

Augmentation du niveau de protection d'un ouvrage de lutte contre la submersion

Julie LEBUNETEL¹, Jean-Philippe THEAUDIN¹, Axel TERLAUD²

1. INGEROP Conseil et Ingénierie, Agence de Rennes, 12 rue du Pâtis Tatelin, CS 50891, 35708 Rennes cedex 7, France.

julie.lebunetel@ingerop.com

2. SOLETANCHE BACHY, Route de Barreau, 33160 Saint Aubin de Médoc, France.

axel.terlaud@soletanche-bachy.com

Résumé :

Le travail exposé dans ce papier consiste à adapter un ouvrage existant pour lui permettre d'apporter une protection face à des contraintes hydrodynamiques plus sévères que celles des événements pour lequel il a été dimensionné.

Il s'agit d'avoir une double approche intégrant : le niveau de protection et l'optimisation du génie civil associé. Un ouvrage type digue mixte complété d'un écran perforé a été conçu. Le dimensionnement se base sur les résultats d'essais en canal à houle. La prise en compte de la dynamique de la vague maximale associée à la période propre de l'ouvrage permet une optimisation du dimensionnement.

Mots-clés :

Protection contre la submersion, Ouvrage atténuateur mixte, Efforts de houle, Chassemer, Paroi perforée, Franchissement, Adaptation ouvrage existant

1. Introduction

Le littoral français compte un linéaire important d'ouvrages de lutte contre la submersion marine. L'évolution des enjeux et des contraintes hydrodynamiques, notamment liées à l'évolution du niveau de la mer ou à l'évolution du niveau de connaissance des houles locales, nécessite une adaptation de ces ouvrages (SERGENT *et al.*, 2013). Le cas présent traite de la rehausse du niveau de protection d'une digue en enrochements avec mur de couronnement en tête. Les contraintes environnementales et la présence d'infrastructures (habitations, zones industrielles,...) ne permettent pas toujours d'augmenter l'emprise au sol des ouvrages. Il s'agit aussi de limiter la réflexion de l'ouvrage (compatibilité avec la navigation). De nombreuses études ont traité de la réalisation de caissons perforés de type Jarlan (BELORGEY *et al.*, 2000 ; TABET AOUL *et al.*, 1999 ; LAJOIE *et al.*, 2014), adaptés aux zones portuaires mais qui peuvent représenter une contrainte économique et d'installation en fonction des espaces disponibles de chantier et tirants d'eau sur site. Ce type d'ouvrage permet aussi de limiter les efforts de houle appliqués au génie civil pour une optimisation structurelle (BERGMANN & OUMERACI, 1999). Il s'agit, dans le cadre de cette étude, d'adapter le dispositif de chambre de dissipation en installant une

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

paroi verticale perforée devant une digue en enrochements pour une réhausse du niveau de protection de l'ouvrage optimisée.

2. Dispositif expérimental

Des essais expérimentaux sont réalisés dans le canal à houle de la société Océanide (longueur utile de 22m, largeur de 1m, et profondeur maximale de 1,5m) à une échelle de 1/12. Des sondes résistives sont installées pour la mesure des composantes incidentes et réfléchies de la houle. Des sondes additionnelles sont placées de part et d'autre de la paroi perforée pour mesure instantanée des houles. Le couronnement est équipé de capteurs de pression. Le mur perforé est placé sur balance d'efforts (fréquence d'acquisition 1000Hz échelle réelle). Un bac situé à l'arrière de l'ouvrage principal (mur de couronnement) permet de mesurer le franchissement. La figure 1 présente une photo du dispositif.

Les houles testées sont irrégulières suivant un spectre de Jonswap ($\gamma=3,3$) et situées dans la gamme $H_s=[0,93\text{m} ; 1,45\text{m}]$; $T_p=[4,5\text{s} ; 5,5\text{s}]$, $h=[3,26\text{m} ; 3,68\text{m}]$. H_s , T_p et h représentent respectivement la hauteur de houle significative, la période pic et la hauteur d'eau au pied de l'ouvrage. L'écran perforé amont est testé avec deux porosités : $p=10\%$ et $p=20\%$. L'influence de la hauteur et de la pénétration de l'écran sont également testés.

