

Etude expérimentale de la célérité des vagues en zone de surf

MARION TISSIER^a, PHILIPPE BONNETON^a, RAFAEL ALMAR^a, BRUNO CASTELLE^a, NATALIE BONNETON^a

a. Université de Bordeaux 1, CNRS, UMR 5805 EPOC, avenue des facultés, 33405 TALENCE

Résumé :

L'estimation de la célérité des vagues en zone de surf est une étape essentielle dans la modélisation de la circulation littorale. Nous présentons une étude de ce paramètre basée sur les données de la campagne de mesure internationale ECORS 2008. En particulier, nous analysons, pour des houles très énergétiques, l'influence des non-linéarités et évaluons plusieurs modèles prédictifs de célérité. Enfin, nous discutons l'influence des pulsations très basse-fréquence de la circulation sur la célérité.

Abstract :

A good prediction of wave celerity in the surf zone is essential for nearshore circulation modelling. This paper is devoted to a study of this parameter based on the analysis of data collected during the ECORS 2008 field experiment. In particular, we analyse, for high energy wave conditions, the effects of non-linearities and evaluate the predictive ability of several celerity models. Then, we discuss the influence of very low frequency pulsations of the circulation on wave celerity.

Mots clefs : modèles de célérité, zone de surf, non-linéarités

1 Introduction

A l'approche de la côte, la houle voit ses caractéristiques se modifier. En se propageant dans des zones où la profondeur d'eau est plus faible, la dynamique des vagues devient de plus en plus non-linéaire. Les vagues se raidissent, et généralement finissent par déferler. Ces vagues déferlées continuent alors de se propager vers la côte dans ce que l'on appelle "la zone de surf". Dans cette zone, la dynamique des vagues est principalement contrôlée par deux nombres sans dimension : $\mu = \frac{d}{\lambda}$ et $\epsilon = \frac{H}{d}$, avec d la profondeur au repos, λ la longueur d'onde et H l'amplitude de la vague. μ quantifie le caractère plus ou moins "peu-profond" de l'écoulement et donc le phénomène de dispersion "classique", dit dispersion en fréquence. Celui-ci est prépondérant au large et perd progressivement de l'importance quand on se rapproche de la côte. ϵ caractérise les non-linéarités de l'écoulement et est associé au phénomène dit de "dispersion" en amplitude. En zone de surf, $\mu \ll 1$ alors que le paramètre ϵ peut être de l'ordre de 1. La vague déferlée se réorganise progressivement dans la zone de surf interne en une succession de ressauts hydrauliques propagatifs : on observe alors des fronts d'onde très raides, donnant aux vagues des profils dit en "dent de scie" (cf. Figure 1). La compréhension et la modélisation de cette dynamique complexe restent encore aujourd'hui des enjeux très importants.

En particulier, la recherche d'une modélisation pertinente de la célérité des vagues en zone côtière est primordiale, et, si la célérité des vagues est aujourd'hui assez bien décrite avant le déferlement, ce n'est pas encore le cas en zone de surf. Pourtant, la célérité des vagues déferlées, c_b , est un paramètre clé pour les différents modèles de vague en milieu littoral. Dans les modèles couplés houle/courant à phase moyennée, les flux de masse, les flux d'énergie et la dissipation dépendent de c_b . Or la plupart des modèles pour la vitesse des vagues supposent que la vague à une forme donnée ou lentement variable, alors qu'en zone de surf celle-ci peut varier très rapidement. Par exemple la célérité est souvent estimée en utilisant le modèle linéaire en eau peu profonde, ou le modèle classique de bore [1]. Dans les modèles de type Boussinesq dépendant du temps, une estimation de c_b est aussi nécessaire : on utilise souvent des estimations grossières du type $c_b = 1.3(g\bar{h})^{1/2}$ [2] où \bar{h} est la profondeur d'eau moyenne, qui comme on va le montrer ultérieurement, ne sont pas forcément représentatives de la réalité.

L'étude in-situ de la célérité des vagues est également importante pour le développement et la validation de certaines méthodes d'analyse vidéo de la dynamique littorale (cf. [3], [4] et [5]). Par exemple, à partir d'images vidéo, il est possible d'estimer les vitesses des vagues et cela sur une zone étendue. La connaissance précise de la relation fonctionnelle entre profondeur d'eau et célérité pourrait donc permettre la détermination efficace et rapide de la bathymétrie par inversion (cf. [3] et [4]).

