

Etude expérimentale de l'impact d'un système houlomoteur bord à quai sur la protection d'ouvrages maritimes

Paul TOURNANT¹, Gaële PERRET¹, François MARIN¹, Philippe SERGENT²,
Hassan SMAOUI^{2,3}

1. Université Le Havre Normandie, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, UMR 6294 CNRS, 53 Rue de Prony, 76600 Le Havre, France.
paul.tournant@univ-lehavre.fr, gaele.perret@univ-lehavre.fr, francois.marin@univ-lehavre.fr
2. Centre d'Etude et d'expertise sur les Risque, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement – DTechEMF, 134 rue de Beauvais, CS 60039, Margny-Lès-Compiègne 60280, France.
philippe.sergent@cerema.fr, hassan.smaoui@cerema.fr
3. Laboratoire Roberval /LHN, Sorbonne Université, Université de technologie de Compiègne, FRE CNRS 2012, CS 60319, Compiègne 60203, France

Résumé :

Les systèmes de récupération d'énergie de la houle bord à quai peuvent jouer un rôle dans la protection de structures. Une précédente étude (NEUVEGLISE *et al.*, 2020) a montré qu'un tel système pouvait réduire de manière significative les franchissements d'eau par-dessus un mur vertical pour une houle régulière. De plus, le placement de houlomoteurs proche de la côte permet de réduire les coûts de raccordement au réseau et les coûts de maintenance par rapport au système en pleine mer.

Dans cet article, nous cherchons à comprendre quel impact peut avoir le flotteur sur la protection de structure. Pour cela, nous avons mesuré expérimentalement les efforts subis par la digue et les franchissements en houle irrégulière pour différentes configurations. Des résultats expérimentaux sont présentés pour un flotteur de type parallélépipède rectangulaire. Les efforts ont été enregistrés avec une balance d'effort multi-composantes. En houle régulière, deux flotteurs de tirant d'eau différents ont été testés. L'influence de la distance à la digue a été étudiée pour le cas d'une houle irrégulière. La présence du flotteur peut augmenter comme diminuer les efforts subis par la digue. En effet, si l'amplitude du flotteur est grande devant l'amplitude de houle, les efforts sont augmentés et inversement. De plus, si la distance à la digue est suffisamment faible, les franchissements sont réduits pour tous les spectres de houles irrégulière testés.

Mots-clés :

Houlomoteur, Protection d'installations côtières, Essais expérimentaux, Interaction fluide/structure.

Thème 5 – Énergies et ressources marines

1. Introduction

Pour limiter les effets du dérèglement climatique, de nombreux secteurs industriels doivent subir des modifications importantes. C'est le cas de la production énergétique mais aussi des installations portuaires. Les technologies de conversion d'énergie des vagues peuvent répondre en partie à ces deux problèmes. Elles permettent d'assurer une production d'énergie décarbonée avec un facteur de charge important et peuvent aussi assurer un rôle de protection maritime.

Les premiers systèmes à avoir démontré leur efficacité dans ce double rôle sont les colonnes d'eau oscillante, comme le démonstrateur de Mutriku (TORRE-ENCISO *et al.*, 2009). Cependant, ces systèmes ont l'inconvénient de nécessiter des travaux d'installation importants et peuvent difficilement s'adapter aux structures déjà existantes. Plus simple d'installation, les systèmes flottants peuvent présenter une solution rapide à mettre en place.

En effet, ZANUTTIGH & ANGELELLI ont étudié expérimentalement l'atténuation de la houle après avoir traversé une ferme de houlomoteurs flottants (ZANUTTIGH & ANGELELLI, 2013). Ils ont pu montrer une modeste réduction de l'amplitude transmise. De plus, s'appuyant sur les brises lame flottants, des systèmes hybrides permettent la protection de structure tout en produisant de l'électricité (REABROY *et al.*, 2019 ; ZHANG *et al.*, 2021). La production d'énergie qui en résulte permet d'amortir les coûts d'installation.

