HAL
open science

Mesures in-situ d'impacts de vagues sur une digue composite In-situ measurements of wave impacts on a composite breakwater

Pierre-Antoine Poncet, Stéphane Abadie, Benoît Larroque, Benoit Liquet, Damien Sous

To cite this version:

Pierre-Antoine Poncet, Stéphane Abadie, Benoît Larroque, Benoit Liquet, Damien Sous. Mesures in-situ d'impacts de vagues sur une digue composite In-situ measurements of wave impacts on a composite breakwater. Digues 2019 3ème Colloque sur les digues maritimes et fluviales de protection contre les inondation, Mar 2019, Aix-en-provence, France. hal-02082354

HAL Id: hal-02082354

https://hal.science/hal-02082354v1

Submitted on 28 Mar 2019

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.

Mesures in-situ d'impacts de vagues sur une digue composite

In-situ measurements of wave impacts on a composite breakwater

P.A. Poncet[1], S. Abadie[1], B. Larroque[2], B. Liquet[2], D. Sous[2]

[1]UNIV PAU & PAYS ADOUR/ E2S UPPA, Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Électrique – , EA4581, Fédération MIRA, Anglet 64600, pa.poncet@univ-pau.fr
[2]CNRS/UNIV PAU & PAYS ADOUR/E2S UPPA, Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications de Pau – , UMR5142,Fédération MIRA, Pau 64000
[3]MIO-USTV/AMU/CNRS/IRD, UM 110, Université du sud-Toulon-Var, La Garde

Résumé

Afin d'étudier les pressions d'impact in-situ, la digue de l'Artha à Saint-Jean de Luz a été équipée de deux capteurs de pression haute-fréquence disposés l'un au dessus de l'autre sur la partie la plus raide du musoir ouest. Ces deux capteurs ont ainsi enregistré le signal de pression à 10 kHz par tranches de 10 minutes toutes les heures de janvier à avril 2016. Par ailleurs le champs de vagues au large est mesuré par une bouée directionnelle, le niveau d'eau est obtenu au marégraphe de Socoa et le vent est mesuré au sémaphore de Socoa. Les mesures de pression sont en accord avec des études similaires précédentes([1], [2]), mettant en évidence des pics de pressions significativement plus faibles que ceux obtenus en canal [3] ou par simulation numérique. La structure de la digue est à l'origine de phénomènes qui sont en général susceptibles de minimiser les impacts par rapport au cas idéalisé. Un des objectifs de cette étude est aussi d'identifier les conditions qui génèrent les impacts les plus destructeurs. Une première analyse statistique de l'influence des facteurs environnementaux a été réalisé. Une étude du signal de pression brut montre que la digue est soumise à différents types d'impact. La grande majorité des impacts sont relativement lents et leurs intensités en partie contrôlée par la hauteur de vague. Mais des impacts intenses et rapides ont aussi été mesurés dans des conditions de houle et de vent relativement calme. L'intensité de ces impacts ne peut être expliquée uniquement par la pression hydrostatique. Des effets potentiel de compression de poche d'air sont étudiés. La prochaine campagne de mesure qui emploiera plus d'une vingtaine de capteurs permettra peut être de détecter plus d'impacts de ce type et de mieux comprendre leur dynamique.

Mots Clés

Vague, mesure, impact, digue, aération

Abstract

In order to study in-situ wave impact pressure on coastal structure, the Artha breakwater was equipped by two high frequency sensors on its western extremity. These sensors recorded pressure at 10 kHz for 10 minutes every hour from January 2016 to April 2016. During the same period, offshore swell was measured by a directional wave buoy 1km from the breakwater while wind and water level were recorded at the semaphore and tide gauge of Socoa. Pressure measurement are in agreement with previous field experiments ([1],[2]), showing peak pressure relatively weaker than those measured in wave flumes [3]. The breakwater's armor unit is likely to generate complex effects which could minimise impacts. One of the aims of this study is to identify the environmental conditions (swell, water level and wind) that generate the strongest impacts. A first statistical analysis of the environmental datas confirmed the randomness of the phenomenon. Each impact were then studied individually and two types of impact were distinguished. The first and more numerous class present relatively slow impacts which intensity stays relatively close to hydrostatic. The second class present faster and more intense impacts happening for relatively weak wave heights. The potential compression effect of entrapped pockets of air is studied in order to explain those pressures. During the next measurement campaign 22 pressure sensor will be deployed on the breakwater allowing a better understanding of the phenomenon.

