

5<sup>e</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22, 23, 24 mars 1995 – ROUEN

## QUELQUES ASPECTS DU DEVELOPPEMENT D'UN BASSIN NUMERIQUE A HOULE MULTIDIRECTIONNELLE

Michel BENOIT

EDF - Laboratoire National d'Hydraulique  
6, quai Watier  
78400 CHATOU

### *Résumé*

Une théorie de diffraction-réflexion de houle linéaire est appliquée à la modélisation numérique d'une cuve à houle multidirectionnelle. L'exploitation optimale de ce type d'installation soulève des questions classiques pour les essais en cuve (détermination de la position du modèle à étudier, effet du modèle sur le champ de houle, effet des limites physiques de la cuve...) et des problèmes plus spécifiques (effet des murs réfléchissants sur les côtés du batteur pour augmenter la superficie de la zone utile,...). La présente communication examine les deux aspects suivants :

- calcul du champ de houle en tout point de la cuve,
- calcul des mouvements du batteur-serpent pour produire la houle désirée.

Pour le premier point, la version 1.0 du code PHISAX de calcul de houle, basée sur une équation de Helmholtz est présentée pour le cas d'un bassin à fond plat. Des guideaux réfléchissants de configurations diverses peuvent être modélisés. Des comparaisons calcul/expériences sont réalisées pour valider cette première version du code.

Pour le deuxième point, trois approches de calcul de mouvement du batteur segmenté sont implantées et comparées. Leurs potentialités et limitations respectives sont analysées et discutées.

Les applications envisagées sont présentées, avec les développements futurs associés.

### *Abstract*

A linear diffraction-reflection wave theory is applied to model a multidirectional wave basin. In order to use this kind of facility in an optimal manner, one has to deal with classical problems related to model experiments (choice of model location, effect of the model on the wave field, influence of the boundaries of the basin,...) as well as more specific conditions (effect of reflective side-walls set up at each side of the wave-maker in order to increase the work area,...). This paper addresses both the following items :

- computation of wave field over the whole basin,
- computation of wave-paddles motions in order to produce the desired waves.

For the first item, the version 1.0 of the wave model PHISAX, based on an Helmholtz equation, is presented for the case of a flat bottom basin. Reflective side-walls of various configurations may be reproduced by the model. Some comparisons computations/experiments are performed to validate this first version of the program.

For the second item, three approaches for the computation of wave-maker displacements are implemented and compared. Their potentialities and limitations are highlighted and discussed.

Forthcoming applications of the model are presented, together with future developments.

## 1. INTRODUCTION - POSITION DE L'ÉTUDE

Les installations d'essais en houle multidirectionnelle se sont multipliées ces dernières années à travers le monde, et ce pour les différents domaines du génie maritime : offshore, côtier, navigation... Par rapport aux cuves à houle aléatoire, maintenant assez couramment répandues, ces installations offrent la possibilité supplémentaire de contrôler la répartition de l'énergie de la houle sur les directions de propagation et de reproduire sur modèle réduit des spectres de houle multidirectionnels. Le Laboratoire National d'Hydraulique (EDF) à Chatou a récemment mis en service une cuve de ce type, principalement destinée aux études en milieu côtier. Parallèlement, plusieurs thèmes de recherche dans ce domaine ont été initiés, en particulier pour ce qui est de la mesure et l'analyse de houle multidirectionnelle (Benoit [2] ; Benoit et Teisson [3]), mais également pour ce qui est de la génération de la houle, ainsi que de l'amortissement... La présente étude aborde les développements les plus récents réalisés au LNH sur le volet "modélisation numérique" de la cuve directionnelle, volet qui est d'importance pour au moins deux aspects :

1. **calcul du champ de houle en tout point de la cuve.** La connaissance du champ de houle est précieuse pour les essais en cuve à houle. Elle permet de déterminer la zone où la houle est quasiment homogène, de choisir avant de lancer les essais une position préférentielle pour implanter un ouvrage à étudier, de décider de la géométrie des murs réfléchissants à mettre en place... Lors du dépouillement d'essais, elle peut intervenir a posteriori comme une source d'information complémentaires pour justifier certaines observations effectuées lors des essais. Enfin, un tel outil numérique peut être utilisé pour valider et comparer différentes méthodes de calcul de mouvements du batteur-serpent en vue de reproduire une houle donnée. Le code numérique PHISAX, destiné à traiter ces aspects, est présenté dans la deuxième partie.
2. **calcul des mouvements du batteur-serpent pour produire la houle désirée.** Pour ce problème, le principe de génération classique, appelé "principe serpent", ("snake principle") est rapidement mis en défaut dès que l'on cherche à utiliser des murs réfléchissants sur les côtés du batteur afin d'augmenter la zone utile. Des approches alternatives peuvent alors être mises en œuvre de façon à prendre en compte ces murs réfléchissants latéraux et à les utiliser pour générer de la houle "utile" par réflexion. Trois méthodes de calcul de mouvements d'un batteur serpent sont présentées et comparées dans la troisième partie de cet article.

Les motivations de cette étude recouvrent en partie celles abordées par Cointe [4] pour un bassin de traction.

La cuve à houle directionnelle utilisée pour les différents tests de cette étude présente la géométrie illustrée sur la figure 1. Le générateur de houle est identique à celui utilisé au LNH : il comprend 56 pelles de 0.40 m de largeur, pour une longueur totale de 22.4 m. Les pelles sont animées d'un mouvement de type "piston". Le fond du bassin est plat et la profondeur d'eau sera, sauf indication contraire, prise égale à 0.60 m. Les parois de la cuve peuvent être soit totalement réfléchissantes (murs réfléchissants 1 à 4), soit totalement absorbantes. Dans la pratique, il est fait usage dans la cuve à houle d'amortisseurs progressifs, à plaques verticales perforées, mis au point au LNH à partir d'essais en canal (Allilaire et Benoit [1]) et qui possèdent un faible coefficient de réflexion (typiquement de l'ordre de 5 % pour les conditions d'utilisation de la présente étude). Ces amortisseurs modulaires de 2 m de long pour 2.8 m de large peuvent être facilement déplacés à l'intérieur de la cuve, selon la configuration désirée. Une plaque métallique rigide est fixée sur la face avant de ces amortisseurs lorsqu'on désire les utiliser comme "murs réfléchissants".

Les conventions pour les axes et la direction de la houle sont illustrées sur la figure 1. La direction de houle est comprise entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ . Une direction de  $0^\circ$  est normale au batteur.

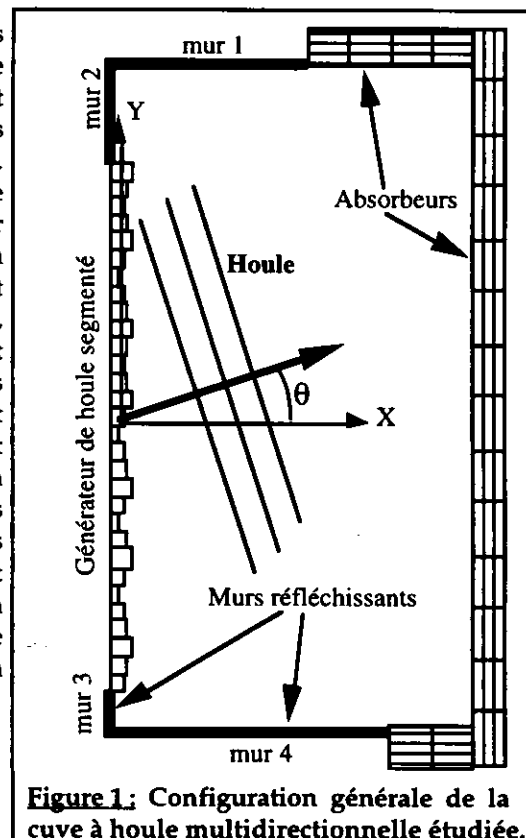


Figure 1: Configuration générale de la cuve à houle multidirectionnelle étudiée.