Le flotteur peut aussi être placé à proximité d'une digue. Cette idée est ancienne (MC IVER & EVANS, 1988). Cette position permet une réduction des coûts et une augmentation du rendement grâce aux réflexions de la houle sur le mur que constitue la digue (SCHAY *et al.*, 2013). Dans cette configuration, la distance entre le flotteur et le mur peut prendre des dimensions critiques pour certaines fréquences de houle. En effet, certaines composantes fréquentielles de la houle peuvent faire entrer en résonance la colonne d'eau située dans le gap. Ces fréquences peuvent être estimées avec un modèle semi-analytique (MOLIN, 2001).

Avec une étude numérique, GAO *et al.*, ont étudié les efforts appliqués sur un flotteur rectangulaire fixe placé, devant un mur vertical. Ils ont montré que la résonance du fluide dans le gap joue un rôle dominant sur les efforts subis par le flotteur (GAO *et al.*, 2019). ZHANG *et al.*, (2020) ont réalisé une étude analytique pour un flotteur libre avec un convertisseur. Ils montrent que les efforts subis par le flotteur sont maximisés lors de la résonance du gap (ZHANG *et al.*, 2020).

En plus de son effet sur les efforts, le flotteur peut avoir une utilité sur la réduction des volumes d'eau franchissant la digue. VAN DER MEER a proposé des modèles pour estimer les franchissements pour des digues verticales (VAN DER MEER, 2002). NEUVEGLISE *et al.*, ont mesuré la variation des franchissements d'eau causée par la présence d'un flotteur rectangulaire en houle régulière (NEUVEGLISE *et al.*, 2020). La présence du flotteur semble réduire davantage les franchissements si le flotteur est plus

proche de la digue. Cependant, il semble augmenter significativement les franchissements pour certaines fréquences de houle proche de la fréquence de résonance du flotteur. Dans cette étude, l'influence du flotteur sur les efforts appliqués à la digue est étudiée. Les essais expérimentaux sont réalisés en houles régulières et irrégulières. Les franchissements sont également quantifiés pour deux configurations différentes en houle irrégulière.

2. Dispositif expérimental

2.1 Les éléments du dispositif expérimental

Les essais se sont déroulés au Laboratoire Onde et Milieux Complexe (LOMC) de l'université du Havre Normandie. Le canal à houle utilisé mesure 34m de long, 0.9m de large et 1.2m de hauteur. Le dispositif complet est présenté en figure 1.

La houle est générée à l'aide d'un batteur piston HR Wallingford. Il est équipé d'un système d'absorption active qui permet d'absorber la houle réfléchi. La houle irrégulière est modélisée par des spectres de JONSWAP. Les amplitudes de houle incidentes et réfléchies sont mesurées à l'aide de sondes résistives avec la méthode de MANSARD et FUNKE (MANSARD & FUNKE, 1980). Le coefficient de réflexion Cr est déterminé par le rapport des amplitudes incidentes et réfléchies. Les incertitudes sur les mesures d'amplitudes sont de plus ou moins 0.5 mm.

Le flotteur est un parallélépipède creux en PVC rigide. Il est traversé par deux pieux verticaux fixés au fond et en haut du canal. Ce guidage permet de contraindre le flotteur à un unique degré de liberté de pilonnement. La digue est modélisée par une paroi en PVC rigide prenant toute la largeur du canal. Elle est fixée sur une balance d'effort multi-composante, elle-même fixée au fond du canal. L'étanchéité entre le canal et la digue est assurée à l'aide d'un joint élastique. L'eau qui franchit la digue est récoltée dans un bac de récupération contenant des pompes volumétriques. Le volume traversant la digue est pompé, mesuré par un compteur volumétrique, puis réinjecté dans le canal pour maintenir un niveau d'eau constant lors des essais.