Key Words

Wave, measurements, impacts, breakwater, aeration

Introduction

Les impacts de vagues sur les structures côtières sont la source de nombreux dégâts et ont donc été étudiés à de nombreuses reprises. Plusieurs mécanismes entrent en jeux lors de ce phénomène complexe. Les pressions générées lors

de l'impact sont majoritairement gouvernées par la forme locale de la surface libre. Ainsi des pressions très élevées peuvent être générées lorsque le front d'onde est quasiment parallèle à la surface impactée, [4]. Ce type d'impacts, qui sont les plus violents en terme de pression sur l'ouvrage, génère un jet vertical très rapide associés à de fort gradients de pression [5][6]. Les vagues déferlantes peuvent aussi piéger un volume d'air plus ou moins important lorsqu'elles interagissent avec la paroi verticale. Cette poche de gaz interagit avec la surface libre ce qui module les pressions d'impact. Mais l'air peut aussi être entraîné sous forme de petites bulles. La compressibilité globale de l'eau est alors augmentée conduisant à des effets complexes capables d'amplifier ou d'atténuer les pics de pression. De nombreuses études expérimentales ont été menées pour explorer ce processus complexe ([7], [3], [8]).
Les travaux expérimentaux en laboratoire s'écartent du processus naturel in-situ. Premièrement, le processus naturel est essentiellement 3D alors que les expériences en canal sont bidimensionnelles. Cela pourrait entraîner une surestimation ou une sous-estimation de la pression maximale [9]. En second lieu, la règle d'échelle appropriée est difficile à établir [2] bien que les expériences récentes se rapprochent de l'échelle réelle [3]. Troisièmement, les empilements de blocs dissipent une grande partie de l'énergie incidente, des essais au 1/30 ème et au 1/60 ème d'impact de vagues sur la digue de l'Artha et de Socoa le confirment[10]. Enfin certaines variables environnementales (orientation de la houle, période, niveau d'eau, vent) ne sont pas systématiquement prises en compte dans les études en laboratoire. Pour toutes ces raisons, il reste indispensable de collecter des mesures de terrain de la pression d'impact des vagues.
Lors des mesures terrains décrites par [1] des pressions variant de 1,8 à 6,9 bars ont été enregistrés pour des hauteurs de vague entre 1.50m et 4.50m. Plus récemment, un capteur spécifique permettant de mesurer à la fois la pression et la concentration a été déployé à la digue d'Alderney [11] avec des valeurs jusqu' à 3,96 bars [2] pour un Hmax de 2.88m . Dans ce contexte notre étude présente les premiers résultats de quatre mois de mesures en deux points de la digue de l'Artha.

Méthode

La structure étudiée dans ce travail est la digue de l'Artha situé à Saint Jean de Luz (figures 1 et 2). La digue est composée d'un caisson entouré d'une berme en béton. Ces deux éléments sont protégés par une carapace en blocs de béton parallélépipédiques de 50 tonnes. La profondeur en amont de l'ouvrage est de 15m permettant aux houles énergétiques de se propager sans déferlement jusqu'aux blocs. Le dispositif expérimental a été déployé en novembre 2015. Deux capteurs de pression ont été intégrés dans le mur faisant face au large, à l'endroit où les vagues frappent avec le plus d'énergie (figure 1).

figure 1 : Situation de la digue de l'Artha dans la baie de St-Jean de Luz avec en A) la position des capteurs, B) la bouée de houle au large, C) le marégraphe de Socoa, D) le sémaphore de Socoa

Le système d'acquisition et de transmission des données se compose de trois parties principales : l'alimentation électrique, le système d'acquisition et la transmission des données [12] Par défaut, le système enregistre automatiquement les mesures des capteurs au début de chaque heure pendant 10 minutes à 10 kHz aux deux capteurs du haut et du bas .

