

BARBARA BOCZAR-KARAKIEWICZ

Académie Polonaise des Sciences

Institut de Constructions Hydrauliques — Gdańsk

INTERACTIONS ENTRE LES ONDES DE GRAVITÉ ET UN FOND DÉFORMABLE EN EAU DE FAIBLE PROFONDEUR

Table des matières: 1. Le sujet, 2. Position du problème. Méthode d'analyse, 3. Les modèles du régime progressif et du fond indéformable [3], 4. Modèle du régime ondulatoire partiellement réfléchi d'un fond indéformable et sinusoidal [1], 5. Modèle expérimental avec un fond déformable, 6. Conclusions; Streszczenie; Summary; Bibliographie;

1. LE SUJET

Le sujet du travail présenté concerne l'un des nombreux du problèmes du mouvement ondulatoire dans les zones côtières de faible profondeur. Il s'agit d'une analyse de la nature des ondes de gravité et des effets de leurs interactions avec un fond déformable, peu profond, dans les zones de leur déferlement. Nous nous sommes intéressés en particulier aux mécanismes responsables de la formation des configurations du fond aux barres. Ces formes topographiques apparaissent dans les zones côtières des mers avec ou sans marées, dans les zones côtières des grands lacs [4, 7, 10], sous forme de systèmes de plusieurs crêtes, parallèles à la ligne côtière. Les observations et mesures effectuées *in situ* montrent que la distance entre chaque barre successive est liée aux paramètres du régime ondulatoire et dépasse toujours la valeur de la longueur d'onde de la houle significative du spectre de la houle du vent [5]. Notre analyse montre que la formation des barres résulte des effets de la propagation, du déferlement et des interactions de l'onde significative avec le fond déformable et peu profond. Cette houle significative du spectre est longue par rapport à la profondeur de la zone considérée et tous les processus dynamiques sont déterminés par les effets non-linéaires des phénomènes considérés.

2. POSITION DU PROBLÈME. MÉTHODE D'ANALYSE

Une solution exacte du problème considérée est impossible même sur un modèle simplifié, dans lequel le spectre de houle est remplacé par une houle régulière et périodique (c'est-à-dire par la houle significative du spectre) qui s'approche perpendiculairement au système des izobates et à la ligne côtière rectilignes. L'une des difficultés principales résulte de la présence de deux surfaces libres (la surfaces de l'eau et celle du fond déformable), qui limitent le domaine du mouvement considéré, et qui, en conséquence, apparaît à priori comme une inconnue du problème (Fig. 1).

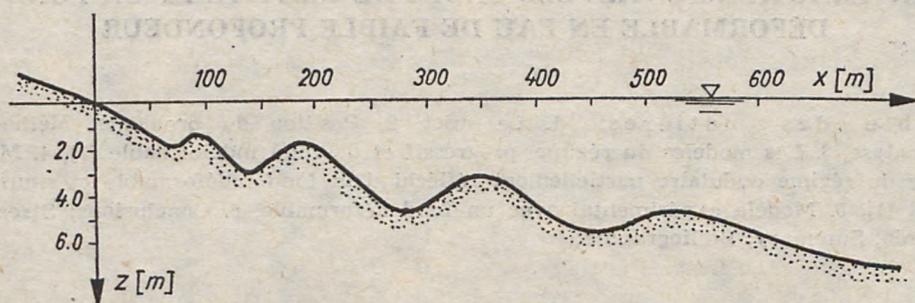


Fig. 1. Configuration typique d'un fond avec barres (zone côtière de la Baltique; après mesures effectuées en 1974)

Ryc. 1. Typowa konfiguracja dna rewowego w strefie przyboju południowego Bałtyku (według pomiarów terenowych 1974 r.)

De plus, dans le domaine du mouvement, la houle déferle, ce qui ne permet pas une application immédiate des méthodes et des résultats théoriques connus.

C'est pourquoi on a pris en considération de nombreuses hypothèses complémentaires, afin de pouvoir résoudre le problème posé à l'aide des résultats obtenus sur plusieurs simples modèles partiels, qui permettaient d'application de certains résultats de l'analyse théorique et expérimentale.

Au chapitre 3, sur un premier groupe de modèles, on a analysé les propriétés du régime d'une houle régulière, progressive et périodique qui se propage sur un fond indéformable, peu profond, horizontal ou incliné.

Au chapitre 4, sur un modèle linéaire, on considère les effets d'une configuration rythmique du fond indéformable, sous la forme d'un système de dunes régulières, sur les propriétés d'un régime ondulatoire.

Au chapitre 5, on analyse le développement des configurations du

fond sur un modèle expérimental avec un fond déformable (sableux), initialement horizontal, et une houle incidente progressive. La formation des barres, qui constituent un état d'équilibre dynamique entre la houle et le fond déformable s'établit après plusieurs étapes transitoires du mouvement de l'eau et des formes du fond correspondant. L'analyse préliminaire a été effectuée à l'aide des résultats et des conclusions obtenues sur des modèles partiels décrits aux chapitres 3 et 4.