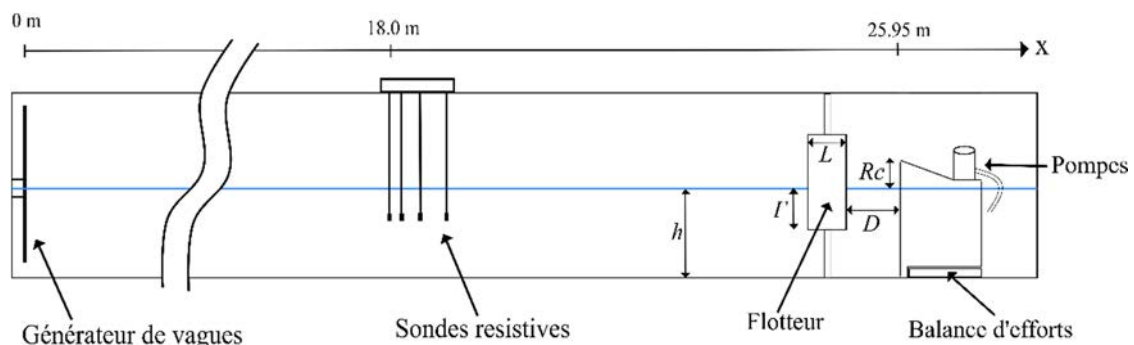


Figure 1. Dispositif expérimental utilisé pour les mesures de franchissement et d'effort sur la digue. Il fait partie de la plateforme MecaFluides du LOMC.

Thème 5 – Énergies et ressources marines

En houle régulière, un cycle de 300 vagues est enregistré. En houle irrégulière, un cycle complet du spectre est enregistré, la durée étant déterminée par le logiciel qui commande le batteur.

2.2 La mesure d'efforts sur la digue

Les efforts sur la digue ont été mesurés à l'aide d'une balance d'efforts multi-composantes. Elle est fixée au fond du canal à houle, la digue repose dessus. La norme adimensionalisée de la force appliquée sur la digue est appelée F .

$$F = \frac{\|\vec{f}\|}{\rho g h l a_i}, \quad (1)$$

où ρ représente la masse volumique, g la gravité, l la largeur de la digue ($l = 0.9m$), h la profondeur d'eau et a_i l'amplitude de la houle incidente mesurée avec les sondes résistives. La force \vec{f} représente la force totale subit par la digue, enregistrée à l'aide de la balance d'effort.

Une moyenne de l'amplitude glissante de la force F sur une période de houle est réalisée. Cette grandeur sera appelée F_m et représente l'amplitude de force moyenne appliqué à la digue. L'incertitude liée à cette grandeur correspond à deux écarts type de la série d'amplitude glissante des efforts.

3. Résultats des efforts appliqués à la digue

3.1 Efforts appliqués à la digue sans flotteur

Les efforts théoriques appliqués à un mur vertical soumis à la houle peuvent être décrits grâce à l'intégrale du profil de pression selon z à la position du mur. Les champs de potentiel de vitesse sont pris à l'ordre 2. Les efforts mesurés expérimentalement F_{exp} sont comparés avec les résultats théoriques pour une digue seule (figure 2). Deux fonctions théoriques sont considérées. La première F_{th} , prend un coefficient de réflexion du mur égal à 1 pour toutes les fréquences incidentes. La théorie corrigée $F_{th,corr}$ représente les résultats théoriques prenant en compte le coefficient de réflexion mesuré expérimentalement pour chaque fréquence de houle. Le coefficient de réflexion de la digue mesuré expérimentalement est toujours inférieur à 1. Il varie entre 0.78 et 0.86 en fonction de la fréquence de la houle.

Les valeurs de la force F_{exp} mesurées expérimentalement sont globalement proches de celles calculées et corrigées théoriquement $F_{th,corr}$. On aperçoit tout de même une sous-estimation légère par rapport aux résultats théoriques. Ceci peut être causé par le joint élastique entre la digue et le canal qui peut induire une légère force de résistance au

déplacement de la digue. Cette force de résistance induit une réduction de 5% maximum sur la mesure

