



Equilibre morphologique de barres de déferlement: Expériences

M. Kamalinezhad^(a), H. Michallet^(b) et E. Barthélemy^(c)

^(a)Doctorante, ^(b)Chercheur CNRS, ^(c)Professeur I.N.P. Grenoble.
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (UJF-INPG-CNRS),
BP53, 38041 Grenoble Cedex 9, France.
Tel: 04 76 82 50 68 Fax: 04 76 82 52 71 Email: kamali@yahoo.com

Résumé

Des expériences ont été réalisées pour caractériser la transformation des vagues sur une plage de sédiments et évaluer la formation et la stabilité des barres liées au déferlement, sous l'action de vagues régulières et irrégulières. Les expériences réalisées indiquent qu'il est possible d'obtenir des fonds en équilibre pour des conditions de vagues aléatoires. Des topographies types en similitude avec la nature sont obtenues en fonction d'une vitesse de chute adimensionnelle.

Abstract

Experiments have been performed to characterize the transformation of waves over sandy beaches and to evaluate the formation and the stability of bars due to breaking under regular and irregular waves. In our experiments, it is possible to obtain the equilibrium beach profiles with bar due to breaking with irregular waves. Different types of topographies in similarity with the nature were obtained in function of a dimensionless fall velocity.

1.Introduction

Dans la zone côtière, les barres littorales sont la conséquence d'une convergence du transport sédimentaire sous l'influence combinée de la houle, des courants, de la marée et du vent. Le phénomène de déferlement joue un rôle très important dans cette dynamique. Ses effets sur la stabilité des barres littorales restent mal connus. De nombreux travaux ont été réalisés pour mieux étudier la zone de déferlement et la formation des barres. La plupart sont relatifs à des mesures *in situ* (e.g. Gallagher et al., 1998¹, Sabatier *et al.*, 2002², Certain *et al.*, 2004³) ou des expériences à grande échelle (Roelvink & Reniers, 1995)⁴. Les expériences de laboratoire à échelle moyenne respectent difficilement les similitudes hydrodynamiques et morphodynamiques simultanément (e.g. Dulou, 2000)⁵. Nous nous sommes donc attachés à réaliser des expériences pour évaluer les configurations hydrodynamiques qui permettent d'obtenir l'équilibre morphologique de barres de déferlement.

2. Procédure expérimentale

Nos expériences sont réalisées dans un canal à houle de 36 m de long et 0,55 m de large, pour des profondeurs d'eau de 35 à 65 cm (figure 1).

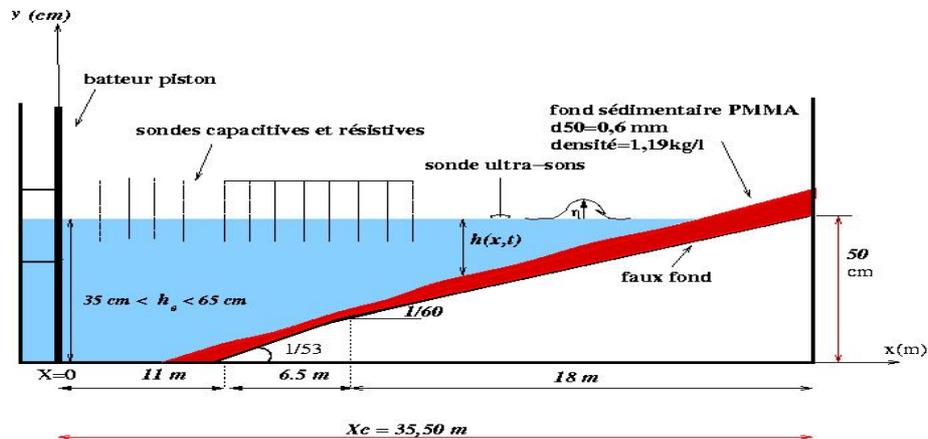


Figure 1- Schéma du canal.

