

Étude des rides sédimentaires générées par les vagues sur le plateau continental

V. Marieu¹, P. Bonneton², F. Ardhuin³ et D. Foster⁴

¹Doctorant, ²Chargé de recherche au CNRS, Université Bordeaux 1, Département de Géologie et Océanographie, UMR CNRS 5805 « Environnement et Paléoenvironnements Océaniques », avenue des facultés, 33405 Talence, v.mariou@epoc.u-bordeaux1.fr

³Chercheur/chef de projet, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Centre Militaire d'Océanographie, 29275 Brest

⁴Assistant Professor, Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, 2070 Neil Avenue, Columbus OH 43210

Résumé

Nous travaillons sur le code de calcul Dune2D développé à l'université technique du Danemark afin de mieux comprendre les mécanismes en présence lors de l'évolution des rides. Ceci permettra de compléter le travail effectué sur une base de données créée à partir des observations in situ de différents auteurs. Cet article expose les différentes méthodes numériques que nous avons employées pour résoudre dans Dune2D l'équation régissant l'évolution de la morphologie des rides sédimentaires, en particulier les rides de vortex.

Abstract

Dune2D is a computer code which has been developed at the technical university of Denmark. We use this code to better understand the mechanisms triggering sand ripples evolution. This will enrich the work carried out on a data base which compiles in situ measurements of various authors. In this article, we discuss about the numerical methods employed to solve the equation that governs the evolution of sand ripple morphology in Dune2D, in particular vortex ripples.

Mots Clés

Rides, vagues, transport sédimentaire, modélisation, morphodynamique.

1. Introduction

Le transport sédimentaire en zone côtière s'effectue par la mise en suspension de sédiment mais en grande partie également, par la migration des rides sédimentaires. Sur le plateau continental, ces rides, pouvant atteindre plusieurs mètres de longueur, sont créées et modifiées par les vagues et les courants. Elles

ont une très forte influence sur la morphologie des zones côtières, ont un rôle dans les problèmes d'enfouissement d'objets et sont responsables d'une grande part de la perte d'énergie des vagues sur le plateau continental. Les premières études des rides en milieu naturel étaient de type descriptif car la mise en œuvre de mesures in situ était très difficile : vagues irrégulières, courants, tailles de grain, profil du fond... En conséquence les chercheurs se sont surtout concentrés sur des expériences de laboratoire permettant d'étudier séparément l'influence de ces différents paramètres. La faible largeur des canaux à houle et le caractère unidimensionnel du forçage limitent l'éventail des phénomènes observables en laboratoire et conduisent à des lois souvent peu représentatives des phénomènes observés en milieu naturel mais ces dernières années, les techniques se sont développées et les mesures in situ se sont multipliées. Ainsi nous avons pu rassembler les différentes mesures réalisées in situ au sein d'une base de données afin de synthétiser le comportement des rides en fonction du forçage hydrodynamique sur le plateau continental.