## 2. UNE MÉTHODE DE CALCUL DU CHAMP DE HOULE — PROGRAMME PHISAX 1.0

### 2.1 Principe de la méthode :

La version 1.0 du programme PHISAX est basée sur le modèle proposé par Isaacson [8]. Il s'agit d'une méthode linéaire, traitant la diffraction et la réflexion de la houle sur un fond plat. Elle peut être appliquée à une cuve dont les bords sont constitués d'un arrangement —a priori quelconque— de partie soit parfaitement absorbantes, soit parfaitement réfléchissantes, soit occupées par des générateurs de houle. Elle permet de calculer la houle en tout point de la cuve si le mouvement des segments du générateur de houle est donné en entrée.

Le mouvement du fluide est supposé irrotationnel et harmonique en temps : les vitesses dérivent donc d'un potentiel de la forme :

$$\psi(x,y,z,t) = \phi(x,y) \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} e^{-i\omega t}$$

Ce potentiel  $\psi$  vérifie l'équation de Laplace :  $\Delta\psi = 0$ .

Pendant, étant donné que le fond est plat, cette équation se ramène à une équation d'Helmholtz pour le potentiel réduit  $\phi$  :

$$\Delta\phi + k^2\phi = 0$$

Le potentiel  $\phi$  est alors exprimé comme le potentiel créé par une distribution de sources situées le long du générateur de houle ainsi que sur chaque mur réfléchissant :

$$\phi(\underline{x}) = \frac{1}{4\pi} \int_S f(\xi) \cdot G(\underline{x}, \xi) dS \quad (1)$$

où  $\underline{x}$  représente le point de coordonnées  $(x,y)$ ,  $S$  le contour le long du batteur et des murs réfléchissants et  $f(\xi)$  est la fonction de distribution des forces des sources.  $G(\underline{x}, \xi)$  est une fonction de Green représentant le potentiel au point  $\underline{x}$  dû à une source de valeur unité en un point  $\xi$  situé sur le contour  $S$ . Cette fonction de Green correspond à la solution fondamentale de l'équation de Helmholtz qui satisfait la condition de radiation. En dimension 2, elle peut s'écrire :

$$G(\underline{x}, \xi) = i\pi H_0^{(1)}(k.r) \quad \text{où} \quad \left\{ \begin{array}{l} H_0^{(1)} \text{ est la fonction de Hankel de première espèce d'ordre 0} \\ r \text{ la distance entre } \underline{x} \text{ et } \xi. \end{array} \right.$$

Les conditions aux limites, le long de  $S$ , indiquent que la vitesse normale est :

- soit égale à la vitesse de déplacement des pelles, le long du batteur,
- soit nulle, le long des murs réfléchissants.

Ces conditions s'écrivent de manière intégrale, pour un point  $\underline{x}'$  situé sur  $S$  :

$$-\frac{1}{2}f(\underline{x}') + \frac{1}{4\pi} \int_S f(\xi) \frac{\partial G(\underline{x}', \xi)}{\partial \underline{n}'} dS = V(\underline{x}') \quad (2)$$

Dans cette expression,  $\underline{x}'$  est le point sur  $S$  auquel on applique la condition aux limites, et  $\underline{n}'$  la normale en  $\underline{x}'$  à  $S$ . Pour un point  $\underline{x}'$  situé le long du batteur,  $V$  est proportionnel à la vitesse de la pelle du batteur. Pour un point situé le long d'un mur réfléchissant,  $V$  est nul.

L'équation intégrale (2) est résolue numériquement en discrétisant la frontière  $S$  en un nombre fini  $N$  de segments élémentaires  $\Delta S_j$  ( $j=1, \dots, N$ ) sur lesquels la force de la source  $f_j$  est supposée constante. Comme il faut des segments-sources relativement petits, notamment devant la longueur d'onde de la houle générée, plus d'une source est parfois nécessaire pour une seule pelle du batteur. Ceci est d'autant plus vrai que la fréquence de la houle désirée est grande (i.e. que la longueur d'onde de la houle est faible). Hiraishi *et al.* [7] ont montré lors de leur validation de cette méthode que la longueur des segments-sources devait être inférieure à  $0.2L$ , où  $L$  est la longueur d'onde de la houle. Les valeurs des sources  $f_j$  ( $j=1, \dots, N$ ) constituent alors les inconnues du problème et sont solutions du système linéaire complexe suivant :

$$\sum_{j=1}^N \left[ -\delta_{ij} + \frac{1}{2\pi} \int_{\Delta S_j} \frac{\partial G}{\partial \underline{n}}(\underline{x}'_i, \xi) \cdot dS \right] \cdot f_j = 2 \cdot V(\underline{x}'_i) \quad \text{pour } i=1, \dots, N$$

$$\text{soit : } \sum_{j=1}^N B_{ij} f_j = b_i \quad \text{pour } i=1, \dots, N$$

$$\text{où } B_{ij} = -\delta_{ij} + \frac{1}{2\pi} \int_{\Delta S_j} \frac{\partial G}{\partial \mathbf{n}}(\mathbf{x}'_i, \xi) \cdot dS \quad \text{est approximé par : } \begin{cases} B_{ij} = \frac{\Delta S_j}{2\pi} \left[ \frac{\partial G}{\partial \mathbf{n}}(\mathbf{x}'_i, \xi_j) \right] & \text{si } i \neq j \\ B_{ij} = -1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

$$\text{et } b_i = 2 \cdot V(\mathbf{x}'_i)$$

Ce système complexe est ramené à un système réel de  $2N$  équations à  $2N$  inconnues et résolu par la méthode Gauss-Jordan. Une fois que les valeurs des sources ont été déterminées, il est aisé de calculer le potentiel en tout point du bassin, à l'aide d'une version discrétisée de l'expression (1) :

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N f_j \cdot G_j(\mathbf{x}) \cdot \Delta S_j$$

Une fois que le potentiel des vitesses a été calculé, toutes les propriétés désirées de la houle peuvent être obtenues. En particulier, l'élévation,  $\eta$  de la surface libre, la hauteur des vagues  $H$ , et la phase angulaire  $\varphi$ , sont données respectivement par :

$$\eta(t) = -\frac{\omega}{g} \left[ \text{Im}(\phi) \cdot \cos(\omega \cdot t) - \text{Re}(\phi) \cdot \sin(\omega \cdot t) \right]$$

$$H = 2 \frac{\omega}{g} |\phi|$$

$$\varphi = -\arctan \left( \frac{\text{Re}(\phi)}{\text{Im}(\phi)} \right)$$

où  $\text{Re}(\phi)$  et  $\text{Im}(\phi)$  sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de  $\phi$ .

Le programme PHISAX 1.0 qui correspond à la méthode exposée ci-dessus permet ainsi de calculer la houle en tout point du bassin, après avoir déterminé la distribution des sources. Il fonctionne sur la configuration générale de la figure 1, c'est à dire avec des murs réfléchissants (numérotés 1 à 4) de longueurs arbitraires. En particulier, les murs réfléchissants peuvent être contre le batteur ou non, faire la longueur du bassin ou non.

