



Un type de digues pour filtrer de la houle

**Guillaume DUPONT¹, Olivier KIMMOUN¹, Fabien REMY¹, Bernard MOLIN¹,
Sebastien GUENNEAU², Stefan ENOCH²**

1. Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, IRPHE UMR 7342, 13013 Marseille, France.

dupont.guillaume@centrale-marseille.fr

2. Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel UMR 7249, 13013 Marseille, France.

Résumé :

L'étude présentée dans ce papier propose une approche pour concevoir un type de digues permettant de réfléchir une plage spécifique de longueurs d'ondes. Cette approche permet d'obtenir une structure pouvant atténuer de manière conséquente les houles associées aux tempêtes, sans atténuer les houles associées aux périodes de beau temps. Ce type de digue a donc pour but de limiter les houles destructrices, tout en laissant passer les houles reconstructrices de manière à protéger les côtes sensibles et les écosystèmes côtiers. Notre approche est basée sur les résonances dans les réseaux périodiques pour lesquelles les ondes ne peuvent pas se propager et consiste à associer les résonances de Bragg et des résonances locales créées par des éléments du réseau.

Mots-clés : Génie côtier, Travaux maritimes, Environnement littoral, Digue maritime, Digue écologique, Protection littorale, Tempêtes, Structures périodiques.

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, des tempêtes majeures ont frappé les zones côtières de par le monde, entraînant des inondations désastreuses donnant lieu à des pertes humaines et matérielles conséquentes. Les grandes hauteurs d'eau, associées à ces phénomènes météorologiques exceptionnels sont dues, pour la majorité des cas, à la combinaison d'une forte marée, d'une onde de tempête liée à la dépression et d'une houle de tempête pouvant avoir une hauteur significative très élevée (NOAA, 2017 ; SHOM, 2017). Le but de notre étude est de proposer un dispositif qui permet d'atténuer drastiquement la houle de tempête, de sorte à minimiser l'impact de la tempête sur le littoral. Nous proposons alors d'utiliser une structure périodique composée de pieux cylindriques pleins et fendus sur la hauteur.

De nombreux travaux portant sur l'interaction de la houle avec des arrangements de cylindres ont été effectués, notamment pour le dimensionnement de structures fixes ou flottantes et pour dissiper l'énergie de la houle (OHL *et al.*, 2001 ; DUCLOS &

<https://dx.doi.org/10.5150/cmcm.2017.037>

CLÉMENT, 2004 ; KAGEMOTO *et al.*, 2002 ; ARNAUD *et al.*, 2017 ; MOLIN & REMY, 2016).

Dans notre cas nous souhaitons utiliser les résonances de ces structures périodiques afin d'empêcher la propagation de la houle à travers celles-ci. Une telle approche a déjà été appliquée à la houle par (McIVER, 2000) pour des réseaux de cylindres pleins et il a été montré analytiquement l'existence de bandes de fréquences interdites. Ici, nous utilisons ces bandes de fréquences interdites (résonances de Bragg) et des résonances basses fréquences liées à des éléments résonnants du réseau qui sont ici des cylindres fendus. Nous combinons donc des cylindres pleins et fendus afin d'élargir la bande interdite aux basses fréquences et nous présentons une étude expérimentale d'une telle structure en bassin à houle, étayée par des résultats numériques.

2. Étude numérique

Dans un premier temps, on considère l'interaction d'une houle régulière avec un réseau périodique de pas $L=0,8m$, composé de 4×20 cylindres pleins de diamètres $d=0,4m$ (figure 1). Dans le cadre de la théorie potentielle linéarisée, où le fluide est considéré comme non-visqueux et incompressible et où l'écoulement est supposé irrotationnel, la propagation d'une houle à la pulsation ω pour une hauteur d'eau h peut être décrite par le potentiel des vitesses :

$$\Phi(x,y,z,t) = R \left\{ \varphi(x,y) \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} e^{-i\omega t} \right\}. \quad (1)$$

Le potentiel réduit φ satisfait l'équation de Helmholtz

$$(\nabla^2 + k^2) = 0 \quad (2)$$

dans le domaine fluide, avec $\nabla = (\partial/\partial_x, \partial/\partial_y)^T$ et k le nombre d'onde vérifiant la relation de dispersion

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (3)$$

où g est l'accélération de la gravité.