Les conclusions sont présentés dans le chapitre 6.

3. LES MODELES DU RÉGIME PROGRESSIF ET DU FOND INDÉFORMABLE [3]

On analyse les propriétés du régime non-linéaire d'une houle régulière et périodique qui se propage en trois domaines différents de son mouvement. Les configurations du fond peu profond ($\frac{h}{L} < 0,1; \frac{H}{h} > 0,1$; h — profondeur, L — longueur d'onde, H — l'hauteur d'onde) sont représentées sur la fig. 2.

Les résultats expérimentaux ont montré, que dans le cas d'un fond horizontal, la houle transforme son profil d'une façon périodique dans l'espace. En première approximation le paramètre de la transformation spatiale L_t , est indépendant de la hauteur d'onde et possède une valeur supérieure à la longueur d'onde, L .

La variation des amplitudes des composantes de Fourier du profil (Fig. 2a) montre que la transformation résulte d'un échange continu et périodique (en espace) de l'énergie du système des composants fournie par le générateur harmonique de la houle.

Les propriétés d'un tel mouvement sont décrites par les équations approchés de la théorie de la houle longue (pour les valeurs de $R_u =$

$= \frac{1}{2} \frac{HL^2}{h^3} \sim 1$) de Korteweg de Vries ou de Benjamin, Bona, Mahony [2, 11]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_t + (gh_0)^{\frac{1}{2}} \bar{u}_x + \frac{3}{2} \bar{u} \bar{u}_x + \frac{1}{6} h_0^2 (gh_0)^{\frac{1}{2}} \bar{u}_{xxx} = 0; \\ \bar{u}_t + (gh_0)^{\frac{1}{2}} \bar{u}_x + \frac{3}{2} \bar{u} \bar{u}_x - \frac{1}{6} h_0^2 \bar{u}_{xxt} = 0; \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} h_0 = \text{const}; \\ \text{ou } h_0 \neq \text{const.} \\ \text{et } \beta < \sigma^3. \end{array} \quad (1)$$

Le mécanisme de la transformation du profil de la surface libre et de la structure interne du mouvement peut être interprété à l'aide d'une pseu-