## 2.2 Application à la houle multidirectionnelle :

Les simulations en houle aléatoire multidirectionnelle sont obtenues par une méthode de superposition linéaire de  $M$  composantes élémentaires :

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \eta_m(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \frac{H_m}{2} e^{i(k_m x \cos \theta_m + k_m y \sin \theta_m - \omega_m t + \varphi_m)}$$

Chaque composante  $\eta_m$  est caractérisée par :

- sa fréquence  $f_m$  ou sa pulsation  $\omega_m = 2\pi f_m$  ou encore sa période  $T_m = 1/f_m$
- sa longueur d'onde  $L_m$  ou son nombre d'onde  $k_m = 2\pi/L_m$ , donné par la relation de dispersion.
- sa direction de propagation  $\theta_m$
- sa hauteur (crête à creux)  $H_m$
- sa phase  $\varphi_m$

Du fait de la linéarité de la méthode de superposition, on est amené à résoudre  $M$  problèmes de Helmholtz en houle régulière monodirectionnelle (tel qu'exposé au §2.1), c'est à dire à déterminer les  $M$  potentiels réduits  $\phi_m(x, y)$ , c'est à dire encore à calculer les  $M$  distributions de sources différentes pour chacune des composantes. La surface libre va ainsi s'exprimer par :

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \frac{i \cdot \omega_m}{g} \phi_m(x, y) e^{-i(\omega_m t - \varphi_m)}$$

Le potentiel total sera quant à lui donné par :

$$\psi(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^M \phi_m(x, y) \frac{\cosh k_m(d+z)}{\cosh k_m d} e^{-i(\omega_m t - \varphi_m)}$$

### 3. CALCUL DES MOUVEMENTS DU BATTEUR-SERPENT — PROGRAMME BATTOR 1.0

Trois approches, de complexités croissantes, ont été implantées au LNH au sein du logiciel BATTOR 1.0 pour le calcul des mouvements du batteur-serpent destinés à produire une houle donnée.

#### 3.1 La méthode élémentaire, dite "snake principle"

Cette méthode, parfois également appelée "principe de Huygens", consiste à supposer que le générateur de houle segmenté est infiniment long et animé d'un mouvement harmonique et progressif de la forme suivante (cf figure 2) :

$$X(y,t) = i \frac{S_0}{2} e^{i(k_0 y - \omega t)}$$

Ce mouvement régulier crée une houle monochromatique et monodirectionnelle de pulsation  $\omega$ , de nombre d'onde  $k$  et de direction  $\theta$  :

$$\eta(x,y,t) = \frac{H_0}{2} e^{i[k(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t]}$$

On a la relation suivante :  $k_0 = k \sin \theta$

La fonction de transfert entre la course totale des pelles  $S_0$  et la hauteur (crête à creux) de la houle générée  $H_0$  s'écrit, pour le cas d'un batteur "piston" :

$$\frac{H_0}{S_0} = \underbrace{G(kd) \cdot \tanh(kd)}_{\text{Fonction de transfert en canal à houle}} \cdot \underbrace{\frac{1}{\cos \theta}}_{\text{Terme correcteur dû à l'obliquité}} \cdot \underbrace{\frac{\sin \tau}{\tau}}_{\text{Terme correcteur dû à la largeur des pelles B}}$$

avec  $G(kd) = \frac{2 \sinh(2kd)}{2kd + \sinh(2kd)}$

$\tau = \frac{k_0 \cdot B}{2} = \frac{k \cdot B \cdot \sin \theta}{2}$

Le terme de vitesse du batteur  $V(x')$  dans l'expression (2) du §2.1 s'écrit alors, pour un point situé sur le batteur (i.e.  $x' = [0, y]$ ) :

$$V(x') = V(0, y) = \omega \cdot \frac{S_0}{2} e^{i \cdot k_0 \cdot y} \cdot G(kd)$$

La mise en œuvre de cette méthode est relativement aisée, mais il convient cependant d'émettre deux remarques :

— les possibilités de génération de houle sont limitées par le critère suivant, dit de Biesel :

$$L/B \geq \sqrt{2} + \sin |\theta| \quad \text{où } B \text{ est la largeur des pelles et } L \text{ la longueur d'onde de la houle.}$$

Cette limitation concerne les hautes fréquences, pour lesquelles il devient impossible de simuler des incidences importantes sans créer simultanément des ondes parasites.

— par ailleurs, cette méthode de simulation, adaptée pour un batteur infiniment long, voit ses potentialités diminuer pour le cas d'un batteur de longueur finie, car elle ne prend pas en compte les effets de diffraction dus à cette longueur finie. Enfin, si l'on a recours à des murs réfléchissants latéraux de chaque côté du batteur, cette méthode n'est plus du tout adaptée.

#### 3.2 La méthode dite de "corner reflection"

Cette méthode, introduite par Funke et Miles [6] pour le cas où il y a des murs réfléchissants sur les côtés du batteur, est une extension de la précédente au sens où les pelles situées aux extrémités du batteur sont d'un côté laissées au repos (section A sur figure 3) et de l'autre sollicitées à double titre (section C) et simulent alors la présence de pelles virtuelles, symétriques des pelles existantes par rapport au mur réfléchissant.

La zone utile est ainsi l'union de la zone hachurée (houle directe : cas sans murs réfléchissants) et de la zone grisée, où la houle est simulée de façon indirecte par réflexion. Il devient possible de mettre en place des modèles de longueur relativement importante assez loin du batteur. Les effets de diffraction des composantes de houle directe et indirecte ne sont cependant pas pris en compte par cette approche géométrique simple.

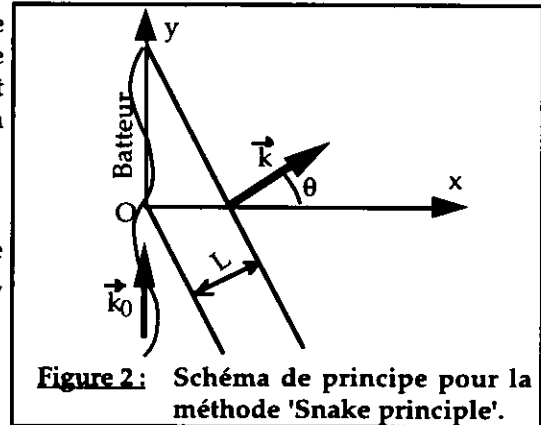


Figure 2: Schéma de principe pour la méthode 'Snake principle'.

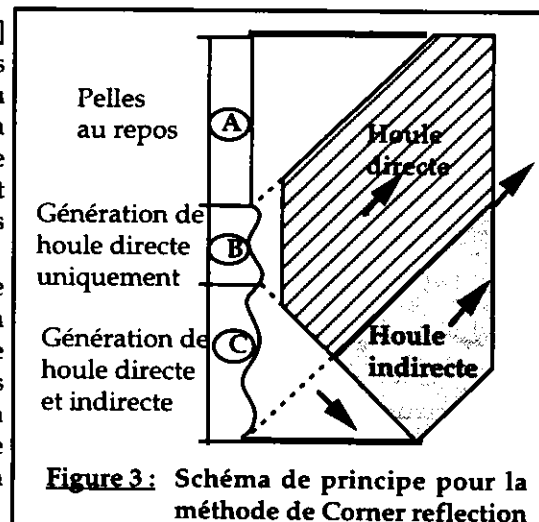


Figure 3: Schéma de principe pour la méthode de Corner reflection

### 3.3 La méthode dite de Dalrymple

Cette méthode, proposée par Dalrymple [5] également pour le cas où il existe des murs réfléchissants de part et d'autre du batteur, s'avère supérieure à la précédente car elle prend en compte les effets de la diffraction pour le calcul des mouvements des pelles et peut en outre fonctionner pour le cas où les fonds sont en pente suivant la direction de l'axe Ox.