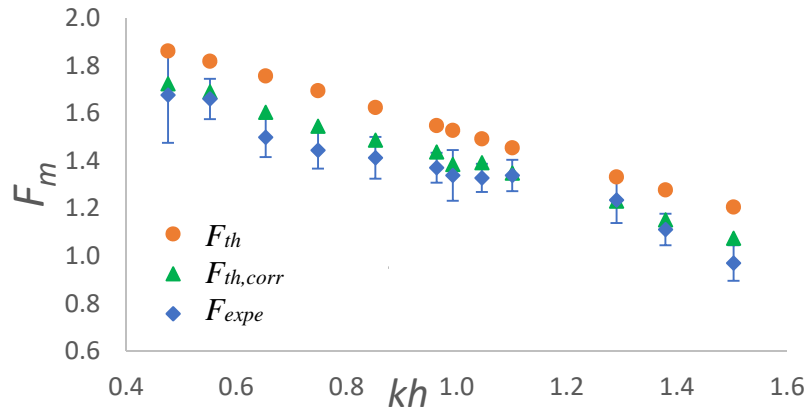


Figure 2. Amplitude moyenne de la force appliquée à la digue mesurée expérimentalement F_{exp} comparée avec les résultats théoriques. Le coefficient de réflexion est égal à 1 pour F_{th} . Pour $F_{th,corr}$ on utilise le coefficient de réflexion mesuré expérimentalement. Ces résultats sont obtenus sans flotteur. k représente le nombre d'onde de la houle.

3.2 Influence du tirant d'eau en houle régulière

On souhaite observer l'impact du flotteur sur la force F subie par la digue (figure 3). Le tirant d'eau du flotteur a été doublé entre les deux séries. L'étude se déroule en houle régulière. On montre également l'évolution de l'opérateur du ratio d'amplitude (RAO) défini par le rapport entre l'amplitude du flotteur sur l'amplitude incidente de la houle (figure 3).

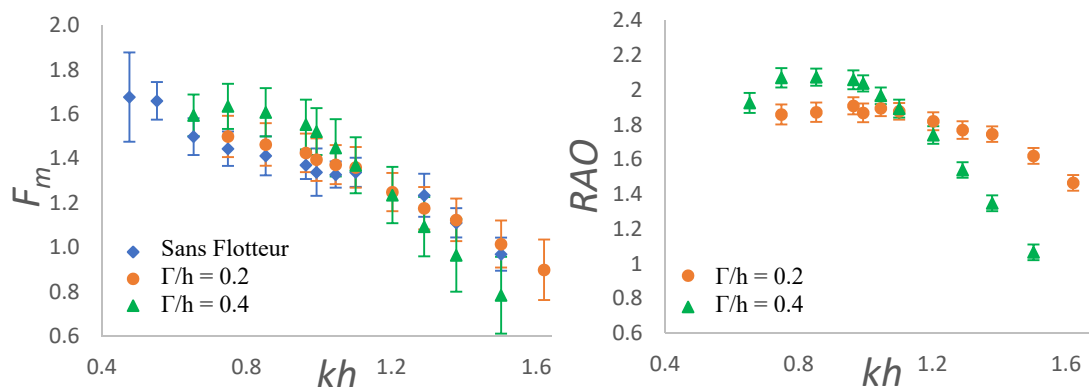


Figure 3. a) Comparaison des efforts subits par la digue avec et sans flotteur. La houle est régulière. b) RAO correspondante aux mesures d'effort. Les paramètres sont les suivants : $a/h = 0.05$, $D/h = 0.02$, $L/h = 0.6$.

Thème 5 – Énergies et ressources marines

Les écarts entre le cas avec et sans flotteur sont relativement faibles. Les plus grands écarts arrivent pour les grands kh . On observe une différence maximale de F de 4.7% pour le cas ou $\Gamma/h = 0.2$ et 19% pour le cas ou $\Gamma/h = 0.4$. Lorsque $\Gamma/h = 0.4$, le flotteur semble réduire les efforts subits par la digue pour les grandes fréquences. En contrepartie, sa présence augmente les efforts quand kh est compris entre 0.5 et 1. Lorsque $\Gamma/h = 0.2$, l'influence du flotteur est moins perceptible.

Ces résultats peuvent être expliqués par le déplacement du flotteur. Une augmentation du tirant d'eau provoque un décalage de la fréquence de résonance du flotteur vers les fréquences plus faibles (TAN *et al.*, 2014). Lorsque la RAO est maximale on observe une augmentation importante des efforts par rapport au cas sans flotteur. Au contraire, lorsque la RAO est faible, les efforts sur la digue semblent diminuer. Globalement, nous observons un assez bon accord entre ces efforts et l'évolution de la RAO.

