



**HAL**  
open science

# Impact de brise-lames détachés poreux émergeants sur l'énergie de la houle à la côte

G. Arnaud, Vincent Rey, Julien Touboul, Damien Sous

► **To cite this version:**

G. Arnaud, Vincent Rey, Julien Touboul, Damien Sous. Impact de brise-lames détachés poreux émergeants sur l'énergie de la houle à la côte. Dignes 2019, Mar 2019, Aix-en-Provence, France. 10.5281/zenodo.2348986 . hal-02082184

**HAL Id: hal-02082184**

**<https://hal.science/hal-02082184>**

Submitted on 10 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Impact de brise-lames détachés poreux émergents sur l'énergie de la houle à la côte

G. Arnaud<sup>1</sup>, V. Rey<sup>1</sup>, J. Touboul<sup>1</sup>, D. Sous<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mediterranean Institute of Oceanography, Université de Toulon, gwendoline.arnaud@univ-tln.fr

## Résumé

Les brise-lames détachés sont une solution largement utilisée pour l'aménagement et la protection des plages. Disposés régulièrement le long de la côte, ils constituent des barrières à la propagation de la houle, et atténuent son impact à la côte par réflexion et diffraction entre deux ouvrages successifs, grâce à un choix adéquat de la taille des ouvrages et de leur espacement. La zone abritée par le brise-lame est souvent comblée avec du sable, formant un tombolo. Les ouvrages poreux sont de plus en plus considérés, présentant d'un point de vue environnemental les avantages de favoriser le développement de la biodiversité et de maintenir une circulation des masses d'eau pour une meilleure qualité de l'eau.

Le travail présenté ici consiste en l'étude d'un brise-lame poreux, constitué d'un réseau dense de cylindres verticaux émergents. Des expériences sur l'hydrodynamique ont été menées en 3D dans le bassin d'essai de SeaTech, elles sont comparées à des modèles numériques basés sur des formulations intégrales pour les potentiels des vitesses. La symétrie du système expérimental permet de considérer le cas d'étude comme celui d'un ensemble de brise-lames régulièrement espacés le long de la côte.

Du fait de la porosité du brise-lame, une partie de la houle continue à se propager avec dissipation à travers la structure, modifiant significativement les conditions d'agitation à l'abri de la structure. L'énergie de la houle est plus homogène le long de la côte, la diffraction, moins importante, étant compensée par un flux à travers la structure. Pour certaines conditions de houle, des interférences peuvent apparaître non seulement en fonction de la distance entre deux brise-lames successifs, comme pour les ouvrages imperméables classiques, mais aussi au niveau de la structure poreuse, augmentant la dissipation de l'énergie des vagues.

## Mots clés

Brise-lames ; milieu poreux ; réflexion ; réfraction-diffraction

## Abstract

Detached breakwaters are a classical solution for beach

management and protection. When they are regularly disposed along the coast, they constitute barriers to wave propagation, and attenuate wave effects on the coast by reflection and diffraction between two successive structures, thanks to a suitable choice of the size of the structures and their spacing. The area sheltered by the breakwater is often filled with sand, forming a tombolo. Porous structures are increasingly considered, presenting from an environmental point of view the advantages of promoting the development of biodiversity and maintaining a circulation of water bodies for better water quality.

The work presented here is dedicated to the study of a porous breakwater, consisting of a dense array of emergent vertical cylinders. Experiments about hydrodynamic were carried out in 3D in the SeaTech test basin, and compared to numerical models based on integral formulations of velocity potentials. The symmetry associated with the basin width allows to consider the study case as that of a set of regularly spaced breakwaters along the coast.

Due to the porosity of the breakwater, part of the waves continues to propagate with dissipation through the structure, changing significantly the agitation conditions downwave the structure. The wave energy is more homogeneous along the coast, the diffraction, less important, being compensated by a flow through the structure. For particular wave conditions, interference may occur not only depending on the distance between two successive breakwaters, as for conventional impervious structures, but also on the porous structure, increasing the dissipation wave energy.

## Key Words

Breakwaters; porous medium; reflection; refraction-diffraction;

## Introduction

Les brise-lames au large des plages sont largement utilisés dans le but de protéger le littoral qui a un attrait croissant d'un point de vue socio-économique et écologique. Depuis une trentaine d'années, les experts du domaine ont mis en avant les avantages des réseaux de brise-lames selon les situations. En effet, ce type de réseau a la capacité de diminuer l'énergie de la houle à l'approche des plages tout en contribuant au maintien de la qualité de l'eau derrière les brise-lames.

Cependant, depuis quelques années l'action des brise-lames, notamment la formation de tombolo en aval des ouvrages, est remise en question au profit de structures poreuses. En effet, un réseau de brise-lames poreux apporte des améliorations d'un point de vue environnemental, en favorisant la biodiversité à l'aide d'une meilleure circulation des masses d'eau. De plus, d'un point de vue hydro-sédimentaire les ouvrages poreux permettent de conserver un trait de côte plus

homogène en diminuant le phénomène de diffraction tout en dissipant l'énergie des vagues.

De nombreuses études ont émergé dans les années 90 dans le but de mieux comprendre l'influence des réseaux de brise-lames sur le trait de côte [1]–[4]. Chacune de ces études a pour vocation de présenter des critères de conception de ces réseaux de brise-lames particulièrement en se basant sur les dimensions d'un brise-lame (longueur et largeur), l'écart entre deux structures successives dans un réseau et leurs distances à la côte.

