



INTERACTION DYNAMIQUE ONDES DE GRAVITÉ - FOND CONSTITUÉ DE SÉDIMENTS EN PRÉSENCE D'OBSTACLES RECTANGULAIRES

V. REY ⁽¹⁾, N. CESSÉLIN ⁽²⁾ et M. BELZONS ⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre (L.S.E.E.T)
URA 705 du CNRS, Université de Toulon et du Var, BP 132, 83957 LA GARDE Cedex

⁽²⁾Département de Physique des Systèmes Désordonnés, SETT,
URA 1168 du CNRS, Université de Provence, case 161, 13397 MARSEILLE Cedex 20

Abstract

Dynamic interactions between surface gravity waves and erodible beds in the presence of rectangular obstacles

Changes of the near-shore bottom topography, or dynamic evolution of sandy beds towards almost sinusoidal topographies under partially standing waves action, provide natural shore protections against incident gravity waves energy. Taking advantage of such capabilities of partially reflecting incident waves, artificial bottoms and submerged or surface obstacles have been suggested for harbor or coastal protection.

For sandy environments, the bottom topography evolution may lead toward scouring or silting up near the artificial obstacles. In consequence, the wave reflecting power can be modified and not yet corresponds to the initial objectives.

We have studied normally incident monochromatic waves scattering by rectangular obstacles over erodible beds. Free surface deformations and bottom topography evolutions under the partially standing wave action are measured with very accurate ultrasonic sensors. Assuming a slow change of the bottom topography compared with the wave period i.e. fixed bed at a given time, irrotational motion and small wave amplitudes, the flow characteristics (velocities, free surface deformation, pressure fields, reflection coefficients...) are calculated using linear potential theory.

Experimental results show a strong mobility of the sand particles near the solid obstacles which are at the origin of scouring, correlated with the wave phase. Elsewhere, the partially standing wave upstream the obstacles is enhanced by the bottom evolution toward a quasi-sinusoidal shape of wavelength half the surface wave wavelength (Bragg reflection phenomenon). Results are in good agreement with theoretical predictions, in particular near the threshold conditions.

I. INTRODUCTION

Des variations de la topographie des fonds rocheux au voisinage du littoral ou l'évolution dynamique de fonds sablonneux vers des profils quasi-sinusoidaux sous l'action de houles partiellement stationnaires constituent une protection naturelle de la côte contre les effets de la houle incidente, d'une part dissipée par atténuation visqueuse, d'autre part partiellement réfléchi. Cette réflexion partielle des ondes de gravité par des obstacles est particulièrement intéressante en génie côtier pour la protection d'ouvrages et a conduit à de nombreuses études sur des obstacles de diverses tailles et formes.

Pour des ouvrages en littoraux sableux, l'évolution de la topographie du fond peut conduire à des ensablements ou affouillements au voisinage des obstacles. Ils se traduisent par une évolution de la réflexion de la houle qui peut ne plus répondre aux objectifs initiaux et une fragilisation de l'ancrage des obstacles.

Nous avons effectué des études en laboratoire de houle monochromatique d'incidence normale au dessus d'un fond sableux en présence d'obstacles rectangulaires totalement ou partiellement immergés. La déformation de la surface libre et l'évolution de la topographie du fond sont mesurées par des méthodes ultrasoniques. L'écoulement du fluide (vitesses, déformation de la surface libre, champs de pression, coefficient de réflexion) est calculé à partir de la théorie potentielle linéarisée. Le but de notre travail était l'étude de l'interaction dynamique entre l'onde de surface et le fond constitué de sédiment qui se traduit par une évolution couplée de l'onde de gravité et de la topographie du fond.

Nous présentons les caractéristiques de la théorie potentielle linéarisée, applicable dans le cas général d'ondes d'incidence oblique, puis décrivons brièvement le dispositif expérimental. Nous présentons ensuite les différentes étapes de notre étude expérimentale : étude des seuils de mise en mouvement de particules, formation de rides et de barres en l'absence ou en présence d'obstacles rectangulaires et enfin estimation quantitative de l'affouillement au voisinage d'obstacles solides rectangulaires en fonction de la phase de l'onde et de la vorticité locale.