Les similitudes mises en oeuvre sont de Froude pour l'hydrodynamique, de Rouse et de Shields pour le comportement du sédiment ce qui détermine complètement les caractéristiques du sédiment. Les échelles de temps et de longueur par rapport à la nature sont respectivement $1/3$ et $1/10$. Le sédiment est de faible densité ($\rho_s = 1,19 \text{ gr.cm}^{-3}$) avec le diamètre médian $d_{50} = 0,6 \text{ mm}$, ce qui permet une mise en mouvement par l'action de la houle. La mesure expérimentale de vitesse de chute du sédiment $W_c = 1,95 \text{ cm.s}^{-1}$ est assez proche de celle que l'on peut estimer à l'aide de la formule de Soulsby (1997)⁶:

$$W_c = \frac{v}{d_{50}} \left[(10,36^2 + 1,049D_*^3)^{\frac{1}{2}} - 10,36 \right] = 1,8 \text{ cm.s}^{-1}, \text{ où } D_* \text{ est le diamètre sédimentologique défini par:}$$

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}} d_{50}, \text{ avec } g \text{ l'accélération de la gravité, } s = \frac{\rho_s}{\rho_e} \text{ où } \rho_e \text{ est la masse volumique de l'eau,}$$

ρ_s est la masse volumique du sédiment et v la viscosité cinématique de l'eau. Les mesures de dénivellation de la surface libre sont faites par 12 suiveurs de surface libre (6 sondes résistives et 6 sondes capacitatives).

Le profil du fond a été mesuré par une sonde à ultrasons. Les houles engendrées par le batteur sont d'une part des ondes sinusoïdales de Stokes de deuxième ordre, et d'autre part des ondes aléatoires se conformant à un spectre de type JONSWAP. La méthode de synthèse repose sur une superposition de signaux sinusoïdaux (1000 composantes) incorporant des phases aléatoires. Les lois de génération des différents types de houle sont validées en calculant des hauteurs significatives et en déterminant la distribution des hauteurs des vagues tout au long du canal.

Les expériences ont été réalisées sur des temps très longs vis à vis de la période des vagues. Une séquence de vagues aléatoires est de l'ordre de 3600 vagues. La plage est considérée en équilibre ("quasi-équilibre") lorsque, après au moins 7 séquences, la vitesse

d'évolution du fond (V_f) est inférieure à 2 mm.h^{-1} , où V_f est une moyenne quadratique définie

$$\text{par: } V_f = \frac{1}{X_c} \sqrt{\int_0^{X_c} \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)^2 dx}$$

où h est la profondeur d'eau.

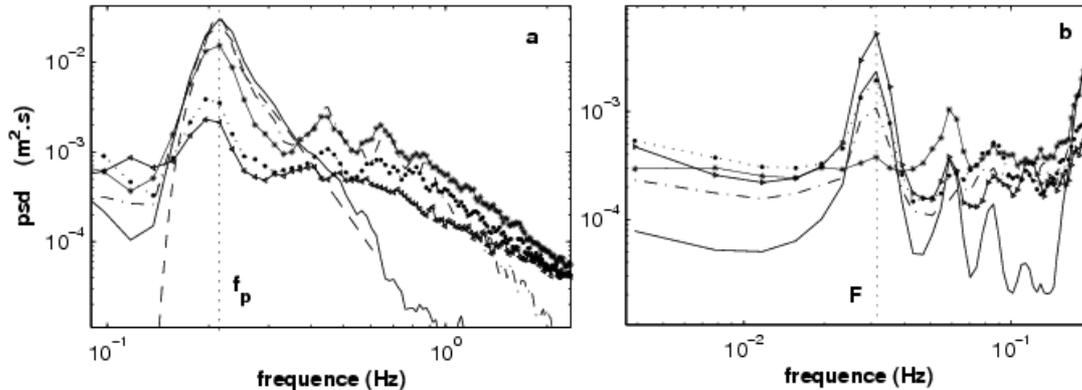


Figure 2- Evolution des spectres d'énergie. a- Spectre de consigne (---), les spectres mesurés à $x=1,77 \text{ m}$ (---), à $x=9,47 \text{ m}$ (-.), à $x=14,47 \text{ m}$ (-*), à $x=21,97 \text{ m}$ (-•-) et à $x=24,47 \text{ m}$ (\triangleleft) du batteur. b- Les spectres mesurés dans la zone basse fréquence. Consigne: $H_{rms}=11,31 \text{ cm}$, $f_p=0,2116 \text{ Hz}$, $h_0=60 \text{ cm}$ (expérience-40).