Ces travaux se basent sur des modèles théoriques de réfraction-diffraction pour les premiers [2], [3] ou sur un modèle hydro-sédimentaire (modèle spectral de vague) pour l'étude, plus récente, de Vaidya et al. [5]. Ces derniers s'intéressent directement à l'évolution du trait de côte derrière un brise-lame isolé et un réseau de brise-lames. Dans la littérature, il existe aussi quelques études où des formules de conception sont proposées dans le cas de brise-lames perméables, tels que des caissons Jarlan [6].

Dans le présent article, les expressions générales des potentiels des vitesses sont résolues pour chacun des milieux finis ou semi-infinis constituant le milieu de propagation de l'onde. La méthode de résolution consiste à résoudre les conditions de continuité des vitesses et des pressions, sous forme intégrale, aux différentes interfaces se présentant entre les domaines. La deuxième partie de l'article consiste à valider le modèle ainsi défini par les résultats d'une campagne expérimentale effectuée en bassin d'essai.

Les applications présentées sont axées sur la paramétrisation d'un réseau de brise-lames, notamment en s'intéressant aux dimensions des structures et aux écarts entre deux ouvrages consécutifs, de façon à comparer les résultats entre des ouvrages poreux et imperméables. Dans la présente étude, les effets de pente sont négligés, les phénomènes de réflexion, réfraction ou diffraction sont dus ici à la présence de la structure poreuse.

### Modèle théorique

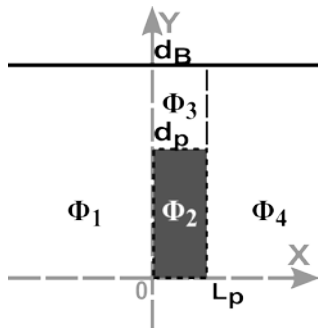


FIGURE 1: SCHÉMA DE LA DEMI-LARGEUR DU BASSIN CONSIDÉRÉ DANS LE MODÈLE

Dans le modèle théorique, on considère une onde incidente dans la direction Ox, perpendiculaire à la côte, se propageant vers les x positifs. L'onde est supposée de faible amplitude et l'écoulement est considéré dérivant d'un potentiel des vitesses.

### Expression des potentiels des vitesses

Les expressions des potentiels de vitesses sont alors présentées dans un repère cartésien (O, x, y, z). Oy correspond à la direction transversale du bassin où y=0 est l'axe médian. Oz étant l'axe vertical orienté vers le haut avec z=0 correspondant à la position de la surface libre au repos.

En utilisant les propriétés de symétrie par rapport au plan y=0, le problème est résolu dans le demi-espace y>0.

L'expression générale du potentiel des vitesses pour les différents domaines considérés  $\Phi_j$ , j=1,...,4 en l'absence de dissipation s'écrit de la façon suivante :

$$\Phi_j(x, y, z, t) = \cosh[k_j(z+h)] \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[ A_{jn}^- e^{-ik_{jxn}} + A_{jn}^+ e^{+ik_{jxn}(x-L)} \right] \times \cos[k_{jyn}(y-d_{jm})] e^{i\omega t} \quad (1)$$

où  $k_{jyn} = \frac{n\pi}{d_{jM} - d_{jm}}$  qui est défini pour des frontières y=d<sub>jm</sub> et y=d<sub>jM</sub> imperméables (pour j=1, 3 et 4) ou perméables (pour j=2) de façon à satisfaire aux conditions de vitesse normale nulle.

De plus, comme  $\nabla^2 \Phi_j = 0$ ,  $k_{jxn} = \sqrt{(k_j^2 - k_{jyn}^2)}$ . Le vecteur d'onde  $k_j$  étant donné par la relation de dispersion suivante (Eq. 2) avec  $k_{jxn} = k_j \cos \theta_n$  et  $k_{jyn} = k_j \sin \theta_n$

$$\omega^2 S = g k_j \tanh(k_j h) \quad (2)$$

où S est la réactance, définie par  $S = 1 + \frac{C_m(\gamma - 1)}{\gamma}$  avec  $\gamma$

la porosité du milieu et  $C_m$  un coefficient de masse ajoutée [7].

### Méthode de résolution

La méthode de résolution est décrite en détail dans Arnaud (2016) [8]. Le système d'équation à résoudre est le système des conditions de continuités des vitesses et des pressions aux interfaces (x=0 et x=L) qui imposent :

$$\begin{cases} \varphi_i = S \varphi_j \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} = \gamma \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \end{cases} \text{ pour } 0 < y < d_p \text{ et } -h < z < 0 \quad (3)$$

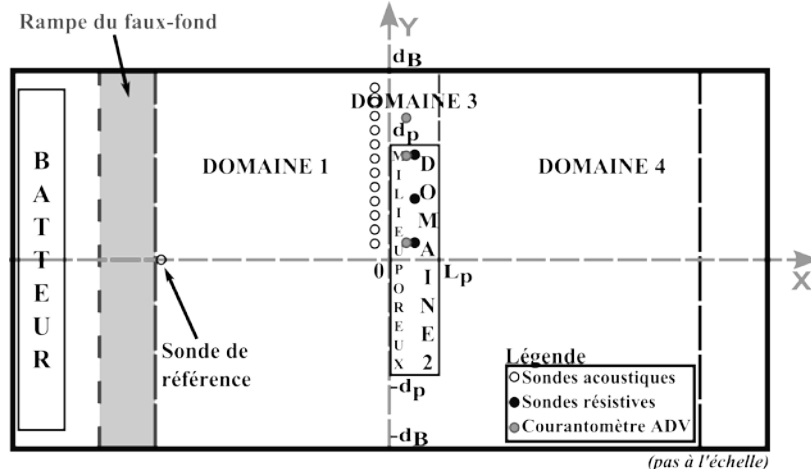


FIGURE 2: DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

avec  $i$  l'indice correspondant aux domaines 1 et 3 et  $j$  l'indice correspondant au domaine 2 qui est le milieu poreux.

$$\begin{cases} \varphi_i = \varphi_j \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_j}{\partial x} \end{cases} \quad \text{pour } d_p < y < d_B \text{ et } -h < z < 0 \quad (4)$$

avec  $i$  l'indice correspondant aux domaines 1 et 3 et  $j$  l'indice correspondant au domaine 3.