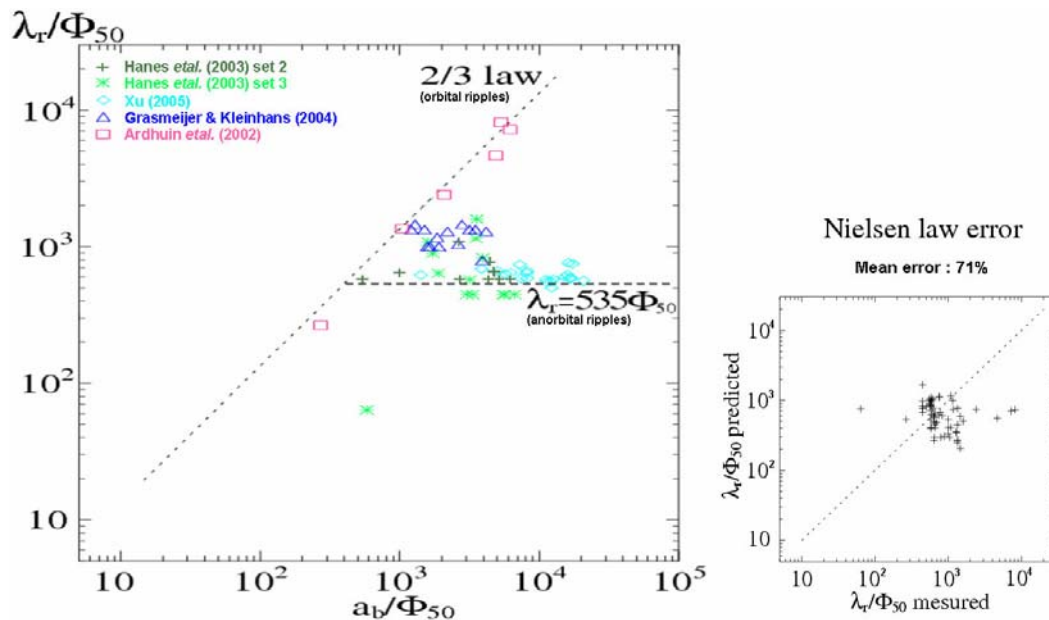


Figure 1 : A gauche : Longueur d'onde des rides en fonction du diamètre orbital des vagues près du fond (adimensionnés par le diamètre médian du sédiment), compilation de données in situ et comportement orbital (Loi en 2/3) et anorbital ($\lambda = 535\phi$). A droite : Efficacité des lois de Nielsen⁷ pour les mêmes mesures.

Nous nous intéressons aux rides de vortex rencontrées sur le plateau continental. Celles-ci ont été décrites comme pouvant être de trois types : orbital, suborbital ou anorbital suivant la classification introduite par Clifton³, chaque type obéissant à différentes lois de comportement. La figure 1, à gauche, montre un échantillon de mesures réalisées in situ superposées au comportement des rides orbitales (loi en 2/3) ou anorbitales ($\lambda = 535\phi$); la longueur d'onde des rides étant représentée en fonction du diamètre orbital des vagues près du fond. La partie droite de la figure 1 montre les performances des lois de Nielsen⁷ pour ces mêmes mesures; les longueurs d'onde prédites sont représentées en fonction de celles mesurées. Le

rassemblement de toutes ces données dans une même base nous a permis de remarquer les limitations des formules existantes qui ne permettent pas de décrire correctement le comportement des rides observées in situ. Si la taille des rides dans le domaine orbital est bien prédite, ce n'est pas le cas lorsque les conditions hydrodynamiques sont plus fortes et on peut observer, pour le même forçage, des rides anorbitales comme celles de Hanes *et al.*⁴ ou orbitales de grande taille comme celles d'Ardhuin *et al.*². Ces rides orbitales de grande taille n'ont pas été décrites en majorité dans la littérature cependant, elles ont été observées à des profondeurs de plusieurs dizaines de mètre et la plupart des campagnes expérimentales n'ont pas été faites à de telles profondeur pour des raisons techniques. Les expériences de Traykovski *et al.*⁹ montrent également ces rides et les plongeurs en loisir, bien que ne les ayant pas mesurées, confirment l'existence de ces grandes rides (longueur d'onde de l'ordre du mètre) à des profondeurs de 20 à 50 mètres sur le plateau continental aquitain. Les lois existantes ne permettent pas de décrire ces grandes rides orbitales car elles prédisent un comportement anorbital dans ces conditions. Or il est primordial de mieux les connaître, l'objectif final de notre étude étant d'estimer la perte d'énergie des vagues sur le plateau continental par frottement sur le fond.