3.3 Influence de la distance à la digue en houle irrégulière

L'étude des efforts en houle régulière permet de comprendre l'impact des effets des résonances. Cependant, dans le cas d'une houle irrégulière, ces effets de résonance ont moins d'impact. Nous avons donc cherché à estimer l'impact du flotteur sur les efforts en houle irrégulière. Dans ces essais, l'influence de la distance à la digue a été mesurée. Pour caractériser les efforts qui surviennent lors des événements les plus violents, nous avons défini deux forces :

- F_{max} : La force maximale subie par la digue pendant le cycle (figure 4.a).
- $F_{2\%}$: La valeur moyenne de 2% des efforts les plus grands (figure 4.b).

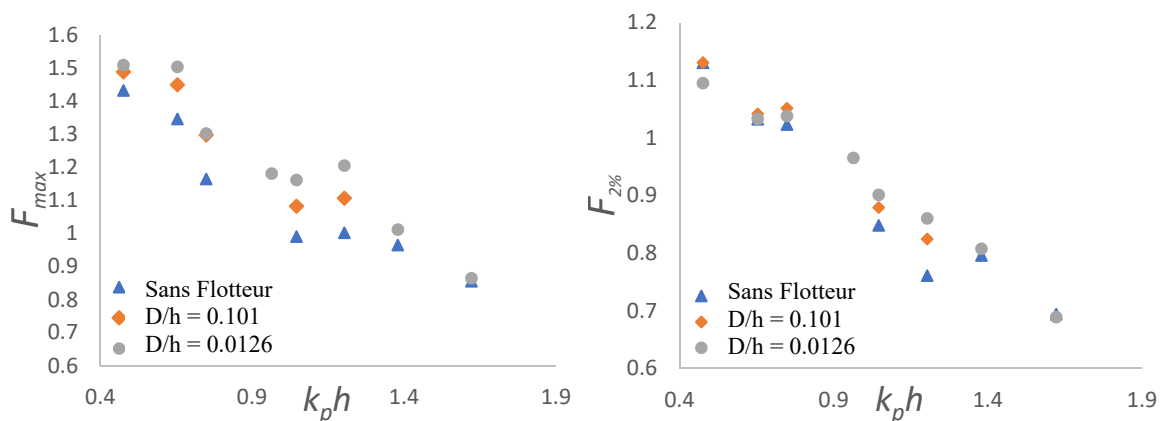


Figure 4. a) Efforts maximums subits par la digue pour une houle irrégulière. b) Moyenne des 2% plus importantes valeurs d'effort enregistrées. Le nombre d'onde à la fréquence pic est noté k_p . Les paramètres sont les suivants : $a/h = 0.05$, $\Gamma/h = 0.165$, $L/h = 0.126$.

La force exercée par l'eau sur la digue diminue quand le nombre d'onde augmente. Plus la longueur d'onde est grande et plus la houle est énergétique.

La présence du flotteur augmente les efforts pour tous les états de mer testés. Cette augmentation est plus prononcée lorsque D est plus faible. En effet, quand la distance à la digue est plus faible, la RAO est généralement plus importante. De plus une modification de la distance à la digue peut permettre à certaines composantes fréquentielles de provoquer la résonance de la colonne d'eau située entre le flotteur et la digue. Comme l'énergie contenue dans le gap augmente, l'énergie transmise à la digue augmente aussi.

4. Mesure de franchissement

En houle régulière, le flotteur augmente les franchissements lorsque la pulsation de la houle est proche de la pulsation de résonance du flotteur (NEUVEGLISE *et al.*, 2020).

Des mesures de franchissement en houle irrégulière ont été conduites pour deux configurations différentes (figure 5). Contrairement à la houle régulière, la houle irrégulière a tendance à réduire les effets de résonance. Les franchissements sont calculés par la grandeur Δv (Equation 2).

$$\Delta v = \frac{\Delta v_{AvecFlotteur}}{\Delta v_{SansFlotteur}}, \quad (2)$$

avec $\Delta v_{AvecFlotteur}$ et $\Delta v_{SansFlotteur}$ représentant les volumes d'eau ayant franchi la digue respectivement, avec et sans flotteur. Ces volumes sont mesurés pour un cycle de houle entier. Quand Δv est supérieure à 1, la présence du flotteur augmente les franchissements.