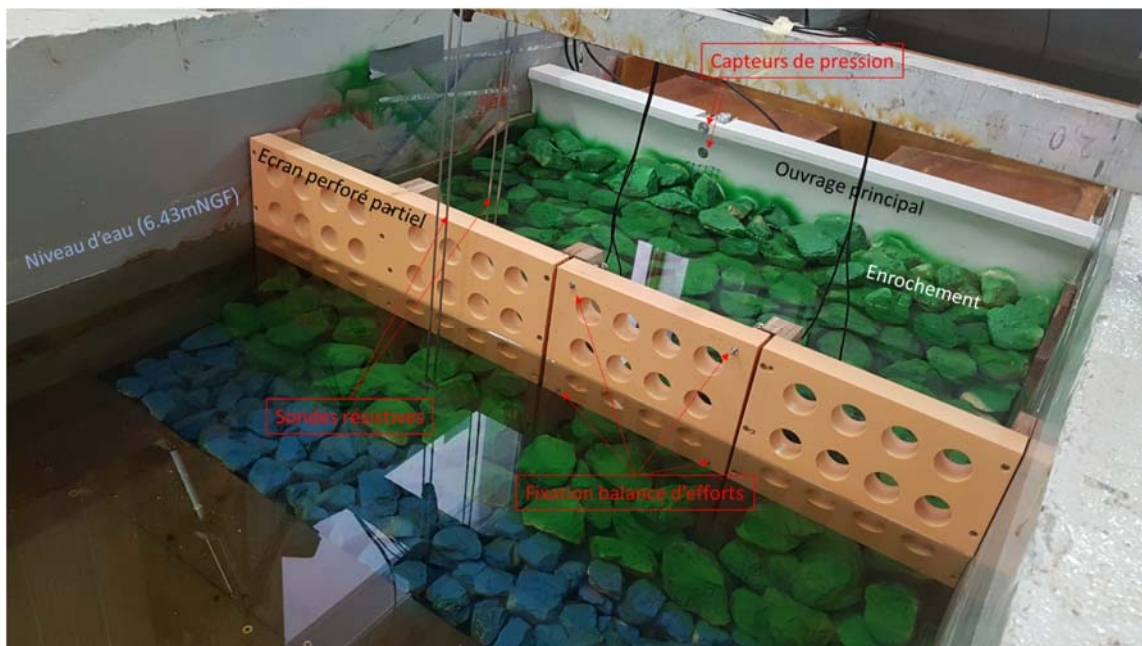


Figure 1. Dispositif expérimental.

3. Résultats

3.1 Observations

Lors de ces essais, l'efficacité du chasse-mer (section courbe en partie supérieure de l'ouvrage principal) contre le franchissement est observée. Les houles les plus fortes sont

écrêtées par l'écran (figure 2), puis, interceptées par le mur chasse-mer, elles sont renvoyées vers le large. L'encorbellement permet une augmentation très limitée du couronnement malgré une rehausse significative du niveau de protection.