2. Ecoulement et flux autour d'une ride

Afin de mieux comprendre les mécanismes de construction et évolution des rides de vortex, nous avons récemment travaillé sur le code Dune2D de l'université du Danemark, en collaboration avec le laboratoire d'ingénierie environnementale de l'université d'Ohio. Il s'agit d'un code bidimensionnel résolvant les équations de Navier - Stokes dans la colonne d'eau, la turbulence étant calculée par un modèle $\kappa-\omega$, couplé à un module de transport sédimentaire et à un module de calcul morphologique sur la frontière Sud du domaine. Ce code a été développé par Tjerry⁸ pour simuler l'évolution des rides de courant dans les rivières, mais il a été adapté à la simulation des rides soumises à des écoulements périodiques.

Le flux total de sédiment au dessus de la ride est calculé dans Dune2D comme étant la somme du flux en suspension dans la colonne d'eau et du flux charrié au fond. Le premier est calculé à partir de l'équation de transport de la concentration en sédiment et le second à partir de la formule de Meyer-Peter&Muller ou d'Engelund&Fredsoe basée sur la tension de cisaillement au fond. La figure 2 montre l'écoulement au dessus de la ride calculé par Dune2D ainsi que la concentration en sédiment en chaque point de la colonne d'eau. Les conditions aux limites sont périodiques aux bords Est et Ouest du domaine.

La figure 3 présente le résultat du calcul des flux sur une ride de vortex par Dune2D à différents instants d'une période de vague. Le flux négatif à droite de la crête est dû à la zone de re-circulation caractéristique des rides de vortex. Le saut de flux est très important au niveau de la crête de la ride, cela est dû au décollement des lignes de courant (cf. Walker&Nickling¹⁰).

L'écoulement autour des rides et le transport sédimentaire, par charriage et suspension ont fait l'objet de nombreuses études et sont bien maîtrisés dans Dune2D. En revanche, l'évolution de la morphologie du fond lorsqu'il est soumis à un forçage périodique est un phénomène qui n'avait pas été simulé avant la thèse de Andersen¹ réalisée avec Dune2D, et qui demande qu'on s'intéresse aux schémas numériques permettant de le résoudre. C'est le saut de flux au niveau de la crête qui présente la plus grosse difficulté numérique pour le calcul de l'évolution du fond. Nous allons présenter les tests de différents schémas numériques du module morphologique de Dune2D pour calculer l'évolution d'une ride de vortex soumise à un écoulement périodique.

