

Les ondes infragravitaires et leur rôle éventuel dans la formation de croissants de plage : cas de la plage de Sète

P. Ferrer¹, V. Rey², R. Certain¹, F. Adloff¹ et S. Meulé³

1 *LEGEM, Université de Perpignan, 52 av Paul Alduy, 66860 Perpignan Cedex, France*

2 *LSEET-LEPI, Université du Sud Toulon-Var, B.P 20132 F 83957, la Garde, Cedex, France*

3 *CEREGE, Europôle Méditerranéen de l'Arbois - BP 80 - 13545 Aix en Provence cedex 04*

Résumé

La génération de formes rythmiques sur les plages est un sujet riche en interrogations. Suite à une campagne intensive d'acquisition dans le cadre de l'ART 7 du PNEC en novembre 2000 sur une plage de Sète (Hérault), une étude hydrodynamique a été menée afin de vérifier si les ondes de bord étaient responsables de la formation des croissants de plage sur la zone. A la vue des résultats obtenus, les ondes de bord ne seraient pas le moteur principal de mise en place.

Abstract

Beach cusps formation is a topic with a lot of questions. After an intensive acquisition survey in November 2000, on Sète Beach (Hérault), a hydrodynamic study has been led to verify if edge waves are responsible of beach cusp formation. It seems that edge waves are not the main factor of settlement.

Mots Clés : infragravité, croissants de plage, hydrodynamique, auto-organisation.

1. Introduction.

La génération de formes rythmiques sur le littoral reste un sujet d'interrogation.

Deux théories principales sont actuellement développées pour expliquer la formation des croissants de plage : la génération due aux ondes infragravitaires^{1,2} et celle liée au modèle d'auto-organisation^{3,4}. La théorie proposée par Guza et Inman (1975) s'appuie sur des modulations rythmiques de la surface libre qui imposent une empreinte sur la morphologie aboutissant à la formation des croissants de plage. Pour vérifier cette théorie, il est nécessaire d'effectuer diverses mesures (espacement entre les croissants, période des ondes incidentes, pente de la plage). Certaines études, dont notamment une étude récente de Coco et

al., 1999, ont permis de vérifier l'existence d'une relation entre l'espacement des croissants et les ondes infragravitaires. Dans la seconde théorie, des hétérogénéités de la morphologie créent des rétroactions positives du champ de courant dans la zone de jet de rive qui aboutissent à la formation de structures rythmiques. Ces structures rythmiques ont un lien avec la pénétration du jet de rive sur la plage. Cependant, un grand nombre d'études^{3,6} ont été réalisées en laboratoire, avec seulement quelques validations sur le terrain⁷.

Si on confronte les deux théories, on s'aperçoit qu'elles sont compatibles pour certains auteurs comme Coco et al. (1999) alors que Werner et Fink (1993) montrent que, dans leur étude, des arguments les opposent. Une étude récente menée par Coco et al. (2000) ne tenant pas compte de l'hydrodynamique près de la côte (vague et réfraction) a montré la possibilité de formation de croissants de plage, leur espacement étant uniquement contrôlé par l'incursion du jet de rive sur la plage. Cela a également permis de mettre en évidence que la présence d'un courant longitudinal dans la zone de jet de rive détruisait les croissants. Cela va donc à l'encontre de la théorie de Guza et Inman (1975) qui dit qu'une incidence oblique favorise le piégeage des ondes de bord dans la zone du jet de rive, ces ondes étant ensuite responsables de la formation des croissants de plage.

D'une manière générale, l'hypothèse des ondes infragravitaires reste la plus étudiée théoriquement et sur le terrain. De nombreuses études viennent confirmer ou infirmer cette théorie^{5,8,9}. Cependant, on s'aperçoit dans le détail que les séries de données hydrodynamiques utilisées sont généralement peu adaptées à ce genre d'expérimentations (mesures effectuées trop loin au large ou décalées dans le temps par rapport au moment de génération des croissants).

On se propose dans ce travail d'étudier plus spécifiquement la part possible des ondes infragravitaires comme cause dans la génération des croissants de plage à partir d'un réseau dense de capteurs de vitesses et de pression déployés en 2000 lors d'une campagne de mesure intensive dans le cadre de l'ART 7 du PNEC à Sète (golfe du Lion).