Pourtant, très peu d'études ont confronté les prédicteurs de célérité à des données issues d'expériences en laboratoire (par exemple [5]), et encore moins à des données in-situ (principalement [6]). Dans ce papier, nous proposons une étude de la célérité des vagues en zone de surf basée sur l'analyse de données in-situ. L'influence

des non-linéarités et du phénomène de dispersion en amplitude sur la dynamique en zone de surf y sera étudiée en détail, et cela en particulier pour de très fortes valeurs de ϵ . Les résultats seront ensuite utilisés pour évaluer différents prédicteurs non-linéaires de célérité.

2 Méthodes

Cette étude est basée sur les données acquises lors de la campagne internationale ECORS 2008 [7]. Elle s'est déroulée en mars-avril 2008 sur le site du Truc Vert, plage sableuse située à environ 10 km au nord de la pointe du Cap Ferret. L'objectif de cette campagne était l'obtention d'un jeu de données hydro-sédimentaires complet dans des conditions de houle très énergétiques, destiné principalement à la qualification des modèles de houle et de morphodynamique.

La plage du Truc Vert présente une bathymétrie fortement tri-dimensionnelle, avec des systèmes chenaux/barres transverses caractéristiques de la côte aquitaine. Les instruments de mesure de la célérité étaient installés en zone intertidale pendant les marées basses, dans des zones où la bathymétrie variait très peu selon la direction parallèle à la côte. Les vagues se propageaient donc sur les capteurs avec une incidence quasi-normale à la côte, ce qui permet de négliger la composante de la célérité parallèle à la côte.

Les capteurs étaient déployés sur différents transects perpendiculaires à la plage composés d'un courantomètre ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) central autour duquel étaient installés deux capteurs de pressions synchronisés sur l'ADV et enregistrant le passage des vagues à haute fréquence (16 Hz).

On détermine alors la composante cross-shore de la célérité en regardant le déphasage temporel δt entre des extraits de signaux de quelques minutes provenant de deux capteurs de la ligne cross-shore (cf. Figure 1). Cette célérité mesurée c_m est donnée par :

$$c_m = \frac{\delta D}{\delta t}, \quad (1)$$

δD étant la distance entre les deux capteurs, proche de 12m. c_m est une estimation de la célérité moyenne sur l'extrait de signal considéré. L'erreur maximale sur l'évaluation de la célérité liée à notre méthode de mesure est d'environ 2%. A partir d'une analyse vague-à-vague (voir [8] pour la méthode), on détermine statistiquement les caractéristiques des vagues, par exemple la moyenne quadratique H_{rms} , la période moyenne T_m , le niveau d'eau moyen \bar{h} , correspondant à chaque calcul de célérité.

Au final, les enregistrements effectués pendant 23 marées hautes soit environ 140 heures seront exploités dans cette étude. Ils correspondent à une large gamme de houles incidentes, avec par exemple une hauteur significative de la houle variant de 1 à 6m, et des hauteurs maximales atteignant les 9m.

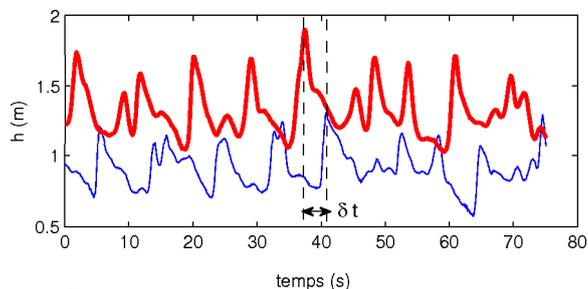


FIG. 1 – Extrait d'un des enregistrements. Evolution temporelle de la hauteur d'eau pour deux capteurs de pression synchronisés. En trait épais, le capteur le plus au large, en trait fin le plus proche du rivage.

3 Analyse des résultats expérimentaux

On considère ici des célérités calculées sur 10 minutes, soit 827 valeurs au total.