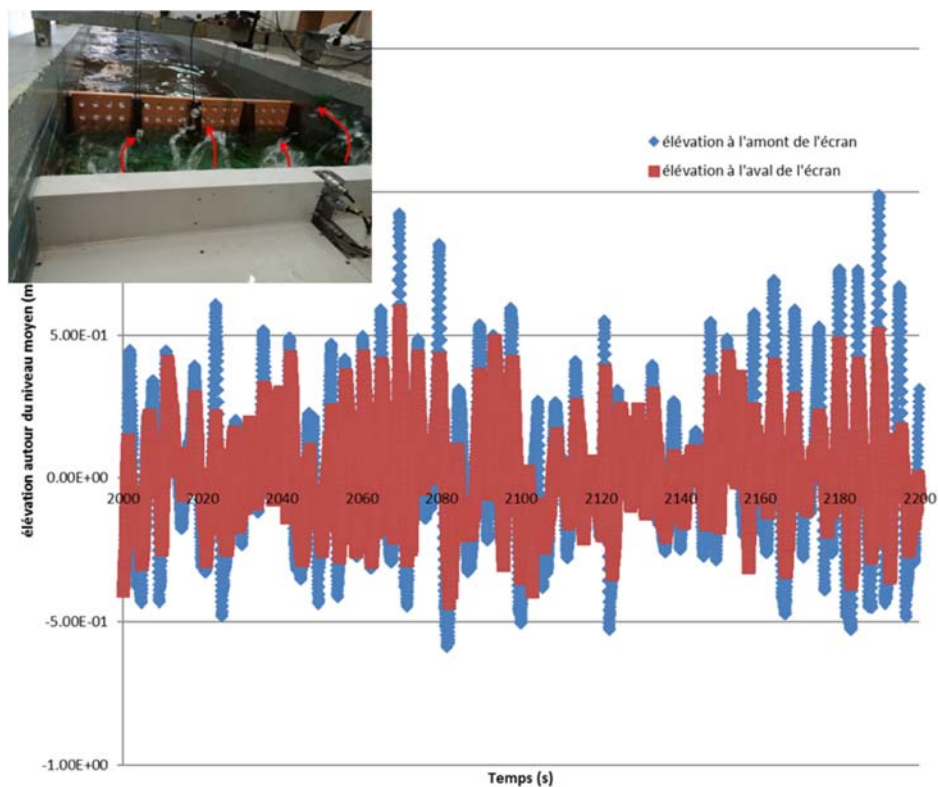


Figure 2. Elévation de la surface libre à l'amont et à l'aval de l'écran.

Des essais ont été réalisés sans la présence de l'écran et ont permis de montrer que la présence de l'écran permet de réduire de 50% les efforts transmis au mur de couronnement et de diviser par 3 les volumes de franchissement. L'impact sur le dimensionnement structurel est donc considérable. L'ajout d'un écran pourrait donc être adapté pour ajuster le niveau de protection sans nécessairement reprendre la structure existante de l'ouvrage.

3.2 Efficacité hydraulique

Le positionnement de l'écran amont (paroi perforée) est ajusté de manière à viser une efficacité optimale. La bibliographie montre que la réflexion des houles est minimale lorsque le rapport entre la largeur de la chambre de dissipation B (ici, on prendra la largeur libre entre la digue et l'écran au niveau d'eau de protection) et la longueur d'onde locale L est comprise entre $B/L=0,15$ et $0,25$ (MAST III/PROVERBS- OUMERACI *et al.*, 2001). Dans le cas présent, $B/L=0,26$. L'évolution du coefficient de réflexion est donnée sur la figure 2 (gauche). Celui-ci est de l'ordre de 35% pour une porosité de l'écran de

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

20% et de 40 à 45% pour une porosité de l'écran de 10%. Ces ordres de grandeurs sont cohérents avec les résultats de la littérature associée à des ouvrages de type caisson, malgré la présence de l'enrochement. Aussi, l'augmentation de porosité génère une réduction des efforts appliqués à l'écran.

