



Réaménagement du port de pêche de la Cotinière: Dimensionnement de deux digues portuaires par faible profondeur d'eau

**Sébastien LEDOUX ¹, Luc HAMM ^{2,6}, Franck MAZAS ², Marie-Laure GENCO ²
François HACQUES ², Jean-Louis BOUQUET ³, Antoine BLANDIN ⁴,
Mathieu BARBIER ⁵**

1. ARTELIA Maritime, Nantes, France.
sebastien.ledoux@arteliagroup.com
2. ARTELIA Maritime, Echirolles, France.
3. Vinci Construction Terrassement, Saint-Pierre-d'Oléron, France.
4. Vinci Construction Terrassement, Rueil Malmaison, France.
5. Département de Charente-Maritime, Rochefort, France.
6. Consultant en hydraulique maritime, Echirolles, France.

Résumé :

Le réaménagement du port de pêche de la Cotinière (île d'Oléron, Charente-Maritime) a fait l'objet d'un partenariat public-privé entre le département de la Charente-Maritime (porteur du projet et exploitant du port) et CETEAUCEANS (partenaire privé en charge des travaux et entretien durant 20 ans). La conception des aménagements a été confiée à un groupement piloté par ARTELIA. Les travaux ont débuté fin 2018 et se sont achevés fin 2021.

Le dimensionnement des deux digues à talus de protection en eau peu profonde a nécessité de prendre en compte des phénomènes spécifiques tels que le déferlement continu des vagues de tempêtes, l'élévation du niveau d'eau lié à ce déferlement, la création d'ondes basses-fréquences, la fatigue des carapaces. De plus, les critères de projet étaient stricts au niveau du franchissement admissible, notamment sur le terre-plein accueillant la criée. Un prédimensionnement a été effectué en utilisant l'état de l'art et les connaissances scientifiques les plus récentes sur le site. Le dimensionnement a été vérifié et finalisé à l'aide d'essais 3D sur modèle physique en cuve à houle. De plus, les impacts de ces ouvrages sur le trait de côte ont été appréciés sur la base d'une étude sur plan et ont permis de mettre en œuvre, au cours des travaux, les mesures de limitation nécessaires pour enrayer la réorientation du trait de côte à l'est du port.

Mots-clés :

Génie côtier, Hydraulique maritime, Travaux maritimes, Evènements extrêmes, Déferlement, Analyse bivariée, Modèle physique, Cuve à houle

Lecture spéciale

1. Présentation de l'opération

Le port de la Cotinière, situé au sein de la commune de Saint-Pierre-d'Oléron sur l'île du même nom, est le port de pêche artisanale les plus importants de Charente-Maritime. À lui seul, il concentre près des deux tiers des poissons pêchés dans le département. Rénovée en 1987, l'infrastructure portuaire s'est toutefois révélée trop petite pour accompagner la croissance de la production locale. Par ailleurs, l'accès au bassin d'échouage et au quai de débarquement ne pouvant se faire qu'à marée haute, la sécurité des pêcheurs, qui ne pouvaient s'y abriter en cas de changement brusque de météo, n'était pas assurée. Quant à l'infrastructure de vente (le bâtiment où se déroule "la criée"), elle était sous-dimensionnée pour les 6 000 tonnes de poissons qui y transitaient tous les ans. Le Conseil départemental de Charente-Maritime (porteur du projet et exploitant du port) a donc lancé en 2013 une consultation pour un partenariat public-privé, comprenant la conception, la construction, le financement, le gros entretien et le renouvellement du port de pêche. Le partenariat public-privé a été signé en 2016 avec CETEAUCEANS, partenaire privé en charge des travaux et entretien durant 20 ans composé de plusieurs sociétés du Groupe VINCI, ainsi qu'un groupement de maîtrise d'œuvre constitué d'ARTELIA, mandataire, et de l'agence d'architecture BPG + Associés.