Le problème, exposé ici pour le cas de fonds plats, est schématisé sur la figure 4. Il s'agit de résoudre l'équation de Helmholtz pour le potentiel réduit :

$$\Delta\phi + k^2\phi = 0$$

avec les conditions aux limites suivantes :

(a) imperméabilité sur les murs réfléchissants

$$\frac{\partial\phi}{\partial y} = 0 \quad \text{en } y = b \text{ et } y = -b$$

(b) mouvement imposé par le batteur en  $x=0$  :

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = V_{\text{bat}}(y) \quad \text{en } x = 0$$

(c) houle régulière oblique à une distance  $X_d$  du batteur

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = \beta \cdot e^{i \cdot k_0 \cdot y} \quad \text{en } x = X_d$$

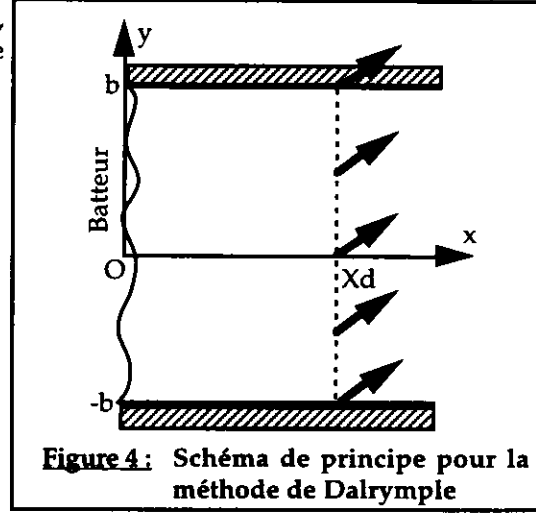


Figure 4: Schéma de principe pour la méthode de Dalrymple

On cherche une solution de l'équation de Helmholtz qui vérifie (a) sous la forme suivante :

$$\phi(x,y) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n(x) \cdot \cos(\lambda_n \cdot y) + b_n(x) \cdot \sin(\gamma_n \cdot y)]$$

où :  $\lambda_n = n \cdot \pi / b$  et  $\gamma_n = (n+0.5) \cdot \pi / b$  ( $n = 0, 1, \dots, \infty$ ) seront appelés "modes" de la décomposition.

Cette solution générale, reportée dans l'équation de Helmholtz donne les équations suivantes :

$$\begin{cases} a_n''(x) + (k^2 - \lambda_n^2) \cdot a_n(x) = 0 \\ b_n''(x) + (k^2 - \gamma_n^2) \cdot b_n(x) = 0 \end{cases} \quad \text{pour } n = 0, 1, \dots, \infty$$

En ne conservant de la solution que les composantes qui se propagent dans le sens des x croissants, on obtient :

$$a_n(x) = A_n \cdot e^{i \cdot x \cdot \sqrt{k^2 - \lambda_n^2}} \quad \text{et} \quad b_n(x) = B_n \cdot e^{i \cdot x \cdot \sqrt{k^2 - \gamma_n^2}}$$

Parmi ces coefficients, on ne conserve que ceux qui correspondent aux modes progressifs, c'est à dire ceux pour lesquels :

$$k^2 - \lambda_n^2 \geq 0, \quad \text{c'est à dire : } n \leq k \cdot b / \pi \quad \text{pour les modes } \lambda_n$$

$$k^2 - \gamma_n^2 \geq 0, \quad \text{c'est à dire : } n \leq k \cdot b / \pi - 0.5 \quad \text{pour les modes } \gamma_n$$

Les modes évanescents, correspondant aux valeurs supérieures de n, sont ignorés.

En utilisant la condition (c), il est possible de calculer les valeurs  $A_n$  et  $B_n$  à la distance  $X_d$  :

$$A_n \cdot e^{i \cdot X_d \cdot \sqrt{k^2 - \lambda_n^2}} = -\frac{2 \beta k_0 (-1)^n \sin(k_0 \cdot b)}{b \cdot (k_0^2 - \lambda_n^2) \cdot \sqrt{k^2 - \lambda_n^2}} \quad \text{pour } n \geq 1 \quad \text{et} \quad A_0 \cdot e^{i \cdot X_d \cdot k} = -\frac{\beta \sin(k_0 \cdot b)}{b \cdot k_0 \cdot k}$$

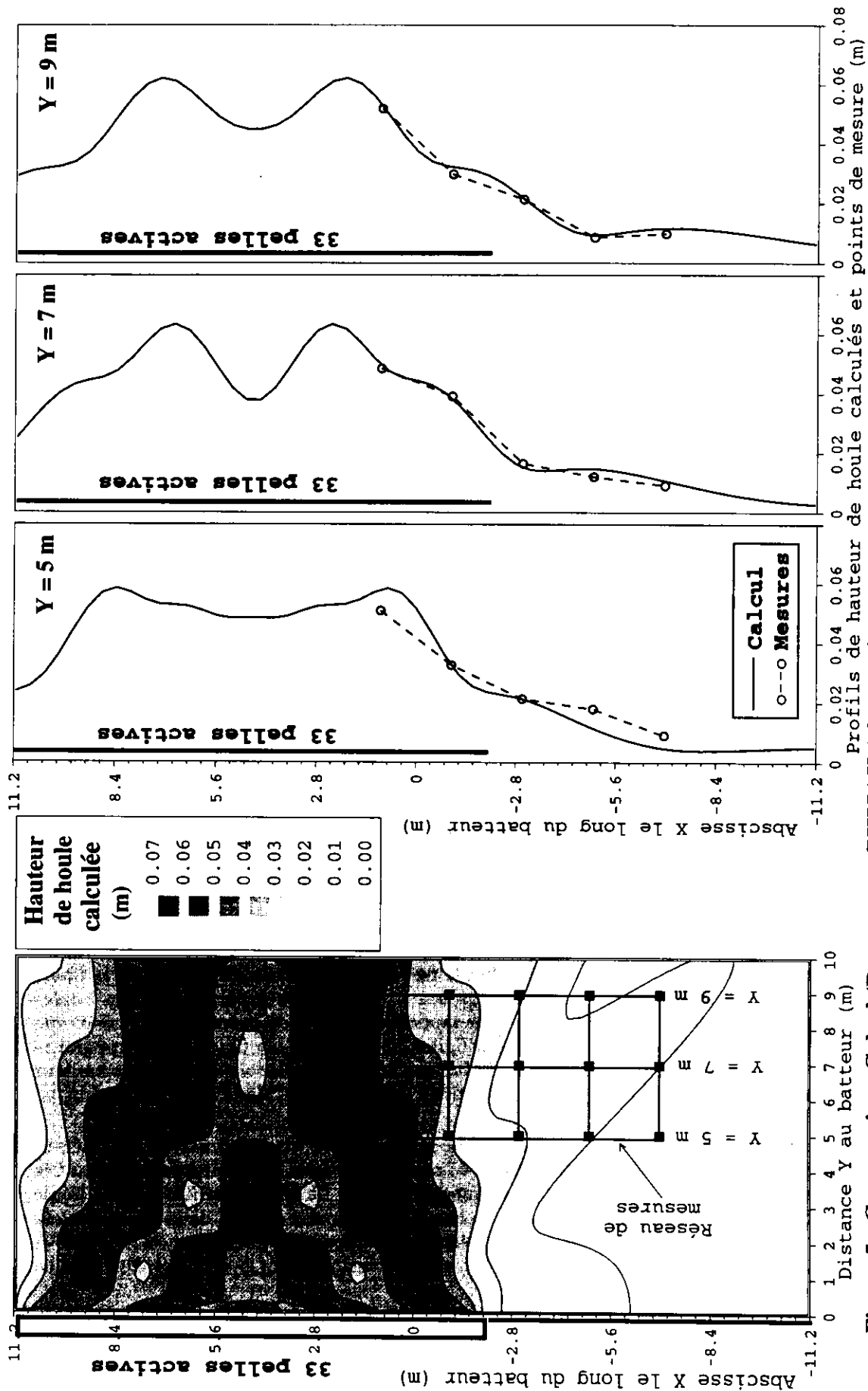
$$B_n \cdot e^{i \cdot X_d \cdot \sqrt{k^2 - \gamma_n^2}} = -\frac{2 i \beta k_0 (-1)^n \cos(k_0 \cdot b)}{b \cdot (k_0^2 - \gamma_n^2) \cdot \sqrt{k^2 - \gamma_n^2}} \quad \text{pour } n \geq 0$$