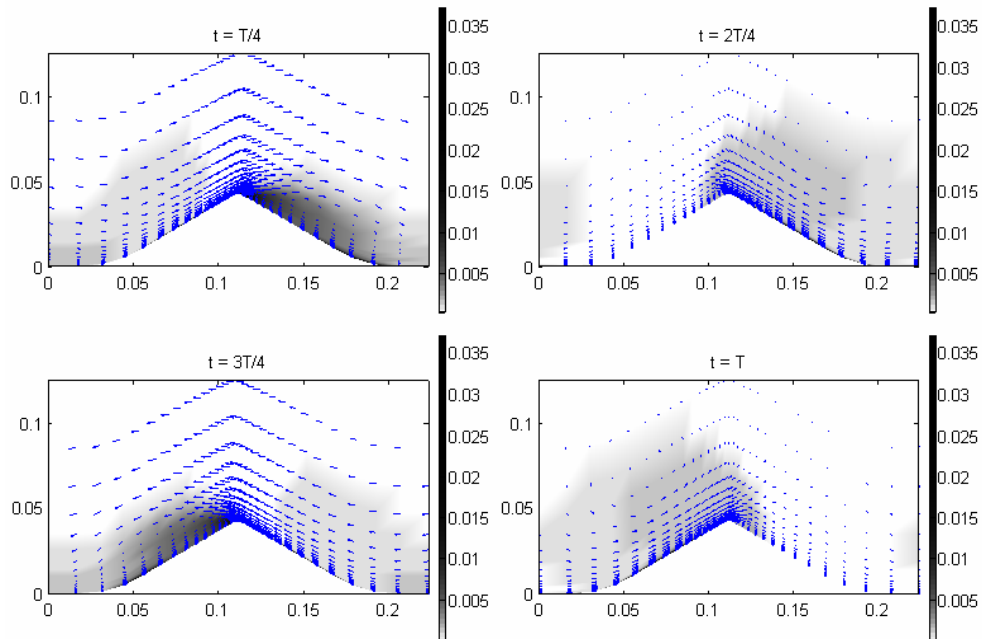


Figure 2 : Écoulement autour de la ride et concentration en sédiment

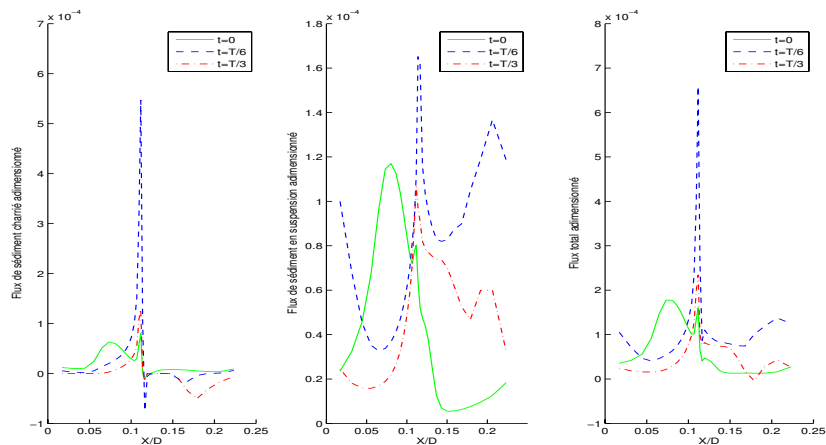


Figure 3 : Flux charrié, en suspension et total au dessus de la ride, à $t = 0, T/6$ et $T/3$, où T est une période de vague.

3. Modélisation de l'évolution du fond

3.1. Schéma QUICK de Leonard⁵

La hauteur du fond dans Dune2D est calculée par l'équation de transport :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \frac{\partial q_t}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

avec h , la hauteur du fond, p , la porosité du fond et q_t le flux total de sédiment. Andersen¹ a fait une étude de l'évolution des rides créées par un écoulement périodique avec Dune2D mais le module morphologique en place dans le code, basé sur le schéma QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) de Leonard⁵ induit de grosses oscillations dues au saut de flux à la crête de la ride et dont l'amplitude est trop importante pour qu'elles soient négligées ou directement lissées. Pour remédier à ce problème, un lissage simple sur trois mailles du flux total de sédiment est effectué plusieurs fois avant le calcul morphologique ($q_t(x_i) = 0.25 (q_t(x_{i-1}) + 2q_t(x_i) + q_t(x_{i+1}))$), ce qui réduit l'effet du décollement au sommet de la ride.