II. LE MODÈLE POTENTIEL

Nous avons étudié numériquement la réflexion d'ondes de gravité d'incidence oblique par des obstacles cylindriques à partir de la théorie potentielle linéarisée [Rey, 1992 ; Rey, 1993]. Cette méthode s'avère particulièrement intéressante pour l'étude hydrodynamique d'une part du fait de son large champ d'applications, des obstacles rectangulaires simples (marche rectangulaire, plaque immergée) jusqu'aux fonds variables de grandes dimensions, d'autre part car elle permet d'avoir accès aux caractéristiques de l'écoulement dans tout le fluide (vitesses, déformation de la surface libre, champs de pression, etc...).

Théoriquement, cette méthode suppose un écoulement irrotationnel et des ondes monochromatiques et de faible amplitude. Son application à l'étude des efforts sur les obstacles sous l'action de la houle se limite aux effets de gradients de pression, et ne considère ni la turbulence ni les effets d'atténuation visqueuse. En outre, elle suppose

un fond solide et imperméable, ce qui n'est plus le cas pour un fond sableux. Cependant, l'évolution lente de la topographie du fond comparée à la période de l'onde permet de supposer le fond figé à un instant donné et imperméable en raison de la très faible vitesse verticale du fluide à l'interface eau-sédiment.

De façon générale, l'expérience montre que le modèle potentiel apporte de bonnes informations sur la nature de l'écoulement dans son ensemble (voir par exemple Belzons *et al.*, 1991 ; Mattioli, 1991 ; Sturova, 1991a et b ; Guazzelli *et al.*, 1992 ; Rey *et al.*, 1992), et la prise en considération d'effets dissipatifs plus locaux peut se faire en première approximation à partir de corrections apportées à cette théorie (Molin et Betous, 1993).

III. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

III.1 Le canal à houle

Les caractéristiques détaillées du canal à houle et de son instrumentation sont présentées en détail dans Rey [1991]. Le canal à houle est de petites dimensions (longueur 4,70 m, largeur 39 cm et hauteur 15 cm). Un batteur, de mouvement parfaitement sinusoïdal, permet de générer des vagues de fréquence comprise entre 0,6 à 5,5 Hertz, d'amplitude variable et de l'ordre du centième de la longueur d'onde. Une plage inclinée de 70 cm de longueur (correspondant à la longueur d'onde des ondes de plus basses fréquences), constituée de fibres enchevêtrées, avait pour but l'amortissement de l'onde incidente dans les études de réflexion de la houle par des obstacles au-dessus de fonds solides [Belzons *et al.*, 1991 ; Rey *et al.*, 1992 ; Guazzelli *et al.*, 1992]. Elle permet de fixer un taux d'onde stationnaire le long de la cuve pour les études de fond sableux. Un chariot de mesure sur lequel sont fixés les systèmes de mesures est mobile le long de la cuve.

III.2 Méthode acoustique de mesure de la topographie du fond

L'appareil de mesure est un écho-sondeur à ultrasons (WS25-5-P1, Ultrason). Une même lame de quartz piézoélectrique immergée (diamètre 6 mm, donc faible perturbation) sert d'émetteur et de récepteur. Il permet de mesurer l'évolution spatiale et temporelle de la topographie du fond.

La fréquence de vibration du détecteur est de 5 MHz, ce qui permet une résolution "théorique" supérieure au micron, la résolution "pratique" est de l'ordre de 100 µm, soit la taille des particules solides. Le détecteur possède une faible largeur d'impulsion (90ns), les mesures peuvent donc être faites avec une cadence suffisante (200 Hz) pendant le déplacement du capteur.

III.3 Méthode acoustique de mesure de l'amplitude de l'onde

Un écho-sondeur à ultrasons (Modèle E-201, Massa Production) constitué d'une lame émettrice transforme une impulsion électrique de courte durée et de forte amplitude en une impulsion mécanique. Une lame réceptrice transforme l'impulsion mécanique réfléchie par la surface de l'eau en un signal électrique. La fréquence de l'onde est de 215 KHz, la fréquence de répétition de 100 Hz. L'étalonnage à distance connue entre surface et

capteurs permet de connaître la hauteur d'eau en un point donné avec une précision de l'ordre de 100 µm.