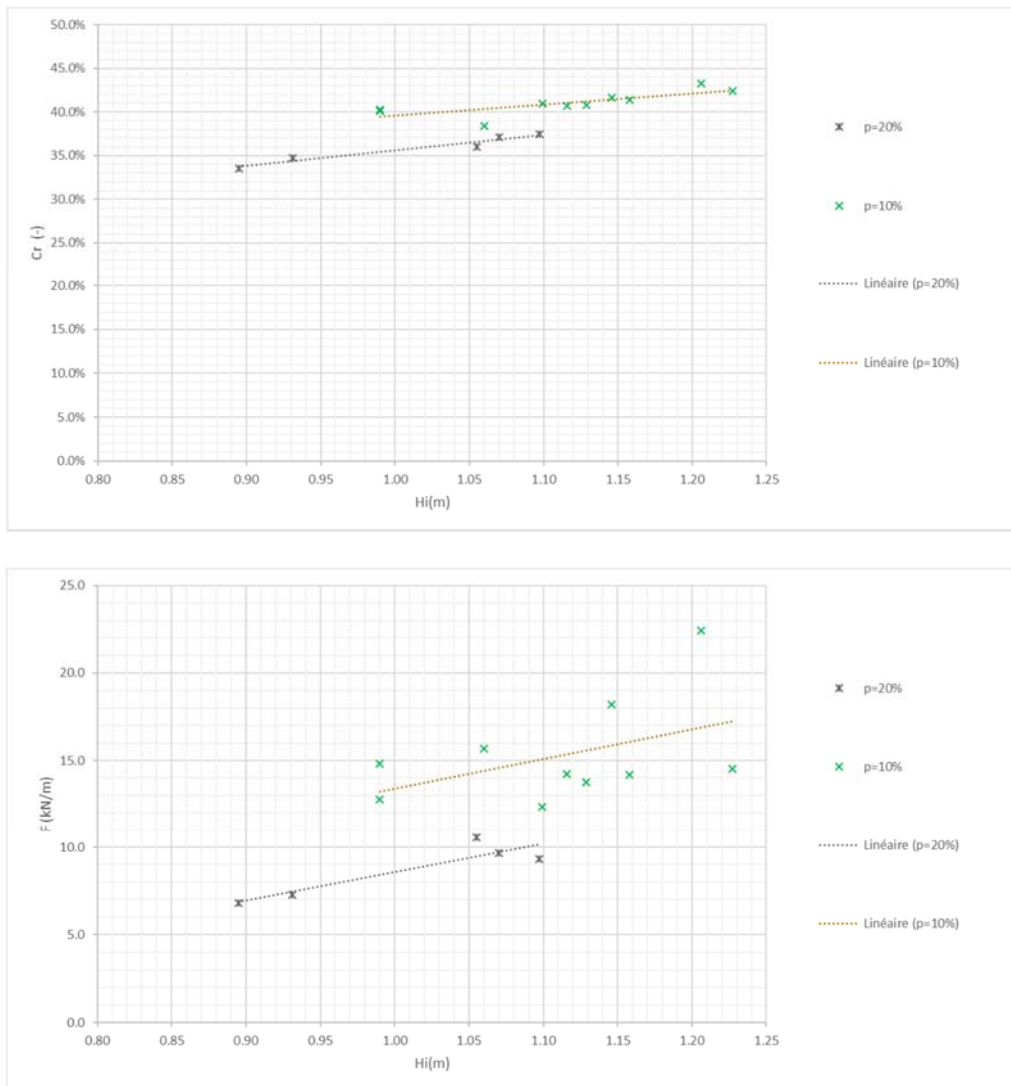


Figure 3. Evolution du coefficient de réflexion (en haut) et des efforts (en bas) en fonction de la hauteur de houle incidente.

3.3 Efforts et dimensionnement

3.3.1 Effort maximal et coefficient dynamique

Classiquement, les travaux reportent les efforts appliqués aux ouvrages selon leur intensité (Formulations de type GODA). Le guide PROVERBS propose de retenir pour le dimensionnement des ouvrages l'effort non dépassé 90% du temps noté F_{90} . La

problématique est entière quant à la détermination du F_{90} . Celle-ci peut être réalisée à partir de l'analyse des plus grosses vagues indépendantes mais dans ce cas il est nécessaire de définir un seuil de détection de l'effort, et les résultats ne convergent pas. Une deuxième méthode consiste à détecter les maxima obtenus par paquets de 250 vagues et pour que l'analyse statistique soit représentative, il est nécessaire d'avoir réalisé des essais longs. Pour autant dimensionner un ouvrage sur la base de l'effort maximal lorsque celui-ci est fondé sur pieux semble particulièrement pénalisant.