2. Description du projet réalisé

Le port de pêche de La Cotinière a donc été agrandi et réhabilité au terme d'un chantier de trois ans (figures 1 et 2). Ce projet mené dans le respect de l'environnement a permis les aménagements suivants :

- Création d'un terre-plein de 40 000 m² accueillant la nouvelle criée (3 fois plus grande que l'ancienne) de 11 000 m² et le pôle de mareyage ;
- Creusement du nouveau bassin de 4,3 hectares à la cote – 2,5 m CM accessible pour les pêcheurs à n'importe quel moment de la marée, 24h/24 ;
- Creusement du chenal d'accès dérocté à la cote – 2,5 m CM ;
- Allongement de la digue ouest de 130 mètres et rehaussement de l'ouvrage existant sur 270 mètres pour répondre aux critères de franchissement définis par le Conseil Départemental ;
- Création de la digue d'enclôture du nouveau terre-plein sur un linéaire de 570 mètres de long ;
- Réalisation d'un quai de 200 mètres de long adossé à la nouvelle criée pour la débarque du poisson ;
- Création d'une zone d'avitaillement en glace ;
- Construction d'une nouvelle criée sur le terre-plein ;
- Démolition partielle de l'actuelle criée ;
- Maintien des bassins existants (utilisation pêche et plaisance) ;
- Remise à l'état naturel de la dune ;
- Maintien de la zone de réparation navale.



Figure 1. Vue aérienne du port de la Cotinière. Haut : avant travaux. Bas : photomontage du projet.



Figure 2. Vue aérienne du projet réalisé (source : Vinci).

Lecture spéciale

3. Les conditions océano-météorologiques

3.1 Les niveaux d'eau

Le marnage au port de la Cotinière atteint 5,7 m avec un niveau haut annuel à + 6,3 m ZH. Le niveau d'eau centennal avec surcote est estimé à + 6,75 m ZH (SHOM & CETMEF, 2012). A cela s'ajoute l'effet du déferlement des vagues (*setup*). Ainsi, un niveau d'eau de + 7,15 m ZH a été mesuré au pic de la tempête Xynthia qui se décompose en un niveau de marée à + 5,8 m ZH, une surcote de 1,15 m et une surélévation due aux vagues de 0,2 m (BERTIN *et al.*, 2017).

3.2 Les conditions d'agitation au large

L'analyse des houles du large a été effectuée en utilisant la base de données HOMERE d'états de mer reconstitué (BOUDIERE *et al.*, 2013). Celle-ci comprend des informations horaires sur 23 années entre 1994 et 2016. Elle a été validée par comparaison avec des mesures de terrain effectuées à deux occasions au large de l'île d'Oléron (bouées 01703 - Shom et 01704 - Cerema / Université de la Rochelle / DIRM Atlantique du réseau CANDHIS (<https://candhis.cerema.fr>, figure 3).

Les vagues en provenance de l'Atlantique (secteur [N235-N315]) constituent la quasi-totalité des états de mer observés au large de La Cotinière (97,7 %). Dans ce secteur, les mers de vent plus locales ne sont pas clairement visibles dans la base de données car très souvent dominées par les houles avec des périodes longues comprises entre 12 et 24 s.

L'analyse des séries temporelles des hauteurs, périodes et direction au point HOMERE 12445 par - 41 m ZH a fait apparaître deux types d'état de mer pour les tempêtes les plus fortes :

- Des mers de vent pleinement développées comme les tempêtes Lothar et Martin en décembre 1999 ou la tempête de février 1996 avec des hauteurs significatives en pic atteignant les 10 m ;
- Des houles comme la tempête Hercules de janvier 2014 ou la tempête de décembre 1998 avec de longues périodes dépassant 20 s et des hauteurs significatives de l'ordre de 6 m.

Trois secteurs du large ont été considérés en ce point: les tempêtes océaniques d'ouest (N255) qui sont dominantes, les mers de vent de sud-ouest (N225) et les mers de vent plus faibles de sud (N180) qui pénètrent plus facilement dans le bassin portuaire. Une analyse d'extrêmes a conduit à une hauteur significative centennale du secteur ouest à 11,5 m avec une période associée de l'ordre de 17 s.

3.3 Le transfert à la côte

Un modélisation numérique spectrale utilisant le code de calcul SWAN v41.20 a été mise en place pour ce transfert qui s'est opéré selon deux modalités :

- Un transfert intégral de la base de données HOMERE par un calcul instationnaire sur 23 ans en utilisant 6 points en conditions aux limites pour lesquelles les densités spectro-angulaires étaient disponibles (figure 3) ;
- Le transfert de 25 évènements extrêmes combinant niveaux et houles extrêmes (voir chapitre suivant).