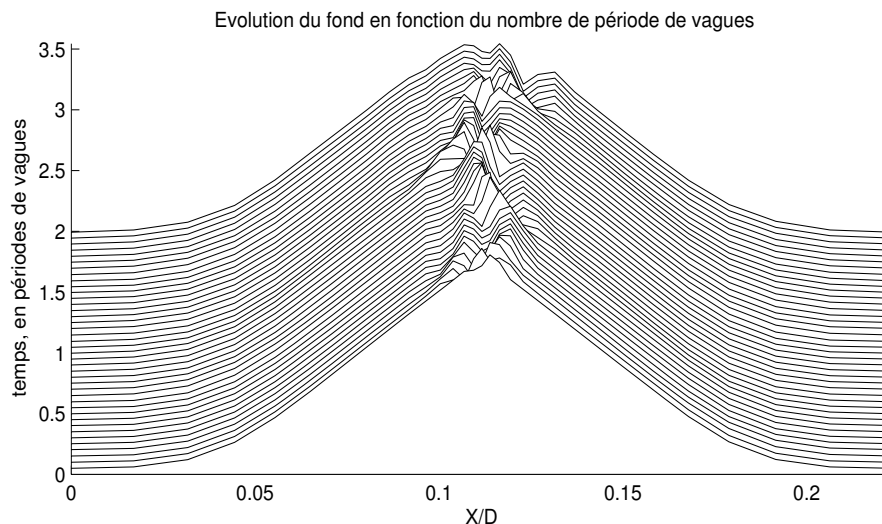


Figure 4 : Evolution d'une ride de vortex calculée par le schéma QUICK de Leonard⁵, sans lissage des flux.

La figure 4 présente le résultat du calcul de l'évolution d'une ride de vortex proche de sa taille orbitale lorsque le flux n'est pas lissé. On remarque que les oscillations induites par le schéma QUICK ont une amplitude trop importante pour ne pas avoir d'influence sur l'évolution de la ride et on comprend pourquoi un lissage est nécessaire. Cependant le même calcul est montré figure 5, lorsque les flux sont lissés 4 fois ou 10 fois avant le calcul morphologique. On remarque que l'évolution de la ride est très dépendante du lissage des flux, le résultat n'étant pas le même après 10 périodes de vagues, suivant le nombre de fois que le flux est lissé avant le calcul de h . De plus, le lissage des flux empêche la simulation de la création de rides à partir d'un fond plat. En effet, il est nécessaire de créer une micro perturbation artificielle du fond pour obtenir un saut de flux, cette

perturbation évoluant vers une ride en équilibre avec l'écoulement. Or le petit saut de flux est lissé par le module morphodynamique et le fond ne peut pas évoluer. Ce sont les raisons pour lesquelles il a été nécessaire de se tourner vers d'autres schémas numériques.

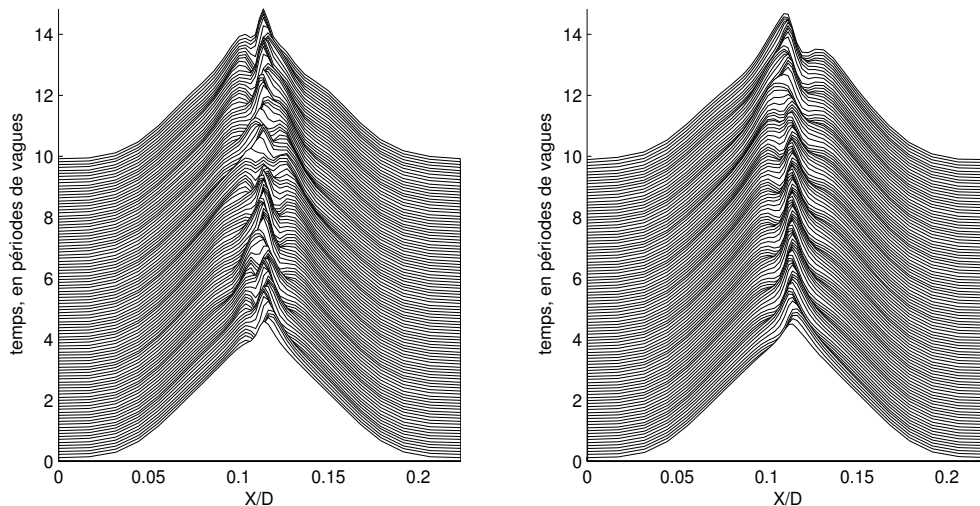


Figure 5 : Evolution d'une ride de vortex calculée par le schéma QUICK, flux total lissé 4 fois (à gauche) ou 10 fois (à droite).