III.4 Fond sablonneux "modèle"

Les caractéristiques techniques de notre bassin à houle ne permettent pas de générer des ondes de gravité d'amplitude supérieure à l'ordre du centimètre. Aussi, la modélisation de la mise en suspension et le transport de sédiment par la houle n'était envisageable que pour des particules monodispersées de faible taille. Nous avons donc utilisé des billes de verres de diamètre moyen $80 \mu\text{m} \pm 25 \mu\text{m}$ (billes de verre Ballotini).

IV. EXPÉRIENCES

Notre travail sur l'interaction dynamique entre l'onde de surface et le fond constitué de sédiment est focalisé sur l'étude de l'évolution couplée de l'onde de gravité et de la topographie du fond, constitué de sable "modèle" de faible granulométrie et de faible dispersion de taille. Dans un premier temps, l'étude de seuils de mise en mouvement de particules avait pour but de tester les capacités de notre dispositif expérimental de petite taille à décrire correctement des phénomènes observés dans des bassins de grande dimension ou en nature. Nous avons ensuite étudié la formation de rides et de barres, en l'absence ou en présence d'obstacles rectangulaires. Nous avons enfin estimé quantitativement l'affouillement au voisinage d'obstacles solides rectangulaires.

IV.1 Seuil de mise en mouvement des particules - formation des rides

A partir d'un fond initialement plat, nous avons observé à partir de quelle amplitude de l'onde de surface, à fréquence et profondeur d'eau données, il y a mise en mouvement des particules. A partir de cette amplitude seuil A_t , nous avons calculé une valeur seuil de la valeur moyenne de la vitesse horizontale du fluide au-dessus du sédiment, appelée U_m , afin de comparer nos résultats aux critères de Bagnold [1946], Manohar [1955], et Komar et Miller [1975]. Notons déjà que ce sont l'excursion horizontale du fluide au-dessus du fond et sa fréquence qui sont importantes. L'onde de gravité n'intervient à ce stade que par le fait qu'elle est à l'origine de cette oscillation horizontale. La valeur U_m est donnée par :

$$U_m = A_t \pi f / \sinh(kH) \quad (\text{modèle potentiel})$$

où A_t est l'amplitude de l'onde crête à crête, f sa fréquence, k le nombre d'onde au-dessus du fond et H la hauteur d'eau.

Dans le cadre de nos expériences ($H = 6 \text{ cm}$, $f = 1,5 \text{ Hz}$, soit longueur d'onde de l'onde $\lambda = 46,5 \text{ cm}$), le fond est érodé pour $A_t > 15 \text{ mm}$, d'où une vitesse seuil $U_m = 78 \text{ mm/s}$. Elle est supérieure à celles prévues par les trois critères précédemment cités (respectivement 50 mm/s; 12,4 mm/s et 59 mm/s), mais il faut souligner que ces formules empiriques ne donnent qu'une information moyennée du seuil d'érosion, en particulier en raison de la dispersion de la taille des particules utilisées lors de ces expériences (le diamètre D pouvait être D_{60} ou D_{90} ...) ou de défauts initiaux de planéité du sédiment qui facilitent la mise en mouvement des particules. Lors de nos expériences, le sable était

monodispersé et initialement aplani au 1/5e de mm, ce qui est compatible avec nos valeurs plus élevées des vitesses seuil. L'efficacité du fluide pour la mise en mouvement des particules peut être caractérisée par un nombre de mobilité ψ qui compare l'énergie cinétique ρU_m^2 du fluide à la variation d'énergie potentielle $(\rho_s \rho)gD$ nécessaire pour soulever une particule solide d'une hauteur égale à sa taille :