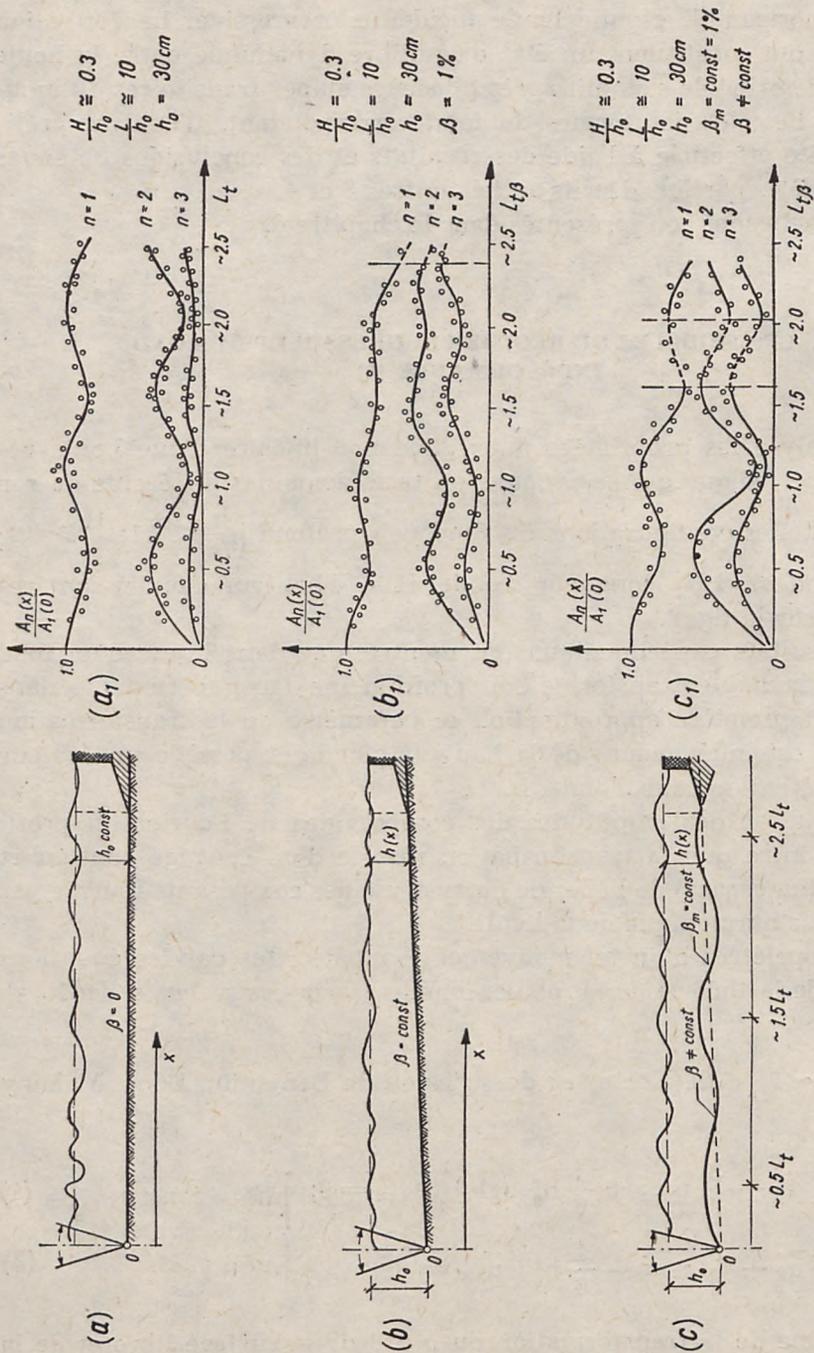


Fig. 2. Schéma des domaines du mouvement de la houle progressive avec résultats correspondants de l'analyse Fourier de son profil

Ryc. 2. Schematy obszarów ruchu dla przypadku fali progresywnej oraz wyniki analizy Fouriera jej profilu

do — résonnance non-linéaire entre les composantes élémentaires du mouvement dans le cas d'une faible dispersion en eau peu profonde [9].

Pour des profondeurs variables (Fig. 2b et c) il n'y a plus d'équations correspondant aux (1) ou (2). Mais pour de faibles valeurs de pente du fond β , c'est-à-dire pour $\beta < \sigma^3$, $\sigma = \frac{h}{L}$, on peut négliger les termes supplémentaires et prolonger la validité de (1) et (2) [11].

A l'aide des résultats de nos expériences, on a prolongé la validité des équations (1) et (2) sur les valeurs de β plus grandes que σ^3 . Les résultats de l'analyse de Fourier pour un fond incliné (Fig. 2b et c) montrent que dans tel cas le caractère qualitatif des transformations non-linéaires de l'onde est analogue à celui de la houle progressive (Fig. 2a). La transformation seule devient quasi — périodique dans l'espace; pour notre analyse approchée, les effets de la réflexion de l'onde peuvent être négligés.

Ensuite sur la base des résultats expérimentaux, on a prolongé la validité des considérations qualitatives résultant des équations (1) et (2) au cas des houles déferlantes ($\frac{H}{h} > 0,5$). On considère donc le déferlement de l'onde comme une forme de mouvement, dont une part de l'énergie initiale est issue du système des harmoniques. Mais cette perte d'énergie ne perturbe pas la transformation, qui reste continue même dans les intervalles de déferlement. De plus on a trouvé que ces intervalles se situent dans les phases de la transformation, où le développement des harmoniques d'indice $n > 1$ est maximal. Tous ces résultats montrent donc, que la houle longue déferle selon un rythme spatial de la transformation non-linéaire du mouvement (Fig. 3).

Sur la base des résultats obtenus et décrits ci-dessus on a pu formuler une conclusion générale:

La dynamique des zones côtières, résultant de la propagation du déferlement et des effets des interactions des ondes avec le fond déformable et peu profond est déterminée par l'énergie et par la transformation spatiale non-linéaire d'une houle régulière et périodique c'est-à-dire de la houle significative du spectre de la houle réelle.

4. MODÈLE DU RÉGIME ONDULAIRE PARTIELLEMENT RÉFLÉCHI D'UN FOND INDÉFORMABLE ET SINUSOÏDAL [1]

Les essais effectués dans un canal à houle avec un fond déformable et avec une houle incidente progressive, ont montré que même une réflexion d'onde très faible (venant initialement de la plage absorbante)