De plus, une condition à la limite de Neumann

$$\nabla \varphi \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (4)$$

est appliquée sur les surfaces des objets rigides, où \mathbf{n} est le vecteur unitaire normal sortant.

Le problème (2)-(3) est résolu avec la méthode des éléments finis, pour une houle se propageant suivant les x croissants, et le coefficient de transmission du réseau est calculé en intégrant le champ total sur un domaine rectangulaire en aval du réseau (figure 1a). Le résultat obtenu est représenté sur la figure 1d (traits pleins). Il apparaît alors que l'amplitude transmise est atténuée de plus de 50 % pour $1,75L < \lambda < 2,75L$. Cela signifie, que pour une zone géographique donnée, connaissant la période de houle et donc la longueur d'onde λ_c correspondant à l'état de mer calme, il est possible de construire une digue en réseau de pas $L_c \sim \lambda_c / 1,2$ pour lequel la transmission est proche

de 1. Au cours d'une tempête, quand la longueur d'onde augmente et devient plus grande que $1,75L_c$ la digue devient active et la houle est atténuée fortement jusqu'à des longueurs d'ondes égales à $2,75L_c$.

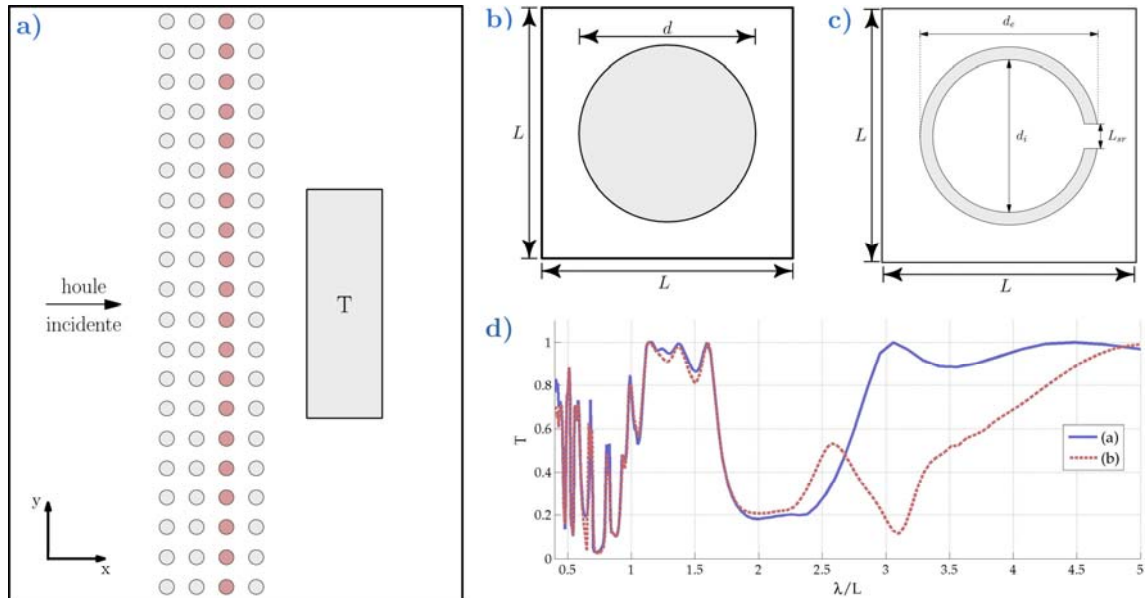


Figure 1. a) Vue schématique du modèle considéré. Dans un cas, le réseau est constitué par la juxtaposition de cellules élémentaires carrées comportant des cylindres. Dans un second cas, la troisième colonne du réseau (éléments en rouge) est remplacée par des cylindres creux et fendus. b) Cellule élémentaire comportant un cylindre avec $L=0,8m$, $d=0,4m$. c) Cellule élémentaire comportant un cylindre creux et fendu avec $L=0,8m$, $d_e=0,4m$, $d_i=0,33m$, $L_{sr}=0,1m$. d) Coefficients de transmission pour les deux types de réseaux.

