

Étude de l'impact d'une tempête extrême sur la Grande Plage de Biarritz en présence d'une digue amovible en sacs de sable

Mohamed ROZKI¹, Denis MORICHON¹, Matthias DELPEY²,
Volker ROEBER³, Stéphane ABADIE¹

1. Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, SIAME, Allée du parc Montaury, 64600 Anglet, France.
mohamed.rozki@univ-pau.fr; denis.morichon@univ-pau.fr;
stephane.abadie@univ-pau.fr
2. SUEZ, Smart & Environmental Solutions, Centre Rivages Pro Tech, 2 Allée Théodore Monod, 64210 Bidart, France.
matthias.delpey@suez.com
3. Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, SIAME, Chaire HPC-Waves, 64600 Anglet, France.
volker.roeber@univ-pau.fr

Résumé :

La Grande Plage de Biarritz a connu plusieurs événements de tempêtes extrêmes ces dernières décennies qui ont causé d'importants dégâts matériels sur les ouvrages et bâtiments situés en front de mer. Ces événements ont conduit à la mise en place d'une stratégie de protection des infrastructures et des usagers qui intègre notamment le déploiement d'une digue amovible en sacs de sable sur le perré situé en haut de plage. Cette étude présente les résultats d'une campagne de mesure réalisée pendant la tempête Justine du 31 janvier 2021 qui a fortement frappé le littoral basque et des simulations associées. Le dispositif de mesure mis en place comprend une série de capteurs de pression fixés au pied du perré sur lequel avaient été sanglées deux rangées de sacs de sable. Ces capteurs sont utilisés pour déterminer les occurrences de franchissement et les hauteurs associées atteintes pendant la tempête en plusieurs endroits le long de la plage. L'hydrodynamique sur l'estran, est étudiée à partir d'un modèle de vague à phase résolue qui est utilisé pour estimer les efforts mécaniques exercés sur les sacs de sable lors des franchissements. Les résultats du modèle permettent d'apporter des premiers éléments de compréhension des processus hydrodynamiques pouvant être à l'origine de mouvements très localisés de sacs de sable observés pendant cette tempête.

Mots-clés:

Digue amovible, Impact des tempêtes, Franchissement, Observations, Modèle Boussinesq.

Thème 7 – Risques côtiers

1. Introduction

Il est maintenant admis que l'élévation du niveau marin due au réchauffement climatique va provoquer une augmentation de l'impact des tempêtes au cours des prochaines décennies. Par conséquent, la protection des infrastructures côtières dans les environnements exposés à l'aléa de submersion marine est désormais critique pour les communes littorales concernées. Parmi les solutions de protection, les digues amovibles constituent une alternative adaptée aux sites touristiques qui souhaitent conserver leur paysage intact en dehors des périodes de tempête. Les sacs de sable appartiennent à cette catégorie de solution temporaire. Ce type de barrière est mis en place avant l'arrivée d'une tempête sur une période restreinte afin de rehausser le seuil de garantie d'un perré et réduire les efforts mécaniques transmis en aval de l'ouvrage de défense. Le dimensionnement et le déploiement de digues amovibles reposent essentiellement sur des approches empiriques. En particulier, les formules utilisées pour déterminer le poids d'un sac de sable sont basées sur des expériences réalisées en laboratoire dans des configurations idéalisées (PULLEN *et al.*, 2007). Un travail supplémentaire est donc nécessaire pour mieux comprendre et prédire les sollicitations extrêmes générées par une (ou plusieurs) vague(s) de submersion sur un module de protection.

Dans cet article, nous nous intéressons à un cas réel où une telle barrière temporaire a été mise en défaut lors d'une tempête. Le site étudié est la Grande Plage de Biarritz, et l'événement, la tempête Justine qui a frappé le littoral basque au cours de l'hiver 2021. Durant cet événement, des capteurs de pression ont été disposés en plusieurs points au pied du perré situé en haut de plage. Ces mesures de niveau d'eau, intéressantes pour mieux comprendre le franchissement, sont complétées par des simulations des vagues à phases résolues. Une fois calibrées, les simulations nous permettent de calculer l'hydrodynamique à l'origine des franchissements et une approximation des efforts exercés sur les sacs de sable.

2. Matériel et méthode

2.1 Site d'étude

La Grande Plage de Biarritz (GPB, figure 1), située sur le littoral basque, est une plage de poche, fortement urbanisée, de type intermédiaire-réfléctive avec un estran pentu (8-9%) et une terrasse de faible pente (2-3%) (MORICHON *et al.*, 2018). L'exposition de la GPB aux vagues de tempêtes est élevée comme en témoigne la base de données historique établie par ABADIE *et al.*, (2018). Cette étude montre que la GPB a connu plus de 30 événements de submersion marine entre 1950 et 2014. Elle a été notamment sévèrement endommagée au niveau du Casino au cours de la tempête Hercules en février 2014.



