 4(b). L'image montre que durant les 200 premières secondes, la colonne oscille autour d'une position d'équilibre. Ces oscillations sont visibles par les stries rouges et noires. Il faut noter de même que précédemment que ces oscillations sont aussi bien présentes dans la zone du faisceau d'ondes internes (indiquée par les lignes pointillées noires) qu'en dehors. La pente de ces stries correspond à la projection verticale de la vitesse de phase des ondes. Après 200 s, la colonne commence à se déformer dans la direction du générateur ( $\delta x < 0$ ). Après 700 s, le déplacement est supérieur à l'amplitude initiale des oscillations et atteint 3 cm (environ 3 fois supérieur à la largeur initiale de la colonne). Ce déplacement est dû à la présence des ondes car il est important dans la zone du faisceau (et en dessous); la partie localisée au dessus du faisceau n'est que peu affectée par un déplacement moyen.

Afin d'étudier l'influence des paramètres de contrôle de l'expérience, cette procédure est répétée pour différentes expériences en changeant la fréquence  $\omega_0$  et l'amplitude A des ondes internes. Ces expériences ont été réalisées pour un fluide stratifié avec N=0.85 rad/s. Le déplacement est mesuré 750 s après le départ du générateur (soit 25 périodes de l'onde). Nous représentons sur la figure 5(a) le déplacement  $\delta x$  en fonction de  $\omega_0/N$  pour différentes amplitudes du générateur pour des ondes internes se déplaçant vers le bas. Nous observons comme attendu que plus l'amplitude des ondes est grande, plus le déplacement est important. Ce déplacement est également plus important si la valeur de  $\omega_0/N$  est grande indiquant également une dépendance en fonction de la pulsation de l'onde. L'expérience a été répétée pour une forte amplitude en faisant varier  $\omega_0$ . La valeur de la fréquence de flottabilité est désormais N=1.1 rad·s<sup>-1</sup> (impliquant une vitesse de sédimentation plus faible). La figure 5(b) montre que la dépendance en  $\omega_0/N$  est une résonance et est maximale pour une valeur de  $\omega_0/N=0.2$ .

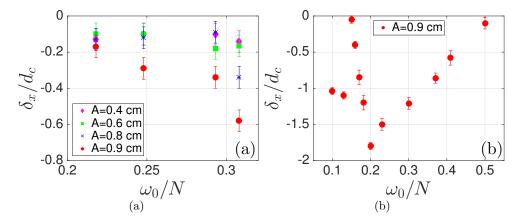


Figure 5. (a) Déplacement de la colonne, mesuré 700 s après le démarrage du générateur, tracé en foction de  $\omega_0/N$ .  $d_c$  désigne la largeur de la colonne. Pour cette expérience, N=0.85 rad/s. (b) Déplacement de la colonne pour A=0.9 cm, N=1.1 rad/s en fonction de  $\omega_0/N$ .

#### 5 Conclusions

Nous avons développé un dispositif expérimental permettant l'étude de l'interaction entre des ondes internes et des particules en suspension. Nous avons montré, d'une part, que la colonne avec une fraction volumique de l'ordre de 0.2% n'a pas d'effets mesurables sur les ondes. Nous avons observé, d'autre part, deux effets lors du passage des ondes internes à travers la colonne : celle-ci oscille autour d'une position d'équilibre. Dans certains cas, la colonne est même déplacée globalement vers la source des ondes. Nous avons mesuré ce déplacement en fonction de différents paramètres (amplitude et fréquence de l'onde, vitesses de sédimentation). Le déplacement, tout comme l'élasticité de la colonne sont encore incompris et feront l'objet d'une étude tant expérimentale que théorique dans la suite.

## Références

- 1. P. HOSEGOOD AND J. BONNIN AND H. VAN HAREN, Solibore-induced sediment resuspension in the Faeroe-Shetland Channel, *Geophysical Research Letter*, **31**(9), L09301 (2004).
- 2. J. PINEDA AND V. STARCZAK AND J.C.B. DA SILVA AND K. HELFRICH AND M. THOMPSON AND D. WILEY Whales and waves: Humpback whale foraging response and the shoaling of internal waves at Stellwagen Bank, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(4), 2555–2570, (2015).
- 3. K.Y. Yick and C.R. Torres and T. Peacock and R. Stocker Enhanced drag of a sphere settling in a stratified fluid at small Reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, **632**, 49–68, (2009).
- 4. J.W.M. Bush and B.A. Thurber and F. Blanchette Particle clouds in homogeneous and stratified environments, *Journal of Fluid Mechanics*, **489**, 29–54, (2003).
- 5. S.B. Dalziel and G.O. Hughes and B.R. Sutherland, Whole-field density measurements by synthetic schlieren, *Experiments in Fluids*, **28**, 322–335 (2000).
- 6. L. Gostiaux and H. Didelle and S. Mercier and T. Dauxois, A novel internal waves generator, *Experiments in Fluids*, **42**, 123–130 (2007).
- 7. M.J. Mercier and D. Martinand and M. Mathur and L. Gostiaux and T. Peacock and T. Dauxois, New wave generation, *Journal of Fluid Mechanics*, **657**, 308–334 (2010).
- 8. M.J. MERCIER AND N.B. GARNIER AND T. DAUXOIS Reflection and diffraction of internal waves analyzed with the Hilbert transform, *Physics of Fluids*, **20**, 086601 (2008).