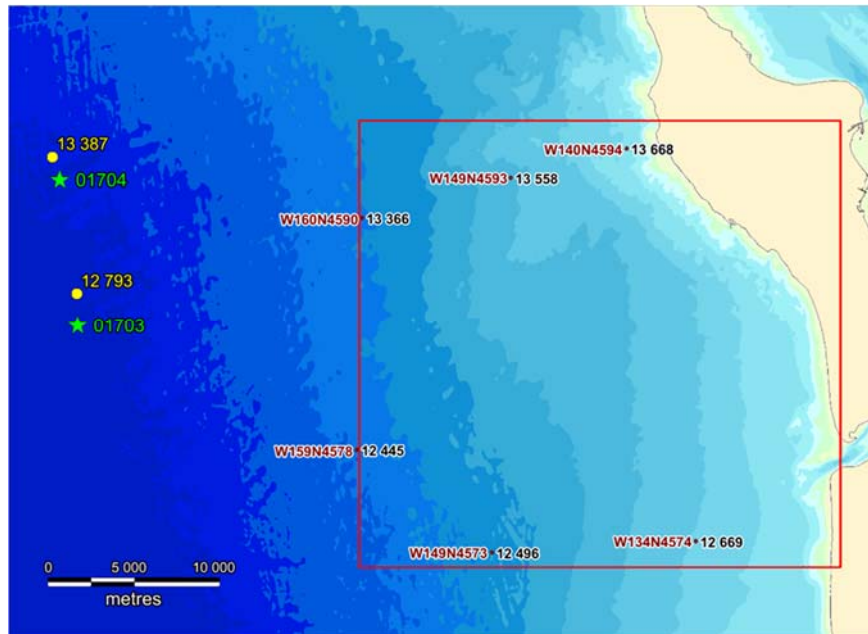


Figure 3. Position des deux bouées au large (étoiles vertes), des 8 points HOMERE et des limites du modèle régional de transfert des états de mer.

Un modèle numérique de terrain (MNT) a été construit pour la bathymétrie par assemblage de plusieurs sources de données bathymétriques (dont le MNT HOMONIM du SHOM, 2015) et topographiques pour l'estran (MNT Lidar 2016 de l'IGN). Un soin particulier a été apporté à la bonne représentation des hauts fonds rocheux devant le port qui conduisent à des déferlements significatifs (figure 4). Nous avons notamment lissé ces fonds pour distinguer ce qui relève de la rugosité du fonds et ce qui relève de bathymétrie proprement dite en cohérence avec les différents mécanismes d'interaction entre les vagues et le fond marin (réfraction et déferlement, frottement sur le fond).

Trois grilles de calcul ont été utilisées avec une maille passant de 100 m au large à 10 m à la côte. Un coefficient de frottement sur le fond différencié pour chacune des grilles a été choisi après analyse de la couverture rocheuse et sédimentaire du site. Ce coefficient vaut 0,05, 0,1 et 0,2 du large vers la côte. Il est associé à une formulation de Madsen. D'autre part, la formulation par défaut de SWAN avec un coefficient gamma constant de 0,73 a été utilisée pour le paramétrage du déferlement. Ce modèle a été validé par comparaison avec des mesures ADCP à -7,3 m ZH incluant la tempête Kurt de février 2017 (BERTIN *et al.*, 2017).

Lecture spéciale



Figure 4. Bathymétrie à la côte sur photo aérienne et limites du modèle de détail de transfert à la côte (1,5km x 1 km).

L'analyse des résultats a montré un effet important de réfraction qui modifie l'incidence des houles d'ouest pour les amener au sud-ouest ($N235^\circ$) devant le port. D'autre part, une réduction très importante des hauteurs significatives est observée (facteur de réduction de l'ordre de 3 à 4) induit par le déferlement des vagues à l'approche de la côte du fait des faibles profondeurs d'eau. Un point de référence, situé devant le musoir ouest du nouveau port, a été fixé et les conditions de houle estimées en ce point (PH3). La hauteur significative centennale est de 2,55 m à comparer aux 11,5 m au large (figure 5). Les niveaux d'eau sont cependant augmentés du fait du *setup* qui peut atteindre jusqu'à 0,45 m.