3.2. Schéma de Nessyahu&Tadmor⁶

(1) peut être écrite sous la forme d'une équation de choc hyperbolique :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + c \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

où $c = \frac{1}{1-p} \frac{\partial q_t}{\partial h}$ est la vitesse caractéristique de propagation de la ride. Il existe

un grand nombre de schémas numériques permettant de résoudre l'équation (2), ils sont très souvent utilisés en mécanique des fluides compressibles. Cependant, ici q_t n'est pas une fonction explicite de h donc le calcul de cette vitesse n'est pas possible directement. Il faut alors utiliser un schéma qui ne le nécessite pas. Le schéma de Nessyahu&Tadmor⁶ et ses dérivés sont intéressants car il s'agit de la seule famille de schémas centraux non oscillant qui permettent la résolution de l'équation sans connaître la vitesse de propagation de l'onde.

La figure 6 montre le résultat de l'évolution de la même ride que sur les figures 4 et 5 mais le calcul morphologique est effectué avec le schéma de Nessyahu&Tadmor⁶ sur maillage non-décalé. On remarque que le schéma gère bien le choc, cependant, la diffusion numérique caractéristique de ce schéma conduit à la diminution de l'amplitude de la ride. La diffusion numérique entraîne une diminution du saut de flux sur la crête, celle-ci étant lissée par la diffusion, et cette diminution du gradient de flux conduit à la suppression du phénomène entretenant la ride.

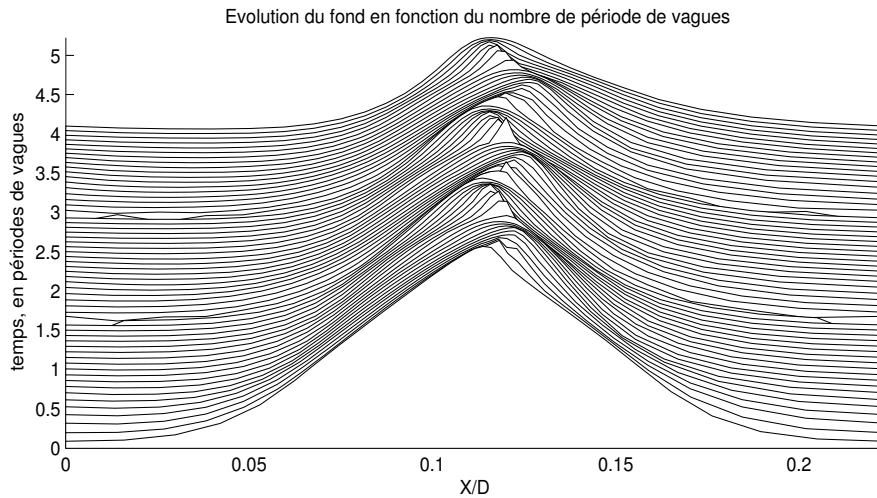


Figure 6 : Evolution d'une ride de vortex calculée par le schéma de Nessyahu&Tadmor⁶ sur 3 périodes de vague.

Sur le figure 7, en plus du forçage périodique, la ride est également soumise à un courant moyen dirigé vers la droite, du même ordre de grandeur. La propagation de la ride dans le sens du courant est visible.