Figure 1. Site de La Grande plage de Biarritz : (a) Volet gauche : localisation de la côte basque française à l'échelle du sud-ouest de la France, volet droit : position de la barrière de protection temporaire. (b) Photo des unités de sacs de sable d'un m^3 de volume.

Ces différents événements ont conduit les services techniques de la ville de Biarritz à mettre en place une stratégie de gestion du risque de submersion marine qui repose sur un système d'alerte précoce et la mise en œuvre de différentes mesures de protection en fonction du niveau d'alerte. Pour le niveau le plus élevé, la solution de protection retenue consiste à protéger le haut de plage en déployant le long du perré plusieurs modules de protection constitués de sacs de sable de deux tonnes. Cette barrière de protection temporaire était constituée de deux rangées de trois sacs de sable sanglées par groupes de six durant la tempête Justine. Malgré cette précaution, des groupes de sacs de sables ont été déplacés lors de la tempête.

2.2 Données d'observation

La hauteur significative (H_s), issue d'une analyse vague à vague, et la période pic (T_p) sont mesurées à la bouée CANDHIS mouillée à 50 m de profondeur au large du cap St Martin. L'évolution de ces variables pour ce qui concerne la fenêtre temporelle correspondant à la tempête Justine est présentée en figure 2.

Thème 7 – Risques côtiers

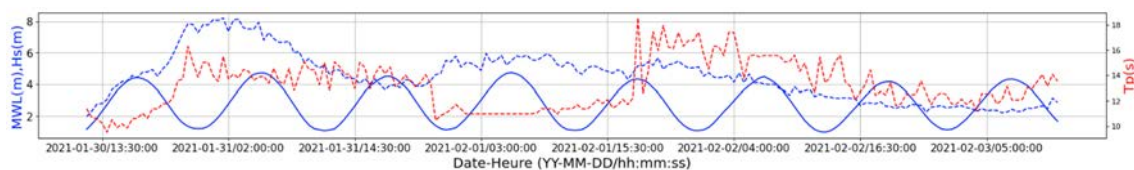


Figure 2. Evolution des conditions de vagues du 30 janvier au 3 février 2021.

Le pic de la tempête Justine s'est produit le 31 janvier entre 5h et 6h avec des valeurs de Hs et Tp, respectivement de 7m et 15s, concomitant à un niveau de marée haute de 4.73m. A défaut de disposer d'une mesure locale, les niveaux d'eau sont fournis par les mesures du marégraphe de Bayonne-Boucau situé à 5.5 km du site d'étude. Ces mesures réalisées toutes les 10min, prennent en compte l'effet de la marée et de la surcote atmosphérique. Le set up est calculé implicitement par le modèle. Quelques unités de sacs de sable ont été déplacées dans la nuit du 31 janvier 2021 en face de la partie nord du Casino (figure 3).

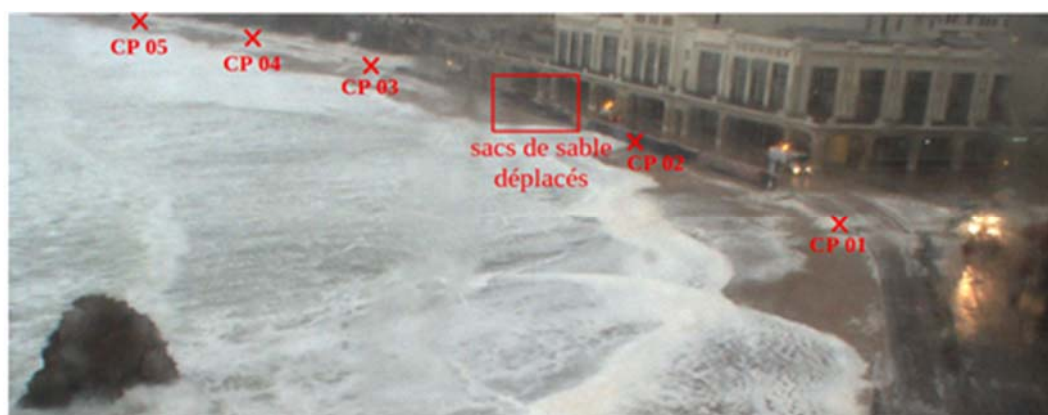


Figure 3. Photo des sacs de sable déplacés (en noir) la nuit du 31 janvier 2021 et positions des capteurs de pression le long de la GPB.

Cinq capteurs de pression (notés CP sur la figure 3) fixés au pied du perré de la GPB, équidistants d'une centaine de mètres, ont permis d'enregistrer les hauteurs d'eau du 30 janvier au 3 février 2021. Ces capteurs ont une fréquence d'enregistrement de 2 Hz. Les hauteurs de franchissement sont obtenues à partir des pressions mesurées en faisant l'hypothèse que la pression est hydrostatique.