3. Hydrodynamique

Pour les configurations en équilibre, les conditions hydrodynamiques sont caractérisées. D'un point de vue énergétique, l'évolution du spectre d'énergie des vagues tout au long du canal est calculée par la méthode de Welch et présentée sur la figure 2. Dans la zone de profondeur constante, le spectre de l'énergie mesurée est très proche du spectre de consigne (figure 2-a). On observe des pics sur les fréquences $2f_p$ et $3f_p$. A cause de la diminution de la profondeur (shoaling), l'énergie est transférée aux harmoniques supérieures avec une tendance de l'ordre de f^5 dans la zone de l'eau profonde et f^3 dans la zone de l'eau peu profonde (Thornton, 1979)⁷. La dissipation d'énergie est observée à toutes les fréquences dans le déferlement (entre 14,5 m et 22 m).

En regardant de plus près la répartition d'énergie dans les basses fréquences (figure 2-b), on note la présence d'ondes stationnaires probablement liées au "surf-beat". Un maximum d'énergie à $F=0,03 \text{ Hz}$ correspond à la fréquence calculée à l'aide de la formule de Wilson (Dean et Dalrymple, 1991)⁸ pour une onde stationnaire uninodale en canal rectangulaire avec plage, qui est: $T=1,64 \frac{2l}{\sqrt{gh_0}}$. Dans notre cas pour une longueur de plage, $l=25 \text{ m}$, et une

profondeur d'eau, $h_0=60 \text{ cm}$, la formule donne $F=0,0296 \text{ Hz}$. Le maximum disparaît à 14,47 m du batteur correspondant au nœud de cette onde stationnaire.

Pour mieux analyser l'énergie basse fréquence et l'énergie des différentes harmoniques, le domaine fréquentiel est divisé en 3 parties. Par exemple pour l'expérience-40, (avec une largeur de spectre de consigne à $0,6 f_p < f < 2,4 f_p$ et $f_p=0,2116 \text{ Hz}$): la partie basse fréquence ($0 < f_p < 0,12$) Hz, une partie fondamentale ($0,12 < f_p < 0,37$) Hz et une partie haute fréquence ($f_p > 0,37$) Hz. On observe sur la figure 3-b que l'énergie haute fréquence augmente légèrement dans la zone de "shoaling" et diminue également dans le déferlement et l'énergie basse fréquence reste faible en tous points. On note que l'énergie de la houle diminue dans la zone de déferlement qui se situe entre 15 m et 18 m ce qui est confirmé par l'analyse vague par vague (figure 3-c). En résumé, on peut dire que les conditions hydrodynamiques

(e.g. forme des spectres, transfert d'énergie, ondes stationnaires) recréées dans les expériences de laboratoire sont en similitude avec la nature.

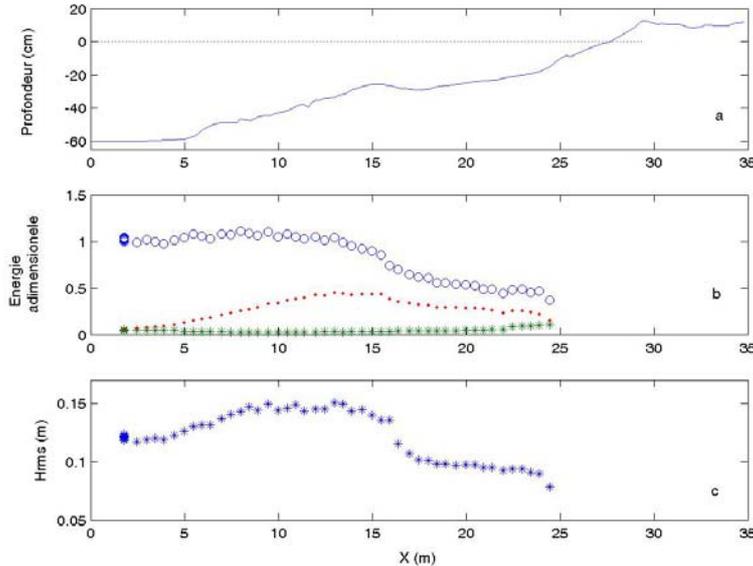


Figure 3- a. Profil de fond. b. Energie totale (o), Energie basse fréquence (*) et Energie des différents harmoniques (.) mesurées en chaque point et rapportées à celle de la première sonde située à 1,77m du batteur. c. Evolution des H_{rms} . Consigne: $H_{rms}=11,31cm$, $f_p=0,2116Hz$, $h_0=60cm$, largeur de spectre: $0,6 f_p < f < 2,4 f_p$ (expérience-40).