Suite à des désordres répétés sur les ouvrages côtiers, les auteurs se sont penchés sur la caractérisation de l'effort qui n'est plus une simple intensité mais une combinaison {durée+intensité}, considérant de plus la nature stochastique de l'impact. OUMERACI *et al.* (2001) ont proposé des approches pour décrire la dynamique des caissons brise-houle mais pour ce qui est des ouvrages de type digue avec mur de couronnement, la bibliographie est maigre. Aussi, les essais réalisés dans le cadre de cette étude montrent que le couronnement subit sous certaines conditions des efforts impactant, contrairement à ce que prévoyait la carte décisionnelle PROVERBS. Nous proposons de nous appuyer sur ces travaux (notamment réalisés dans le cadre du programme PROVERBS) pour réaliser une analyse de sensibilité de notre design vis à vis des aspects dynamiques et sélectionner le bon niveau d'efforts à considérer pour le dimensionnement.

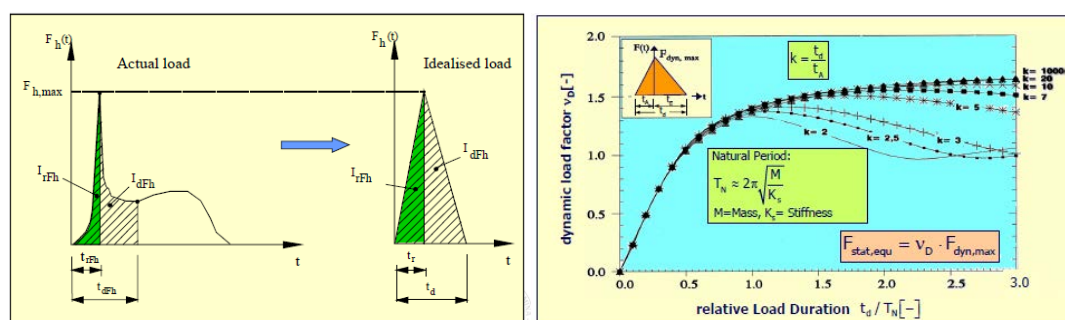


Figure 4. Schématisation de l'effort et introduction d'un coefficient dynamique pour des caissons brise-houle (OUMERACI *et al.*, 2001).

Cette approche consiste à définir l'intensité maximale de l'effort, le temps de montée du pic (t_r) et le temps de l'impact (t_d). D'après OUMERACI *et al.*, (2001), on peut schématiser l'effort et définir un coefficient d'amplification dynamique à intégrer pour le dimensionnement (voir figure 4). Ce graphe montre la forte dépendance du rapport de la durée de l'impact avec la période propre de l'ouvrage avec le coefficient dynamique.

Pour chaque test, nous considérons la vague maximale dont la figure 5 est représentative. A partir de ce graphe, le temps t_{dFh} est déterminé ainsi que l'intégrale des efforts (hors quasi statique). C'est à partir de ces données que nous pouvons estimer le temps t_d , qui permet de reconstituer un effort équivalent.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

L'exercice est réalisé de comparer les résultats obtenus de l'exploitation des tests et avec la théorie (issue d'exploitation de résultats obtenus sur des structures différentes).

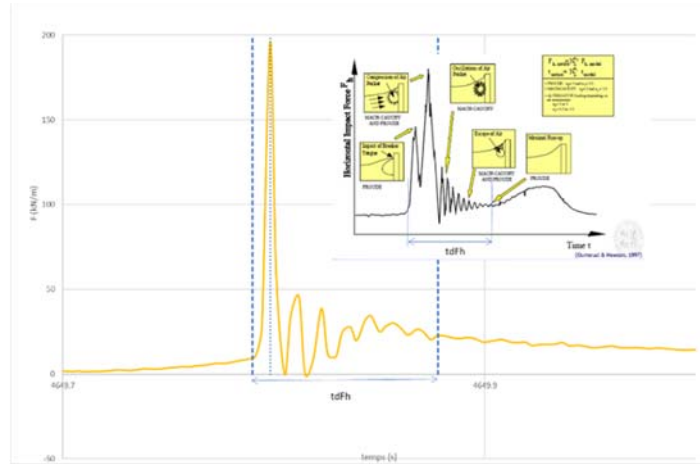


Figure 5. Evolution temporelle de la vague d'impact maximal (test 17).