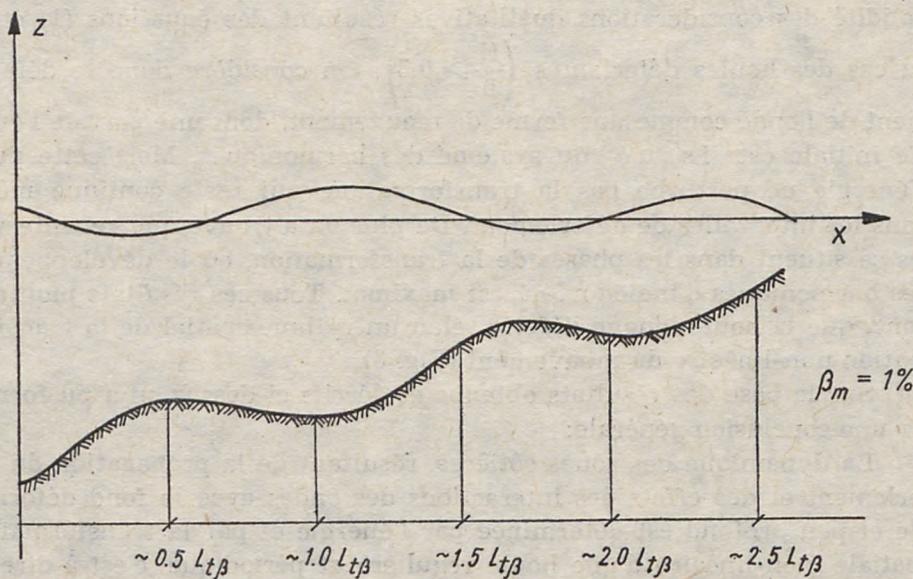
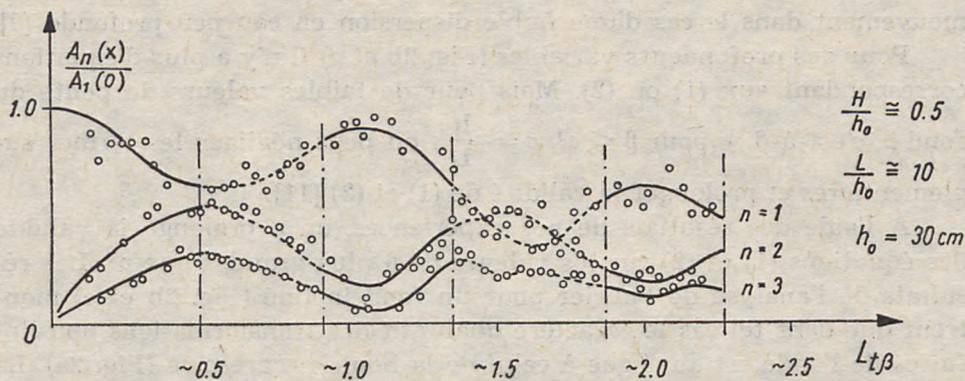


Fig. 3. Quasi — périodicité spatiale d'une houle déferlante:

a) résultats de l'analyse de Fourier,

b) schéma du domaine du mouvement correspondant

Ryc. 3. Quasi — okresowy charakter ruchu fali załamującej się:

a) wyniki analizy Fouriera

b) schemat obszaru ruchu

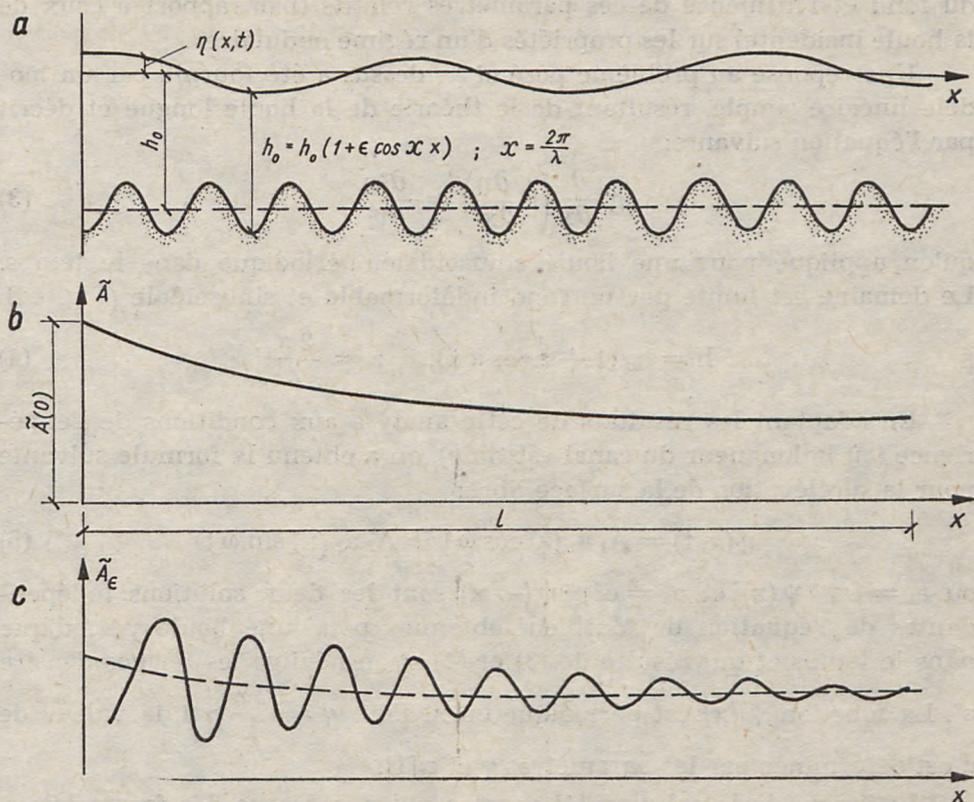


Fig. 4. Modèle avec clapotis partiel:

- schéma du domaine du mouvement pour le modèle théorique,
- amplitude „locale” d'après les résultats théoriques,
- amplitude d'après les résultats d'un essai avec $\gamma = 1$

Ryc. 4. Model z falą częściowo zinterferowaną:

- schemat obszaru ruchu dla modelu teoretycznego
- amplituda „lokalna” według obliczeń teoretycznych
- amplituda według pomiarów dla wartości parametru $\gamma = 1$

provoque la formation d'une configuration dunale aux crêtes distantes de $\lambda = 0,5 L$. Les amplitudes des dunes augmentent ensuite en proportion de la réflexion de l'onde incidente (Fig. 4a).