$$\psi = U_m^2 / (\gamma g D)$$

où $\gamma = (\rho_s - \rho) / \rho$, ρ_s étant la densité du sable, ρ celle de l'eau, D est le diamètre moyen du sédiment et U_m la valeur moyenne de la vitesse horizontale au-dessus du sédiment. Il apparaît des rides lorsque les particules de sable sont entraînées par le fluide en mouvement. Leur taille est de l'ordre de l'amplitude d'oscillation du fluide au voisinage du fond. Le rapport entre hauteur η et longueur λ_r des rides est fonction du nombre de mobilité ψ , de l'amplitude de l'oscillation du fluide $A = U_m / (2\pi f)$ et d'un facteur de friction sur le fond [Nielsen, 1979]. Ce rapport était de l'ordre de 0,16 pour nos études expérimentales [Rey, 1991 ; Cesselin, 1992 ; Rey *et al.*, 1993], soit très voisin de résultats d'études in situ, où $\eta / \lambda_r = 0,14$. Malgré sa petite taille, notre dispositif expérimental s'avère donc performant pour décrire correctement des phénomènes observés dans des bassins de grande dimension ou in situ.

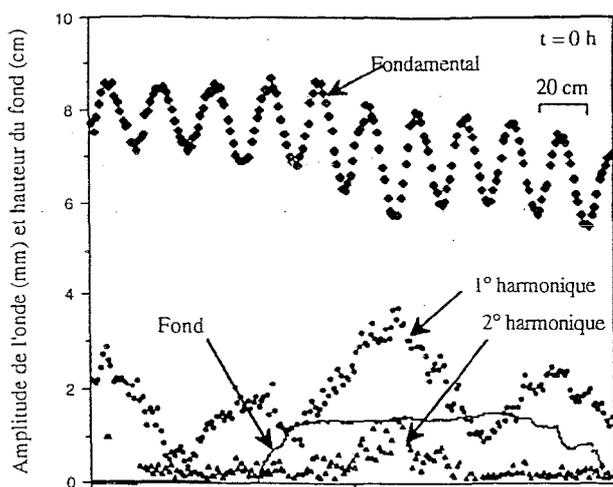


figure 1

constant au cours de l'évolution du fond tandis que le taux d'onde stationnaire en amont augmente nettement entre les deux moments de mesure, la réflexion passant de 10% à 23%. Cette augmentation de la réflexion est due au phénomène de résonance de Bragg, qui se traduit par une forte réflexion de l'onde lorsque sa longueur d'onde est double de celle du fond.

IV.3 Affouillement au voisinage des obstacles

En présence d'obstacles rectangulaires, les rides et les barres peuvent se former de part et d'autre des obstacles,

IV.2 Formation des barres - effets sur le taux d'onde stationnaire de l'onde

La présence de rides induit au voisinage du fond une forte vorticité capable d'éjecter des particules dans l'écoulement, ensuite transportées avant d'être redéposées par gravité. La présence d'une onde de surface partiellement stationnaire impose des oscillations du fluide d'amplitudes différentes selon que l'on se place au voisinage des noeuds ou des ventres. Il apparaît ainsi un phénomène lent d'accumulation des particules (échelle de temps de l'ordre de l'heure) dont le déphasage avec l'enveloppe de l'onde de surface est fonction du taux d'onde stationnaire, de la nature du sédiment et des processus de transport (charriage, suspension). Cette évolution du fond conduit à une modification du taux d'onde stationnaire de l'onde, elle-même à l'origine d'une modification du fond et ainsi de suite. Nous avons étudié la formation des rides et des barres, ainsi que leur influence sur la réflexion et l'atténuation des ondes [Rey *et al.*, 1993], une étude bibliographique détaillée des nombreuses études en nature ou en laboratoire sur la formation des barres de sable et sur les processus mis en jeu y est présentée. Nous avons présenté sur les figures 1 et 2 la topographie du fond et l'aspect de l'onde de surface après analyse harmonique.