Les résultats obtenus avec les deux approches montrent un coefficient d'amplification dynamique inférieur à un (voir figure 6). Ils montrent aussi une surestimation des efforts via la théorie ainsi que du coefficient d'amplification dynamique.

L'effort obtenu est alors équivalent à l'intégrale du pic d'effort (0.05s) de la vague maximale et non à l'intensité de l'effort maximal.

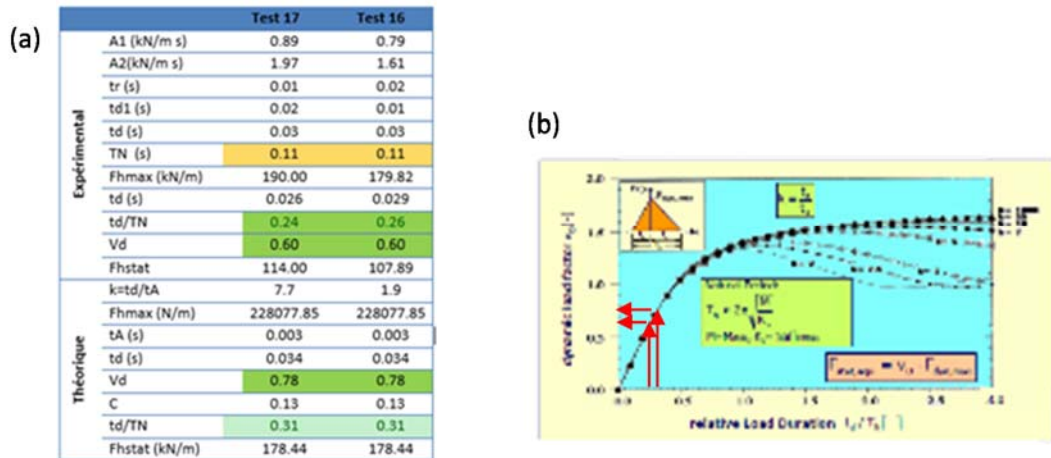


Figure 6. Evaluation du coefficient d'amplification dynamique (a) numérique (b) graphique.

3.3.2 Approche liée à la dynamique des ondes de surpression

Dans cette section, est reportée une démarche classiquement utilisée pour le dimensionnement d'ouvrages de génie civil qu'il paraissait intéressant de venir calquer à l'approche ci-avant. Le développement d'une analyse dynamique simple montre qu'une

pression dynamique peut être équivalente à une pression statique pondérée par un coefficient DLF (Dynamic Load Factor ou facteur de chargement dynamique). Ce coefficient permet de traduire le risque de mise en résonance de l'élément de structure étudiée. En fait, il s'agit de déterminer une pression statique équivalente par la relation suivante :

$$P_{se} = P_{max} \times DLF \quad (1)$$

avec P_{se} : pression statique équivalente, P_{max} : pression maximale exercée sur la structure par l'onde. Le coefficient DLF dépend du rapport entre la durée de la surpression et la période propre de l'élément de structure étudié t_L/T et de la forme de la courbe de pression en fonction du temps. On suppose ici que l'action de la houle est alors assimilable à une action présentant une évolution de forme triangulaire dans le temps. La réponse des structures de génie civil pour ce type de sollicitations est bien documentée. Elle correspond à la forme classique retenue pour les structures soumises à des actions d'ondes de surpression (explosion). Le coefficient d'amplification dynamique peut alors être déterminé par les graphes de la figure 6.