2. Site d'étude.

La zone retenue pour cette expérience se situe à Sète, dans le golfe du Lion, en Languedoc-Roussillon (fig.1). Elle correspond au site méditerranéen de l'ART 7 du PNEC (Programme National d'Environnement Côtier), qui a étudié les environnements d'avant-côte à barres sédimentaires.

Ce site microtidal (0,15 m de marnage) est dominé par les vagues. Les vents dominants proviennent de terre (NW) ou de mer (SE). Ils induisent des variations de niveaux importantes, qui peuvent atteindre 1m à la côte. Les vagues créées par les vents de NW sont généralement faibles (0,3m) avec des périodes allant de 3 à 4 secondes (mer du vent). Les vagues dominantes sont induites par les vents de SE. Elles atteignent régulièrement des hauteurs significatives de 2,5m avec des périodes voisines de 8 secondes. La morphologie en pente douce (1%) de l'avant-côte jusqu'au rivage est entrecoupée par deux barres sédimentaires (interne et externe). Cette terminologie est reprise pour décrire les deux fosses séparatrices.

Le sédiment superficiel est fin à moyen, généralement bien trié et sa médiane décroît du bord vers le large. Ponctuellement, lors de la décroissance de la taille de la houle à la fin des tempêtes, la formation de croissants de plage s'observe dans la zone de jet de rive.

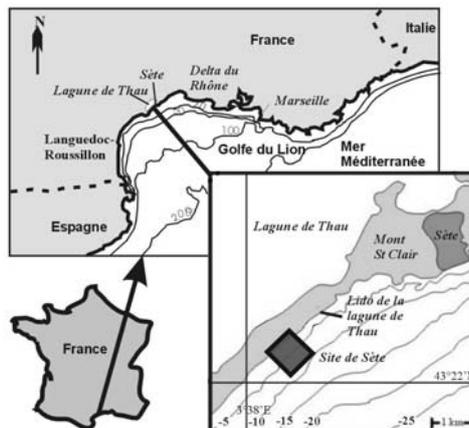


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude.

3. Méthodologie.

L'expérimentation de terrain s'est déroulée du 3 novembre au 3 décembre 2000¹⁰. Le dispositif instrumental se composait de trois courantomètres / houlographes Interocean de type S4 (DW et ADW), de capteurs de pression et d'un courantomètre/houlographe Nortek de type Vector pour l'étude hydrodynamique ; d'un théodolite pour la partie de l'étude morphologique. Les levés topographiques ont eu lieu suite à la formation ou à la destruction des croissants de plage.

3.1. Les outils de mesure.

Les S4 ont été fixés sur des structures a-magnétiques. Ces instruments mesurent les deux composantes du courant horizontal à une hauteur comprise entre 0,5 m et 0,9 m par rapport au fond marin et la pression, à une distance du fond de 0,4 m à 0,8 m. Ces données permettent d'évaluer les caractéristiques directionnelles des vagues. Les données brutes sont acquises à une fréquence de 2 Hz pendant 18 à 36 minutes toutes les trois heures. Une fois moyennées, elles fournissent les caractéristiques du courant horizontal moyen ainsi que les fluctuations du niveau du plan d'eau statique. Les caractéristiques de l'agitation (hauteur significative et périodes caractéristiques) sont déduites des séries temporelles des fluctuations de pression par analyse spectrale. Les S4 étaient disposés sur le glacis et dans les creux inter-barres (respectivement à -6,0 ; -4,0 et -2,5 m) afin d'étudier les conditions de houle à l'entrée du système et sa déformation après passage sur les barres (fig.2). En effet, lors des tempêtes, deux déferlements successifs peuvent se produire au passage des barres. Pour des

houles plus petites, les vagues peuvent parvenir à la côte sans déferler ou seulement sur la barre interne.

Pour l'étude plus spécifique de l'hydrodynamique à la côte, au plus proche de la zone de génération des croissants, au cours de l'expérimentation de terrain, des capteurs de pression, au nombre de 5, ont été disposés sur le flanc externe et la crête de la barre interne du 14/11/2000 au 24/11/2000 (fig. 2). Ils sont situés entre -2 et -3 mètres de profondeur. L'enregistrement s'est effectué à une fréquence de 16Hz, à intervalles irréguliers sur des durées variables (5 à 90 minutes). De plus, ponctuellement, un courantomètre/houlographe de type Vector a été déployé dans la fosse de lévigation interne, au pied du talus de collision pour un enregistrement avec une fréquence de 32 Hz pendant 30 minutes. Ce déploiement a eu lieu les jours de formation de croissants de plage (7/11, 14/11 et le 24/11) ainsi qu'un jour de destruction de la topographie résiduelle (20/11/2000).