Le signal de houle est mesuré grâce à une bouée de surface directionnelle Datawell appartenant au réseau Candhis située à environ 1000 m à l'ouest (figure 1), par 20 m de profondeur. Cette bouée permet d'avoir l'élévation instantanée de la surface libre ainsi que les paramètres statistiques et spectraux. La vitesse et la direction du vent (à 10 m d'altitude) ont été mesurées à partir de la station Météo France du sémaphore de Socoa en prenant le maximum sur 10 min, toutes les heures. Enfin, le niveau d'eau est basé sur une analyse harmonique des données recueillies localement au marégraphe de Socoa et un terme de correction pour tenir compte de l'effet de pression atmosphérique [13]
Afin de mieux étudier les différents types d'impacts les échantillons de 10min ont été découpés en impacts unitaires. Seuls les impacts dépassant le seuil de 1 bar (en relatif) ont été retenus. Ce filtre a permis d'obtenir une base de données de 145 impacts. Les signaux pour lesquels l'identification des maxima et minima était ambiguë à cause du bruit ou d'une typologie trop particulière ont été écartés. Cela permet de retenir une base de données de 81 impacts de plus de 1 bar en relatif avec une identification non ambiguë des extrema.

Résultats

Une étude statistique de l'influence des conditions environnementales sur la pressions pour chaque échantillon de 10 minutes a été menée. Un biais évident est le caractère très aléatoire du phénomène qu'on tente de corréler avec des variables parfois moyennées sur 30 minutes (spectre de houle). Il en ressort que 58 % de la variabilité en pression est expliquée par les variables environnementales. La variable la plus importante est la hauteur de vague qui explique 45 % de la variabilité totale. Le niveau d'eau explique 10 %, la direction de la houle 2,5 % et la période des vagues moins de 0,5 % de la variabilité totale. L'influence du vent (vitesse et direction) ne semble pas significative [12]. Dans cette première analyse l'influence dominante de la hauteur de vague est liée au fait que tous les signaux de pression sont pris en compte et notamment les plus faibles. Il est donc probable que ces signaux de pression n'impliquent pas tous une réelle percussion mais plutôt une montée en pression liée au phénomène hydrostatique et donc à la hauteur de vague. Parmi les impacts mis à part, 8 présentent une typologie similaire aux impacts à forte aération décrit dans [7] et présentés en figure 4. La fréquences pic de ces oscillations varie autour de 15-20 Hz pour les impacts les mieux définis, figure 3(g). Les pressions générées par ce type d'impact semblent couvrir une plage de valeurs assez large allant des pressions moyennes aux plus fortes du jeu de donné. Ces impacts seront nommés impacts de type 2 par la suite. Pour les 81 autres impacts qui présentent des pics plus larges (on les qualifiera d'impact de type 1 par la suite) les oscillations sont moins marquées et moins localisées il est donc plus délicat de réaliser la même analyse spectrale.
Pour essayer de différencier des classes d'impact, deux indices ont été étudiés. Dans un premier temps le rapport palier quasi-hydrostatique / pic percussif est étudié. Les 8 impacts atypiques présentent des rapports avec une moyenne à 0.1 et une déviation standard de 3,5% alors que les impacts

Tableau 1. Synthèse des paramètres environnementaux et des mesures.

Paramètre	Valeur moyenne	Valeur maximale
$H_{1/3}$	1.8 m	7.57 m
$TH_{1/3}$	10 s	18 s
Orientation de la houle	313°	
Niveau d'eau	1.7 m/3.5m	4.9 m
Vitesse du vent	8 $m.s^{-1}$	26 $m.s^{-1}$
Orientation du vent	239°	
P_{max} (capteur bas)	0.64 bar	2.59 bar
P_{max} (capteur haut)	0.32 bar	2.69 bar