En  $y=d_p$ , les équations à résoudre sont les suivantes :

$$\begin{cases} S\varphi_2 = \varphi_3 \\ \gamma \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \end{cases} \quad \text{pour } 0 \leq x \leq L_p \quad (5)$$

La méthode numérique de résolution consiste à écrire ces conditions sous forme intégrale, basée sur le fait que pour toute fonction  $f$ ,  $f=0$  revient à écrire  $f \cdot g = 0$ ,  $\forall g$ . Le choix des fonctions de base «  $g$  » peut être a priori arbitraire, ici  $g=1$ . Pour les conditions limites en  $x=0$  et  $x=L_p$ , on utilise les fonctions de base  $\psi_{j,n}$ ,  $n=0, \dots, P$ . Pour les conditions limites en  $y=d_p$ , on utilise les fonctions

$$Ch_n(x) = \cosh(l_n x) \text{ avec } l_n = \frac{n\pi}{L_p}, \text{ qui sont des}$$

fonctions orthogonales solutions de  $\int_0^{L_p} Ch_n Ch_m dx = 0$  si

$$n \neq m.$$

L'intégrale suivant l'axe  $z$  fait apparaître les constantes  $K$  et  $K_p$  définies par :

$$K = \int_{-h}^0 \cosh[k(z+h)] dz$$

$$\text{et } K_p = \int_{-h}^0 \cosh[k_p(z+h)] dz$$

Les conditions de flux et pression en  $x=0$  s'écrivent alors de la façon suivante :

$$\begin{aligned} K \int_0^{d_B} \varphi_1 \psi_{1n}(y) dy &= SK_p \int_0^{d_p} \varphi_2 \psi_{1n}(y) dy \\ &+ K \int_{d_p}^{d_B} \varphi_3 \psi_{1n}(y) dy \end{aligned} \quad (6)$$

*pour  $n = 0, \dots, P$*

$$\begin{aligned} K \int_0^{d_B} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \psi_{1n}(y) dy &= \gamma K_p \int_0^{d_p} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \psi_{1n}(y) dy \\ &+ K \int_{d_p}^{d_B} \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \psi_{1n}(y) dy \end{aligned} \quad (7)$$

*pour  $n = 0, \dots, P$*

En  $x=L_p$  :

$$\begin{aligned} SK_p \int_0^{d_p} \varphi_2 \psi_{4n}(y) dy &+ K \int_{d_p}^{d_B} \varphi_3 \psi_{4n}(y) dy \\ &= K \int_0^{d_B} \varphi_4 \psi_{4n}(y) dy \end{aligned} \quad (8)$$

*pour  $n = 0, \dots, P$*

$$\begin{aligned} \gamma K_p \int_0^{d_p} \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} \psi_{4n}(y) dy &+ K \int_{d_p}^{d_B} \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} \psi_{4n}(y) dy \\ &= K \int_0^{d_B} \frac{\partial \varphi_4}{\partial x} \psi_{4n}(y) dy \end{aligned} \quad (9)$$

*pour  $n = 0, \dots, P$*

Enfin, en  $y=d_p$  :

$$SK_p \int_0^{L_p} \varphi_2 Ch_n(x) dx = K \int_0^{L_p} \varphi_3 Ch_n(x) dx \quad (10)$$

*pour  $n = 0, \dots, P$*

$$\gamma K_p \int_0^{L_p} \frac{\partial \varphi_2}{\partial y} Ch_n(x) dx = K \int_0^{L_p} \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} Ch_n(x) dx \quad (11)$$

*pour  $n = 0, \dots, P$*

Le flux d'énergie de la houle dans la direction longitudinale Ox, intégré sur la largeur 2d du bassin doit être conservé en l'absence de dissipation :

$$\left|A_{11}^{-}\right|^2 = \left|A_{11}^{+}\right|^2 + \left|A_{41}^{-}\right|^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{n_p} \left[ \left|A_{1n}^{+}\right|^2 + \left|A_{4n}^{-}\right|^2 \right] \quad (12)$$

### Validation du modèle

Cette section concerne la validation du modèle théorique décrit dans la section précédente à l'aide de données expérimentales obtenues par une campagne de mesures réalisée en bassin d'essai.

#### Dispositif expérimental

Les expériences ont été réalisées dans un bassin d'essai de longueur utile 10 m et de largeur efficace de 2.60 m (cf FIGURE 3, SeaTech, Université de Toulon). La hauteur d'eau maximale possible dans le bassin est de 1 m. Cette série d'expérience a permis de réaliser une cartographie de l'amplitude de la houle autour de l'obstacle considéré.