2.3 Caractéristiques du modèle de vague

Le modèle de vague à phase résolue de type Boussinesq est le modèle BOSZ (ROEBER & CHEUNG, 2012). Il s'agit d'un modèle intégré sur la profondeur, basé sur les équations de NWOGU (1993) exprimées sous une forme conservative. BOSZ a été utilisé pour différentes applications, notamment pour étudier les tsunamis (MORICHON *et al.*, 2021), les oscillations portuaires (BELLAFONT *et al.*, 2018), les transformations des vagues (VARING *et al.*, 2020) et le run-up (PINAULT *et al.*, 2020). Le système d'équations,

faiblement non-linéaire et faiblement dispersif, permet de modéliser la transformation des vagues des eaux intermédiaires jusqu'aux eaux peu profondes. Le déferlement, dont le critère est basé sur le nombre de Froude, induit une viscosité turbulente dans l'écoulement calculée par le modèle de Prandtl-Kolmogorov (*i.e. longueur de mélange*).

BOSZ est utilisé ici pour simuler la propagation des vagues depuis le large jusqu'au franchissement. A noter que le modèle n'est capable que de représenter le franchissement par déversement par opposition au franchissement par paquet de mer.

Dans ce travail, le modèle a été utilisé en 1D, le long de 5 profils de plage situés au droit des 5 capteurs de pression (figure 4).

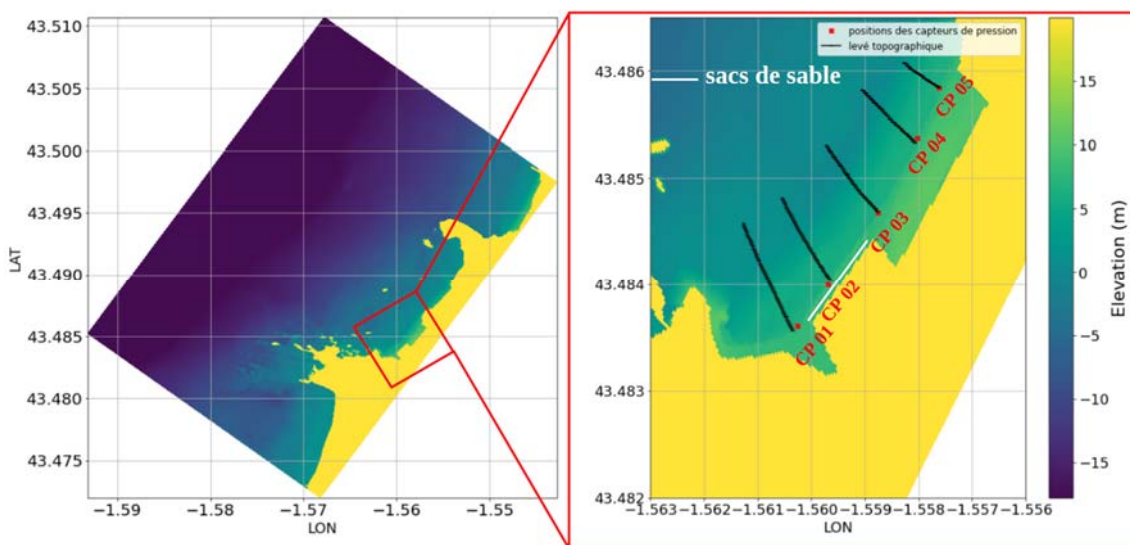


Figure 4. Bathymétrie et topographie du domaine et zone d'étude (encadrée en rouge).

2.4 Définition d'un événement de franchissement

Dans la présente étude, un événement de franchissement se définit comme un épisode pendant lequel le perré, ou la barrière de protection temporaire sont noyés et où le niveau d'eau dépasse une valeur seuil de 0.2 m fixée au-dessus de la structure de défense amovible devant le casino et au-dessus du perré dans le reste du domaine. La même définition est utilisée pour identifier les pics de franchissement observés et simulés, figure 5. Bien que les variables représentatives du franchissement soient influencées par la valeur du seuil, il n'y a pas de consensus dans la littérature sur le choix de cette valeur (KOOSHEH *et al.*, 2021). Dans la présente étude, la valeur du seuil du franchissement est choisie de manière à ne conserver que les franchissements significatifs.

La hauteur de franchissement (HF) simulée est calculée en faisant la différence de la surface libre et du niveau topographique, au nœud correspondant au sommet de la digue amovible au droit du CP 02 (figure 5), et au sommet du perré dans le reste du domaine. La HF observée est déterminée en déduisant la hauteur d'eau comprise entre la position du CP 02 et le sommet de la digue amovible du signal de pression converti en niveau

Thème 7 – Risques côtiers

d'eau sous l'hypothèse hydrostatique. Nous calculons ensuite la moyenne (HF_{moy}) et la valeur maximale (HF_{max}) sur l'état de mer étudié en réalisant chaque fois 20 tirages de phase différents (voir section 2.6).