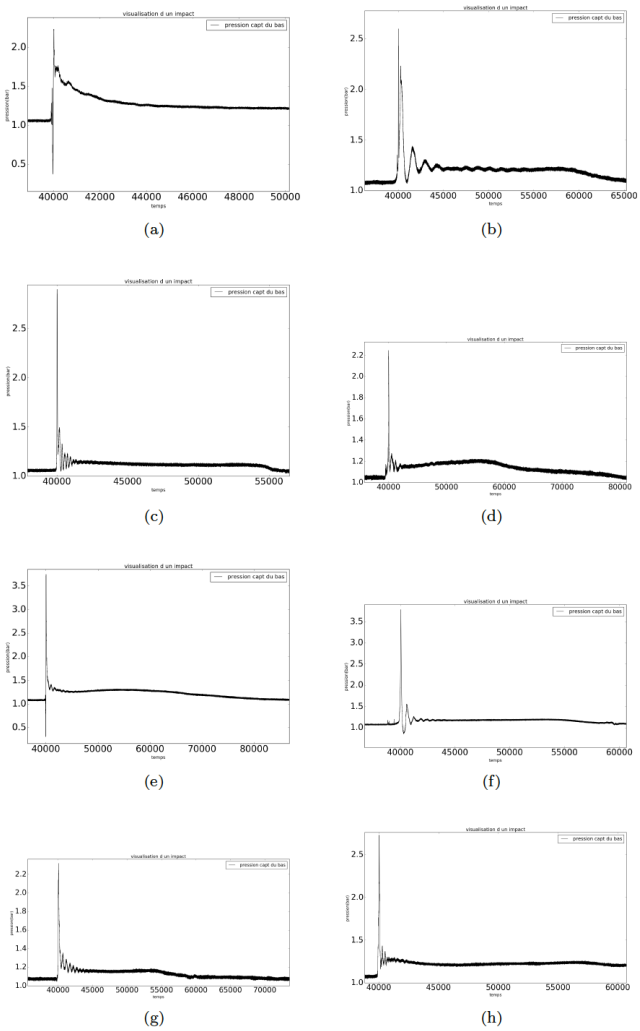

Figure 3 : série temporelle des huit impact de type 2

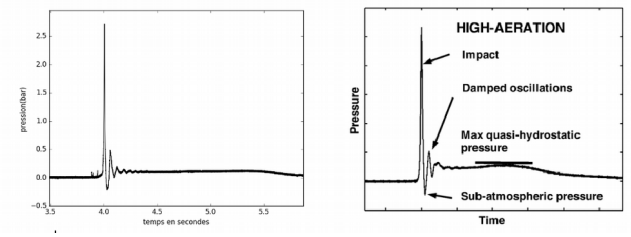

Figure 4 : à gauche signal de pression mesuré sur la digue de l'Artha le 4 avril 2016 à 15h. À droite schéma d'un impact haute aération selon [7]

classiques présentent un rapport moyen de 0.6 mais une déviation standard de 26%. La question est donc de savoir s'il s'agit réellement de phénomènes différents comme décrits par ([14], [15] [7]), ou s'il y a dans la nature un continuum de processus. Un deuxième indice a ensuite été

étudié : le rapport entre la pression du pic percussif et le $H_{1/3}$ pendant l'événement (ramenée à une pression hydrostatique). Cet indice met en évidence cinq impacts qui se détachent particulièrement du reste de la distribution (figure 5), ces cinq impacts étant des impacts qui présentent la forme "forte aération". Il reste donc trois autres impacts qui se

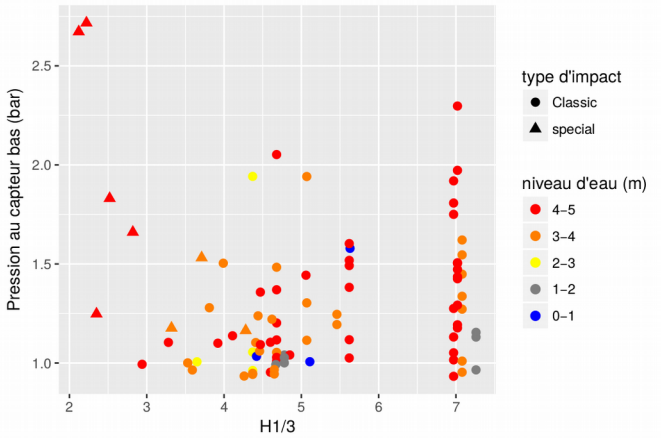

figure 5 : distribution des pressions pic en fonction de $H_{1/3}$, du type d'impact et du niveau d'eau.