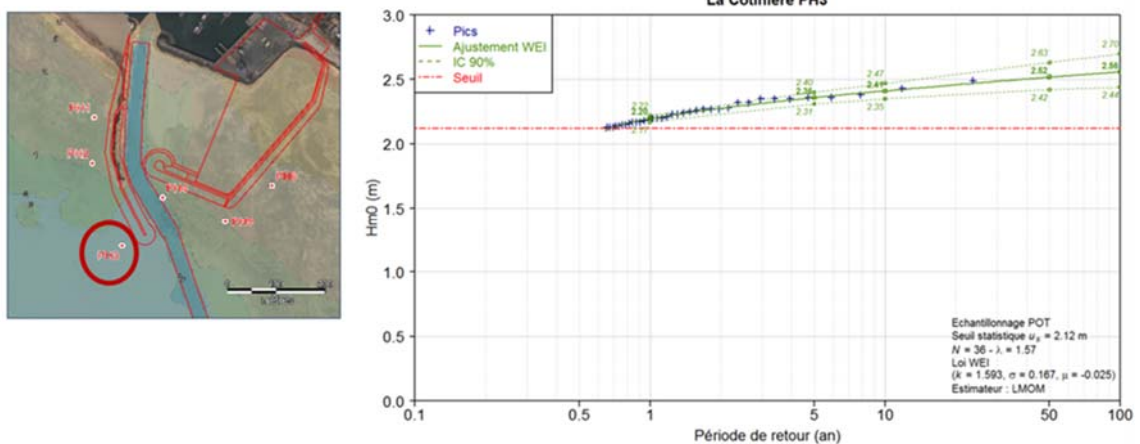


Figure 5. Hauteurs significatives extrêmes au droit du musoir de la nouvelle digue de protection (point PH3).

Une corrélation effectuée sur 11 tempêtes du large entre 2005 et 2016 (incluant Xynthia) indique que la saturation de la hauteur significative est obtenue pour des tempêtes annuelles ou supérieures. Cela signifie que la digue extérieure va être soumise à des efforts de houle répétés, ce qui peut conduire à une accumulation de dommages par fatigue. Pour quantifier cet effet, nous avons calculé le nombre d'heures au point PH3 pour lesquelles H_m0 dépasse 2 m avec un niveau d'eau supérieur à + 5,8 m ZH sur les 23 années de la base de données. On aboutit à un total de 259 h, soit plus de 10 h par an.

4. Les critères de projet

4.1 Les exigences de l'appel d'offres

Les différents critères de projet portaient sur :

- La stabilité des carapaces des digues de protection (pas de dégâts en deçà d'événements de période de retour centennale) ;
- Les débits maximaux de franchissements des digues (digue Est: $q_{max} < 1$ l/s/ml, digue Ouest: $q_{max} < 20$ l/s/ml) ;
- Le terre-plein : éviter toute submersion pour des périodes de retour d'événements climatiques inférieur à 100 ans ;
- L'agitation portuaire.

4.2 Les différentes options étudiées

Une série de 25 événements extrêmes ont été sélectionnés pour répondre au cahier des charges dont 15 du secteur ouest dominant. Ils ont été définis d'abord en combinant les niveaux et houles annuels, décennaux et centennaux puis en considérant des événements combinés de probabilité centennale en appliquant la méthode développée par MAZAS & HAMM (2017).