Initialement, le taux d'onde stationnaire est imposé par la réflexion de la plage. Le taux d'onde stationnaire aval, dû essentiellement à la réflexion de la plage, reste

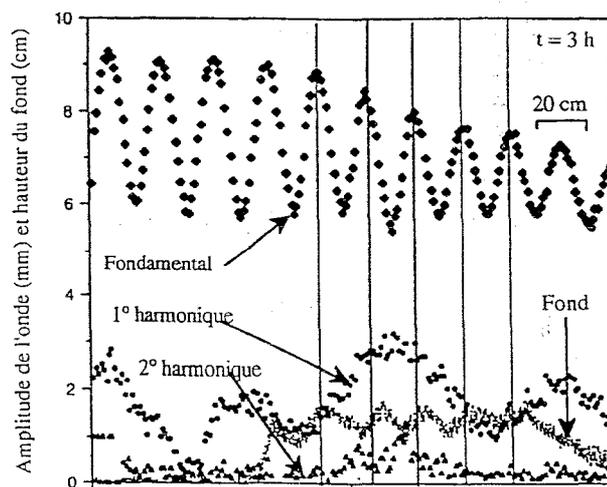


figure 2

leurs caractéristiques sont similaires à celles observées en leur absence et nous nous intéresserons plus particulièrement dans cette partie aux problèmes locaux d'affouillements. Nous avons considéré dans un premier temps un obstacle rectangulaire sur le fond, et étudié l'influence de la forme, aiguë ou arrondie, des coins de marche (fig. 3 et 4). Nous observons la formation de rides et de barres en amont et en aval de l'obstacle. L'aspect du fond en amont ne dépend pas de la nature des angles de l'obstacle, contrairement à l'érosion côté aval, fortement accrue au voisinage de l'obstacle dans le cas

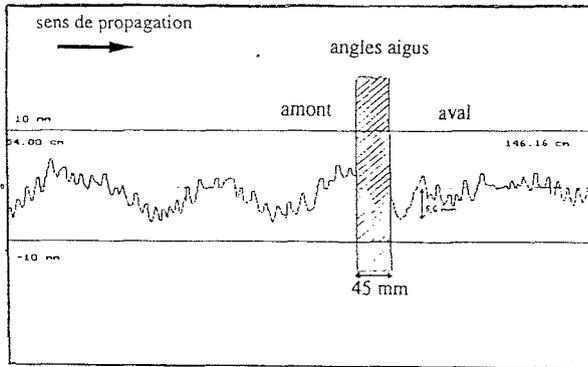


figure 3

d'angles droits. Ces résultats confirment nos études d'obstacles au dessus de fonds solides [Rey *et al.*, 1992], qui avaient montré une faible influence des arrondis sur

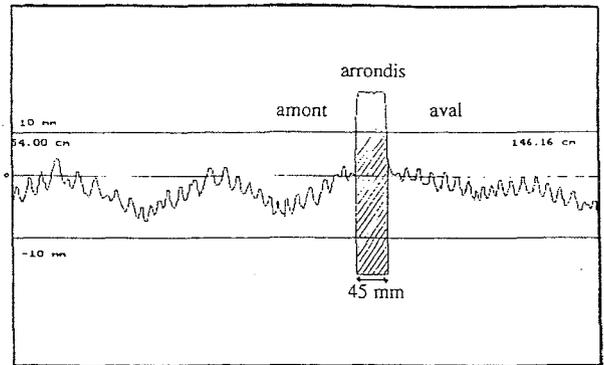


figure 4

le coefficient de réflexion de l'onde, malgré la vorticité importante pour les angles droits, à l'origine ici d'affouillements notables.