Finalement ces coefficients sont transposés au niveau du batteur dont le mouvement s'exprime :

$$X(y,t) = \sum_{n=0}^{\infty} [\tilde{A}_n \cdot \cos(\lambda_n \cdot y) + \tilde{B}_n \cdot \sin(\gamma_n \cdot y)] e^{-i \cdot \omega \cdot t}$$

$$\text{avec : } \tilde{A}_n = A_n \sqrt{k^2 - \lambda_n^2} e^{i \cdot X_d \cdot \sqrt{k^2 - k_0^2}} \quad \text{et} \quad \tilde{B}_n = B_n \sqrt{k^2 - \gamma_n^2} e^{i \cdot X_d \cdot \sqrt{k^2 - k_0^2}}$$

Le bon fonctionnement de cette méthode est conditionné par le nombre de modes disponibles dans la décomposition qui doit au moins d'une dizaine pour obtenir des résultats corrects. Or ce nombre est limité par la relation :  $n \leq k \cdot b / \pi$ , ce qui signifie que pour une demi-largeur de bassin b donnée, la méthode pourra être mise en défaut lorsque le nombre d'onde k diminue, c'est à dire lorsque la période de houle et/ou la profondeur d'eau augmentent.



**Figure 5 : Comparaison Calcul (Programme PHISAX 1.0) -Expérience (Mesures en cuve à houle directionnelle LNH).**  
(Profondeur 0.60 m ; Période 1.5 s ; Direction 0 deg ; Pas de murs réfléchissants)

## 4. EXEMPLES D'APPLICATION ET DE VALIDATION

### 4.1 Un exemple de validation de PHISAX 1.0

La version 1.0 du programme PHISAX de calcul de champ de houle a été validée par comparaison aux mesures effectuées en cuve à houle par Hiraishi *et al.* [7] et par des mesures complémentaires réalisées dans la cuve à houle directionnelle du LNH. La figure 5 présente un exemple de comparaison calcul/expérience sur un cas réalisé au LNH de façon à apprécier l'effet de la diffraction. La zone de calcul de houle couvre toute la longueur du batteur (22.4 m), mais seules les 33 premières pelles sont actives, les 23 autres sont immobiles et se comportent donc comme un mur réfléchissant situé dans le prolongement du batteur. Il n'y a pas de murs réfléchissants latéraux. La profondeur d'eau est de 0.60 m. La houle générée est régulière et monodirectionnelle frontale (direction 0°). Sa période est de 1.5 s et sa hauteur de 5.5 cm. Un réseau de mesures comprenant 15 capteurs de houle est positionné entre 5 et 9 m du batteur dans une zone où la hauteur de houle varie sensiblement du fait de la diffraction.

Les profils de hauteur de houle de la figure 5 mettent en évidence une bonne adéquation des mesures aux résultats du modèle numérique. La décroissance transversale de la hauteur de houle du fait de la diffraction est bien reproduite. L'ensemble des tests de validation réalisés affiche un niveau de comparaison équivalent, ce qui indique que la méthode de calcul de houle semble adaptée et opérationnelle, pour autant que la houle puisse être considérée comme linéaire.

### 4.2 Comparaison des méthodes de génération de houle

Dans le but de mettre en évidence les différences entre les trois méthodes de génération de houle exposées en partie 3, une même houle est spécifiée en entrée pour les trois approches possibles implantées dans BATTOR 1.0 et les champs de houle correspondants sont calculés par PHISAX 1.0. Le batteur utilisé est celui du LNH avec 56 pelles de 0.40 m de large. Des murs réfléchissants de 5 m de long sont disposés de chaque côté du batteur. La profondeur d'eau est fixée à 0.60 m. On cherche à générer une houle régulière monodirectionnelle oblique de direction 30° et de période 1 s. Les élévations de surface libre et les hauteurs seront normalisées par la hauteur de houle théorique.

La figure 6 illustre les champs d'élévation de surface libre au même instant produits par les trois méthodes de calcul de mouvements du batteur. Les champs de hauteur de houle normalisée, ainsi que les profils à 3, 5 et 7 m du batteur, obtenus pour les méthodes Snake principe, Corner reflection et Dalrymple sont présentés sur les figures 7, 8 et 9 respectivement.

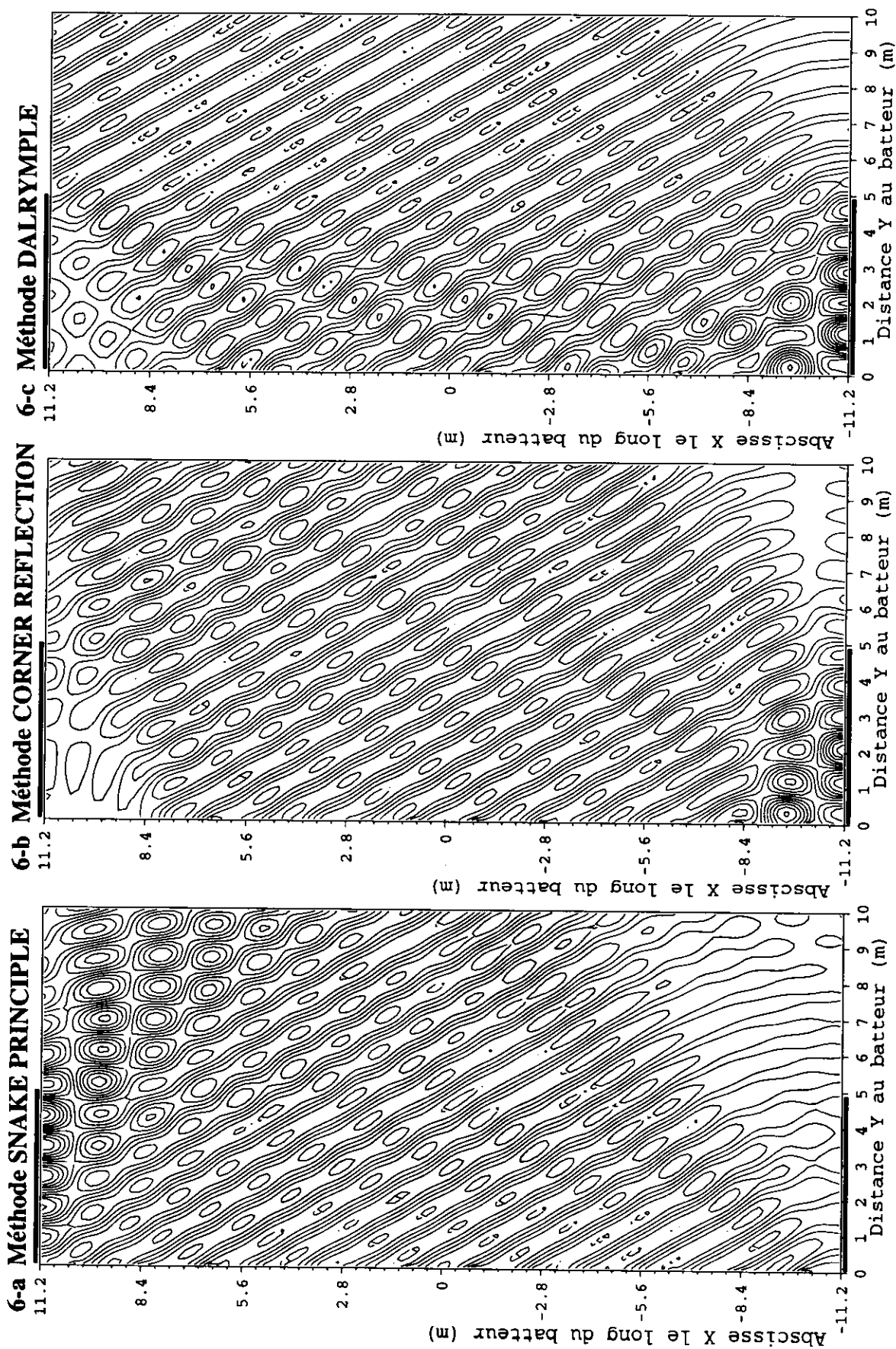
— méthode Snake principe : Comme attendu, cette méthode n'apparaît pas adaptée pour ce cas avec murs réfléchissants. Sur la figure 6-a, on observe que la houle générée par les premières pelles se réfléchit sur le mur d'abscisse  $x=11.2$  m et il se forme dans cette partie de la cuve une zone de clapotis gaufré, avec une agitation relative qui varie entre 0 et 2. Dans la partie opposée de la figure 6-a (près du mur d'abscisse  $x=-11.2$  m), la diffraction provoque une décroissance et une inhomogénéité de la houle. Les profils de la figure 7 indiquent que la houle est très peu homogène à une distance de 5 m du batteur et que la longueur utile ne dépasse pas une dizaine de mètres à cette distance.