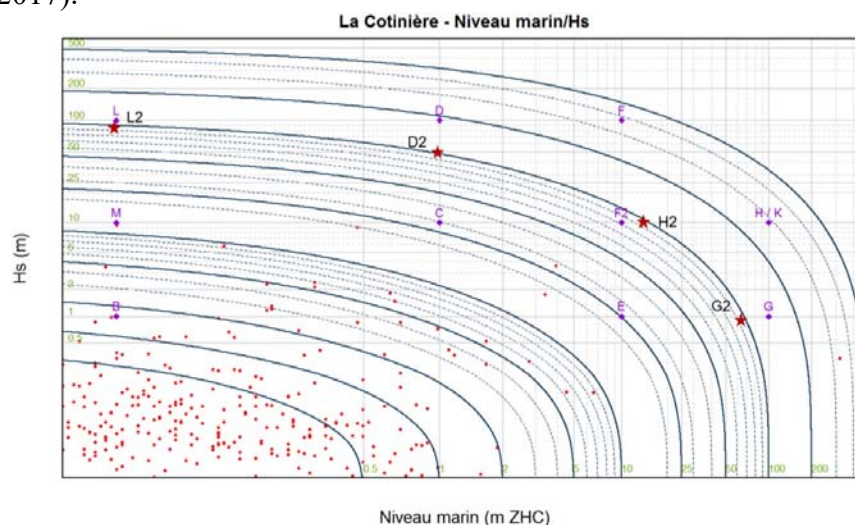


Figure 6. Périodes de retour des événements extrêmes représentatifs au large, retenus pour le secteur ouest.

Lecture spéciale

La figure 6 fournit les périodes de retour des événements considérés. Les événements L2, D2, H2 et G2 sont issus des événements L, D, H et G ramenés à leur probabilité combinée centennale par diminution des hauteurs significatives de houle ou des niveaux d'eau. La tempête Xynthia a également été retenue pour les risques de submersion ainsi qu'un événement Xynthia+CC incluant 0,6 m de remontée du niveau moyen de la mer due au changement climatique en cours.

Le transfert à la côte a été ensuite effectué par des calculs stationnaires avec des conditions aux limites uniformes. Une attention particulière a été apportée au calcul du *setup* induit par le déferlement des vagues en cumulant les surélévations calculées par chaque modèle dans le modèle emboîté suivant. Ces calculs ont retrouvé la valeur de hauteur significative centennale de 2,55 m déjà obtenue précédemment pour le secteur ouest avec une estimation du *setup* associé de 0,45 m.

5. Le prédimensionnement des digues

5.1 Approche fonctionnelle

Compte-tenu des conditions d'agitation assez faibles, le principe de deux digues à talus en enrochements a été retenu. Le prolongement de la digue principale et la position de la digue secondaire de protection du terre-plein ont fait l'objet d'une approche fonctionnelle classique de plan-masse pour définir leur géométrie avec notamment une étude des conditions d'agitation dans le port par modélisation numérique. Un point particulier a été porté au respect des limites de franchissements avec un prédimensionnement de la cote d'arase et de la largeur en crête des digues avec les approches de l'EurOtop (2007) conduisant à une cote à + 9,5 m ZH et une largeur en crête de 4 m pour le prolongement de la digue principale (digue Ouest).

5.2 Approche structurelle

La carapace des digues a été prédimensionnée classiquement avec les formules de van der Meer et van Gent préconisées par le Manuel Enrochements, en considérant 3000 vagues soit environ de 10 à 17 heures selon la période de la houle. Ces formules nécessitent d'estimer la hauteur significative $H_{1/3}$ alors que la modélisation numérique fournit une hauteur significative spectrale H_{m0} . Un coefficient conservatif de 1,35 a été utilisé pour cela en appliquant la formule de THOMPSON & VINCENT (1985).

Cela a conduit à une carapace en 3-5 t sur une pente à 2 pour 1 pour le prolongement de la digue Ouest en section courante (4-6 t au musoir).

La sensibilité aux dommages cumulés a été étudiée à l'aide de la méthode de Melby (2005) pour dix tempêtes de période de retour annuelles à centennales sur des durées de 3 à 6h soit environ 13 500 vagues représentant 45 heures de tempêtes. Les valeurs de

dommages cumulés sont inférieures à celles d'un événement extrême centennal considéré dans le prédimensionnement avec la méthode de Van der Meer.

6. Vérification sur modèle physique en cuve à houle

Des essais de vérification du dimensionnement des deux digues ont été réalisés en cuve à houle au sein du Laboratoire d'Hydraulique d'ARTELIA. Les objectifs de ces essais étaient de vérifier la stabilité hydraulique des différentes parties des ouvrages (carapace, talus arrière soumis aux franchissements), d'évaluer les franchissements et de vérifier l'agitation dans le bassin n°3, pour les conditions annuelles, décennales à centennales.