Ces phénomènes ont montré, que dans le cas d'un fond mobile le clapotis partiel contrôle les conditions du transport de la masse près du fond [6, 8] en modifiant sa forme initialement horizontale. Cette modification de la forme du fond change les conditions de propagation du régime ondulatoire.

Dans ce chapitre, on analyse les effets d'une configuration rythmique

du fond et l'influence de ces paramètres relatifs (par rapport à ceux de la houle incidente) sur les propriétés d'un régime ondulatoire.

Une réponse au problème posé ci — dessus a été fournie par un modèle linéaire simple, résultant de la théorie de la houle longue et décrit par l'équation suivante:

$$g \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \quad (3)$$

qu'on applique pour une houle sinusoidale, périodique dans le temps. Le domaine est limité par un fond indéformable et sinusoidale (Fig. 4d):

$$h = h_0 (1 + \varepsilon \cos \kappa x); \quad \kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

En adaptant les résultats de cette analyse aux conditions de l'expérience (où la longueur du canal est finie), on a obtenu la formule suivante pour la surélévation de la surface libre:

$$\eta(x, t) = A_1 a_1(\kappa) \cos \omega t + A_2 a_2(x) \sin \omega t \quad (5)$$

où $a_1 = e^{-\mu x} \psi(x)$ et $a_2 = e^{+\mu x} \psi(-x)$ sont les deux solutions indépendantes de l'équation de Mathieu, obtenues pour une houle périodique dans le temps et qui résulte de (3) et (4) si on néglige les termes d'ordre ε^2 . La fonction $\psi(x)$ est périodique en x . Pour $\gamma = \frac{2\kappa}{k} \sim 1$ la valeur de μ est déterminée par les paramètres γ et ε [1].

La forme de la solution [4] montre qu'en présence des formes sinusoidales du fond indéformable, le régime ondulatoire correspondant est un clapotis partiel. Le „coefficient de réflexion” de l'onde par le fond est une fonction de γ et atteint la valeur maximale pour $\gamma = 1$.

L'amplitude „locale” de la houle en présence des formes sinusoidales du fond est décrite par la formule suivante:

$$\tilde{A} = (A_1^2 e^{-2\mu x} + A_2^2 e^{+2\mu x}) = \tilde{A}(0) \frac{\text{ch}^{1/2} \mu (1-x)}{\text{ch}^{1/2} 2\mu l} \quad (6)$$

présentée à la fig. 4c. Le résultat obtenu sous la forme (6) a été vérifié qualitativement par les expériences [1]. Le résultat expérimental pour $\gamma \cong 1$ est représenté sur la fig. 4d.

Si l'on tient compte des résultats de ce chapitre on voit comment les formes rythmiques (sinusoidales) du fond peu profond aux paramètres liés à la longueur d'onde incidente selon le rapport $\gamma = \frac{2\kappa}{k} = 1$ augmentent l'abilité réfléchissante du milieu considéré. Les résultats expliquent également l'importance d'une faible réflexion initiale de la houle incidente qui fait „démarrer” le processus des interactions entre le fond déforma-

ble et de la houle. Après un temps suffisamment long, ces interactions provoquent une évolution de la configuration des dunes et l'établissement d'un régime de clapotis partiel correspondant.

5. MODÈLE EXPÉRIMENTAL AVEC UN FOND DÉFORMABLE

Les résultats des deux paragraphes précédents conduisent à deux conclusions contradictoires:

a) Au chapitre 3 on a trouvé que le paramètre $L_t > L$ de la transformation spatiale et non-linéaire d'une houle longue et progressive correspond à l'échelle spatiale L_t de la topographie du fond sous la forme d'un système de barres. Sur la base de ces résultats, on a formulé l'hypothèse suivante: la formation des barres dans les zones côtières de faible profondeur résulte des effets des interactions du régime ondulatoire (représenté par la houle significative du spectre) et du fond mobile [3].

b) Au chapitre 4, on a montré que dans le cas d'un fond mobile, le développement de sa forme est contrôlé par les effets de réflexion d'onde négligés au chapitre 3. Les interactions entre le clapotis partiel et le fond conduisent à la formation des dunes. L'échelle spatiale des dunes est liée à l'onde incidente selon le rapport $\frac{\lambda}{L} = \frac{1}{2}$ d'où $\lambda < L$; $\lambda \neq L_t$.

Les résultats expérimentaux de ce chapitre montrent, comment les deux étapes précédentes sont liées et comment on applique les conclusions en résultant pour expliquer le mécanisme de la formation des barres.

En effet, on a répété une expérience déjà décrite au chapitre 4. Pour un temps suffisamment long (plus long que celui de l'essai précédent), on a enregistré les formes du fond déformable (sableux) initialement horizontal, changeant sous l'action des houles incidentes longues et progressives, d'amplitude finie (près de la limite de leur déferlement; $\frac{h}{H} \sim 0,5$).