La Figure 2 représente les valeurs de célérités mesurées en fonction de la profondeur d'eau moyenne \bar{h} . La courbe pointillée correspond aux valeurs théoriques données par la théorie linéaire en approximation eau peu profonde ($k\bar{h} \ll 1$) : $c_\varphi = (g\bar{h})^{1/2}$. On voit qu'au premier ordre, elle donne une bonne tendance d'évolution de la célérité. Cependant, elle sous-estime clairement les célérités en zone de surf. La prise en compte des effets dispersifs, c'est-à-dire la théorie linéaire complète : $c_\varphi = (\frac{g}{k} \tanh(k\bar{h}))^{1/2}$ où k est le nombre d'onde, n'améliore pas la prédiction car elle conduit à des célérités encore plus faibles.

Les différents prédicteurs de célérité donnent des vitesses relatives au plan d'eau (notées c_r), alors que les mesures de célérité c_m sont les valeurs dans un référentiel absolu. D'après [9], dans le cas d'un courant verticalement variable $U(z)$ tel que $U/c < O(1)$, on a la relation suivante :

$$c_a = c_r + U_{eff}, \quad (2)$$

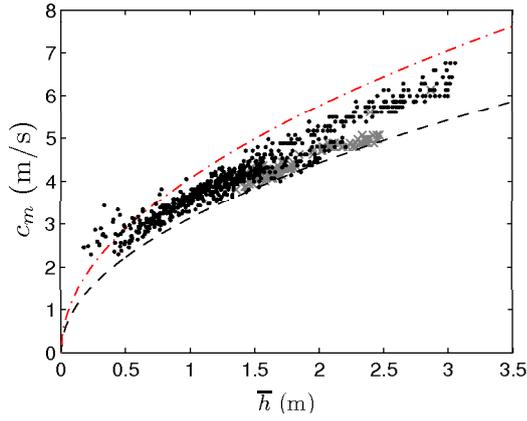


FIG. 2 – c_m en fonction de \bar{h} . Données en zone de surf (\bullet), hors zone de surf (\times gris), $(g\bar{h})^{1/2}$ (—) et $1.3(g\bar{h})^{1/2}$ (- · -).

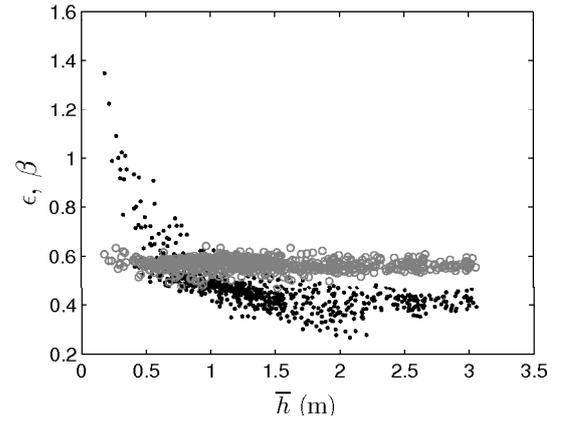


FIG. 3 – Paramètres ϵ (\bullet) et β (\circ) en fonction de \bar{h} .

où U_{eff} devient en eau peu profonde $\frac{1}{h} \int_{-h}^0 U(z) dz$. Les courants cross-shore moyens induits par les vagues, mesurés par l'ADV, ont des caractéristiques comparables pour les enregistrements de 22 marées hautes sur un total de 23. La marée "atypique" sera analysée ultérieurement. Pour les autres marées, les courants sont assez faibles comparés à la célérité des vagues : $|U_{adv}/c_m| < 0.05$. Ils sont de plus dirigés vers le large : ce sont des courants de type courant de retour, dont l'intensité moyenne est très variable selon la profondeur z . Comme on peut le voir par exemple dans [10], leur valeur est généralement maximale vers le bas de la colonne d'eau, c'est-à-dire à proximité du point de mesure des vitesses, les courantomètres étant fixés environ 40 cm au dessus du sable. On estime que le courant U_{eff} représente au maximum 2.5% des célérités mesurées, ce qui est de l'ordre de grandeur des erreurs liées à la méthode de mesure. L'influence du courant cross-shore moyen U sur les célérités sera négligée.

Sur l'ensemble des mesures en zone de surf, la théorie linéaire donne une erreur quadratique moyenne R_{rms} de 14.1%. Le prédicteur de célérité dérivé, $1.3(g\bar{h})^{1/2}$, bien que très utilisé en modélisation pour les vagues déferlées, n'est pas plus performant : $R_{rms} = 15.2\%$. Expérimentalement, on observe que la célérité dépend de l'amplitude de la vague : l'importance de la dispersion en amplitude est étudiée plus précisément par la suite.