6.1 Description de l'installation

Le modèle a été réalisé dans le bassin LHF de 30 m par 30 m, équipé d'un générateur de houle fixe composé de 60 volets batteurs de 0,50 m qui a été utilisé pour reproduire les houles de secteur Sud. Il a été complété d'un batteur mobile de 16 m pour simuler les houles océaniques de secteur Ouest. Ils ont été utilisés alternativement et nous présenterons ici uniquement les essais de phase 1 avec le batteur mobile (figure 7). L'échelle retenue était le 1/35 en similitude de Froude.

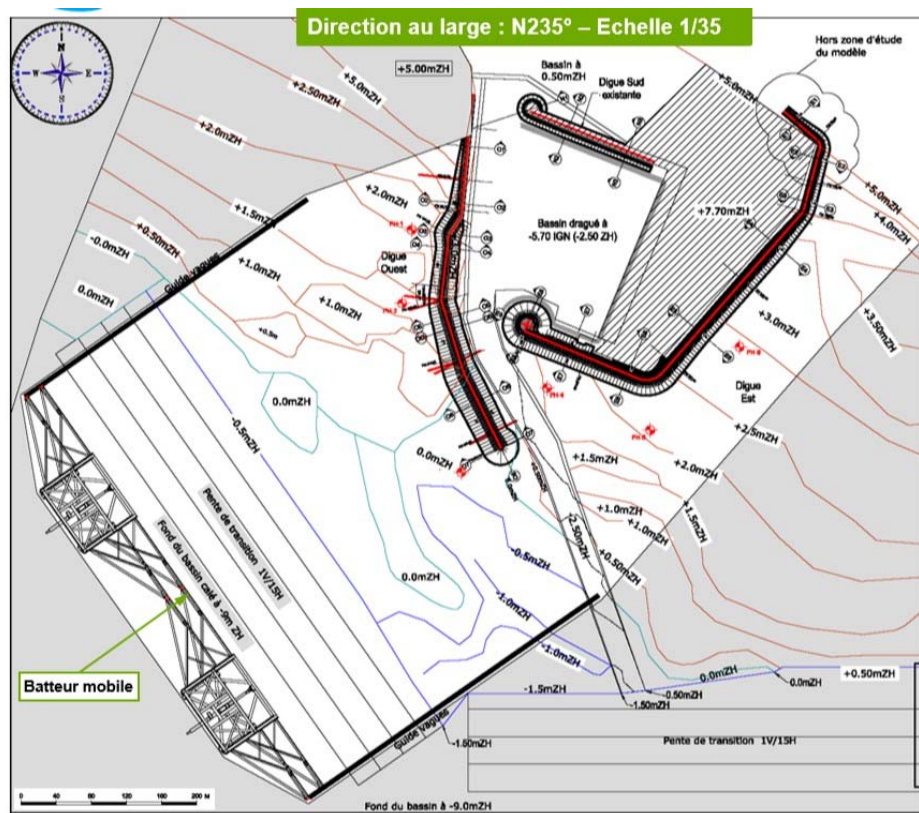


Figure 7. Plan-masse du modèle 3D dans sa configuration houles d'ouest.

Lecture spéciale

6.2 Calibration des conditions de houle sans ouvrage

La bathymétrie a d'abord été construite sans ouvrages et 4 sondes à houle ont été disposés devant le batteur et au pied des deux digues pour calibrer les consignes de houle incidente au batteur. Le batteur étant implanté par fonds de - 9 m ZH, il n'était pas possible de simuler les conditions de houle au large. Le calage a donc consisté à monter progressivement la hauteur significative spectrale au batteur pour retrouver les valeurs obtenues par la modélisation numérique au point PH3. 11 tempêtes de secteurs ouest et sud-ouest (incluant Xynthia) ont été calées pour vérifier les conditions de stabilité et de franchissement des ouvrages.