Afin d'élargir la zone active de la digue, les cylindres pleins de la troisième colonne du réseau sont remplacés par des cylindres creux et fendus dont la géométrie est montrée sur la figure 1c. Ces cylindres creux et fendus ont pour but d'introduire des cavités fluides dans le réseau, auxquelles sont associées des résonances basses fréquences. Il en résulte un intervalle de longueurs d'ondes, pour lesquelles la houle ne se propage pas dans la structure, dont la largeur dépend de la taille de la cavité et de la fente. Pour obtenir des intervalles de largeurs importantes, la cavité doit être grande ($d_i \sim d_e$) avec une taille de fente L_{sr} de l'ordre de $d_i/2$. De plus, lorsque la fente n'est pas trop grande ($L_{sr} \leq d_i/2$) son orientation a peu d'influence, ce qui n'est plus le cas pour des tailles de fentes plus grandes.

Le coefficient de transmission d'un tel réseau est calculé selon la même méthode que précédemment et est représenté sur la figure 1d (traits pointillés). Il apparaît alors que la houle est atténuée d'au moins 50 % jusqu'à $\lambda/L=3,5$, ce qui signifie que la longueur d'onde en cas de tempête pourrait augmenter jusqu'à presque trois fois celle

*Mediterranean rocky coasts:
Features, processes, evolution and problems*

correspondant à l'état de mer calme avant que la digue n'atténue plus de manière satisfaisante la houle.

3. Validation expérimentale

La campagne expérimentale a été réalisée au bassin de génie océanique BGO FIRST opéré par Océanide à La Seyne sur Mer (France). Ce bassin d'essais est long de 40m et large de 16m avec une hauteur d'eau pouvant varier de 0m à 5m. Dans notre cas, la hauteur d'eau est fixée à $h=0,5m$ pour des cylindres fixes de 1m de haut reposant sur le fond.

Le réseau 4x20 (3,2m x 16m) avec des cylindres fendus sur la troisième colonne a été placé à un peu plus de la moitié du bassin et occupe toute la largeur de celui-ci (figure 2). Un peigne de 5 sondes a été placé en amont de la structure et un ensemble de 9 sondes en aval afin de mesurer les champs transmis et réfléchis. Des sondes ont été placées entre les cylindres dans la structure, sur la face avant d'un cylindre de la première colonne (run-up), et à l'intérieur d'un cylindre fendu de la troisième colonne. Les interactions de houles régulières avec la digue ont été étudiées sur l'intervalle $L < \lambda < 5L$ pour des incidences normales et de 10° et pour des cambrures de vague H/λ égales à 2 %, 3,5 % et 5 %, où $H=2a$ avec a l'amplitude des vagues incidentes.



Figure 2. a) Prise de vue de la maquette dans le bassin d'essais. b) Prise de vue d'un des cylindres creux et fendus constituant la troisième colonne de la maquette.

Les résultats pour la transmission de la structure sont présentés sur la figure 3a. Ces résultats sont globalement conformes à ceux de l'étude numérique, les différences observées venant essentiellement des non-linéarités pas prises en compte par l'étude numérique. Il apparaît que lorsque la cambrure des vagues augmente, la structure dissipe plus d'énergie aux petites longueurs d'ondes, ce qui a aussi été observé avec une houle incidente de 10° . Des houles irrégulières ont aussi été générées en considérant des trains d'ondes se focalisant au niveau de la plage en aval de la structure. Ces trains d'ondes sont générés en considérant des spectres dont on a fait varier le pic central. La

transmission alors obtenue par comparaison des spectres en amont et en aval du réseau est représentée sur la figure 3b.