Tout d'abord il est important de remarquer que la valeur de ϵ est caractéristique d'une partie de la zone de surf donnée (cf. Figure 3). ϵ varie peu en zone de surf interne, autour de 0.4, ce qui correspond à la majorité des points de mesure, mais augmente très rapidement lorsque la vague se rapproche de la zone de jet de rive, frontière entre partie émergée de la plage et zone de surf interne (h très faible). La Figure 4 représente la célérité mesurée, normalisée par $(g\bar{h})^{1/2}$ en fonction du paramètre non-linéaire ϵ . A faible ϵ , on se rapproche de la prédiction donnée par la théorie linéaire. L'écart à la théorie linéaire augmente de manière significative lorsque la valeur de ϵ augmente. La courbe représentée Figure 4 est l'approximation polynomiale d'ordre 2 du nuage de points. Elle a pour équation $c/(g\bar{h})^{1/2} = 0.46\epsilon^2 + 0.07\epsilon + 1$. Les valeurs en très faible profondeur d'eau étant peu nombreuses à l'issue du premier traitement de données (points), un deuxième traitement, moins précis car certains capteurs sont partiellement émergés, est effectué. Il permet d'obtenir un second jeu de données pour des profondeurs encore plus faibles (représenté par les croix sur la Figure 4). Celui-ci est en accord avec le premier traitement des données, ce qui confirme la forte croissance de $c_m/(g\bar{h})^{1/2}$ observée quand on se rapproche de la zone de swash. L'écart quadratique moyen entre approximation polynomiale et mesures est de 4.1 %, contre par exemple 6.6 % lorsque l'on considère une célérité de la forme $\alpha(gd)^{1/2}$, avec $\alpha = 1.14$ la valeur minimisant R_{rms} .

Une partie des enregistrements avait été laissée de coté précédemment. Ils correspondent à une marée haute (notée 13) où les courants moyens induits par les vagues ont des caractéristiques singulières. Ils sont ici d'amplitude plus forte, U_{adv} représente jusqu'à 15% des célérités des vagues, et sont dirigés vers la côte. Ils représentent cette fois la composante cross-shore d'un courant de dérive. Les courants de dérive sont quasi-uniformes verticalement : on peut considérer que $U_{eff} \approx U_{adv}$. L'effet du courant moyen sur la célérité des vagues n'est plus a priori négligeable, et en effet la Figure 5 montre que sans correction, les points de cet enregistrement sont au-dessus des autres alors que si l'on retranche le courant moyen à c_m , pour obtenir une vitesse relative, on se replace sur la courbe de tendance définie à partir du reste des enregistrements, ce qui confirme encore la validité de l'approximation polynomiale précédente.

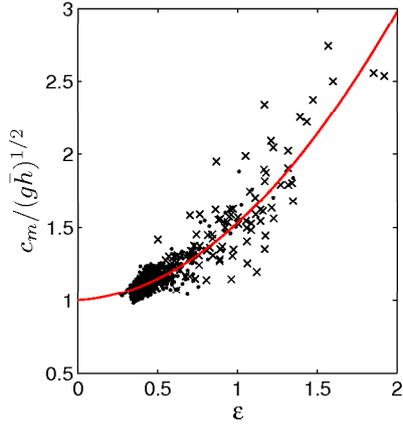


FIG. 4 – $c_m/(g\bar{h})^{1/2}$ en fonction de ϵ . Données en zone de surf (\cdot), traitement spécifique en faibles profondeurs (\times), $y = 0.46\epsilon^2 + 0.07\epsilon + 1$ (– rouge)

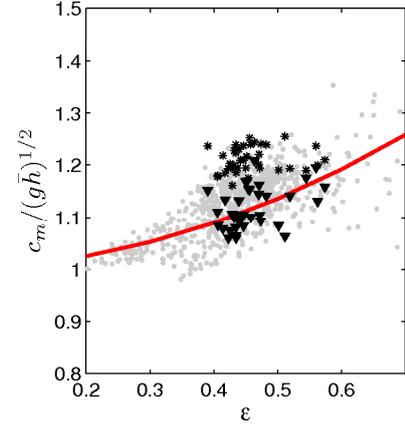


FIG. 5 – Effet du courant moyen. Ensemble des données en zone de surf (\cdot gris), célérités mesurées de l'enregistrement 13 sans ($*$) et avec soustraction de U_{moyen} (triangles noirs).