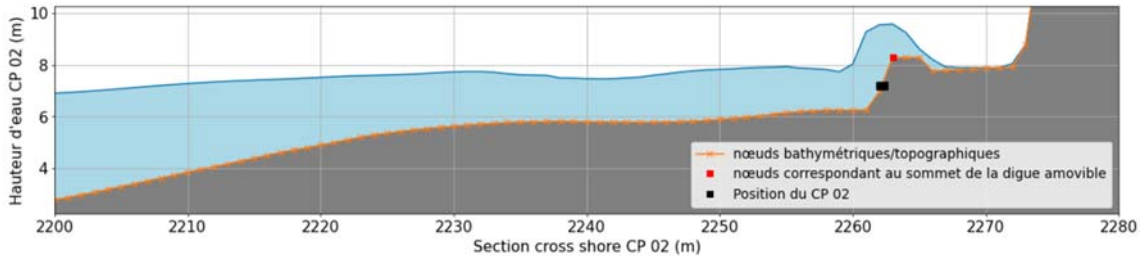


Figure 5. Événement de franchissement de la digue amovible au droit du CP 02.

2.5 Test de sensibilité au maillage

Un test de sensibilité de la hauteur maximale du franchissement (HF_{max}) à la taille de maille (Δx) au droit du CP 02 est présenté dans cette section, figure 6. Toutes les simulations sont caractérisées par la même distribution des phases. Les tailles de maille étudiées sont respectivement $\Delta x=1m$, $1.2m$, $1.4m$, $1.6m$, $1.8m$, $2m$ et $3.5m$. Justine génère des gradients très prononcés de la surface libre dans certains endroits du domaine provoquant une instabilité numérique pour un maillage plus fin que $1 m$.

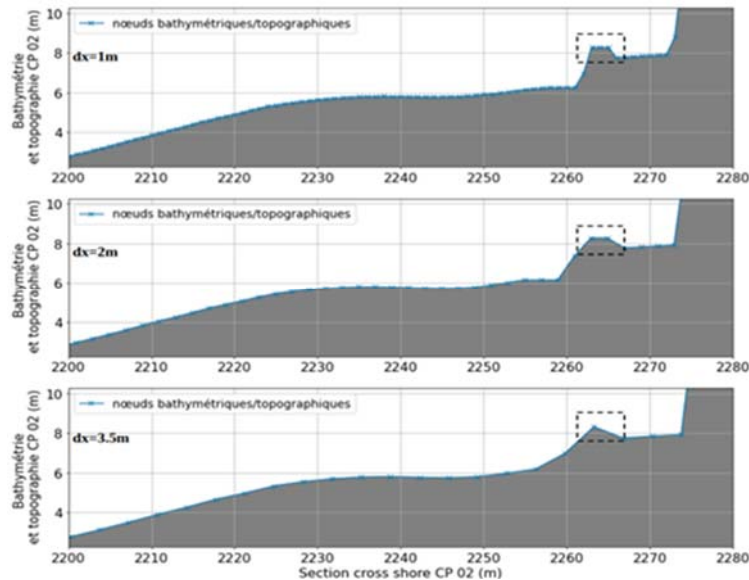


Figure 6. Profils bathymétriques et topographiques au droit du CP 02 avec différents maillages. La zone encadrée correspond aux sacs de sable.

Comme le montre la figure 7, au droit du CP 02, la HF_{max} augmente régulièrement jusqu'à un peu moins de $1m$ pour $\Delta x=1.4m$ puis semble commencer à osciller pour des Δx

inférieurs. Bien qu'il montre encore une légère variabilité, l'indicateur HF_{max} semble se stabiliser pour $\Delta x \leq 1.6m$.

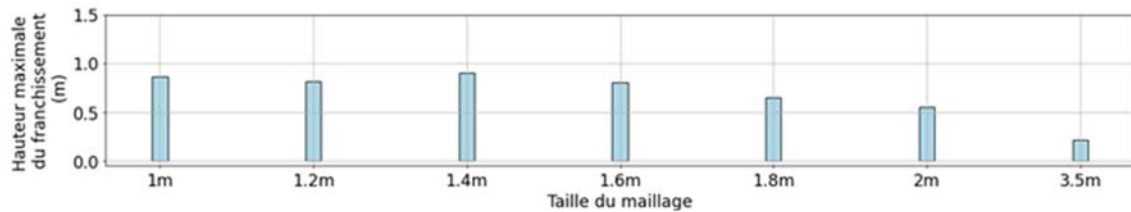


Figure 7. Sensibilité du franchissement au maillage en 1D

2.6 Test de sensibilité à la phase

Étant donné que l'on ne connaît pas les phases des différentes composantes spectrales qui sont intervenus durant l'événement, il est impossible de reproduire exactement ce qui a été observé. Néanmoins, on peut obtenir des informations statistiques d'intérêt en réalisant plusieurs simulations, avec pour chacune, un tirage de phase différent. C'est ce qui est représenté dans la figure 8. Cette figure montre que les moyennes et les écarts-types semblent converger à partir de 20 simulations (écart de la moyenne de la HF_{max} et son écart-type inférieurs à 1cm), nombre que l'on pourrait éventuellement réduire à 10 pour des raisons de temps de calcul avec une perte modérée de précision.