— méthode Corner reflection : Le champ de houle calculé avec cette méthode apparaît sur la figure 6-b nettement meilleur que le précédent. Près du mur d'abscisse  $x=11.2$  m, on remarque que les premières pelles ont été désactivées et la houle locale ne résulte que de la diffraction de la houle générée par les pelles suivantes. Près du mur d'abscisse  $x=-11.2$  m, la superposition des houles directe et indirecte provoque un clapotis gaufré. Par rapport à la méthode précédente, la zone utile apparaît plus étendue vers la partie inférieure de la figure. Les profils de la figure 8 font apparaître une houle plus homogène à une distance de 5 m du batteur, mais les variations spatiales de hauteur de houle sont encore importantes, du fait de la non-prise en compte des effets de la diffraction, en particulier aux extrémités du profil.

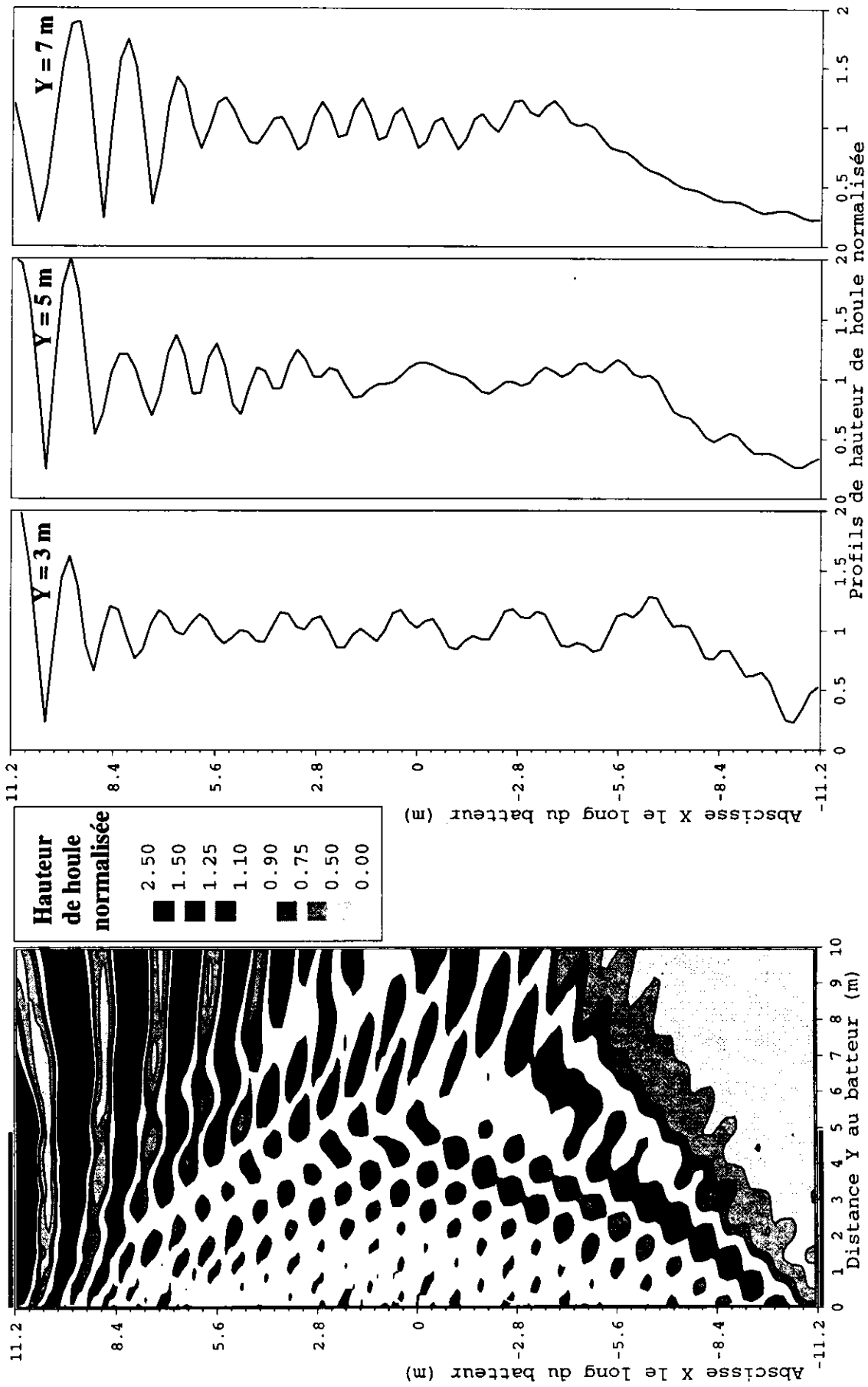
— méthode de Dalrymple : le champ de houle de la figure 6-c présente les mêmes caractéristiques générales que celui de la figure 6-b, mais il apparaît de qualité supérieure. Les crêtes de houle sont rectilignes et sur une plus grande distance. Le champ de hauteur de houle normalisée de la figure 9 indique que la zone où la houle est comprise à  $\pm 10\%$  de la hauteur visée (zone en blanc) est très étendue au-delà des murs réfléchissants. Les profils de hauteur de houle à 5 et 7 m du batteur confirment cet état de fait et font clairement ressortir le gain en homogénéité spatiale par rapport à la méthode précédente.

La figure 10 illustre les mouvements du batteur produits par les trois méthodes sur ce cas de simulation. Les positions des différentes pelles sont représentées à cinq instants au cours d'une période. On retrouve pour la méthode Snake principe un mouvement progressif des ondulations du