4 Evaluation des modèles de célérité en zone de surf

Il est donc nécessaire de considérer des modèles non-linéaires pour décrire de façon pertinente la célérité en zone de surf. Une description complète des différents prédicteurs de célérité est présentée dans Catálan et Haller [5]. Les trois modèles non-linéaires de célérité les plus représentatifs sont évalués ici.

L'onde solitaire, solution de forme constante des équations de Boussinesq, est l'un des premiers modèles permettant de décrire les phénomènes non-linéaires. La célérité de l'onde solitaire est donnée par l'expression :

$$c = \sqrt{g\bar{h}(1 + \epsilon)}. \quad (3)$$

Bien qu'il ne soit pas conçu pour modéliser les vagues déferlées, ce modèle est souvent utilisé pour décrire les comportements non-linéaires en eau peu profonde, et donne une assez bonne prédiction des célérités, avec cependant une tendance à la surestimation [6].

Le modèle classique de bore, développé entre autres par Svendsen [1], repose sur l'analogie entre vague déferlée et ressaut hydraulique propagatif (ou "bore"). La conservation de la masse et de la quantité de mouvement au niveau du ressaut donne l'expression de la célérité du front suivante :

$$c_b = \left(\frac{gh_1 h_2 (h_1 + h_2)}{2\bar{h}^2} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

où h_1 et h_2 sont les profondeurs d'eau à l'aval et à l'amont du front. Cette expression de c_b est une des plus utilisées dans les modèles à phase moyennée.

Enfin, Bonneton [11] a proposé une généralisation du modèle de bore basée sur la théorie des chocs. En particulier, ce modèle, appelé modèle des chocs par la suite, n'impose pas une vague de forme constante. Les fronts d'onde observés en zone de surf sont assimilés à des chocs et la célérité du front peut s'exprimer sous la forme :

$$c_b = -2(g\bar{h})^{1/2} + 2(gh_1)^{1/2} + \left(\frac{gh_2}{2h_1} (h_1 + h_2) \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Dans les deux derniers modèles, l'asymétrie de la vague est prise en compte par l'introduction des grandeurs h_1 et h_2 . On définit alors le nombre sans dimension $\beta = \zeta_c/H$, avec ζ_c l'élévation de la crête par rapport au niveau moyen, représentatif de l'asymétrie des vagues en zone littorale. On peut réécrire les modèles de bore et des chocs sous la forme :

$$\frac{c_{th}}{(g\bar{h})^{1/2}} = f(\epsilon, \beta),$$

où f est uniquement fonction de ϵ et β et dépend du modèle considéré. On cherche à comparer le comportement global des différents modèles en fonction des non-linéarités. Comme β varie peu quand il est moyenné sur 10 minutes (cf. Figure 3), on le prend égal à sa valeur moyenne sur l'ensemble des enregistrements et on analyse l'évolution de $\frac{c_{th}}{(g\bar{h})^{1/2}}$ en fonction de ϵ pour les 3 modèles (courbes de la Figure 6). En zone de surf interne,

le comportement des modèles de chocs et de bore sont proches : ils ont tous deux tendance à sous-estimer légèrement les célérités, contrairement au modèle de l'onde solitaire qui les surestime. Mais c'est proche de la zone de swash que les comportements diffèrent le plus. Seul le modèle de bore prévoit une décroissance du rapport quand ϵ augmente, ce qui le discrimine clairement par rapport aux données. Cette confrontation aux données ne dégage pas clairement lequel des 2 autres modèles est le meilleur prédicteur, même si la croissance observée semblent se rapprocher un peu plus de celle prédite par le modèle des chocs.