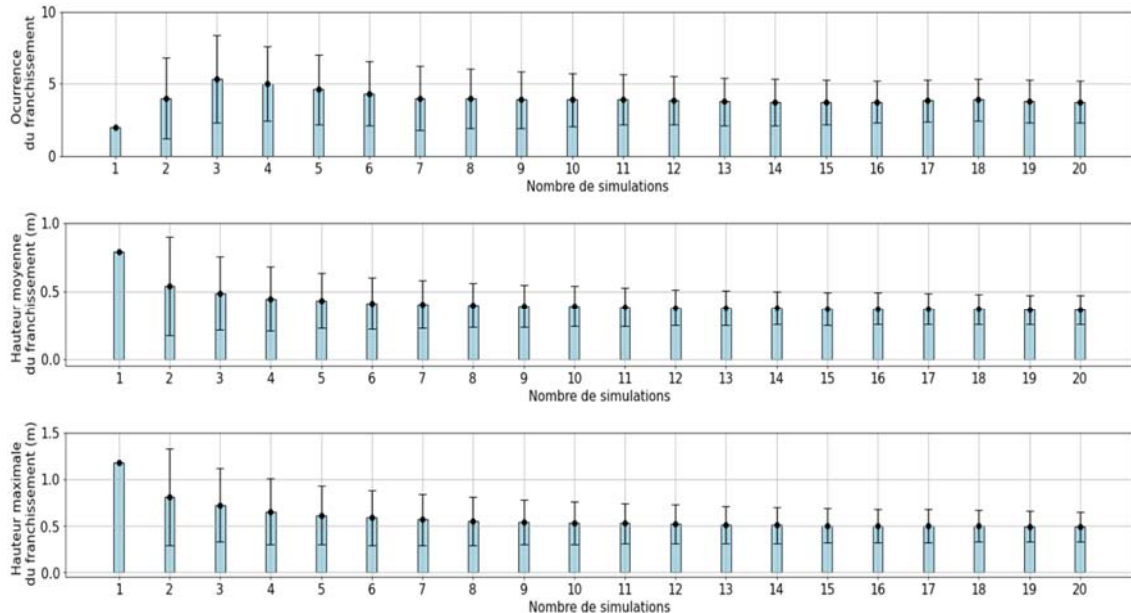


Figure 8. Évolution de la moyenne des occurrences de franchissement, des hauteurs moyennes et maximales de franchissement et de leurs écarts-types respectifs en fonction du nombre de simulation.

Pour le reste de l'étude, le maillage est uniforme, avec une taille de maille de 1m. La friction sur le fond est modélisée par un coefficient de Manning uniforme d'une valeur de $0.02sm^{-1/3}$. Cette valeur est calibrée avec comme référence les mesures de hauteur de

Thème 7 – Risques côtiers

franchissement. Cette calibration modélise en quelque sorte l'influence du mur en haut de plage qui, compte tenu de sa pente, n'est pas parfaitement simulé par le modèle. Au large, le modèle est forcé avec un spectre fréquentiel calculé par le modèle SWAN (BOOIJ *et al.*, 1999). Les phases sont tirées de manière aléatoire, et pour chaque résultat, 20 simulations sont réalisées. La surface libre et les vitesses sont enregistrées à une fréquence de 2 Hz comme les données d'observation (DO).

2.7 Calculs des forces

On cherche également à estimer la force d'impact associée à l'événement de franchissement maximal en un point donné. Pour ce faire, on utilise la formulation de CROSS, (1967) :

$$F = \frac{1}{2}\rho gh^2 + C_f \rho hu^2, C_f = 1 + (\tan\theta_0)^{1.2} \quad (1)$$

où : F est en N/m, ρ est la masse volumique de l'eau, g est l'accélération de la pesanteur, h et u sont respectivement la hauteur et la vitesse du bore juste avant l'impact et $\tan\theta_0$ est la pente du front du bore. Cette formulation sépare la force générée en une contribution hydrostatique et dynamique (i.e., en u^2). Les paramètres (h et u) du bore sont calculés grâce au modèle en amont du pied du perré immédiatement avant l'impact. Cette formulation, basée uniquement sur les propriétés du bore, ne prend pas en compte la dimension de l'obstacle. Or, la force d'impact au droit du CP 02 agit sur le perré et la barrière de protection temporaire caractérisés par la même hauteur (1 m). Pour ne considérer que l'action agissant sur la barrière de défense amovible, la moitié de la force sera uniquement retenue. La force est également moyennée sur 20 simulations pour chacun des 5 transects. L'unité de la force est le N/m, nous multiplions le résultat par 3m pour avoir un équivalent de la force sur les 3 sacs qui font face à la vague. Il convient de rappeler que les sacs de sables étaient sanglés par groupes de six sur deux rangées de trois sacs durant la tempête Justine.