4. Morphodynamique

Sur un total de 50 expériences, 24 ont permis d'obtenir clairement une topographie type. Les différents profils obtenus sont classés par rapport à deux nombres adimensionnels indépendants, le nombre d'Ursell: $U_{rs} = \frac{g H_{rms} T_p^2}{h_0^3}$ (Ursell 1953⁹, avec H_{rms} moyenne quadratique des hauteurs de vague, T_p la période pic) et une vitesse de chute adimensionnelle dans la zone de déferlement: $\Omega = \frac{H_{br}}{T_p W_c}$ (Dean 1973¹⁰, avec W_c la vitesse de chute de la particule et H_{br} la hauteur de vague au point de déferlement). Une similitude entre expériences peut être mise en oeuvre en conservant le nombre d'Ursell pour simuler la transformation des vagues sur la plage et la vitesse de chute adimensionnelle à proximité du batteur ($\Omega = \frac{H_{br}}{T_p W_c}$) pour la reproduction du profil de la plage. Cette similitude a permis d'obtenir des topographies semblables avec différentes profondeurs d'eau (de 35 à 65 cm), voir figure 4.

Wright & Short (1984), par rapport à différentes mesures sur les plages en milieu naturel, indiquent qu'une plage est très réfléchive pour $\Omega < 1$ et très dissipative pour $\Omega > 6$. Pour les valeurs intermédiaires ($1 < \Omega < 6$) une barre de déferlement en équilibre peut être obtenue. Les valeurs de Ω dans nos expériences sont situées dans la zone intermédiaire (entre 1 et 6). Dans cet intervalle, trois morphologies types se distinguent correspondant à 4 domaines du plan (figure 5): pour $1,7 < \Omega < 2,1$ on obtient une barre; pour $2,1 < \Omega < 2,5$ la plage est réfléchive et on obtient un système de multi-barres; pour $\Omega > 2,5$ on obtient une plage avec une barre qui migre vers le haut de la plage (vitesse de migration de barre: $V_{barre} > 0,8 \text{ m.h}^{-1}$) et finalement,

forme une terrasse, et pour $\Omega < 1,7$ la plage est dissipative et on obtient une plage en forme de terrasse. Les valeurs de paramètres de 4 expériences types sont présentées dans le tableau 1. Pour ces 4 expériences présentées, la largeur de spectre est égale à $0,6f_p < f < 2,4f_p$ et la profondeur d'eau initiale est égale à 60 cm. Les profils de la figure 6 correspondent aux 4 cas ainsi définis.

Dans le cas $\Omega = 1,92$ (expérience-40), une barre de déferlement a été observée et $V_f \sim 0,9 \text{ mm.h}^{-1}$ après 45 heures. Dans ce cas là, il y a une focalisation du déferlement qui est plutôt de type plongeant.

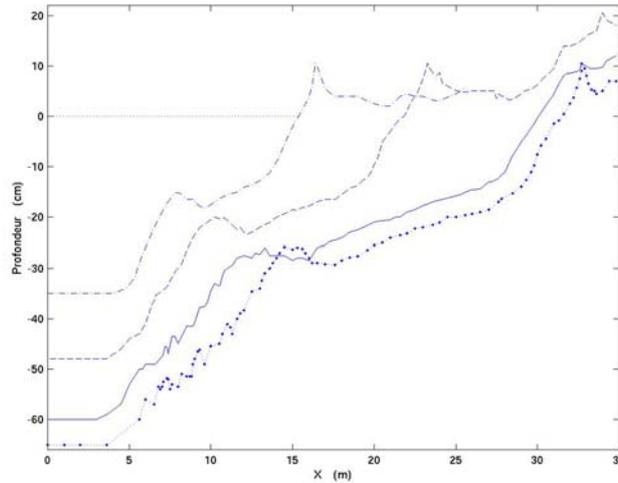


Figure 4- $H_{rms}=8\text{cm}$, $f_p=0,33\text{Hz}$, $h_0=35\text{cm}$, expérience-29: (-), $H_{rms}=9,88\text{cm}$, $f_p=0,27\text{Hz}$, $h_0=48\text{cm}$, expérience-36: (- -), $H_{rms}=9,88\text{cm}$, $f_p=0,2327\text{Hz}$, $h_0=60\text{cm}$, expérience-39: (- - -), $H_{rms}=12,09\text{cm}$, $f_p=0,2206\text{Hz}$, $h_0=65\text{cm}$, expérience-41: (- •), largeur de spectre de consigne: $0,6 f_p < f < 2,4 f_p$.