On a provoqué leur déferlement (par une pente du fond qui fait décroître la profondeur de l'eau) dans une partie du canal.

Sur la fig. 5, on a représenté les résultats des mesures de la forme du fond en fonction de la durée de l'expérience:

(Fig. 5a). Pendant les huit premières heures d'essais effectuées avec une houle progressive, déferlante (en $x = 8,0$ m du canal), un régime du clapotis partiel s'est développé avec une configuration des dunes correspondantes, d'échelle spatiale $\lambda = \frac{1}{2} L$. Les effets du déferlement de

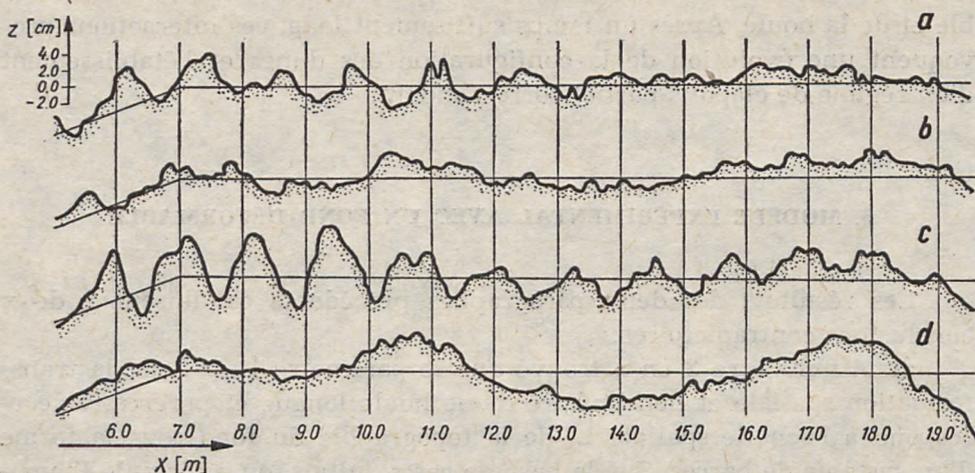


Fig. 5. Développement de la forme du fond mobile en fonction de la durée de l'expérience ($\frac{L}{h_0} = 14$; $\frac{H}{h_0} > 0,5$; $h_0 = 20$ cm):

- a) premières dunes après $t = 8$ h,
- b) premières barres après $t = 16$ h,
- c) secondes dunes après $t = 24$ h,
- d) profil d'équilibre (secondes barres) après $t = 32$ h

Ryc. 5. Rozwój profilu ruchomego dna w funkcji czasu trwania doświadczenia ($\frac{L}{h_0} = 14$; $\frac{H}{h_0} > 0,5$; $h_0 = 20$ cm):

- a) pierwsze wały diunowe po $t = 8$ godz.,
- b) pierwsze rewy po $t = 16$ godz.,
- c) drugi układ wałów diunowych po $t = 24$ godz.,
- d) profil równowagi (drugie rewy) po $t = 32$ godz.

l'onde agissant sur le fond (au voisinage de $x = 8,0$ m pendant plusieurs heures de l'expérience) n'influencent pas la forme du fond.

(Fig. 5b) Après avoir dépassé $t \approx 8$ h, l'état d'équilibre dynamique instantané, le régime ondulatoire modifie son caractère de clapotis partiel en onde progressive. Cette onde provoque une dénivellation des dunes et les premiers contours des barres deviennent visibles ($t \approx 16$ h).

(Fig. 5c) Pendant les huit heures suivantes ($t \approx 24$ h) sur la configuration des premières barres se développe graduellement un nouveau système de dunes avec un régime de clapotis partiel correspondant.

(Fig. 5d) Après avoir dépassé un deuxième état de développement maximal des dunes et de réflexion d'onde, le régime ondulatoire redevient progressif, provoquant une dénivellation des dunes précédentes. La nouvelle configuration consiste en deux barres sur lesquelles la houle progressive déferle. Cette topographie ne change plus de forme après plusieurs heures ($t \approx 30$ h) d'action des houles.