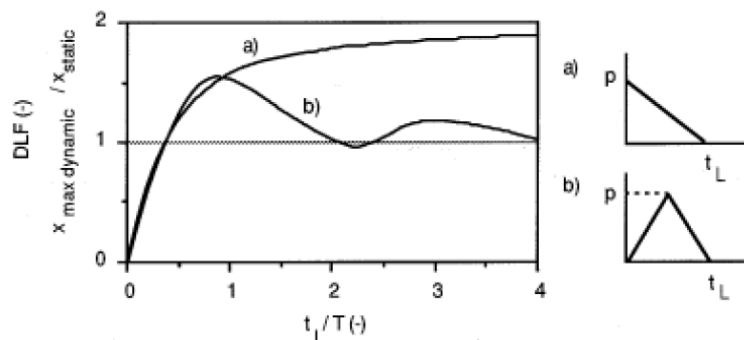


Figure 7. Evolution du coefficient de réflexion (gauche) et des efforts (droite) en fonction de la hauteur de houle incidente.

Selon la figure 7 la durée de surpression est de : $t_L = 0.034$ s et les périodes propres de la structure sont comprises entre 0.11s et 0.093s, portant le rapport t_L/T à environ 0.35. Il n'a donc pas d'amplification dynamique.

4. Conclusions

L'adaptation d'un ouvrage de type digue avec mur de couronnement dans le cadre de la rehausse du niveau de protection nécessaire vis-à-vis de la montée des eaux est investiguée via l'installation d'un écran perforé partiel devant l'ouvrage.

Des essais en canal à houle ont été réalisés pour quantifier l'impact sur le franchissement, les efforts et la réflexion. Cette installation permet de limiter les reprises de l'ouvrage principal et l'impact sur le milieu (navigation, environnement...).

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Les résultats en termes d'efforts ont été investigués en détail pour une prise en compte adaptée des efforts et une optimisation structurelle. L'incertitude liée à l'estimation du F_{90} oblige à considérer plutôt une approche dynamique de la vague maximale pour mieux appréhender les efforts de dimensionnement. Finalement, la comparaison est faite entre l'approche de houle dynamique et celle des ondes de surpression consécutives à une explosion. Cette dernière est moins adaptée mais peut constituer une première approche génie civiliste. Les deux approches de calculs permettent de démontrer que dans le cas de l'ouvrage étudié, les charges dynamiques peuvent être prises en compte comme des charges statiques équivalentes pour le dimensionnement de l'ouvrage principal sans majoration dynamique. La réduction d'efforts de houle générée par l'installation de l'écran peut permettre de limiter les reprises de l'ouvrage de génie civil existant.

5. Références bibliographiques

- BELORGEY M., ROUSSET J.M., TABET AOUL E.H., BERGMANN H., DE GERLONI M. COLOMBO D., FRANCO L., PASSONI G. (2000). *Perforated caisson breakwaters: Wave loads and hydraulic performance*, Coastal Structures '99.
- BERGMANN H., OUMERACI H. (1999). *Hydraulic performance of perforated structures*, Proc. of the 5th COPEDEC, Cape Town, pp 1340-1349.
- LAJOIE D., BOUGIS J., DOLIDON J. (2014). *Conception d'un atténuateur de houle de type caisson à double parois poreuses*. XIIIème Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Dunkerque, 2-4 juillet 2014, pp 649-658. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.071>
- OUMERACI H., ALLSOP W., DE GROOT M. B., CROUCH R., VRIJLING J. K., KORTENHAUS A., VOORTMAN H.G. (2001). *Probabilistic design tools for vertical breakwater*, MAST III / PROVERBS, CRC Press, 392 p.
- TABET AOUL H., ROUSSET J.M., BELORGEY M. (1999). *Analysis of horizontal forces on the vertical walls of perforated breakwater*. 9th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Brest, France, Vol. 3, pp 712-717.
- SERGENT P., PREVOT G., MATTAROLO G., LUCK M., BROSSARD J., NGUYEN D. T., MOREL G., MAR N.-F., BENOIT M., ROPERT F., GUILLOU N., BOUTTES F., KERGADALLAN X., TRICHET J.-J., DELISLE J.-R., MENON J.-M., MALLET P., VOYNEAU N., LAM M., LE BANNER G. (2013). *Projet SAO POLO - Adaptation des structures côtières au changement climatique*. Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions, Colloque technique MEDDTL CFBR Irstea, Aix-en-Provence, du 12 au 14 juin 2013.