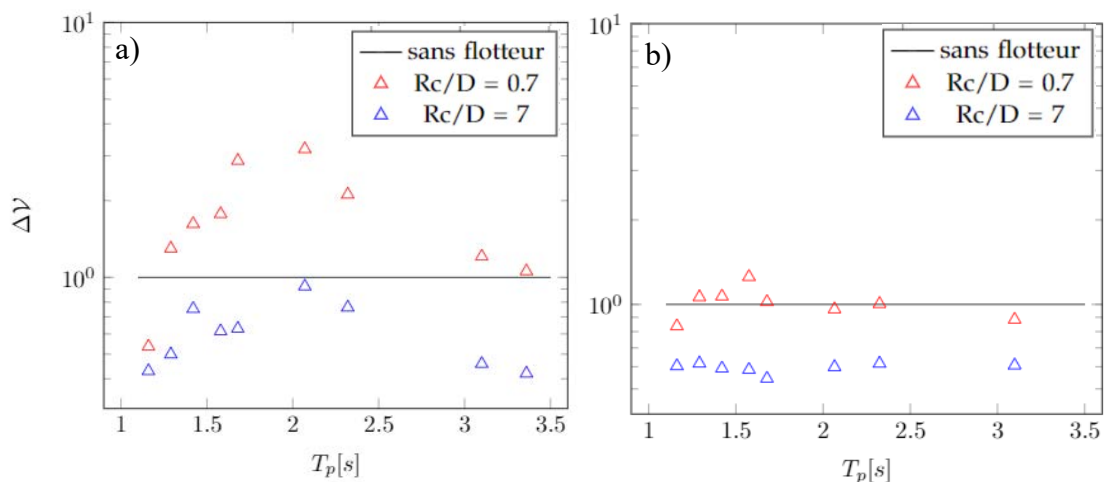


Figure 5. Influence de la présence du flotteur sur les franchissements d'eau passant par-delà la digue en houle irrégulière. a) $\frac{\Gamma}{h} = 0.397$. b) $\frac{\Gamma}{h} = 0.177$.

Thème 5 – Énergies et ressources marines

De manière générale, lorsque la distance à la digue diminue, les franchissements diminuent. Pour les plus faibles D , cette réduction est présente pour toute la gamme testée. A l'inverse, si la distance à la digue est importante, la présence du flotteur peut augmenter les franchissements pour une multitude de fréquence.

Lorsque la distance à la digue augmente, la quantité d'eau contenue dans le gap est plus importante, ce qui semble augmenter la quantité d'eau qui franchit. On peut également noter que lorsque le gap est étroit, les pertes de charge dans ce dernier sont plus importantes, ce qui peut provoquer une réduction de l'élévation de la surface libre dans le gap.

5. Conclusion

Cette étude présente des résultats expérimentaux de l'impact d'un flotteur bord à quai sur les efforts subis par une digue verticale, ainsi que son influence sur les franchissements. Cette étude est menée en houle régulière et irrégulière.

La présence du flotteur modifie les efforts reçus par la digue. Pour une houle régulière, la variation des efforts est liée au déplacement du flotteur. Lorsque le flotteur est à la résonance, les efforts subis par la digue sont augmentés. Lorsque l'amplitude du flotteur est faible devant l'amplitude de la houle, les efforts sur la digue sont diminués.

Les mesures en houle irrégulière montrent une légère augmentation des efforts maximums subis par la digue. Certaines composantes fréquentielles de la houle provoquent une forte augmentation de l'amplitude du flotteur qui contribue à l'effort subi par la digue.

Cependant, cet impact est relativement faible. Les efforts les plus importants survenus lors du cycle de houle ont été enregistrés. La plus forte augmentation mesurée est de 20% entre un cas avec et un sans flotteur. Une réduction de la distance entre le flotteur et la digue augmente les efforts reçus par la digue dans la configuration utilisée.

L'impact du flotteur sur les franchissements d'eau pour une houle irrégulière a été étudié. Lorsque la distance à la digue est suffisamment faible, la présence du flotteur permet une réduction des franchissements pour tous les états de houle testés. La houle irrégulière diminue fortement les effets de résonance du flotteur et du gap. En effet, les effets de résonance ne semblent pas montrer d'augmentation significative des franchissements pour des fréquences particulières.