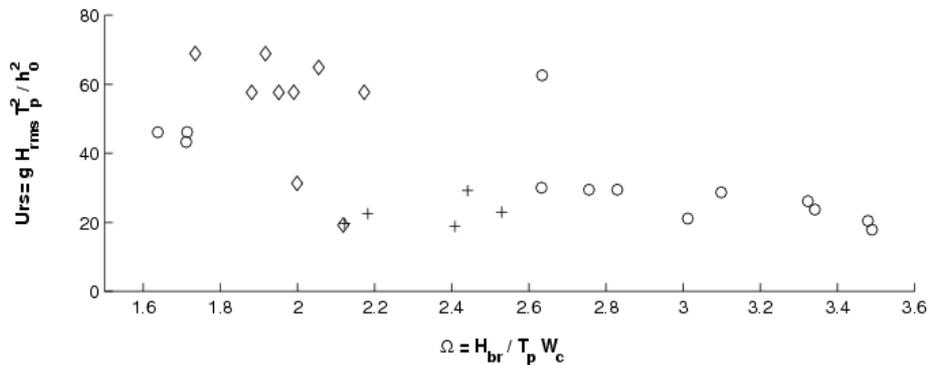


Figure 5- Plage terrasse: (O), Plage multi-barres (en évolution rapide): (+), Plage barrée: (◇).

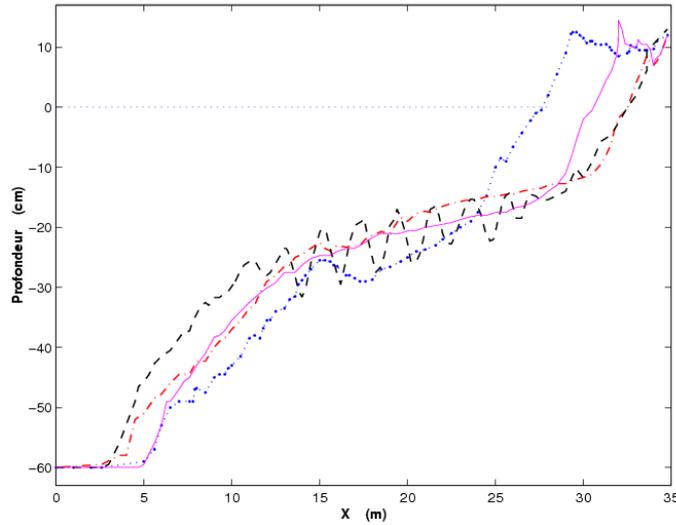


Figure 6- Expérience-44 ($\Omega=2,76$): (---), expérience-38 ($\Omega=2,12$): (- -), expérience-40 ($\Omega=1,92$): (-•-), expérience-43 ($\Omega=1,71$): (-.).

Tableau 1- Les valeurs de paramètres de 4 expériences types.

Expérience	Hrms (cm)	fp (Hz)	penne(moyenne initiale)	Ω	durée
44	12	0,33	0,0175	2,76	60h30
38	8	0,33	0,0217	2,12	14h40
40	11,31	0,212	0,0196	1,92	45h10
43	9,17	0,233	0,0172	1,71	32h20

Dans le cas $\Omega = 1,71$ (expérience-43) une plage en forme de terrasse a été obtenue ($V_f \sim 1,1 \text{ mm. h}^{-1}$ après 16 heures). Dans ce cas là, le déferlement est plus régulier et plutôt de type glissant. Dans le cas $\Omega = 2,76$ (expérience-44) une barre se forme, migre vers le haut de la plage et forme une berme. Ce cycle se répète plusieurs fois et la plage arrive à une condition de quasi-équilibre après un temps assez long ($V_f \sim 1,5 \text{ mm. h}^{-1}$ après 60 heures). L'état d'équilibre ("quasi-équilibre") a été obtenu dans ces trois cas ($\Omega < 2,1$ & $\Omega > 2,5$). Dans le cas réfléchif $\Omega = 2,12$ (expérience-38) un système de multi-barres sur le fond, avant et après le point de déferlement a été observé. La vitesse d'évolution des fonds reste grande même aux temps longs ($V_f > 9 \text{ mm. h}^{-1}$ après 14h40 heures). Les ondes réfléchies par la plage se réfléchissent à nouveau contre le batteur pour former un clapotis partiel et contribuent à modifier le fond. La modulation d'amplitude induite se traduit par des barres de réflexion.