La force critique (i.e., théoriquement nécessaire pour déplacer des sacs) est également estimée pour la comparer à la force d'impact. Elle est calculée ici comme la somme du produit du coefficient de friction statique f_c (digue amovible/sol – $f_c \sim 0.3$) et du poids déjaugé de six sacs de sable.

3. Résultats

Les hauteurs d'eau enregistrées sur toute la durée de la tempête Justine, sont présentées dans la figure 9. On peut remarquer que les pics de franchissement se sont produits le 31 janvier 2021 de 02:00 à 07:40. Par la suite, nous nous focalisons sur le créneau horaire 5h-6h du 31 janvier 2021 correspondant au pic de marée.

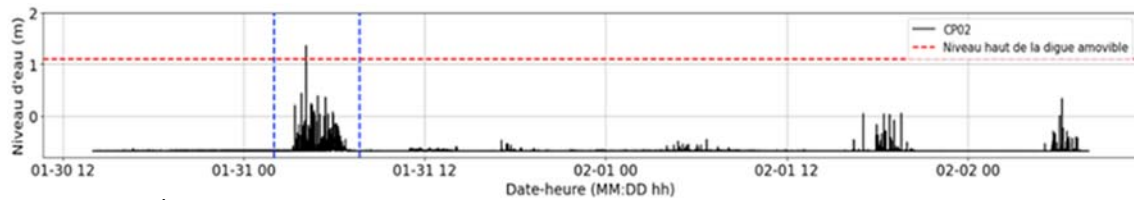


Figure 9. Évolution du niveau d'eau au cours de la tempête Justine au droit du CP 02. (Mise en évidence du pic de la tempête de 02h00 à 7h40 par les lignes en bleu).

Le tableau 1 et la figure 10 montrent les résultats obtenus au droit des 5 capteurs pour ce créneau horaire. En ce qui concerne les observations, les capteurs ont enregistré plus de franchissement (95%) dans la partie nord du domaine (CP 03, 04 et 05) comparativement au sud (CP 01 et 02).

Tableau 1. Comparaison des occurrences et des intensités des franchissements observés et simulés.

	CP01	CP02	CP03	CP04	CP05
Occurrence du franchissement: DO	2	0	10	4	20
Occurrence du franchissement: BOSZID	2	3	10	4	26
Hauteur moyenne du franchissement (m): DO	0.47	-	0.41	0.30	0.41
Hauteur moyenne du franchissement (m): BOSZID	0.55	0.64	0.65	0.55	0.41

Les simulations 1D-BOSZ calibrées à partir du coefficient de Manning, reproduisent très bien les occurrences de franchissement observées aux CP 01, 03 et 04 mais surestiment un peu ce paramètre au droit des CP 02 et 05. La rehausse du seuil de garantie par la mise en place de la digue amovible au droit du CP 02 explique l'absence d'événements de franchissement à cet endroit. Les HF_{moy} simulées sont également assez proches des HF_{moy} observées à l'exception des CP 02, 03 et 04. Outre cela, les HF_{moy} et HF_{max} simulées sont plus ou moins surestimées au droit des CP 01, 03 et 04 et légèrement sous estimées au droit du CP 05 (figure 10). Il est toutefois important de noter que les occurrences de franchissement sont très hétérogènes au droit des 5 capteurs de pression, et donc, l'estimation des HF_{moy} et les comparaisons sous-jacentes sont à considérer avec prudence. La figure 10 montre que la composante hydrostatique de la force d'impact est moins importante par rapport à la composante dynamique. L'écart-type de la force est particulièrement important au droit du CP 02. A l'endroit où les sacs se sont déplacés, elle ne représente que 29.6% de la force, les 70.4% restants étant dus à la composante dynamique. La force critique est ici largement dépassée par la force d'impact, ce qui peut expliquer le déplacement des sacs de sable à cet endroit. Ce premier résultat est

Thème 7 – Risques côtiers

néanmoins à considérer avec prudence compte tenu des différentes approximations sous-jacentes à ce calcul, parmi lesquelles, l'approximation 1D, l'incertitude sur la force d'impact et la fraction de la poussée d'Archimède à considérer ou le fait de négliger la friction latérale avec les autres groupes de sacs par exemple.