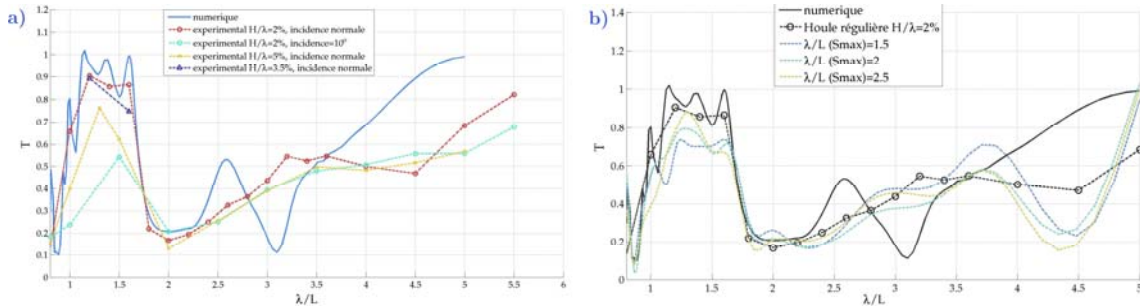


Figure 3. a) Résultats expérimentaux pour le coefficient de transmission, dans le cas de houles régulières. b) Coefficients de transmission pour des houles irrégulières (focalisées en aval de la structure) dont les pics centraux correspondent à $\lambda/L=1,5$, $\lambda/L=2$ et $\lambda/L=2,5$.

Il apparaît que la structure a joué le rôle de filtre fréquentiel en laissant passer principalement les petites longueurs d'onde conformément à ce qui est observé dans le cas des houles régulières (figure 3). Il est important de noter que, comme pour un réseau uniquement composé de cylindres pleins, la faible transmission autour de $\lambda/L=2$ est associée à une résonance de Bragg, et que pour les $\lambda/L > 3$, cette faible transmission est due aux résonances des cylindres fendus.

4. Conclusion

Nous avons ici proposé une étude numérique et expérimentale d'une structure périodique composée de cylindres pleins et de cylindres creux et fendus permettant d'atténuer les houles associées aux tempêtes. Ce type de structures présente l'avantage d'avoir un impact positif sur le littoral car il peut réduire considérablement les effets destructeurs des houles associées aux tempêtes tout en laissant inchangées les houles de beau temps, ce qui en fait un dispositif actif.

La mise en place d'une telle digue nécessite de connaître les états de mers associés aux localisations géographiques de l'implantation afin que les éléments soient dimensionnés justement.

5. Références bibliographiques

ARNAUD G., REY V., TOUBOUL J., SOUS D., MOLIN B., GOAUD F. (2017). *Wave propagation through dense vertical cylinder arrays: Interference process and specific surface effects on damping*, Applied Ocean Research, Vol 65, pp. 229-237, ISSN 0141-1187. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.04.011>.

*Mediterranean rocky coasts:
Features, processes, evolution and problems*

DUCLOS G., CLÉMENT A. H. (2004). *Wave propagation through arrays of unevenly spaced vertical piles*. Ocean Engineering, vol. 31, no 13, pp. 1655-1668. doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.03.006

KAGEMOTO H., MURAI M., SAITO M., MOLIN B., MALENICA S. (2002). *Experimental and theoretical analysis of the wave decay along a long array of vertical cylinders*. Journal of Fluid Mechanics, 456 (2002), pp. 113–135.

doi: 10.1017/S0022112001007480

McIVER P. (2000). *Water-wave propagation through an infinite array of cylindrical structures*. Journal of Fluid Mechanics, 424, 101-125. doi.org/10.1017/S0022112000001774

MOLIN B., REMY F. (2016). *Etude théorique et expérimentale du ballonnement dans une cuve rectangulaire remplie de cylindres verticaux*. 15ème Journées de l'Hydrodynamique, ENSTA Bretagne Brest.

NOAA. (2017). *National Oceanic and Atmospheric Administration*. <http://www.noaa.gov/>

OHL C. O. G., EATOCK TAYLOR R., TAYLOR P. H., BORTHWICK A. G. L. (2001). *Water wave diffraction by a cylinder array. Part 1. Regular waves*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 442 (1), pp. 1-32. doi.org/10.1017/S0022112001004931

SHOM. (2017). *Service hydrographique et océanographique de la Marine*. <http://www.shom.fr/>