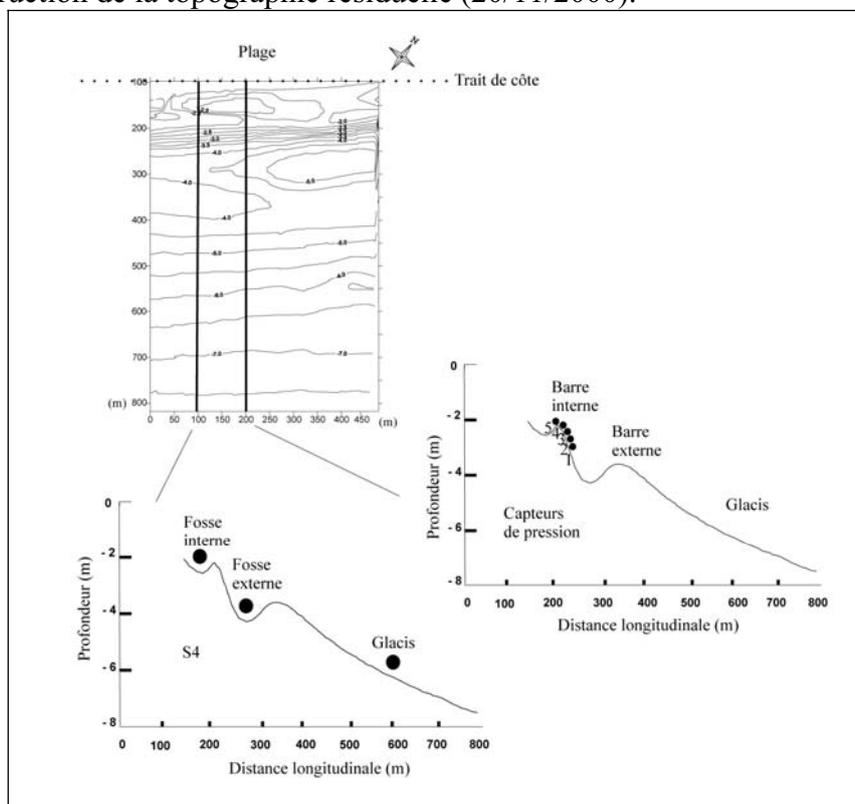


Figure 2 : Les profils transversaux instrumentés et leur morphologie au cours de la campagne (modifiée de ¹⁰).

3.2. Analyse des données.

Seules les situations de décroissance de la houle, favorables à la formation de croissants, seront présentées dans cet article. Toutes les données hydrodynamiques vont être étudiées en utilisant des transformées de Fourier rapide (FFT) avec des fréquences de coupure entre 0,003 Hz et 0,40 Hz (300 s-2,5 s). Cette méthode permet d'obtenir des spectres d'énergie en fonction des fréquences et donc de déterminer les caractéristiques des ondes. Il a fallu ensuite

différencier les ondes infragravitaires des ondes gravitaires. La limite supérieure des ondes infragravitaires a été fixée à 0,05 Hz⁻¹. A partir de ces spectres, les longueurs d'onde liées aux pics des ondes infragravitaires (L_e) ont été calculées à partir de la relation de dispersion (1) (en partant du postulat que les ondes étudiées sont stationnaires) puis comparées aux longueurs d'ondes des croissants observés sur le terrain (L_c) longitudinalement. Pour le cas synchrone $L_c=L_e$ alors que pour le cas sub-harmonique $L_c=L_e/2$.

$$L_e = \frac{g}{2\pi} T_e^2 \times (2n+1) \tan \beta \quad (1)$$

(où L_e : la longueur d'onde de l'infragravité, g : la valeur de l'accélération de la pesanteur, T_e : la période de l'infragravité, n : le mode et β : la pente de la plage)

4. Résultats.

Des représentations tridimensionnelles de la plage ont été réalisées (fig. 3). A partir de ces cartes en 3D, un profil topographique longitudinal a été extrait (fig. 3). La longueur d'onde des croissants de plage (L_c) a été calculée à partir de ce profil.