Le dépouillement des enregistrements de houle a mis en évidence la génération et le développement d'ondes longues significatives avec des périodes de l'ordre de 45 à 90 s et des hauteurs atteignant jusqu'à 30% de la hauteur significative spectrale des vagues devant le coude de la digue Est. D'autre part, les vagues en pied d'ouvrage étaient très non-linéaires avec un ratio $H_{1/3}$ sur H_{m0_h} (hauteur significative spectrale hautes fréquences) de l'ordre de 1,15 en pied de la digue ouest. Ces observations sont en accord avec les mesures de terrain de BERTIN *et al.*, (2017, 2020) dépouillées à l'aide du logiciel développé par BONNETON *et al.*, (2018).

D'autre part, les conditions d'agitation mesurées au droit de la digue secondaire se sont révélées être plus fortes que les résultats de la modélisation numérique avec le logiciel SWAN. Cela influera sur les volumes de franchissement atteignant le terre-plein.

6.3 Tests de stabilité

Les tests de stabilité ont globalement confirmé les coupes-type issues du prédimensionnement, y compris après le test de nombreuses tempêtes exceptionnelles simulant les conditions de fatigue auxquelles seront soumis les ouvrages. Une section singulière a néanmoins été renforcée sur la digue ouest.

6.4 Tests de franchissement

La digue ouest est très franchie en conditions extrêmes (jusqu'à 35 l/s/ml, figure 8) mais les dommages constatés sur le talus arrière et l'agitation induite dans le bassin respectent les critères de projet.

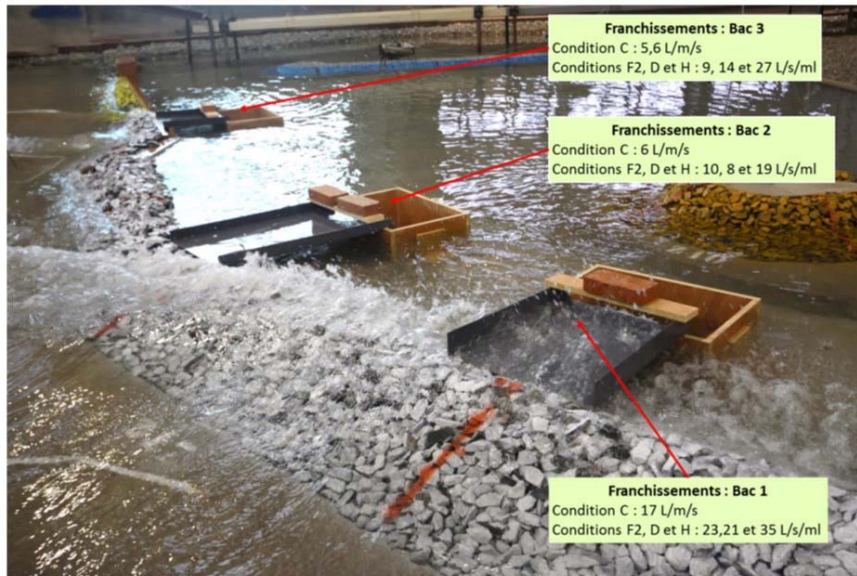


Figure 8. Mesures des franchissements sur la digue ouest.

Sur la digue est, des mesures de volume instantané ont complété les mesures classiques de franchissement (figure 9). Le critère de franchissement en condition centennale (1 l/s/ml) a été dépassé pour trois événements et des volumes instantanés importants (maximum 2 m³/ml) ont été mesurés. Son dimensionnement a donc été revu sur la partie la plus exposée avec une rehausse de la cote d'arase de 0,5 m et un adoucissement de la pente de la carapace à 2 pour 1.



Figure 9. Mesure des volumes maximaux de franchissement sur la digue est.

Enfin des submersions fréquentes du quai et du terre-plein dans le bassin n°3 (quai à + 7,70 m ZH) sont apparues pour la condition Xynthia+ CC, conduisant à préconiser un rehaussement de 0,4 m de la cote du terre-plein et du quai. Ces submersions étaient dues

Lecture spéciale

non seulement à l'élévation du niveau de la mer de 0,6 m mais également à l'apparition d'une seiche portuaire dans le bassin.