La distance entre le flotteur et la digue est un facteur très important pour assurer une fonction de protection. Sa diminution permet de réduire les franchissements pour une houle irrégulière. En revanche, les efforts en houle irrégulière sont légèrement augmentés dans la configuration étudiée. L'amplitude du flotteur était plus importante pour certaines composantes fréquentielles lorsque la distance à la digue était la plus faible.

6. Perspectives

Une étude complémentaire sur les efforts subis par le flotteur serait enrichissante. Elle permettrait de comprendre si la résonance du flotteur impacte aussi les efforts qu'il subit. Une nouvelle étude d'efforts et de franchissements avec la présence d'un convertisseur serait complémentaire. Sachant que le convertisseur réduit la RAO du flotteur, il est possible que sa présence permette une diminution des efforts sur la digue.

Enfin, l'étude présentée dans cet article prend en compte un modèle de houle idéale. Une étude avec des vagues déferlantes pourrait permettre de prendre en compte l'impulsion de pression résultat du choc. Ce qui pourrait mettre en évidence une réduction intéressante des efforts par le flotteur. Elle pourrait permettre aussi un constat plus réaliste sur la fonction de réduction des franchissements du flotteur en houle irrégulière.

7. Références bibliographiques

GAO J., HE Z. ; ZANG J., CHEN Q., DING H., WANG G. (2020). *Numerical investigations of wave loads on fixed box in front of vertical wall with a narrow gap under wave actions*. Ocean Engineering, Vol. 206, 107323. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107323>

MCIVER P., EVANS D. V. (1988). *An approximate theory for the performance of a number of wave-energy devices set into a reflecting wall*. Applied Ocean Research, Vol. 10, No. 2, pp. 58-65. [https://doi.org/10.1016/S0141-1187\(88\)80032-4](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(88)80032-4)

MOLIN B. (2001). *On the piston and sloshing modes in moonpools*. J. Fluid Mech, Vol. 430, pp 27-50. <https://doi.org/10.1017/S0022112000002871>

NEUVEGLISE S., PERRET G., SMAOUI H., MARIN F., SERGENT P. (2020). *Impact of a Quayside Floating System on Overtopping*. J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng. ; Vol. 146(1). DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000532

REABROY R., ZHENG X., ZHANG L., ZANG J., YUAN Z. LIU M., SUN K., TIAPLE Y. (2019). *Hydrodynamic response and power efficiency analysis of heaving wave energy converter integrated with breakwater*. Energy Conversion and Management, Vol. 195, pp. 1174-1186. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.088>

SCHAY J., BHATTACHARJEE J., GUEDES SOARES C. (2013). *Numerical modelling of a heaving point absorber in front of a vertical wall*. Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes, France.

TAN L., LU L., LIU Y., SABODASH O. A., TENG B. (2014). *Dissipative effects of resonant waves in confined space formed by floating box in front of vertical wall*. Proceedings of the 11th Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, PACOMS 2014. pp. 250-255.

TORRE-ENCISO Y., ORTUBIA I., LOPEZ DE AGUILETAL. I., MARQUES J. (2009). *Mutriku wave power plant : from the thinking out to the reality*. Proceedings of the 8th European wave and tidal energy conference, Uppsala, Sweden. Vol 710, pp 319-329.

Thème 5 – Énergies et ressources marines

VAN DER MEER J. W. (2002). *Technical report wave run-up and wave overtopping at dikes*. In TW report (incorporated in the EurOtop manual).

MANSARD E. P. D., FUNKE E. R. (1980). *The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method*. Coastal Engineering 1980. pp 154-172. <https://doi.org/10.1061/9780872622647.008>

ZANUTTIGH B., ANGELELLI E. (2013). *Experimental investigation of floating wave energy converters for coastal protection purpose*. Coastal Engineering, Vol. 80, pp 148-159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.11.007>

ZHANG H., ZHOU B., ZANG J., VOGEL C., FAN T., CHEN C. (2021). *Effects of narrow gap resonance on a dual-floater WEC-breakwater hybrid system*. Ocean Engineering, Vol. 225, 108762. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108762>

ZHANG Y., LI M., ZHAO X., CHEN L. (2020). *The effect of the reflection on the performance of a floating breakwater-WEC system*. Applied Ocean Research, Vol. 100, 102117. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102117>