Coefficient de réflexion (%)	Ventre		Noeud	
	mesuré	Théorie potentielle	mesuré	Théorie potentielle
e = 1.0 cm	12	14.7	34	43
e = 1.5 cm	10	13.4	31	42

Tabl. 1

Nous avons ensuite étudié le cas d'un obstacle immergé, à distance e variable du fond (fig. 5). Nous observons qu'aucune érosion n'est amorcée côté aval, ceci provenant d'une amplitude d'oscillation au-dessus du seuil en amont, et au-dessous en aval dans les conditions d'expérience. Nous avons calculé coefficients de réflexion

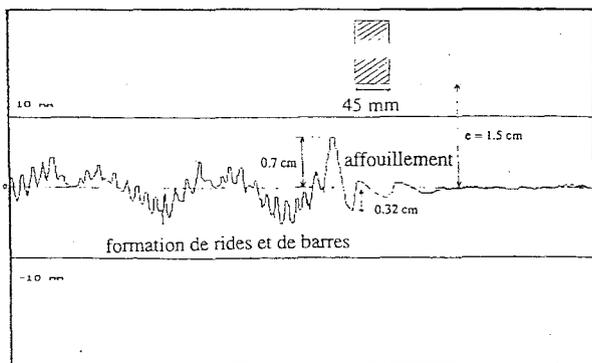


figure 5

Seuil	Ventre		Noeud	
	amplitude de l'onde incidente (cm)	vitesse au dessous de la marche (cm/s), calculée	amplitude de l'onde incidente (cm)	vitesse au dessous de la marche (cm/s), calculée
e = 1.0 cm	0.40	6.4	0.41	8.6
e = 1.5 cm	0.47	7.2	0.50	9.8

Tabl.2

et amplitudes d'oscillation au fond au dessous de l'obstacle avant érosion (tabl. 1 et 2). Les calculs donnent des résultats similaires aux mesures, notamment au voisinage du seuil. Par conséquent, les calculs des vitesses d'oscillation au-dessous de l'obstacle permettent de prévoir l'amplitude de l'onde à partir de laquelle il y a transport.

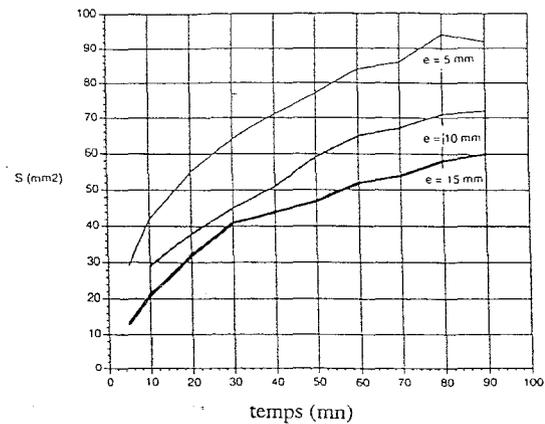


figure 6

Le problème était ensuite de quantifier le transport de sédiment au voisinage de l'obstacle en essayant d'en extraire un modèle et de voir vers quel état (d'équilibre?) tendait le processus. Nous avons choisi comme paramètre la quantité de sable par unité de largeur (surface S) déplacée en fonction du temps (fig. 6). Le transport n'apparaît que pour une vitesse d'oscillation au fond $U > U_s$, U_s étant la valeur pour le seuil, nous avons par conséquent exprimé V en fonction de $(U - U_s)$. Nous observons aux temps courts que $V / t \approx C (U - U_{th})$, avec $C \approx$ constante quelles que soient e et la position de l'obstacle, ce qui correspond au développement d'une instabilité. Notons que Sleath [1978] avait introduit cette notion de seuil pour le transport au-dessus de rides en exprimant le débit en fonction de $(\psi - \psi_{th})$ où ψ est le paramètre de Shields. Aux temps longs, nous avons observé une limite asymptotique pour le sédiment déplacé, mais des études pour des amplitudes plus importantes sont envisagées pour étudier les conditions d'évolution vers un état stable.

V. CONCLUSIONS

Notre travail sur l'interaction dynamique entre l'onde de surface et le fond constitué de sédiment était focalisé sur l'étude de l'évolution couplée de l'onde de gravité et de la topographie du fond, notamment au voisinage d'obstacles. Dans un premier temps, l'étude de seuils de mise en mouvement de particules, et de la formation de rides et de barres a permis de valider les capacités de notre dispositif expérimental de petite taille à décrire correctement des phénomènes observés dans des bassins de grande dimension ou en nature. Nous avons ensuite estimé quantitativement l'affouillement au voisinage d'obstacles solides rectangulaires, et montré les influences de la phase de l'onde et de la vorticité locale. L'interprétation des résultats s'aide largement des conclusions de nos études de propagation d'ondes au dessus des fonds solides. Enfin, les résultats sont confortés par des calculs basés sur la théorie potentielle linéarisée, qui montre encore ici son efficacité malgré toutes les approximations qu'elle suppose.