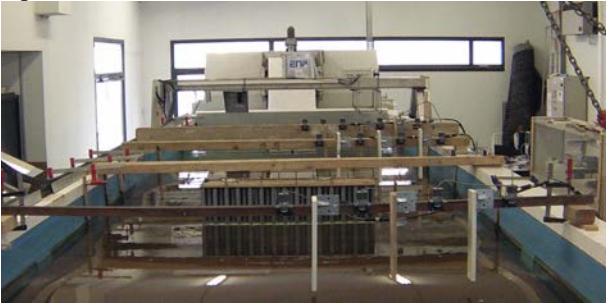


FIGURE 3: PHOTOGRAPHIE DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

#### Milieu poreux

Le milieu poreux considéré lors de ces mesures est un milieu poreux modèle constitué par un réseau de cylindres verticaux émergents (cf. FIGURE 4). Les cylindres, de diamètre  $D=0.032$  m, dans la structure sont disposés régulièrement selon 2 axes perpendiculaires faisant un angle de  $45^\circ$  avec l'axe transversal du bassin. Ce milieu poreux a une porosité  $\gamma$  égale à 0.7. Il a une longueur  $L=0.30$  m et une largeur  $2d_p=1.20$  m. Dans la présente étude, le milieu poreux était posé sur un faux fond de façon à garder une hauteur d'eau constante  $h=0.23$  m dans tout le bassin.

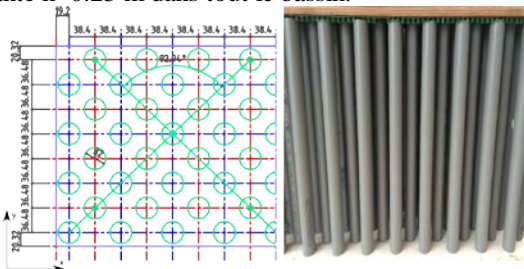


FIGURE 4: SCHÉMA (VUE DE DESSUS) ET PHOTOGRAPHIE (VUE DE CÔTÉ) DU MILIEU POREUX

#### Déploiement des capteurs et conditions d'expériences

Pour cette série d'expérience, la surface libre a été mesurée à l'aide de 13 sondes acoustiques synchrones avec une fréquence d'échantillonnage de 40 Hz (FIGURE 2). La cartographie de l'amplitude la houle a été réalisée selon un maillage régulier de 0.10 m par 0.10 m. 8 conditions de houle régulière ont été étudiées (

TABLEAU 1).

TABLEAU 1: CONDITIONS DE HOULES

Fréquences (Hz)	Amplitudes (m)		
1	0.010	0.015	0.020
1.5	0.010	0.015	0.020
1.8	0.010	0.015	