Nous avons constaté que le profil de fond évolue rapidement au début de chaque expérience et puis décroît régulièrement (figure 7). Dans le cas de la figure 6, sur les 2 cas en quasi-équilibre (expérience-40, 43), en moyenne sur les 6 premières heures, $V_f=6,3 \text{ mm. h}^{-1}$, puis après 15 heures $V_f=3 \text{ mm. h}^{-1}$ et enfin $V_f=1 \text{ mm. h}^{-1}$ après 26 heures.

Pour les plages-barrées, nous avons calculé le rapport entre la profondeur d'eau au niveau du creux (h_t) et la profondeur d'eau au niveau de la crête (h_c):

$$\frac{h_t}{h_c} \cong 1,2$$

Ce rapport est comparable avec celui déterminé par Sunamura, (1989)¹¹ en milieu naturel. Par ailleurs, la distance entre le sommet de la barre et la ligne de côte est bien de l'ordre du dixième de celle mesurée en nature (Wright & Short, 1984)¹².

On a aussi pu mettre en évidence l'importance de la granulométrie sur le profil d'équilibre d'une plage. Afin de quantifier cet effet, des prélèvements de sédiment ont été effectués à différents instants pendant les expériences. A l'aide d'un granulomètre laser, il a été mis en évidence l'existence d'un tri granulométrique dans le cas des expériences en équilibre. Les matériaux les plus grossiers se déposent "onshore" du point de déferlement et les matériaux les plus fins se déposent "offshore" du point de déferlement (figure 8), ce qui est également une caractéristique des plages en nature (Van Rijn, 1998)¹³.

En résumé, on peut dire que l'aspect morphodynamique (*e.g.* le choix du sédiment, la pente de la plage, le déferlement et en conséquence le courant de retour) dans les expériences de laboratoire est en similitude avec la nature.

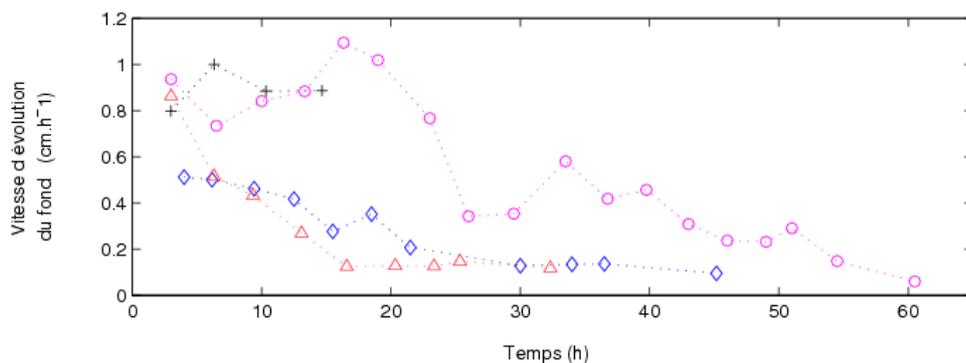


Figure 7- Vitesse de l'évolution de fond. Expérience-44:(O), expérience-38:(+), expérience-40:(◇), expérience-43:(△).