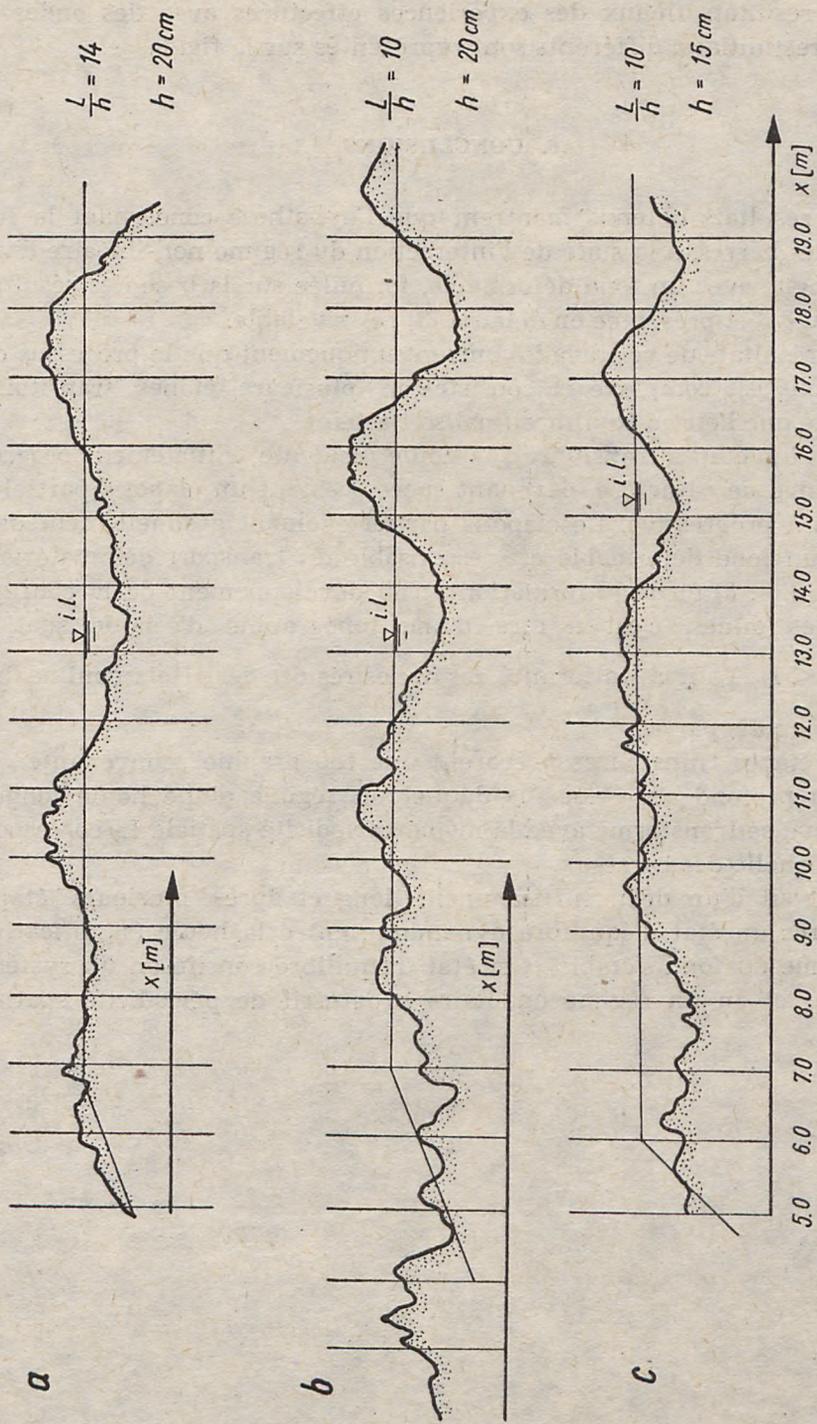


Fig. 6. Profils d'équilibre pour différents paramètres de houle incidente

Ryc. 6. Profile równowagi dla różnych parametrów fal

Les résultats finaux des expériences effectuées avec des ondes de paramètres initiaux différents sont représentés sur la fig. 6.

6. CONCLUSIONS

Les résultats obtenus montrent que l'hypothèse concernant la formation des barres, à la suite de l'interaction du régime non-linéaire d'une houle longue avec un fond déformable, formulée sur la base des résultats décrits au § 3 et présentée en détail à [3] reste valable.

Les résultats de ce travail montrent uniquement que le processus des interactions est complexe et consiste en plusieurs étapes transitoires jusqu'à ce que l'état d'équilibre final soit atteint.

Dans ces étapes transitoires, la houle incidente, initialement progressive, change de caractère, devenant successivement un clapotis partiel et redevenant progressive. Le clapotis partiel évoluant graduellement dans le cas d'un fond déformable est responsable du transport des matériaux du fond [6, 7, 8] et de la formation et du développement de la configuration des dunes, c'est à dire d'une topographie d'échelle spatiale $\lambda = \frac{1}{2}L < L_t$. La non-uniformité des dunes résulte des effets nonlinéaires dans le clapotis partiel.

Les étapes transitoires préparent une topographie „convenante” du fond peu profond au — dessus duquel un régime d'une houle longue, progressive se transforme avec la même périodicité spatiale L_t correspondant à l'échelle des barres.

Au bout d'un délai suffisamment long et après plusieurs étapes transitoires un état d'équilibre dynamique entre la houle (significative) et la forme du fond s'établit. Cet état d'équilibre consiste en un système de barres et en un régime ondulatoire progressif de périodicité spatiale $L_t > L$.