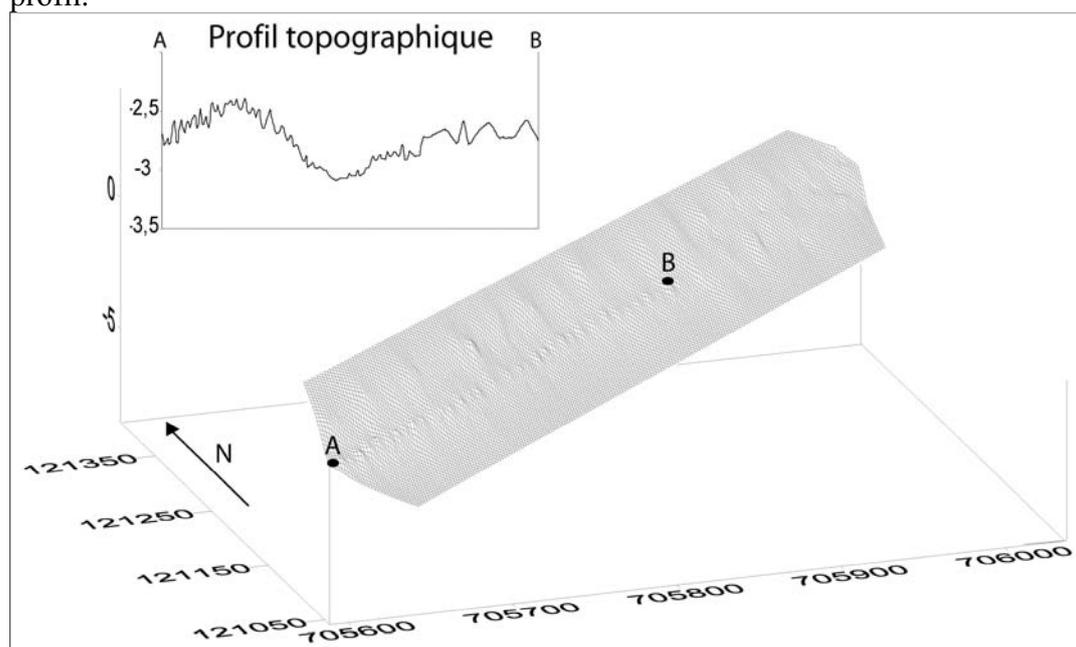


Figure 3 : carte topographique de la zone et profil topographique au niveau des croissants.

Les données hydrodynamiques ont permis d'obtenir des spectres d'énergie (fig. 4) caractéristiques pour chaque journée d'analyse au moment de la formation ou de la destruction des croissants. On distingue plusieurs pics énergétiques dans ces spectres. Chaque pic correspond à un type d'onde dans le domaine infragravitaire, gravitaire ou de la mer du vent. A partir de ces spectres, les fréquences des ondes gravitaires incidentes et des ondes infragravitaires observées ont été mesurées, et les périodes correspondantes ont été calculées. La longueur d'onde des ondes infragravitaires (L_e) a été déduite de l'équation (1).

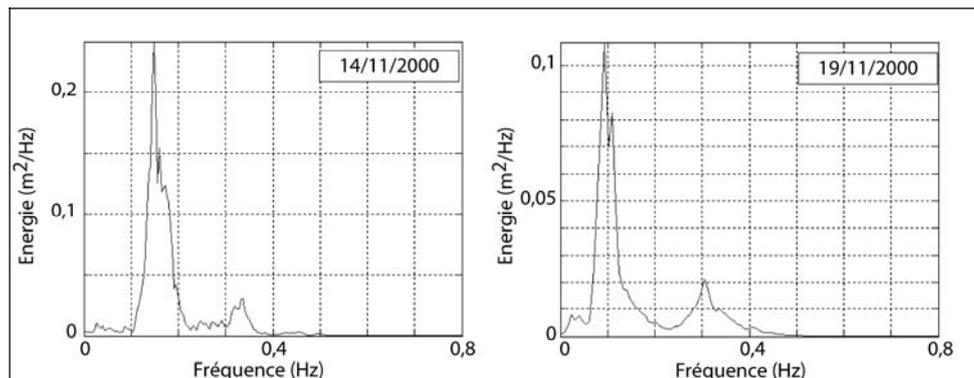


Figure 4 : spectres d'énergie du 14/11/2000 et du 19/11/2000.