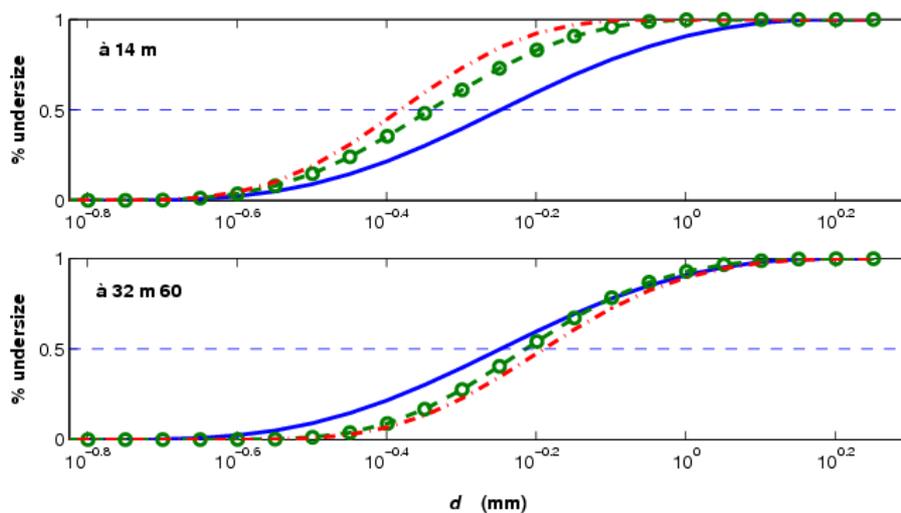


Figure 8- Distribution granulométrique en 2 sections au début (O) et à la fin de l'expérience-3 (---)(après 13h30), (consigne: $H_{ms}=12,3\text{cm}$, $f_p=0,4\text{Hz}$, $h_0=65\text{cm}$, largeur de spectre: $0,8f_p < f < 1,8f_p$), comparée à la distribution moyenne (---).

5. Conclusions

Les expériences réalisées avec les ondes aléatoires indiquent qu'il est possible d'obtenir des topographies de fond en quasi-équilibre. On distingue 4 morphologies types en fonction d'une vitesse de chute adimensionnelle. Un système de barre de déferlement et une plage en forme de terrasse ont été obtenus en similitude avec la nature. En outre, les expériences ont montré que dans le cas des plages en quasi-équilibre, on obtenait un tri granulométrique sur toute la longueur de la plage.

6. Remerciements

Ce travail a été soutenu par le PATOM (Programme ATmosphère Océan à Multi-échelles). Les expériences ont bénéficiées du support technique de J.-M. Barnoud et L. Terrier. Nous remercions également Jean Martins du LTHE pour la mise à disposition du granulomètre laser Malvern.

7. Références

- 1.E. GALLAGHER, R. T. GUZA & S. ELGAR. Observation of sandbar on a natural beach. *J. Geophys. Res.*, **103** (C2): 3203-3215, 1998.
- 2.F. SABATIER, A. LAMBERT, M. CHAIBI, O. SAMAT & M. PROVANSAL. Morphodynamique du profil de plage en milieu microtidal : du relevé de terrain au modèle mathématique et numérique. *Geomorphology : from expert opinion to modelling*, 357-360, 2002.
- 3.R. CERTAIN, J-P. BARUSSEAU, F. LEVOY, O. R. A. MONFORT & A. H. SALLENGER. Morphodynamics of nearshore bars in the Golfe du Lion under swell obliquity. *J. of Coastal Research, (accepté avec correction)*, 2004.
- 4.J. A. ROELVINK & A. J. H. M. RENIERS. *LIP11D Delta Flume Experiments*. Report h2130, Delf Hydraulics, 1995.
- 5.C. DULOU. *Interactions houle-sédiments: application à la formation des barres littorales*. PhD thesis, Université de Marseille I, 2000.
- 6.R. L. SOULSBY. *Dynamics of marine sands, a manual for practical applications*. Thomas Telford, H. R. Wallingford, 1997.
- 7.E. B. THORNTON. Energetic of breaking waves within the surf zone. *J. Geophys. Res.*, **84** (C8): 4931-4938, 1979.
- 8.R. G. DEAN & R. A. DALRYMPLE. *Water wave mechanics for Engineers and Scientists*. World scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1991.
- 9.F. URSELL. The long-wave paradox in the theory of gravity waves. *Proc. Camb. Philos. Soc.*, **49** : 685-694, 1953.
- 10.R. G. DEAN. Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proc. Conf. On Engineering Dynamics in the surf zone, Institution of Civil Engineering, Australia, Sydney*, 208-214, 1973.
- 11.T. SUNAMURA. Sandy beach geomorphology elucidated by laboratory modelling. in: V. C. LAKHAN & A. S. TRENHAILE (editors). *Application in coastal Modelling*, Amsterdam: Elsevier, 159-213, 1989.
- 12.L. D. WRIGHT & A. D. SHORT. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.*, **56**: 93-118, 1984.
- 13.L. C. VAN RIJN. *Principles of Coastal Morphology*. Aqua Publications, 1998.