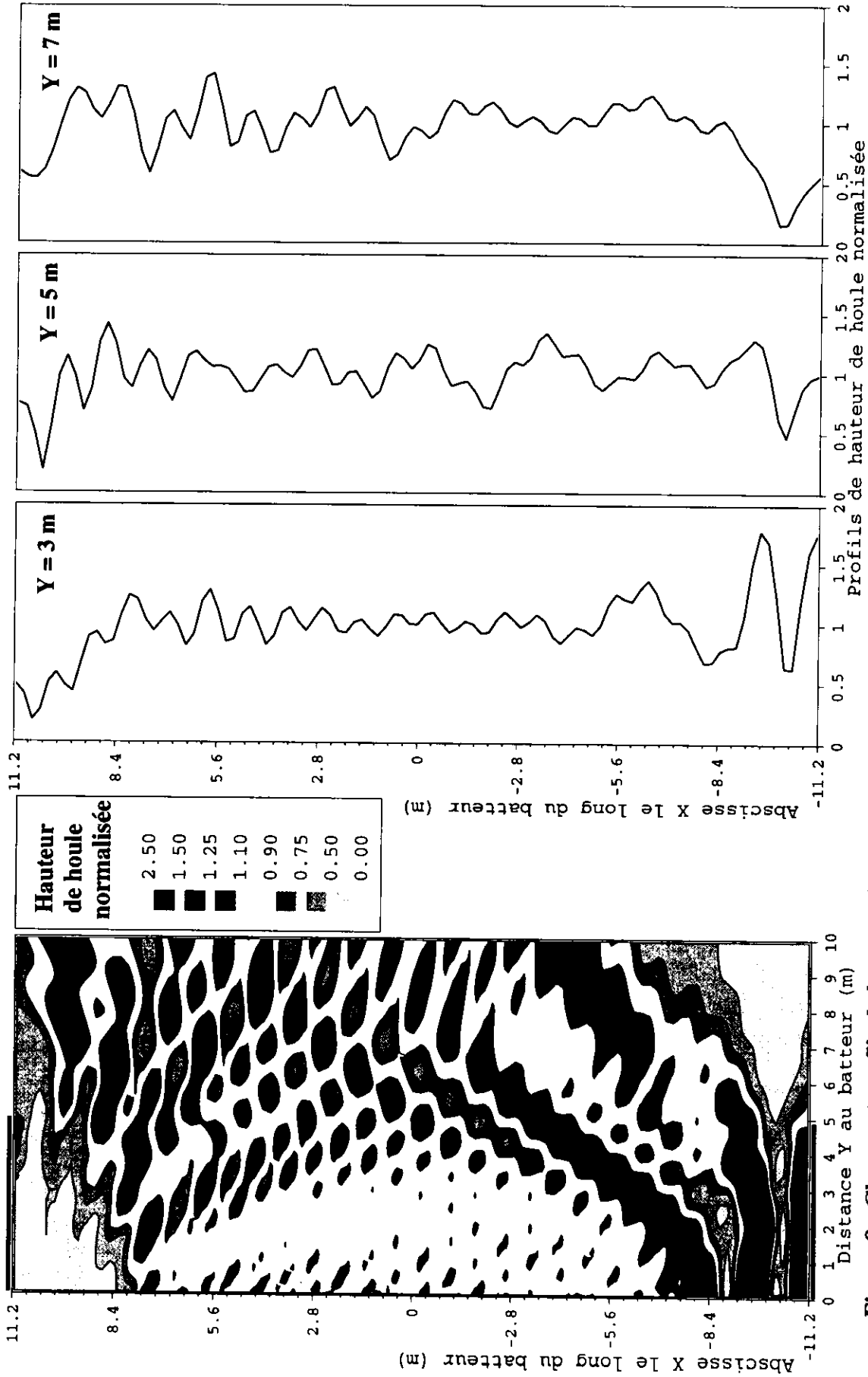




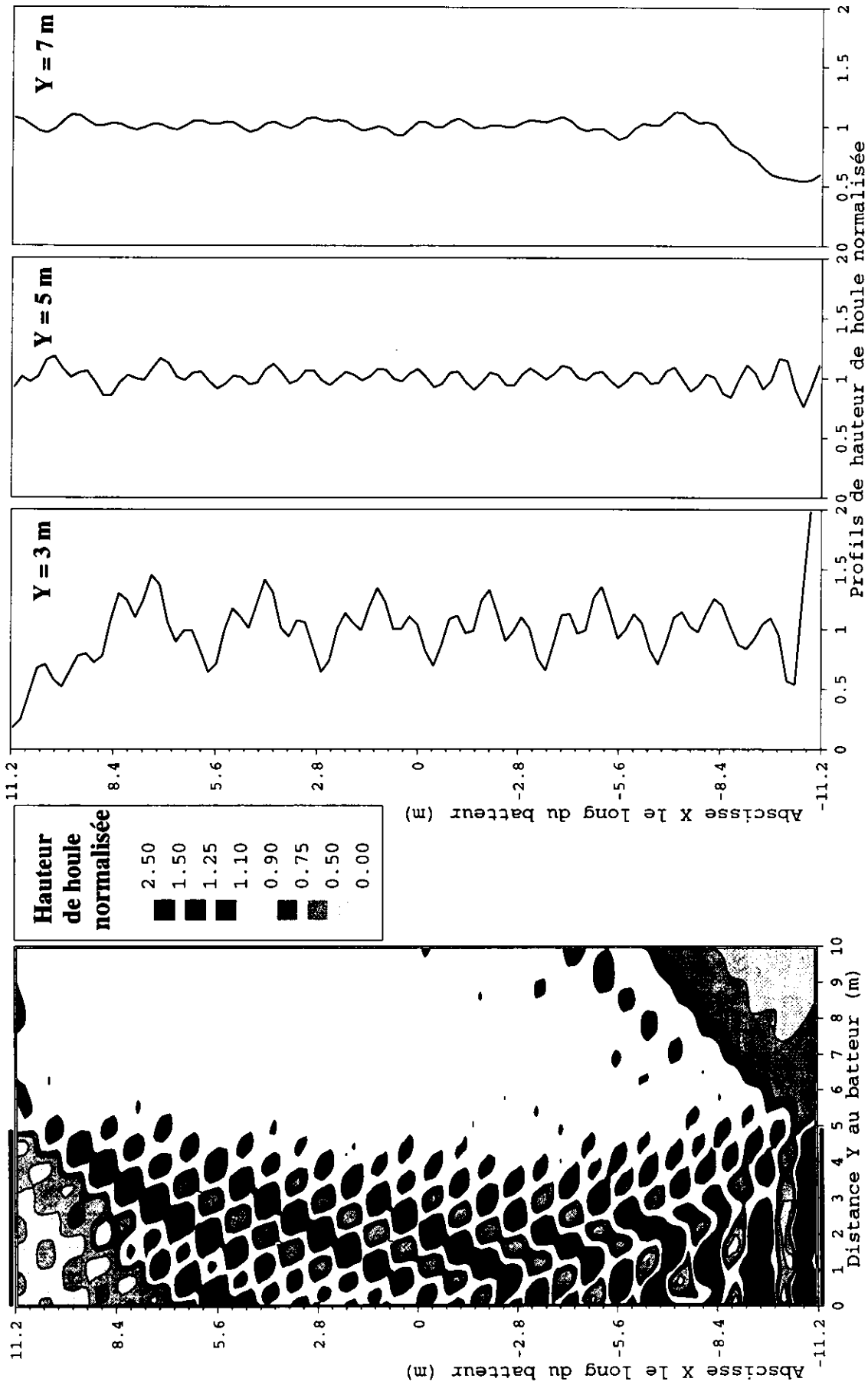
**Figure 6 : Champs d'élevation de surface libre calculés avec les trois méthodes pour les mouvements du batteur. (Profondeur 0.60 m ; Période 1 s ; Direction 30 deg ; Murs réfléchissants 5 m de long)**