#### Validation

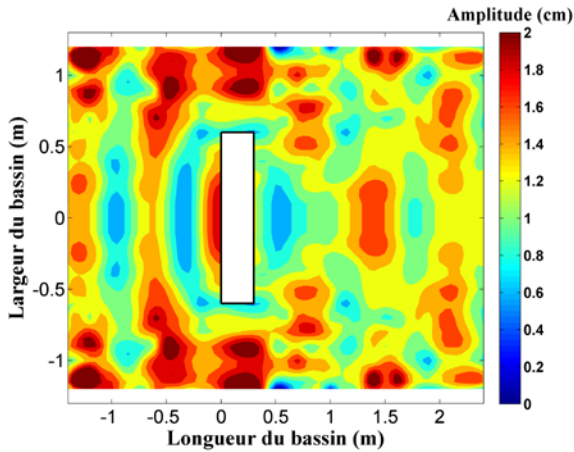
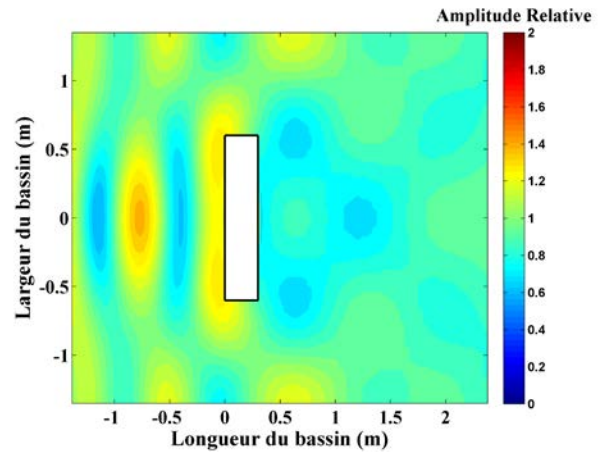
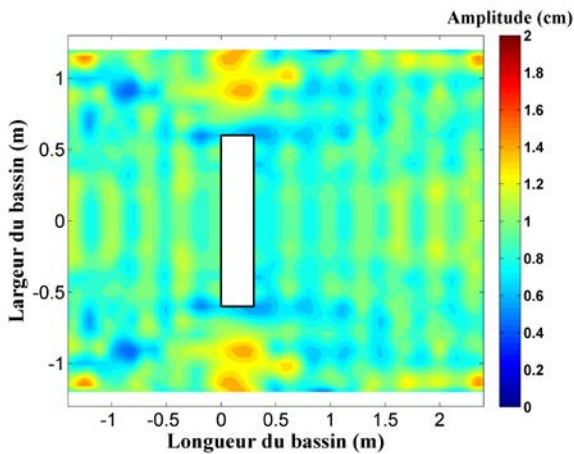
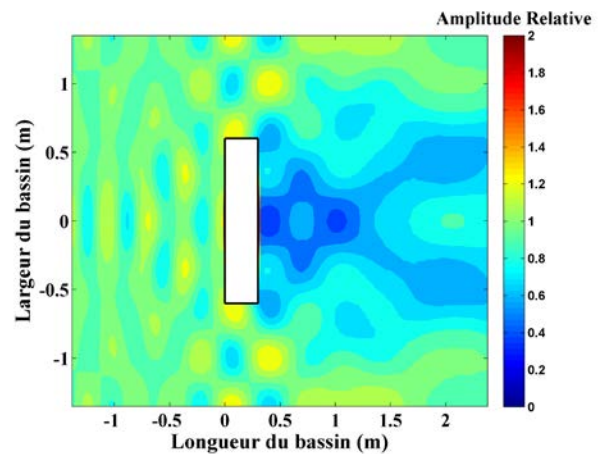
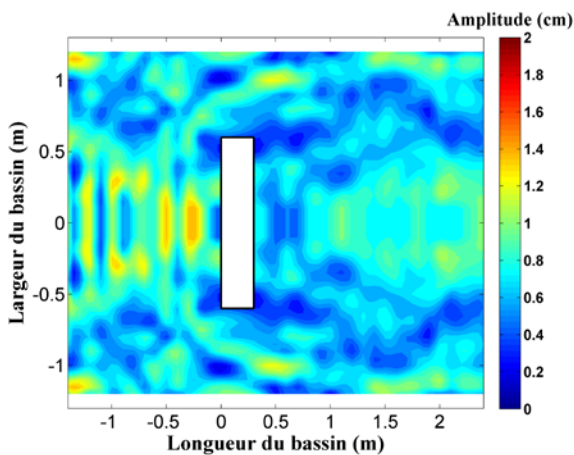
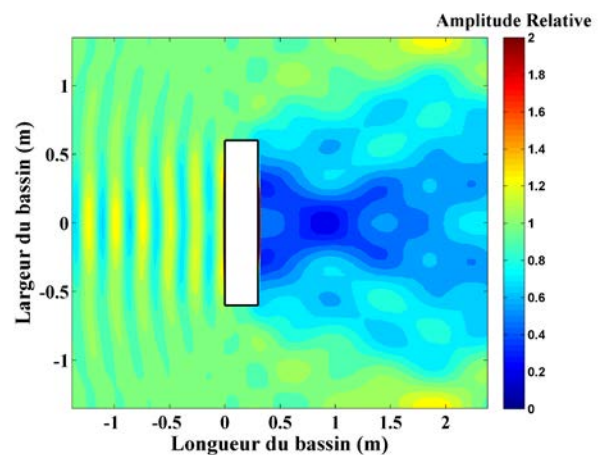
Les résultats des cartographies représentant les champs des amplitudes de la houle théorique (FIGURE 8 à FIGURE 10) sont comparés au même type de représentations des résultats expérimentaux (FIGURE 5 à FIGURE 7). Les 3 fréquences de houle étudiées dans le cadre de cette expérience sont  $f=1, 1.5$  et  $1.8$  Hz ce qui correspond à des longueurs d'onde à l'extérieur du milieu poreux  $\lambda=1.27, 0.67$  et  $0.48$  m. L'échelle des couleurs sur ces résultats représente l'amplitude normalisée par rapport à la sonde de référence placée à  $y=-1.40$  m en amont de la structure poreuse.

Le modèle a été paramétré de façon identique à une précédente étude réalisée en 2D [9] où le paramètre de dissipation  $n=20$  et le coefficient de masse ajoutée  $C_m = 0.3$  ont été déterminés expérimentalement.

Les comparaisons effectuées permettent d'observer une bonne concordance entre les résultats théoriques et expérimentaux. En effet, le modèle représente bien les motifs de réflexion et de réfraction-diffraction de la houle pour les 3 fréquences de houle présentées. De plus, nous observons une bonne concordance des ordres de grandeur de l'amplitude de la houle entre la théorie et les mesures. Plus précisément, en amont de la structure les extrema des amplitudes de la houle représentant le phénomène de réflexion par l'ouvrage sont bien représentés par le modèle. En aval de la structure les motifs sont aussi bien reproduits par la théorie, les quelques différences visibles, notamment dans la zone entre la structure et le bord du bassin, peuvent s'expliquer par les nombreux effets de bord présents dans les résultats expérimentaux. Ces mêmes effets sont d'autant plus importants sur les côtés de la structure, où les mesures sont incertaines à cause de multiples interférences entre les sondes acoustiques utilisées relativement proches les unes des autres.

En ce qui concerne la fréquence  $f=1.5$  Hz, nous pouvons mettre en évidence un phénomène de résonance de l'onde avec la largeur du milieu poreux, la largeur étant égale au double de la longueur d'onde. Cette résonance liée à la

largeur de l'ouvrage s'ajoute à la résonance due à la largeur du bassin. Les résultats entre la théorie et les mesures concordent, prouvant ainsi une bonne prédiction par le modèle théorique des différents phénomènes de résonance possible en fonction des conditions de houle et des paramètres de dimensionnement des structures considérées.

FIGURE 5: AMPLITUDE MESURÉE  $f=1$  Hz  $a=0.010$  mFIGURE 8: AMPLITUDE THÉORIQUE  $f=1$  HzFIGURE 6: AMPLITUDE MESURÉE  $f=1.5$  Hz  $a=0.015$  mFIGURE 9: AMPLITUDE THÉORIQUE  $f=1.5$  HzFIGURE 7: AMPLITUDE MESURÉE  $f=1.8$  Hz  $a=0.010$  mFIGURE 10: AMPLITUDE THÉORIQUE  $f=1.8$  Hz



## Applications

### Ouvrages imperméables versus structures poreuses

En termes d'application nous étudions en particulier les effets des écarts  $\Delta$  entre 2 brise-lames successifs dans un réseau disposé parallèlement au trait de côte.