7. Les enseignements à tirer

Ces études très complètes ont permis un retour d'expérience sur les sujets suivants :

- a) Les deux méthodes utilisées pour la définition des conditions de projet à pied d'ouvrage ont conduit à des résultats complémentaires. Le transfert à la côte de l'ensemble de la base de données du large à l'avantage de bien prendre en compte l'effet des covariables (période, direction, niveaux d'eau). Elle fournit aussi des durées d'exposition des ouvrages permettant de quantifier les actions de fatigue. Le transfert à la côte d'évènements sélectionnés au large de son côté permet des calculs plus précis de propagation sur des bathymétries complexes pour les conditions extrêmes dépassant les observations historiques ainsi que pour la prise en compte de l'élévation du niveau marin.
- b) La nécessité d'estimer à la fois H_{m0} et $H_{1/3}$ à pied d'ouvrage pour les calculs de prédimensionnement est une difficulté récurrente de tels projets situés par faibles profondeurs dans la zone de déferlement. La formule de THOMPSON & VINCENT (1985) est très conservative. D'un autre côté, une étude récente (PEZERAT *et al.*, 2021) a mis en évidence de possibles sous-estimations de H_{m0} avec le paramétrage recommandé du déferlement en faible profondeur du logiciel SWAN, en cas de très faibles pentes des fonds. Les deux approches pourraient possiblement se compenser. Des recherches seraient à mener sur ce sujet en utilisant notamment des modélisations déterministes non-moyennées sur la période des vagues fournissant les évolutions de la surface libre.
- c) Les mesures de volume maximal de franchissement en complément des mesures classiques de débit moyen ont été très utiles pour la digue Est. Ils s'inscrivent dans les recommandations du nouveau manuel EurOtop (2018) qui était en cours de finalisation lors des essais réalisés en 2017-2018.
- d) La présence d'ondes longues sur la côte ouest de l'île d'Oléron est maintenant bien documentée dans la littérature scientifique. Sa prise en compte dans les études de prédimensionnement structurel des ouvrages reste difficile. En revanche, le nouveau manuel EurOtop de 2018 apporte des avancées conséquentes sur le sujet pour estimer les franchissements.

Remerciements

A Xavier Bertin (LIENSS - La Rochelle) pour les mesures de houle à Oléron et à Philippe Bonneton (EPOC -Bordeaux) pour la fourniture du logiciel d'analyse de ces mesures. A Xavier Kergadallan (Cerema) pour l'accès aux données de houle CANDHIS, au Shom pour le MNT HOMONIM et à l'Ifremer pour l'accès aux données HOMERE.

8. Références bibliographiques

- BERTIN X., DE BAKKER A., CHATAIGNER T., GUERIN T. (2017). *Energy transfers and reflection of infragravity waves at a dissipative beach under extreme storm conditions*. Présentation aux XBEACH Days, Delft, novembre 2017
- BERTIN X., MARTINS K., PEZERAT M., MENGUAL B., LAVAUD L., COULOMBIER T. (2020). *Mieux comprendre l'impact des évènements extrêmes sur les littoraux nécessite davantage d'observations in situ*. XVI^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Le Havre, 2020, <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2020.005>
- BONNETON P., LANNES D., MARTINS K., MICHALLET H. (2018). *A nonlinear weakly dispersive method for recovering the surface wave elevation from pressure measurements*. Coastal Engineering 138, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.04.005>
- BOUDIERE E., MAISONDIEU C., ARDHUIN F., ACCENSI M., PINEAU-GUILLOU L., LEPESQUEUR J. (2013). *A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters*. International Journal of Marine Energy, 3-4, e40-e52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.01> - Open Access : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00164/27524/>
- MAZAS F., HAMM L. (2017). *An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels*. Coastal Engineering 122, 44-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.02.003>
- PEZERAT M., BERTIN X., MARTINS K., MENGUAL B., HAMM L. (2021). *Storm waves in the nearshore area using spectral model: Current issues and a pragmatic solution*. Ocean Modelling, 158, 101737, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101737>
- SHOM (2015). *MNT Bathymétrie de façade Atlantique (Projet Homonim)*. http://dx.doi.org/10.17183/MNT_ATL100m_HOMONIM_WGS84
- SHOM - CETMEF (2012). *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*. <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/statistiques-niveaux-marins-extremes-cotes-france-manche>
- THOMPSON E.F., VINCENT C.L. (1985). *Significant wave height for shallow water design*. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng, 111(5), ASCE, 828-842. DOI:10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:5(828)

Lecture spéciale