Pour les valeurs moyennées sur 10 minutes, les erreurs de prédiction sur l'ensemble des données sont $R_{rms} = 6.8\%$ pour le modèle des chocs, 7.7% pour l'onde solitaire et 10% pour le modèle de bore. Les résultats donnés par le modèle des chocs et de l'onde solitaire sont proches. Mais en moyennant sur 10 minutes, on a tendance à lisser fortement les variations temporelles des paramètres caractéristiques des vagues, en particulier β , et donc minimiser les fluctuations des paramètres qui pourraient différencier le comportement des deux modèles. Si on effectue alors les calculs de célérités sur 3 minutes, on obtient les écarts suivants, maintenant calculés sur 2600 valeurs : $R_{rms} = 6.4\%$ pour le modèle des chocs, contre 8.4% pour l'onde solitaire. Le modèle des chocs est donc le plus adapté si l'on s'intéresse aux fluctuations temporelles à plus haute fréquence de la célérité, suivi de près par celui de l'onde solitaire.

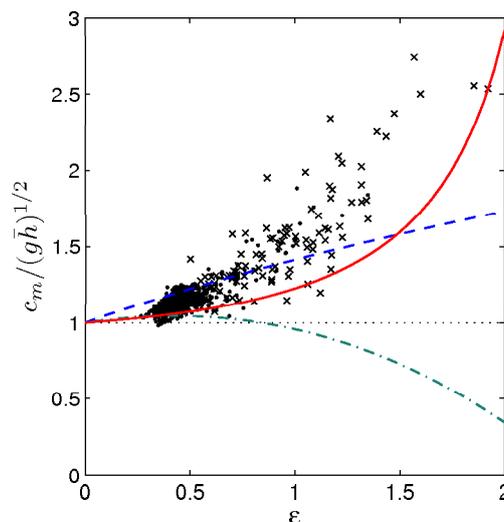


FIG. 6 – Comparaison des données (\cdot et \times , cf. Figure 4) avec les différents prédicteurs de célérité. Modèle linéaire (...), modèles des chocs (—), de l'onde solitaire (---) et de bore (-.-).

5 Impact sur la célérité des variations très basses fréquences de la circulation

Le déferlement des vagues sur des topographies complexes telles que le système de barres transverses du site du Truc Vert amène la création de cellules de circulation instables. Les courants induits par les vagues pulsent à très basse fréquence (VLF). On observe par exemple dans nos courants moyennés sur 3 minutes des oscillations de 10-15 minutes de période et allant jusqu'à 40cm/s d'amplitude. La Figure 7 compare le courant cross-shore moyenné avec les célérités calculés sur des intervalles de 3 minutes, décalés à chaque fois de 1 minute pour un des enregistrements. Les deux signaux oscillent à des fréquences et amplitudes très proches. Nous n'expliquons pas le fait que ces oscillations ne soient pas toujours en phase, mais il est clair que les oscillations du courant cross-shore se retrouvent dans la célérité des vagues.

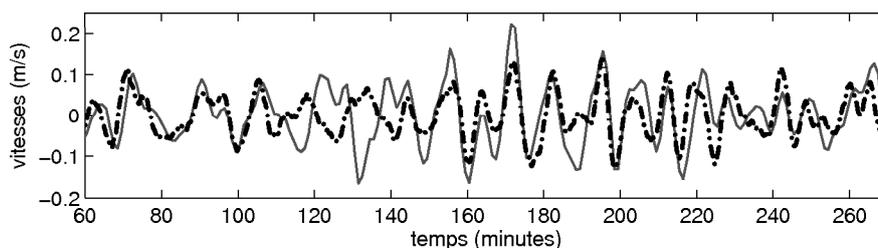


FIG. 7 – Influence des fluctuations VLFs du courant sur la célérité. Oscillations autour de la valeur moyenne de la célérité mesurée des vagues en pointillé, du courant cross-shore moyenné en continu.

Les VLFs sont extrêmement difficiles à observer in-situ, en particulier parce que la zone de surf est une zone

très difficile à instrumenter, et cela encore plus dans des conditions de houles énergétiques. Leur compréhension est pourtant encore un thème d'étude très actuel (récemment [12], [13], [14] et [15]). L'observation de la célérité des vagues est une méthode indirecte pour caractériser les instationnarités très basses fréquences des courants. Or, la célérité des vagues peut être évaluée à grande échelle temporelle et spatiale par traitement vidéo (cf. [3]) : la vidéo pourrait alors devenir un nouvel outil très efficace pour l'étude des VLFs.