Dans le cas présent, nous avons choisi une fréquence  $f=1.4$  Hz soit  $\lambda=0.78$  m pour une hauteur d'eau  $h=0.30$  m. Concernant les dimensions, la demi-largeur de la structure poreuse est constante et est choisie  $d_p=0.5$  m de même que la longueur  $L=0.50$  m. Nous avons choisi de diminuer la « longueur de dissipation » en modifiant la valeur du coefficient de dissipation par rapport au cas de validation de façon à se rapprocher d'avantage de ce qui est habituellement utilisé en génie côtier, soit  $n=5$  qui dépend dans la présente étude du diamètre des cylindres dans la structure. Dans la présente étude, 3 valeurs de l'espace entre 2 segments ont été étudiés  $\Delta=0.44, 0.5$  et  $0.54$ . Ces valeurs sont choisies aux alentours de  $0.5$  dans le but de respecter les critères définis dans la littérature et particulièrement celui de O. Toyoshima [10] :  $\lambda/2 < \Delta < 3\lambda/2$ .

L'analyse des résultats (FIGURE 11 à FIGURE 16) porte aussi sur une comparaison entre des ouvrages poreux comme définis précédemment et des segments imperméables comme principalement utilisés actuellement en génie côtier.

Dans les cas où ce sont des brise-lames poreux qui sont considérés (FIGURE 11 à FIGURE 13), l'écart entre les segments semble faiblement impacter le motif de réflexion en amont des ouvrages. Les valeurs de l'amplitude de la houle sont relativement similaires quel que soit l'écart considéré dans la présente étude. En ce qui concerne le côté aval d'un segment poreux, on tend à observer une amplitude plus homogène pour la plus grande valeur de  $\Delta$ .

Quels que soient les paramètres pris en compte pour paramétrer le réseau, nous pouvons observer une baisse significative de l'amplitude juste derrière l'ouvrage. Cette dernière vaut environ  $0.5$ . En ce qui concerne l'amplitude juste derrière la structure imperméable sa valeur est inférieure à  $0.3$ . Lorsque l'on compare une structure poreuse à un ouvrage imperméable pour un écart entre les segments constant, la réflexion de la houle est nettement plus importante de même que le phénomène de réfraction-diffraction qui tend à créer un motif hétérogène de l'amplitude de la houle en aval de l'ouvrage. Cette hétérogénéité est responsable de la formation de tombolo ou encore de la formation d'un trait de côte inhomogène avec une succession de zones d'accrétion et d'érosion qui ne sont pas forcément souhaitées.