distinguaient par le premier indice mais qui ne passent pas le critère de ce second indice. En figure 5 on retrouve les 5 impacts qui présentent des pressions élevées pour des $H_{1/3}$ modérées uniquement pour des niveaux d'eau supérieurs à 4 m.
Sous l'hypothèse que ces impacts correspondent à des impacts hautes aération avec poche d'air emprisonnée les valeurs de pression maximales ont été comparées au valeurs prévues par le modèle de Bagnold [16] dans le tableau 2.

La formule de [16] nous donne :

$$P_{max} - P_0 = 2.7 \rho U^2 K / D \qquad (1)$$

Avec K la largeur de la colonne d'eau en mouvement, D la largeur de la poche d'air et P_0 la pression de référence.
On fait les approximations suivantes pour obtenir les valeurs du tableau 2 :

$$\rho = 1026\, kg/m^3$$

$$U = \sqrt{g * H}$$

$K = H/5$ Selon la formule empirique de [16]

$D = \alpha * H$ Avec α un coefficient variable

Six cas sont étudiées : trois pour un impact généré par une vague d'amplitude $H_{1/3}$ et différentes épaisseurs du coussin d'air emprisonné et trois pour un impact généré par une vague d'amplitude H_{max} et différentes épaisseurs du coussin d'air. Les noms des colonnes sont du type $PmaxbaH$ avec H successivement $H_{1/3}$ et H_{max}.
Les valeurs de pressions mesurées sont toutes supérieurs au valeurs prévues par le modèle de Bagnold pour une vague d'amplitude $H_{1/3}$ et un coussin d'air d'épaisseur $0.5 * H_{1/3}$. Les cases grisées correspondent aux valeurs de pression maximales calculées selon le modèle de Bagnold les plus proches des pressions maximales mesurées. Pour les impacts du 03/11 et du 04/07 à 15h les pressions sont plus fortes que celles explorées dans ce tableau donc pour des poches d'air plus petites que 0.1H soit moins de 35 cm d'épaisseur au maximum.

Discussion

Dans cet article, de nouvelles mesures in-situ de la pression d'impact des vagues sur un caisson soumis à un climat de vagues énergétiques ont été présentées. Les valeurs de pression maximale enregistrées au cours de l'expérience sur le terrain sont un ordre de grandeur inférieures aux pressions enregistrées en canal. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce résultat. Les blocs forcent la plupart des vagues à déferler suffisamment avant le mur du caisson et à dissiper leur énergie (ces blocs ont une structure 3D qui influence le déferlement ce qui n'as pu être prise en compte dans les expériences de [10]). Deuxièmement, la digue de l'Artha est orientée selon un axe est-ouest alors que la plupart des vagues viennent de l'ouest-nord-ouest. Pour capter les pressions maximales, des capteurs ont été placés sur la partie ouest du brise-lames, qui est une partie courbée du mur. Pour cette raison, les pressions générées peuvent être réduites par rapport à une paroi plane. Un modèle linéaire multivarié a été mis en œuvre pour étudier les liens entre la pression

TABLEAU 2: COMPARAISON DES VALEURS DE PRESSIONS MAXIMALES MESURÉES AU MODÈLE DE BAGNOLD

date	$H_{1/3}$ (m)	H_{max} (m)	Pmax (bar)	Pmaxb05h13 (bar)	Pmaxb02h13 (bar)	Pmaxb01h13 (bar)	Pmaxb05hmax (bar)	Pmaxb02hmax (bar)	Pmaxb01hmax (bar)
01/06	4.3	6.1	1.1	0.5	1.2	2.3	0.7	1.6	3.3
01/30	3.7	6.2	1.5	0.4	1.0	2.0	0.7	1.7	3.4
02/12	2.5	3.91	1.8	0.3	0.7	1.4	0.4	1.1	2.1
02/27	3.3	6.3	1.2	0.4	0.9	1.8	0.7	1.7	3.4
03/11	2.1	3.4	2.6	0.2	0.6	1.1	0.4	0.9	1.8
04/07 15h	2.2	3.5	2.8	0.2	0.6	1.2	0.4	1.0	1.9
04/07 17h	2.3	3.5	2.2	0.25	0.6	1.25	0.4	1.0	1.9
04/08	2.8	4.6	2.6	0.3	0.8	1.5	0.5	1.2	2.5