Tous les résultats sont répertoriés dans le tableau 1. Un certain nombre de difficultés a été rencontré dû à la complexité du milieu. Ainsi la pente de la plage a été supposée constante dans le modèle alors qu'en réalité elle est variable dans la zone du jet de rive. Ce modèle a été testé à Sète en considérant $\tan \beta = 0,086$. Ensuite, il a fallu identifier le pic principal dans le domaine infragravitaire pour chaque spectre d'énergie. Le mode $n=0$ a été utilisé car il correspond théoriquement à celui qui concentre le plus d'énergie à la côte.

Situation	Cas étudié	Date	Lc (m)	fi (Hz)	Ti (s)	fe (Hz)	Te (s)	Le (m)	Le/2 (m)
1	Formation	07/11/2000	31	0,090	11,130	0,032	26,256	92,567	65,563
2	Formation	14/11/2000	11	0,148	6,738	0,027	36,571	179,585	89,792
3	Destruction	19/11/2000	-	0,102	9,846	0,039	25,600	87,997	43,998
4	Formation	21/11/2000	19	0,125	8,000	0,031	32,000	137,495	68,747
5	Evolution	24/11/2000	20	0,125	8,000	0,023	42,666	244,435	122,217

Tableau 1 : résultats (Lc : longueur d'onde des croissants observée sur le terrain, fi : fréquence de l'onde incidente, Ti : période de l'onde incidente, fe : fréquence du pic principal de l'infragravité, Te : période de l'infragravité et Le : longueur d'onde de l'infragravité).

5. Interprétation.

Pour valider le modèle de structuration des croissants de plage à partir des ondes infragravitaires, il convient donc de mesurer les périodes des ondes infragravitaires et de vérifier que la longueur d'onde des formes rythmiques correspond à la moitié de celle calculée théoriquement à partir de la relation de dispersion (1) dans le cas subharmonique, le plus couramment admis. Plusieurs situations ont été considérées dans cette étude.

Les situations 1, 2 et 4 correspondent à la formation de croissants de plage. En comparant le pic principal de l'infragravité pour chaque situation, la longueur d'onde calculée ne correspond pas à la longueur d'onde observée des croissants. Les fréquences sont toujours trop basses pour générer de petites longueurs d'onde comme celle des croissants. Donc l'infragravité ne semble pas être le moteur principal de la formation des croissants de plage pour les situations étudiées.

Dans la situation 5, les croissants sont déjà formés. Il est intéressant de voir si l'infragravité a une influence sur l'évolution de la longueur d'onde des croissants dans le temps ou si les croissants sont en mesure de créer ou de maintenir une onde infragravitaire dont la longueur d'onde est compatible avec les croissants de plage⁸. Ici, la longueur d'onde des croissants est différente de celle du pic principal dans le domaine infragravitaire. Il est donc possible d'en déduire pour notre cas que l'infragravité n'est pas le moteur principal dans l'évolution morphologique des croissants de plage et qu'aucune onde infragravitaire spécifique ne semble maintenue par les croissants.

La situation 3 correspond à une phase de destruction des croissants. Le but est alors de voir si l'infragravité participe à leur destruction. Or, dans le spectre d'énergie du 19 novembre 2000, le pic qui correspond à celui de la mer du vent est plus énergétique que celui de l'infragravité et cette mer du vent d'influence maritime dirigée obliquement vers la côte (en provenance de sud) a manifestement participé à la destruction des croissants. Il semble donc que la cause principale de destruction des croissants soit liée à des ondes de hautes fréquences qui viendraient déstructurer le bas de plage par une action importante sur le jet de rive plutôt que par l'apparition d'ondes de basses fréquences.

6. Discussion et conclusion.

La génération des croissants de plage sur le site de Sète ne semble pas liée au forçage d'ondes infragravitaires, pour les paramètres utilisés dans cette étude. Cependant, de nombreuses variables peuvent modifier fortement le calcul de la longueur d'onde des ondes infragravitaires. La plus problématique est celle concernant la pente de la plage. En effet, lors des études, personne ne définit à quoi correspond précisément la pente de la plage^{6,7,8}. Dans notre cas, la valeur utilisée $\tan\beta$ (= 0,086) correspond à la valeur mesurée à l'endroit où se forment les croissants, ce qui aboutit à des longueurs d'onde L_c calculées trop importantes par rapport à celles mesurées sur le terrain. Cependant, si on prend la pente moyenne de l'avant-côte, soit $\tan\beta = 0,01$, les longueurs d'onde calculées pour L_c peuvent être compatibles avec celles mesurées sur le terrain. Le mode n utilisé pour l'onde infragravitaire fait aussi fortement varier le calcul de la longueur d'onde mais vers des valeurs de moins en moins compatibles avec la longueur d'onde des croissants observés. De plus, la mise au carré de T dans la relation de dispersion accroît l'imprécision du calcul.