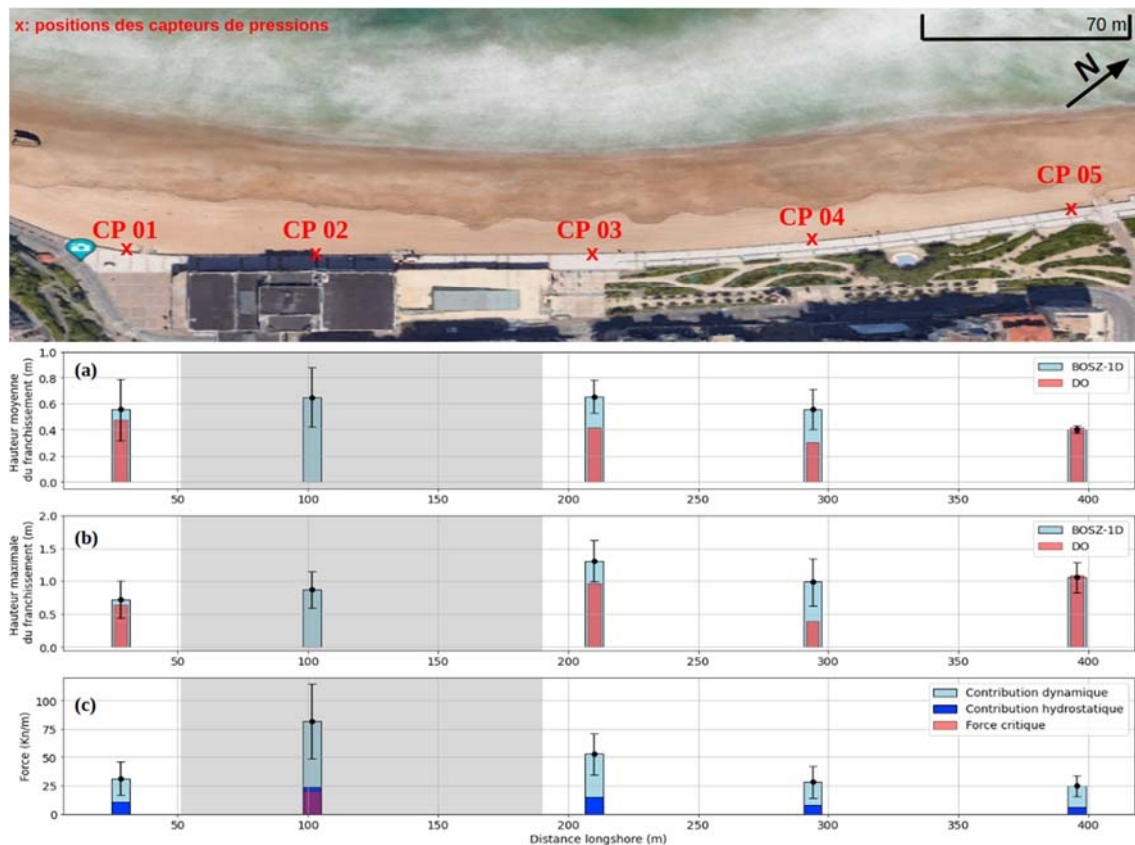


Figure 10. Variabilité des hauteurs moyennes et maximales de franchissement au droit des cinq CP (a, b). Force au droit des cinq CP et force critique au CP 02 (c) (seul endroit protégé par des sacs de sable). La zone grisée correspond à l'endroit où les sacs de sable ont été déployés.

En ce qui concerne la force d'impact notamment, on observe un écart-type important sur les vitesses comparé aux hauteurs d'eau (40 et 26 % respectivement par rapport aux valeurs moyennes, figure 11).

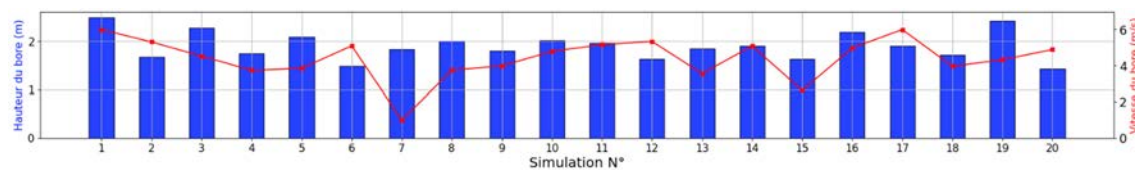


Figure 11. Hauteurs et vitesses des bores générant le franchissement le plus violent au droit du CP 02 pour chacune des 20 simulations.

Cette variabilité induit de grandes variations dans le calcul de la composante dynamique. Il s'agit donc de mieux comprendre maintenant les raisons d'un tel comportement.