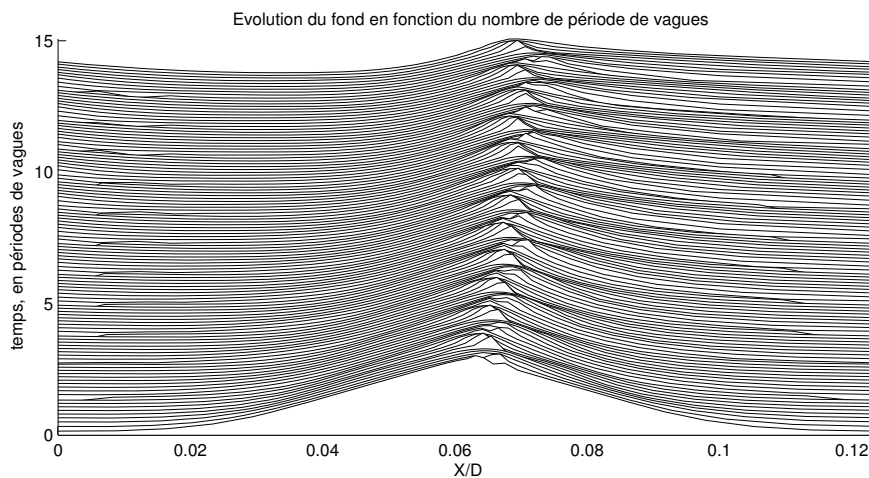


Figure 7 : Evolution d'une ride de vortex soumise à un courant périodique et à un courant moyen de même ordre de grandeur (0.5 m/s), calculée par le schéma de Nessyahu&Tadmor⁶ sur 12 périodes de vague.

La famille de schémas de Nessyahu&Tadmor⁶ est bien adaptée à la simulation de l'évolution des rides de vortex, bien que le schéma de base sur maillage non décalé soit trop diffusif. L'étude des schémas sur maillage décalé et l'ajustement des limiteurs de pente sont les principales pistes de travail que nous envisageons pour réduire cette diffusion.

4. Conclusion

La simulation numérique de l'évolution des rides de vortex est un bon complément aux mesures expérimentales et à l'observation in situ du phénomène. Elle est nécessaire pour compléter les lois régissant les rides de vortex et pour expliquer les mécanismes de création - évolution des rides. Si l'écoulement autour des rides et les flux de sédiment sont calculés correctement dans Dune2D, ce n'est pas le cas de l'évolution du fond et la difficulté principale du calcul morphologique vient de la raideur des flux au voisinage de la crête des rides. On a montré que le schéma QUICK en place dans Dune2D n'est pas adapté à ce type de calcul ; en revanche la famille des schémas centrés non oscillants basés sur le travail de Nessyahu&Tadmor⁶ semble permettre de décrire correctement le phénomène, même s'il paraît nécessaire de trouver un dérivé du schéma engendrant moins de diffusion numérique.

Bibliographie

- 1** Andersen K.H., (1999), The dynamics of ripples beneath surface waves and topics in shell models of turbulence. *Ph.D. Dissertation, Tech. Univ. of Denmark.*
- 2** Arduin F., Drake T.G. et Herbers T.H.C., (2002), Observations of wave-generated vortex ripples on the North Carolina continental shelf. *J. Geoph. Res.*, **107**, (C10), 7-1.
- 3** Clifton H.E., (1976), Wave-formed sedimentary structures: A conceptual model in beach and nearshore sedimentation. *SEPM Spec. Publ*, **24**, 126-148.
- 4** Hanes D.M., Alymov V. et Chang Y.S., (2001), Wave-formed sand ripples at Duck, North Carolina. *J. Geoph. Res.*, **106** (C10), 22575-22592.
- 5** Leonard B.P., (1979), A stable and accurate convection modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Comp. Meth. in Applied Mech. and Eng.*, **19**, 59-98.
- 6** Nessyahu H. et Tadmor E., (1990), Non-oscillatory central differencing for hyperbolic conservation laws. *J. Comp. Phys.*, **87**, 408-463.
- 7** Nielsen P., (1992), Coastal bottom boundary layers and sediments transport. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, **vol. 4**, 340 p.
- 8** Tjerry S., (1995), Morphological calculation of dunes in alluvial rivers. *Ph.D. Dissertation, Tech. Univ. of Denmark.*
- 9** Traykovski P, Hay A. E., Irish J.D. et Lynch J.F., (1999), Geometry, migration, and evolution of wave orbital ripples at LEO-15. *J. Geoph. Res.*, **104** (C1), 1505-1524.
- 10** Walker I.J. et Nickling W.G., (2003), Simulation and measurement of surface shear stress over isolated and closely spaced transverse dunes in a wind tunnel. *Earth Surf. Process. Landforms*, **28**, 1111-1124.