d'impact maximal et les paramètres environnementaux. La hauteur de houle significative explique 45 % de la variabilité avec ce modèle. Les résultats présentés en figure 5 vont être approfondis en utilisant d'autres indices et variables. En particulier la hauteur de vague en pied d'ouvrage permettra de prendre en compte la période par une formule de shoalling. Les travaux de modélisation en cours devraient également permettre une étude plus fine basée sur l'analyse vague à vague. Une limite de cette première expérience est l'utilisation de seulement deux capteurs. Il est bien connu [2] que les pics de pression élevés n'apparaissent que très localement. Il est donc probable que des valeurs de pression plus élevées puissent être enregistrées par un réseau de capteurs plus dense. De plus, un réseau de capteurs couvrant la direction verticale et horizontale peut aussi aider à déterminer le type d'impact en étudiant leur structure spatiale. Dans les approximations de cette étude et selon le modèle de Bagnold les huit impacts de type 2 de plus de 1 bar enregistrés ont pu être produits pour des vagues enfermant des poches d'air de moins de 35 cm d'épaisseur pour les impact les plus forts jusqu'à plus de 1m pour les impact de type 2 se produisant pour des houles plus grosses. La première hypothèse pour appliquer ce modèle est que les huit impacts étudiés correspondent bien a des impacts hautes aération (une poche d'air enfermée). Cette hypothèse est largement soutenue par la ressemblance entre le signal type présenté par [7] et les mesures. Un frein à cette identification vient de la configuration du dispositif de mesure, les nombreux effets induit par le déferlement dans les blocs, l'aération dans l'eau devant l'ouvrage et la courbure de la digue peuvent également participer à la génération des oscillations amorties observées. Une analyses approfondie de la périodes des oscillations et de l'amortissement devrait aider à valider cette hypothèse [17].

Le modèle de Bagnold semble tout de même proposer des pics de pression du même ordre de grandeur que les valeurs mesurées. C'est relativement surprenant dans la mesure où ce modèle ne prend pas en compte l'aération et donc la pseudo-compressibilité de la masse d'eau qui impact le mur, en plus des approximations effectuées. Deux hypothèse sont alors possibles :

- Les forts niveaux d'eau enregistrés permettent aux impacts de se produire avec des taux d'aération de l'eau assez faibles et le modèle s'applique bien.

- Les pressions mesurés correspondent en fait à des cas plus critiques (poche d'air très mince) mais avec des taux d'aération élevés qui induiraient des effets d'amortissement non pris en compte par le modèle de Bagnold.

Conclusion

Les résultats préliminaires d'une nouvelle campagne de mesures in-situ de pression d'impact des vagues sur un brise-lame composite situé sur la côte basque française à Saint Jean de Luz (Golf de Gascogne) ont été présentés dans cet article. Les mesures ont été réalisées de janvier à mars 2016. Les pressions maximales mesurées lors de cette campagne sont plus faibles que dans les précédentes expériences en canal ou par modélisation numériques publiées. Une étude du lien entre les pressions maximales et les paramètres environnementaux montrent le rôle de la hauteur des vagues et du niveau d'eau. Ce travail doit être poursuivi pour chaque impacts avec en particuliers la reconstitution de la surface libre devant la digue. Une première analyse typologique est proposée et une comparaison avec le modèle de [16] permet d'émettre des hypothèses sur la nature des phénomènes ayant

générés les plus fortes pressions. Le modèle de Bagnold ne permet pas de caractériser précisément chaque impact mais prévoit des valeurs de pression cohérentes avec nos mesures pour les impacts de type 2. Pour permettre une analyse plus complète, un véritable réseau 2D de 22 capteurs de pression couvrant les directions horizontale et verticale a été installé au printemps 2018.