4. Conclusions

Dans cette étude, nous avons présenté des mesures et des simulations de l'impact de la tempête Justine ayant causé la rupture partielle d'une digue amovible sur le site de la Grande Plage de Biarritz. Nous avons en particulier analysé des mesures et simulations d'événements de franchissement et avons tenté d'estimer par la simulation (modèle 1D de type-Boussinesq) les forces générées sur les sacs de sable. En premier lieu, si le modèle donne globalement des résultats en cohérence avec les observations pour ce qui concerne les variables représentatives du franchissement, il est néanmoins compliqué d'obtenir une calibration parfaite. Nos résultats montrent également l'importance de réaliser un nombre relativement important de simulations (dans notre cas 20 ont été réalisées) pour un état de mer donné. Compte tenu de la variabilité des résultats numériques avec le tirage de phase, on ne peut, au mieux, que vérifier que les observations sont bien dans la gamme de variation des simulations. Dans notre cas d'étude, néanmoins, il apparaît que ce n'est pas toujours le cas notamment aux capteurs CP02, 03 et 04. Ensuite, l'analyse des données et simulations montre que le franchissement du perré est spatialement variable. Cela implique également des disparités en termes de forces sur les structures impactées. Cela montre la complexité du phénomène et la nécessité de mettre en place un protocole de protection adapté. Enfin, les résultats du modèle montrent que la force d'impact dépasse assez largement la force critique au capteur CP 02. Même si ce résultat était attendu, puisque les sacs de sables ont été déplacés dans cette zone, la différence entre la force d'impact et la force critique semble exagérée et doit faire l'objet d'investigations supplémentaires.

Remerciements

Les auteurs remercient Tom Somdecoste pour la mise en disposition des spectres SWAN. Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention Marie Skłodowska-Curie n° 945416 et du programme européen POCTEFA MARLIT EFA344/19.

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du laboratoire commun KOSTARISK, qui fait partie du programme E2S UPPA géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-16-IDEX-0002) et soutenu par les Investissements d'Avenir (PIA) du gouvernement français. Le laboratoire commun KOSTARISK est cofinancé par E2S UPPA, la Fondation AZTI et le centre Rivages Pro Tech de SUEZ.

Volker Roeber a reçu le soutien financier du programme I-site Energy and Environment Solutions (E2S), de la Communauté d'Agglomération Pays Basque (CAPB) et de la Communauté Région Nouvelle Aquitaine (CRNA) pour la chaire HPC-Waves.

5. Références bibliographiques

- ABADIE S., BEAUVIVRE M., EGURROLA E., BOUISSET C., DEGREMONT I., ARNOUX F. (2018). *A database of recent historical storm impact on the French Basque coast*. Journal of Coastal Research, 85 (10085), 721–725. <https://doi.org/10.2112/SI85-145.1>
- BOOIJ N., RIS R.C., HOLTHUIJSEN L.H. (1999). *A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- CROSS R.H. (1967). *Tsunami surge forces*. Journal of the Waterways and Harbors Division, vol. 93, n°4, p. 201-231.
- KOOSHEH A., ETEMAD-SHAHIDI A., CARTWRIGHT N., TOMLINSON R., & VAN GENT M. R. (2021). *Individual wave overtopping at coastal structures: A critical review and the existing challenges*. Applied Ocean Research, 106, 102476.
- MORICHON D., ROEBER V., MEDINA M., BELLAFONT F., ABADIE S. (2021) *Tsunami impact on a detached breakwater: Insights from two numerical Models*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers, 147 (2), pp.05021001-1- 05021001-15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000622](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000622)
- MORICHON D., DE SANTIAGO I., DELPEY M., SOMDECOSTE T., CALLENS A., LIQUET B., LIRIA P., ARNOULD P. (2018). *Assessment of flooding hazards at an engineered beach during extreme events: Biarritz, SW France*. Journal of Coastal Research, 85 (10085), 801–805. <https://doi.org/10.2112/SI85-161.1>
- NWOGU O. (1993). *Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 119, n°6, p. 618-638. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1993\)119:6\(618\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:6(618))
- PINAULT J., MORICHON D., ROEBER V. (2020). *Estimation of irregular wave runup on intermediate and reflective beaches using a phase-resolving numerical model*. Journal of Marine Science and Engineering, vol. 8, n°12, 993. <https://doi.org/10.3390/jmse8120993>
- PULLEN T., ALLSOP N.W.H., BRUCE T., KORTENHAUS A., SCHÜTTRUMPF H., VAN DER MEER J.W. (2007). *EurOtop wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual*. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:b1ba09c3-39ba-4705-8ae3-f3892b0f2410>
- ROEBER V., CHEUNG K.F. (2012). *Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments*. Coastal Engineering, 70, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.06.001>
- VARING A., FILIPOT J.-F., DELPEY M., GUITTON G., COLLARD F., PLATZER P., ROEBER V., MORICHON D. (2021). *Spatial distribution of wave energy over complex coastal bathymetries: Development of methodologies for comparing modeled wave fields with satellite observations*. Coastal Engineering, 169, 103793. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.1037>