Références:

Bagnold R. A. 1946. Motion of waves in shallow water: Interaction between waves and sand bottoms, Proc. Royal Society of London, series A, 187, 1-8.

Belzons M., Rey V. and Guazzelli E. 1991. Subharmonic Bragg resonance for surface water waves, Europhysics Letters, 16, 189-194?

Guazzelli E., Rey V. and Belzons M. 1992 Higher-order Bragg reflection of gravity surface waves by periodic beds. J. Fluid Mech. 245, 301-317.

Komar P. D. and Miller M. C. 1974. Sediment threshold under oscillatory waves. Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, 756-775.

Mattioli F. 1991. Resonant reflection of surface waves by non-sinusoidal bottom undulations. Applied Ocean Research, Technical Note, 13, 49-53.

Molin B. et Betous P. 1993. Atténuation de la houle par une dalle horizontale immergée et perforée. 4^o Journées de l'Hydrodynamique, 1, 2 et 3 mars 1993, Nantes.

Nielsen P., 1979. Some basic concepts of wave sediment transport. Technical University of Denmark, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Series Paper n^o 20, 160 pp.

Rey V. 1991. Propagation d'ondes de gravité au-dessus de fonds solides ou constitués de sédiments : application à l'étude d'interactions dynamiques ondes-sédiments, thèse de l'Université de Provence, Marseille.

Rey V. 1992. Propagation and local behaviour of normally incident gravity waves over varying topography. European Journal of Mechanics B/Fluids, 11, 213-232.

Rey V., Belzons M. and Guazzelli E. 1992. Propagation of surface gravity waves over a rectangular submerged bar. J. Fluid Mech. 235, 453-479.

Rey V. 1993. Propagation d'ondes de gravité d'incidence oblique en présence d'obstacles cylindriques par profondeur finie. Colloque "Les méthodes informatiques de la conception industrielle", ESIM, Marseille.

Rey V., Davies A. G. and Belzons M. 1993. On the formation of bars by the action of waves on an erodible bed. Journal of Coastal Research (sous presse).

Sleath J. F. A. 1978. Measurements of bed load in oscillatory flow. J. Waterw., Port Coastal Ocean Div., Am. Soc. Civ. Eng., 19th, 2310 - 2321.

Sturova I. V. 1991a. Propagation of plane surface waves over an underwater obstacle and a submerged plate. Journal of applied mechanics and technical physics. 32, n^o 3, 453-479.

Sturova I. V. 1991b. Propagation of plane surface waves over a rectangular bar with overhang and partially capped rectangular trench. Journal of applied mechanics and technical physics. 32, n^o 5, 453-479.

QUESTION DE MONSIEUR GOIFFON

Les études théoriques de modélisation sur les ouvrages sont faites avec des formes "géométriques" de section rectangulaire. On constate des affouillements en aval. Qu'en serait-il avec un profil plus pratique de forme trapézoïdale ?

REPONSE

Nous avons considéré initialement des obstacles rectangulaires pour leur forme simple étudiés théoriquement et expérimentalement pour des fonds solides. Nos études antérieures sur l'influence de fortes courbures (coins anguleux ou arrondis) avaient montré que le tourbillon (et donc la recirculation)  tait d'autant plus développé que l'excursion du fluide au voisinage de l'obstacle était grande par rapport au rayon de courbure des arêtes de l'obstacle (Rey *et al*, 1992).

Pour un obstacle de profil trapézoïdal, l'étude est envisageable et le modèle potentiel reste applicable. Le développement de tourbillons, et par conséquent l'affouillement en aval, dépendront des mêmes paramètres (excursion du fluide et rayon de courbure des arêtes dépendant de la pente des côtés du brise-lame).