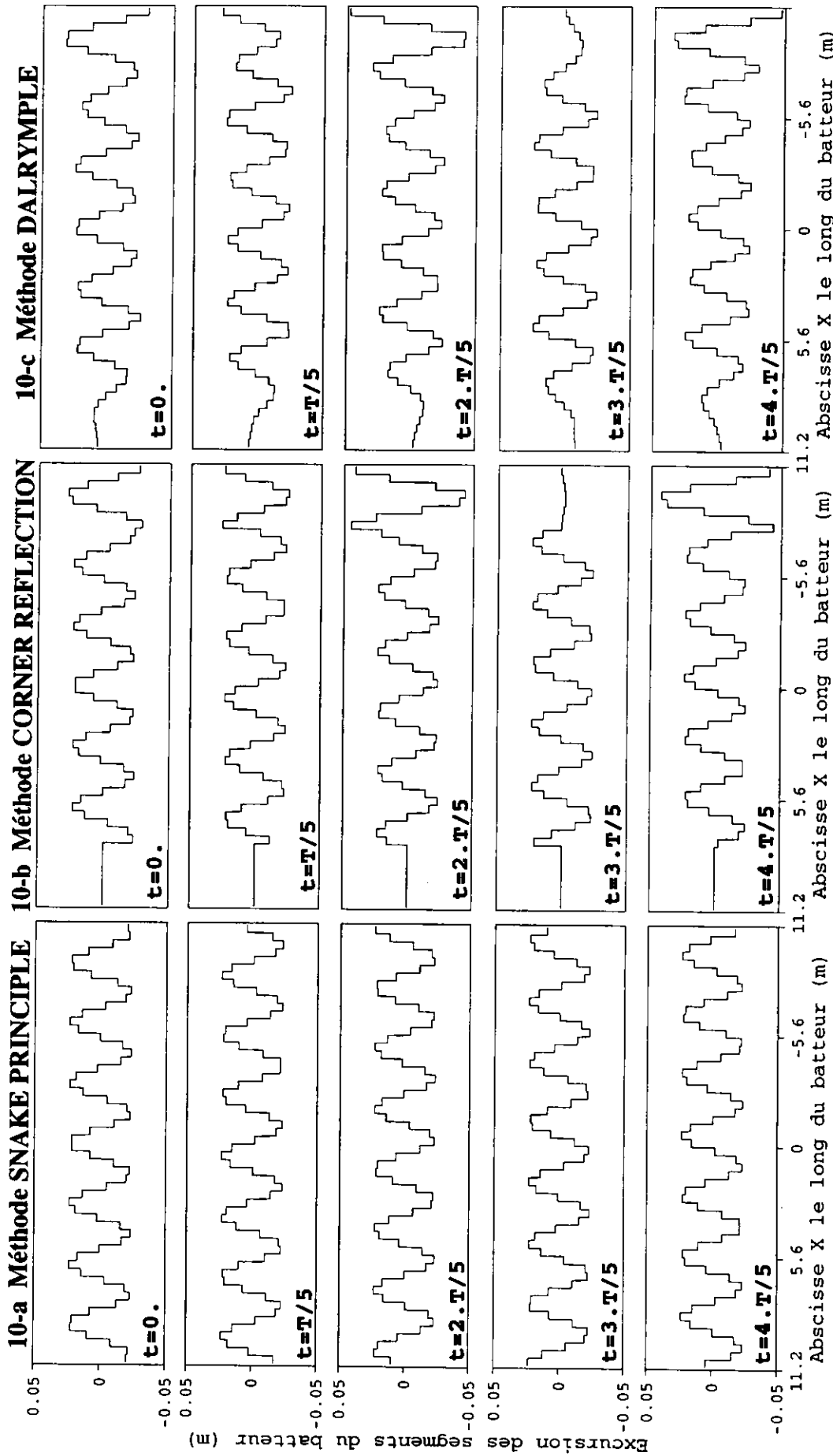
**Figure 7 : Champ et profils de hauteur de houle normalisée calculés avec méthode SNAKE PRINCIPLE pour le batteur.**  
 (Profondeur 0.60 m ; Période 1 s ; Direction 30 deg ; Murs réfléchissants 5 m de long)



**Figure 8 :** Champ et profils de hauteur de houle normalisée calculés avec méthode CORNER REFLECTION pour le batteur. (Profondeur 0.60 m ; Période 1 s ; Direction 30 deg ; Murs réfléchissants 5 m de long)



**Figure 9 :** Champ et profils de hauteur de houle normalisée calculés avec méthode DALRYMPLE pour le batteur. (Profondeur 0.60 m ; Période 1 s ; Direction 30 deg ; Murs réfléchissants 5 m de long)



**Figure 10 : Mouvements du générateur de houle segmenté calculés par les trois méthodes (positions à différents instants). (Profondeur 0.60 m ; Période 1 s ; Hauteur 0.10 m ; Direction 30 deg ; Murs réfléchissants 5 m de long)**

batteur-serpent. Pour la méthode Corner reflection, les premières pelles restent immobiles alors que les dernières ont un mouvement d'amplitude double par rapport à celles du milieu qui ont conservé un mouvement serpent classique. Avec la méthode Dalrymple, le mouvement général des pelles est voisin de celui issu de la méthode précédente, mais des différences apparaissent, en particulier aux deux extrémités du batteur. Il n'y a plus de pelles immobilisées : même les premières pelles participent à la génération pour compenser les effets de la diffraction.

## 5. CONCLUSIONS - PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT

Les programmes PHISAX 1.0 et BATTOR 1.0 présentés dans cette étude ont permis d'atteindre un premier niveau de modélisation numérique d'une cuve à houle directionnelle. Les résultats obtenus s'avèrent satisfaisants tant au niveau du calcul de champs de houle —même si cette première version en houle linéaire sur fond plat est relativement simple— que du calcul des mouvements du batteur. Ce dernier point apparaît revêtir une certaine importance, car des différences sensibles apparaissent dans les caractéristiques de la houle générée selon la méthode employée.

En ce qui concerne le programme PHISAX de calcul de champs de houle multidirectionnelle dans la cuve, les principaux axes de recherche actuels concernent :

- une validation étendue pour des houles aléatoires et multidirectionnelles.
- la prise en compte de frontières partiellement réfléchissantes, modélisant mieux le comportement des amortisseurs de houle et des ouvrages côtiers.
- la possibilité de traiter des fonds irréguliers, dans le but de reproduire des géométries côtières quelconques.
- la possibilité de modéliser des houles —faiblement et/ou fortement— non-linéaires.

En ce qui concerne les méthodes de calcul de mouvements du batteur-serpent, les développements déjà réalisés permettent de disposer, avec la méthode de Dalrymple, d'un outil de tout premier plan pour le contrôle de la houle générée. Des essais complémentaires en cuve restent cependant nécessaires pour confirmer les observations réalisées sur modèle numérique et quantifier plus précisément les limites d'utilisation de cette méthode. Mizuguchi [9] a récemment proposé une adaptation de la méthode Snake principe au cas où le générateur de houle est de longueur finie. Après évaluation, cette méthode pourra être intégrée dans le programme BATTOR.

Outre l'aide à la définition, la mise en place et l'exploitation d'essais en cuve à houle multidirectionnelle qu'apporte cette modélisation numérique, une des principales applications envisagées concerne l'étude numérique préalable de la possibilité d'implanter l'absorption active en houle multidirectionnelle.

## 6. RÉFÉRENCES

- [1] ALLILAIRE J., BENOIT M., 1994, "Optimisation en canal à houle d'un absorbeur à plaques poreuses verticales", Proc. IIIèmes Journées Nat. Génie Civil Génie Côtier, Sète (France).
- [2] BENOIT M., 1992, "Practical comparative performance survey of methods used for estimating directional wave spectra from heave-pitch-roll data". Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), pp 62-75, Venice (Italy).
- [3] BENOIT M., TEISSON C., 1994, "Laboratory comparison of directional wave measurement systems and analysis techniques", Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), Kobe (Japan).
- [4] COINTE R., 1993, "Peut-on générer de la houle multidirectionnelle 'réaliste' dans un bassin de traction ?", Proc. 4èmes Journées de l'Hydrodynamique, Nantes (France).
- [5] DALRYMPLE R.A., 1989, "Directional wavemaker theory with sidewall reflection", Journal of Hydraulic Research, vol 27, N°1.
- [6] FUNKE E.R., MILES M.D., 1987, "Multidirectional wave generation with corners reflectors", Technical Report HY-021, National Research Council Canada.
- [7] HIRAISHI T., MANSARD E.P.D., MILES M.D., FUNKE E.R., ISAACSON M., 1991, "Numerical and experimental validation for a diffraction model of directional wave generation", Technical Report HY-037, National Research Council Canada.
- [8] ISAACSON M., 1989, "Prediction of directional waves due to a segmented wave generator", Proc. 23rd IAHR Congress, Ottawa, Ontario (Canada), Vol. C, pp. 435-442.
- [9] MIZUGUCHI M., 1994, "Uniformity of wave field produced by multi-directional wave maker". Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. (ASCE), Kobe (Japan).