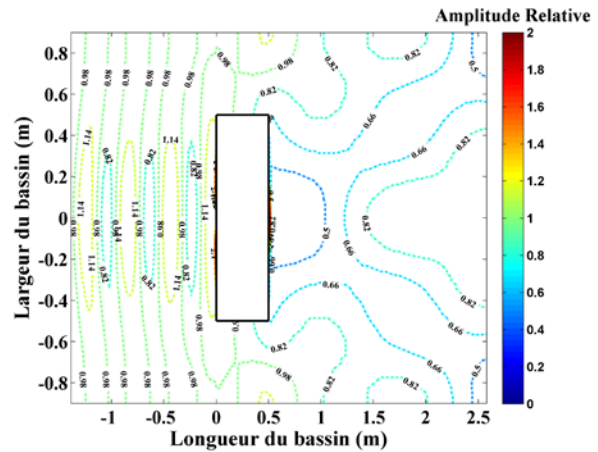


FIGURE 11: STRUCTURE POREUSE  $f=1.4$  Hz,  $\Delta=0.44$ ,  $kd=7.22$

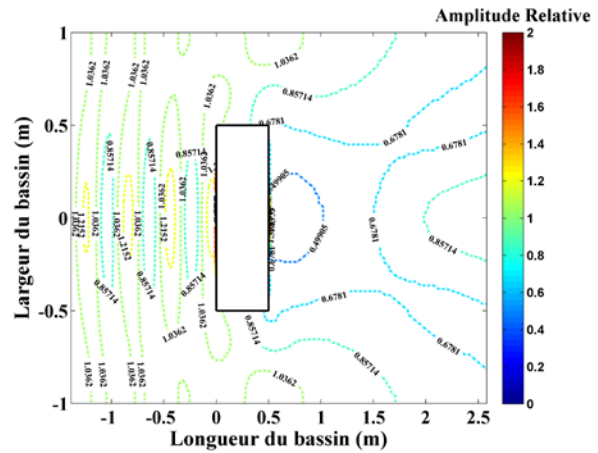


FIGURE 12: STRUCTURE POREUSE  $f=1.4$  Hz,  $\Delta=0.50$ ,  $kd=8.02$

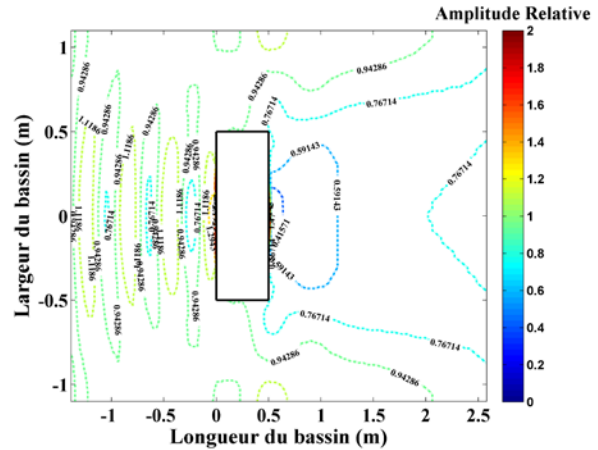


FIGURE 13: STRUCTURE POREUSE  $f=1.4$  Hz,  $\Delta=0.54$ ,  $kd=8.82$

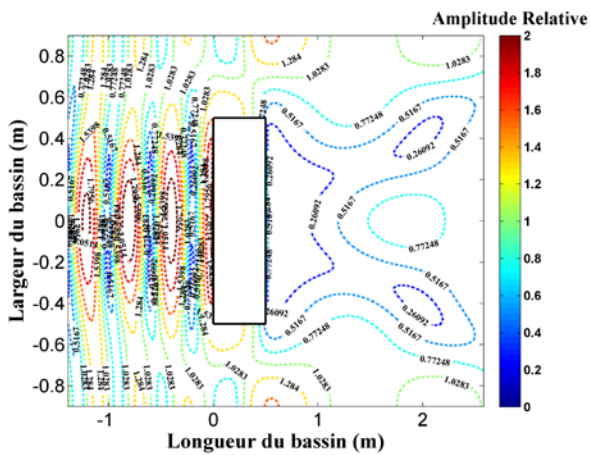


FIGURE 14: OUVRAGE IMPERMÉABLE  $f=1.4$  Hz,  $\Delta=0.44$ ,  $kd=7.22$

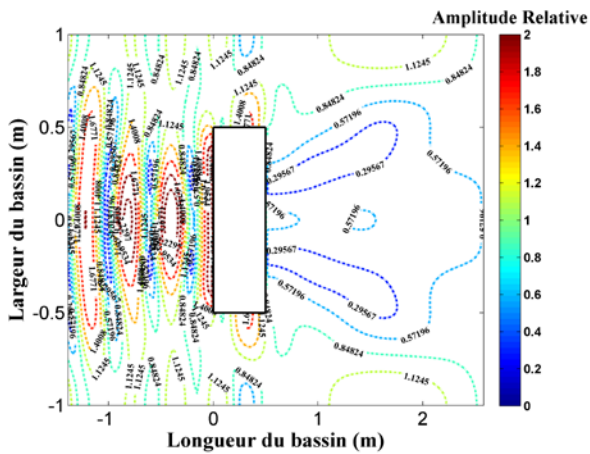


FIGURE 15: OUVRAGE IMPERMÉABLE  $f=1.4$  Hz,  $\Delta=0.50$ ,  $kd=8.02$

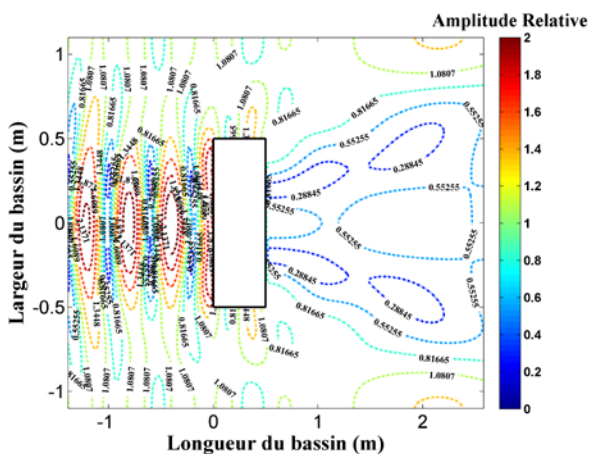


FIGURE 16: OUVRAGE IMPERMÉABLE  $f=1.4$  Hz,  $\Delta=0.54$ ,  $kd=8.82$

### Variabilité longitudinale de l'amplitude en aval de l'ouvrage

De façon à mettre en évidence les remarques faites dans la section précédente, des profils longitudinaux de l'amplitude sont réalisés en  $y=1.5$  m en aval du segment considéré. Dans cette section, quatre valeurs de  $\Delta$  sont étudiées, et pour chacun des cas les structures poreuses et imperméables seront comparées (FIGURE 17 et FIGURE 18).