BARBARA BOCZAR-KARAKIEWICZ

Polska Akademia Nauk

Instytut Budownictwa Wodnego — Gdańsk

WZAJEMNE ODDZIAŁYWANIE PŁYTKOWODNYCH FAL POWIERZCHNIOWYCH I ODKSZTAŁCALNEGO DNA

Streszczenie

Przedmiotem niniejszej pracy jest analiza procesów wzajemnego oddziaływania, zachodzących pomiędzy falą wiatrową w strefie przyboju oraz płytkim i odkształcalnym dnem w tej strefie. Analizy dokonano na kilku prostych modelach częściowych. Na pierwszej grupie modeli stwierdzono, że regularne ciągi fal płytkowodnych (reprezentujące ciąg fal znacznych w falowaniu wiatrowym) o charakterze progresywnym odznaczają się okresem przestrzennym $L_t > L$ (L — długość fali). W rytm tego okresu przestrzennego zachodzi nieliniowa transformacja i załamanie ciągłości profilu fali oraz transformacja wszystkich pozostałych wielkości fizycznych ruchu: prędkości, ciśnień, przemieszczeń. Na podstawie tego wyniku sformułowano hipotezę tworzenia się form dennych (rew) jako efekt wzajemnych oddziaływań rytmicznej w przestrzeni struktury ruchu wody z odkształcalnym dnem, odznaczających się skalą przestrzenną $L_t > L$.

Na drugiej grupie modeli pokazano, że w warunkach odkształcalnego dna istotnym staje się odbicie fali, które jest jednocześnie przyczyną tworzenia się i rozwoju struktury diunowej dna o skali przestrzennej $\lambda \cong \frac{1}{2} L < L_t$.

Na trzecim modelu eksperymentalnym badano rozwój kształtu ruchomego dna pod wpływem ciągu fal płytkowodnych, pierwotnie progresywnych. Otrzymane wyniki wykazały, że dno rewowe jest końcowym stanem równowagi dynamicznej. Równowaga ta zostaje ustalona po kilku etapach pośrednich, w których następują po sobie kolejno fazy falowania zinterferowanego z odpowiednią konfiguracją diunową (w skali $\lambda \cong \frac{1}{2} L$) oraz fazy falowania o charakterze progresywnym z konfiguracją rewową (w skali $L_t > L$). Analizy jakościowej dokonano na podstawie wyników uzyskanych na uprzednio omówionych modelach częściowych.

BARBARA BOCZAR-KARAKIEWICZ
Polish Academy of Sciences
Institute of Hydro-Engineering — Gdańsk

INTERACTIONS BETWEEN A SHALLOW-WATER WAVE AND A MOVABLE BED

Summary

The subject of the present paper concerns the non-linear structure of wind waves in surf zones and its interaction with the movable bed in this zone.

The results presented have been obtained by means of a few simple models:

On the first group of models it was found that a progressive, regular and shallow-water wave train representing the significant wave in the wind wave spectrum was characterised by a spatial period $L_t > L$ (L — wave length). It was found that the bar and trough topography in surf zones with the same spatial periodicity, L_t results from interaction between the rhythmically oscillating wave and the movable and deformable shape of the bed.

On a second group of models it was shown that for a deformable bed the previously neglected waves reflection becomes important, causing a formation and further development of a dune configuration in a spatial scale, $\lambda \cong \frac{1}{2} L < L$.

On a third experimental model it was found that a bar and trough configuration is a final equilibrium state. This state is reached after several transient states of wave motion and corresponding bed configurations: partially standing wave regimes with dune topographies or progressive waves with bar and trough topographies. A qualitative analysis of the phenomena was conducted by means of results obtained on the two previous models.

BIBLIOGRAPHIE

LITERATURA

1. Benjamin T.B., Boczar-Karakiewicz B., Pritchard W.G., *The formation of sand bars by water waves*, Fluid Mechanics Research Institute, University of Essex Raport, 1977.
2. Benjamin T.B., Bona J.L., Mahony J.J., *Model equations for long waves in non-linear dispersive systems*, Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1972, A, 272.
3. Boczar-Karakiewicz B., *Struktura falowania wiatrowego w strefie przyboju*, Rozprawy Hydrotechniczne 34, 1975.

4. Byrne R.J., *Field occurrence of induced multiple gravity waves*, J. Geoph. Res. 74, 1969, 10.
5. Druet Cz., Massel S., Zeidler R., *Struktura falowania wiatrowego w strefie przyboju w świetle analizy wdimowej*, Rozprawy Hydrotechniczne, 1969.
6. Johns B., *The turbulent wave boundary layer*, J. of Fluid Mech. 48, 1970, 177.
7. Lau J., Travis B., *Slowly varying Stokes waves and formation of submerged sand bars*, J. Geoph. Res. 78, 1973, 21, 4480.
8. Longuet-Higgins M.S., *Mass transport in water waves*, Phil. Trans. Roy. Soc. 245, 1953, 535.
9. Philips O.M., *On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude*, J. Fluid Mech. 8, 1960.
10. Zenkowicz W.P., *Podwodnyje piesczanyje wały i schodnyje obrazowanija*, Archiwum Hydrotechniki 20, 1962, 2.
11. *Waves on beaches and resulting sediment transport*, ed. R. Meyer, Ac. Press New York—London 1972.