6 Conclusion

Dans cette étude, l'influence des non-linéarités sur la célérité des vagues a été quantifiée, avec l'obtention d'une loi empirique dépendant de ϵ seulement. En particulier, le comportement asymptotique pour fort ϵ a été analysé, et comparé aux prédictions de plusieurs modèles de célérité non-linéaires. Le modèle classique de bore, qui est le plus utilisé en modélisation, apparaît totalement inadapté à la description de la dynamique lorsqu'on s'approche de la zone de swash.

L'observation d'oscillations très basse fréquence dans la célérité des fronts, corrélées aux oscillations du courant, ouvre de nouvelles perspectives quant à l'étude et la compréhension des VLFs. La prochaine étape est maintenant de valider cette technique d'observation par traitement des données vidéo acquises durant la campagne.

Enfin, cet article permet de mettre en valeur un jeu de données unique, comprenant des enregistrements pour des faibles profondeurs et des fortes non-linéarités. De plus, les données ont été acquises pour une très large gamme de conditions de houle, que ce soit au niveau de l'amplitude, de l'incidence ou de la période. En les complétant par des données provenant de plages de morphologies différentes on pourrait alors constituer un ensemble de données de référence pour la paramétrisation de c_b dans les modèles de vagues.

Références

- [1] Svendsen I., Madsen P., and Hansen J. Wave characteristics in the surf zone. Proc. 16th Coastal Engineering Conf., pages 520–539, 1978.
- [2] Shaffer H., Madsen P., and Deigaard R. A boussinesq model for waves breaking in shallow water. Coastal Engineering, 20(3-4), 185–202, 1993.
- [3] Almar R., Bonneton P., Sénéchal N., and Roelvink D. Wave celerity from video imaging : A new method. Proceedings, 31th International Conference on Coastal Engineering, 2008.
- [4] Holland K. Application of the linear dispersion relation with respect to depth inversion and remotely sensed imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(9), 2001.
- [5] Catalán P. and Haller M. Remote sensing of breaking wave phase speeds with application to non-linear depth inversions. Coastal Engineering, 55, 93–111, 2008.
- [6] Thornton E. B. and Guza R. Energy saturation and phase speeds measured on a natural beach. Journal of Geophysical Research, 87(C12), 9499–9508, 1982.
- [7] Sénéchal N. and coll. Ecors-truc vert 2008 : Qualification des modèles de houle et de morphodynamique. Xème Journées Nationales Génie Côtier - Génie civil, 2008.
- [8] Hamm L. Modélisation numérique bidimensionnelle de la propagation de la houle dans la zone de déferlement. PhD thesis, Université de Grenoble 1, 1995.
- [9] Kirby J. and Chen T. Surface waves on vertically sheared flows : approximate dispersion relations. Journal of Geophysical Research, 94(C1), 1013–1027, 1989.
- [10] Cox D. T. and Kobayashi N. Application of an undertow model to irregular waves on plane and barred beaches. Journal of Coastal Research, 14(4), 1314–1324, 1998.
- [11] Bonneton P. Wave celerity in the inner surf zone. Proceedings, 29th International Conference on Coastal Engr. ASCE, pp. 392-401, 2004.
- [12] MacMahan J., Thornton E., and Reniers A. Rip current review. Coastal engineering, 53(2-3), 191–208, 2006.
- [13] Bonneton N., Sénéchal N., and Castelle B. Very low frequency rip current pulsations during high-energy wave conditions on a meso-macro tidal beach. pages 1087–1096, 2006.
- [14] Castelle B., Bonneton P., Sénéchal N., Dupuis H., Butel R., and Michel D. Dynamics of wave-induced currents over a multi-barred beach on the aquitanian coast. Continental Shelf Research, 26, 113–131, 2006.
- [15] Bruneau N., Castelle B., Bonneton P., and Pedreros R. Very low frequency motions of a rip current system : observations and modelling. Accepted to Journal of Coastal Research, SI 56, 2009.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme ECORS (DGA-SHOM), ainsi que des projets MODLIT (RELIEFS/ECORS) et IDAO (LEFE/INSU). La thèse de Marion Tissier est financée dans le cadre de l'ANR MISEEVA. Nous remercions les différents participants de la campagne qui nous ont aidés à la mise en oeuvre des expériences, en particulier Jean-Paul Parisot et Sylvain Capo pour le positionnement GPS des instruments.