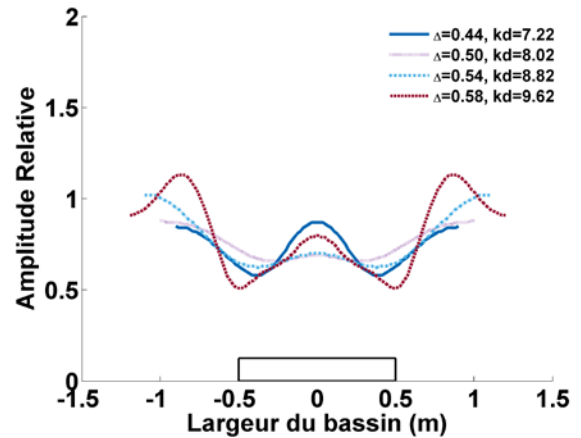


FIGURE 17: PROFIL TRANSVERSAL EN AVANT DE LA STRUCTURE POREUSE  $X=1.5$  m,  $f=1.4$  Hz

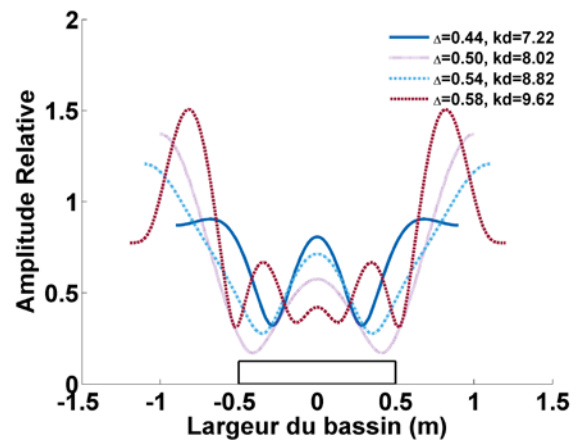


FIGURE 18: PROFIL TRANSVERSAL EN AVANT DE L'OUVRAGE IMPERMÉABLE  $X=1.5$  m,  $f=1.4$  Hz

Les profils en aval d'une structure poreuse (FIGURE 17) montrent des oscillations de l'amplitude de la houle plus ou moins importantes en fonction de l'écart considéré entre 2 ouvrages. En effet, les oscillations de l'amplitude croissent lorsque l'écart  $\Delta$  est plus important et nous observons particulièrement un fort phénomène de diffraction pour le plus grand écart étudié qui se traduit par une forte augmentation de l'amplitude derrière les extrémités du segment poreux.

En comparant l'impact d'un ouvrage poreux sur l'amplitude de la houle par rapport à une structure imperméable (FIGURE



18), il est évident que la variation de l'amplitude est beaucoup plus importante pour cette dernière. Le constat est le même que précédemment, l'influence de l'espace entre 2 segments est significative sur l'amplitude de la houle. Dans le cas du plus grand  $\Delta$  étudié l'amplitude varie de 0.3 à 1.5 en aval de la structure alors que dans le cas d'un ouvrage poreux l'amplitude varie de 0.5 à 1.

## Conclusions

Les présents travaux mettent en évidence l'influence de brise-lames poreux tout en les comparant aux résultats obtenus dans le cas où les ouvrages sont imperméables.

En amont de cette étude le modèle analytique basé sur la théorie linéaire est validé par des mesures expérimentales réalisées en bassin d'essai. Cette partie de l'étude avait aussi pour objectif de paramétrer le modèle concernant les coefficients de dissipation  $n$  et de masse ajoutée  $C_m$  qui sont tous les deux liés à la structure poreuse. Les effets de l'ouvrage poreux sur l'énergie de la houle, traduits dans la présente étude par des cartographies de l'amplitude relative de la houle, montrent une dissipation ainsi qu'une réflexion moins importante que dans le cas d'un ouvrage imperméable. Cependant, l'énergie de la houle est plus homogène en aval de l'ouvrage. Les dimensions des structures ont aussi une importance sur le phénomène de réflexion-diffraction. En effet, même si la dissipation par l'ouvrage est assez homogène suivant la direction transversale, l'énergie varie avec l'écart considéré (soit avec le paramètre  $kd$ ) entre deux brise-lames. Plus l'écart entre des brise-lames successifs est grand, tout en respectant les critères de validité obtenu dans la littérature, plus le phénomène de réflexion-diffraction est présent. Ce dernier résultat se traduit par une augmentation de l'amplitude de la houle en aval des extrémités des segments et une forte diminution dans l'axe de propagation.

L'objectif de ces structures côtières étant, tout de même, de dissiper significativement l'énergie incidente de la houle pour protéger le littoral, il est possible de mettre en place un réseau de brise-lames poreux sur des fonds en pente douce. En effet, la présente étude a été réalisée dans le cas d'un fond plat tout en supposant une dissipation croissante de l'énergie si le réseau est mis en place sur des fonds hétérogènes ou en pente douce.

## Références

- [1] H. Hanson and N. C. Kraus, "Shoreline response to a single transmissive detached breakwater," *Coast. Eng. Proc.*, vol. 1, no. 22, pp. 2034–2046, 1990.
- [2] R. A. Dalrymple and P. A. Martin, "Wave diffraction through offshore breakwaters," *J. Waterw. port, coastal, Ocean Eng.*, vol. 116, no. 6, pp. 727–741, 1990.
- [3] A. G. Abul-Azm and A. N. Williams, "Oblique wave diffraction by segmented offshore breakwaters," *Ocean Eng.*, vol. 24, no. 1, pp. 63–82, 1997.
- [4] L. Bricio, V. Negro, and J. Diez, "Geometric detached breakwater indicators on the Spanish Northeast Coastline," *J. Coast. Res.*, pp. 1289–1303, 2008.
- [5] A. M. Vaidya, S. K. Kori, and M. D. Kudale, "Shoreline Response to Coastal Structures," *Aquat. Procedia*, vol. 4, no. ICWRCOE 2015, pp. 333–340, 2015.
- [6] M. Fugazza and L. Natale, "Hydraulic Design of Perforated Breakwaters," *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.*, vol. 118, no. 1, pp. 1–14, 1992.
- [7] X. Yu and A. T. Chwang, "Wave motion through porous structures," *J. Eng. Mech.*, vol. 120, no. 5, pp. 989–1008, 1994.
- [8] G. Arnaud, "Houle à la côte : propagation, impacts et ouvrages innovants," Thèse de l'Université de Toulon.
- [9] G. Arnaud, V. Rey, J. Touboul, D. Sous, B. Molin, and F. Gouaud, "Wave propagation through dense vertical cylinder arrays: Interference process and specific surface effects on damping," *Appl. Ocean Res.*, vol. 65, pp. 229–237, 2017.
- [10] O. Toyoshima, "Design of a detached breakwater system," *Coast. Eng.* 1974, pp. 1419–1431, 1975.