Remerciements

Les auteurs remercient le programme européen POCTEFA MAREA EFA046/15 pour le support financier. La thèse de Pierre-Antoine Poncet est financée par le programme ISITE E2S.

Références

[1] De Rouville A., Besson P., Petry P., (1938) *Etat actuel des études internationales sur les efforts dus aux lames.* Annales des Ponts et Chaussées VII.

[2] Bullock G.N., Crawford A.R., Hewson P.J., Walkden M.J.A., Bird P.A.D. (2001). *The influence of air and scale on wave impact pressure* Coastal Engineering, Vol. 42(4), pp291-312 https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00065-X

[3] Hofland B., Kaminski M., Wolters G. (2011). *Large scale wave impacts on a vertical wall.* Coastal Engineering Proceedings, Vol 18(3), 15 p.

[4] Wagner H. (1932) . *The phenomena of impact and planning on water* NACA translation, 1366

[5] Cooker M.J., Peregrine D.H. (1990) . *A model for breaking wave impact pressures.* Coastal Engineering Proceedings, Vol. 1(22), pp 1473-1486 https://doi.org/ 10.1061/9780872627765.112

[6] Cooker M.J., Peregrine D.H. (1992) . *Wave impact pressures and its effect upon bodies lying on the sea bed.* Coastal Engineering, Vol. 18(3), pp 205-229 https://doi.org/10.1016/0378-3839(92)90020-U

[7] Bullock G.N., Obrhai C., Peregrine D.H., Bredmose H. (2007). *Violent breaking wave impacts. part 1: Results from large-scale regular wave tests on vertical and sloping walls.* Coastal Engineering, Vol. 54(8), pp 602-617 https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.12.002

[8] Kaminski M.L., Bogaerts H. (2009). *Full scale sloshing impact tests.* 19th International Off shore and Polar Engineering Conference (Osaka, Japan), International Society of Offshore and Polar Engineers.

[9] Peregrine D.H. (2003). *Water wave impact on walls.* Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 35(1), pp 23–43. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.35.101101.161153

[10] Bougis J., Rihouey D., Bernard S., Vergnet C., Cayrol C., Garcia N., Jocou F., Roudil A., (2016) *Extrapolation d'essais d'impacts de la houle sur modèles réduits* JNGCGC Toulon 2016, pp 333-342. https://doi.org/10.5150/jngcgc.2016.038

[11] Bird P.A.D., Crawford A.R., Hewson P.J., Bullock G.N. (1998) *An instrument for field measurement of wave impact pressures and seawater aeration.* Coastal Engineering, Vol. 35(1998), pp 103–122. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(98)00020-9

[12] Larroque B., Arnould P., Luthon F., Poncet P.A., Rahali A., Abadie S. (2018) *In-situ measurements of wave impact pressure on a composite breakwater: preliminary results*. International Coastal Symposium (ICS) 2018, Busan, South Korea. Journal of Coastal Research, Special Issue n° 85.

[13] Arnoux F., Abadie S., Bertin X., Kojadinovik I. (2018). *A database to study storm impact statistics along the Basque Coast.* International Coastal Symposium (ICS) 2018, Busan, South Korea, Journal of Coastal Research, Special Issue N°85.

[14] Oumeraci H., Klammer P., Partenscky H.W. (1993) *Classification of breaking wave loads on vertical structures.* Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 119(4), pp 381–397. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:4(381)

[15] Hull P., Müller G. (2002) *An investigation of breaker heights, shapes and pressures.* Ocean Engineering, Vol. 29, pp. 59–79. https://doi.org/10.1016/S0029-8018(00)00075-5

[16] Bagnold R., (1939). *Interim report on wave-pressure research*, J.Inst Civil Eng. 12: 201–226.

[17] Lugni C., Brocchini M., Faltinsen O.M. (2010) *Evolution of the air cavity during a depressurized wave impact. II. The dynamic field* Physics of fluids 22, 056102