Si la génération de croissants de plage n'est pas liée aux ondes de bord, elle peut être liée à l'auto-organisation. La formule théorique³, reliant la longueur d'onde des croissants à la distance parcourue par le jet de rive est tout à fait compatible avec les observations de terrain à Sète (des incursions du jet de rive entre 6 et 18 m pour des longueurs d'onde de croissants de 10 à 30 m). Un autre cas de figure, proche de l'auto-organisation, semble pouvoir être évoqué ici. Pour les observations faites le 07/11/2000, la formation des croissants pourrait être rattachée à un mécanisme de propagation d'une instabilité gravitaire. En effet, il semble qu'à partir d'une hétérogénéité ponctuelle importante du relief de bas de

plage on ait vu les croissants se former de proche en proche dans le sens de propagation de la houle, oblique ce jour-là.. L'irrégularité de départ de la topographie aurait pu créer des perturbations hydrodynamiques qui seraient responsables de la génération de croissants de plage en aval.

Si les causes de la génération des croissants de plage n'ont pu être trouvées, il est possible d'affirmer qu'une mer du vent ($f=0,33$ Hz) avec une incidence oblique est responsable de la destruction de ces formes rythmiques. Le vent et la mer du vent semble lier à l'évolution des croissants au fil du temps ⁶.

A la vue des données hydrodynamiques et topographiques, les longueurs d'ondes des croissants de plage formés ne correspondent pas à celles des ondes infragravitaires. Il semble donc que l'on puisse conclure que pour les cas étudiés, les ondes de bord ne soient pas le moteur principal dans la formation des croissants de plage.

Dans le cadre de cette étude, un nouveau suivi hydrodynamique va être réalisé sur des durées plus longues et avec l'instrumentation d'un profil longitudinal. Cela permettra d'échantillonner les fréquences de manière plus précise. Il faudra également faire un suivi topographique plus détaillé de la pente de la plage afin de voir les différentes composantes qui peuvent entrer en jeu dans la génération des croissants.

7. Références bibliographiques.

- ¹ Guza, R. T. and Inman, D. L., (1975). Edge waves and beach cusps, *J. Geoph. Res.*, **80** (21), 2997-3012.
- ² Inman, D. L. and Guza, R. T., (1982). The origin of swash cusps on beaches, *Mar. Geol.*, **49**, 133-148.
- ³ Werner, B. T. and Fink, T. M., (1993). Beach cusps as self-organized patterns, *Science*, **260**, 968-971.
- ⁴ Coco, G., Huntley, D. A. and O'Hare, T. J., (2000). Investigation of a self-organization model for beach cusp formation and development, *J. Geoph. Res.*, **105** (C9), 21991-22002.
- ⁵ Coco, G., O'Hare, T. J. and Huntley, D. A., (1999). Beach cusps: A comparison between data and theories for their formation, *J. Coastal Res.*, **15** (3), 741-749.
- ⁶ Masselink, G. and Pattiaratchi, C. B., (1998). Morphological evolution of beach cusps and associated swash circulation patterns, *Mar. Geol.*, **146**, 93-113.
- ⁷ Coco, G., Burnet, T. K. and Werner, T., (2003). Test of self-organization in beach cusp, *J. Geoph. Res.*, **108** (3), 3101-3112.
- ⁸ Holland, K. T. and Holman, R. A., (1996). Field observations of beach cusps and swash motions, *Mar. Geol.*, **134**, 77-93.
- ⁹ Holland, K. T., (1998). Beach cusp formation and spacings at Duck, USA, *Cont. Shelf. Res.*, **18**, 1081-1098.
- ¹⁰ Certain, R., Meulé, S., Rey, V. and Pinazo, C., (2005). Wave transformation on a microtidal barred beach (Sète, France), *J. Mar. Sys.*, **58**, 19-34.
- ¹¹ Bauer, B.O., 1990. Assessing the relative energetics of infragravity motions in lakes and seas. *J. Coast. Res.*, **6**, 853– 865.