

Déplacement d'un bloc de béton de 50T par une vague extrême : analyse d'un événement capturé par un photographe

Edgar Pierre BURKHART ¹, Amirhossein PARVIN ¹ Stéphane ABADIE ¹

1. Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S-UPPA, SIAME, France
edgar.burkhart@ens-paris-saclay.fr ; amirhossein.parvinashtiani@etud.univ-pau.fr ;
stephane.abadie@univ-pau.fr

Résumé :

Différentes approches existent afin de déterminer la cause du déplacement de blocs de tailles importantes par des événements côtiers extrêmes. Cependant, les équations théoriques généralement utilisées n'ont pas encore pu être validées faute d'observations ou de mesures in-situ.

Dans cette étude, deux modèles numériques imbriqués sont utilisés afin de déterminer les conditions hydrodynamiques ayant mené au déplacement d'un bloc de béton de 50T sur la digue de l'Artha le 28 février 2017. Les données mesurées par une bouée du réseau CANDHIS permettent d'apporter des conditions aux limites adéquates aux modèles utilisés. La vitesse du courant générée par la vague identifiée comme responsable du déplacement du bloc atteint 14.5m/s, selon le modèle réalisé. Cette valeur est légèrement inférieure à celle obtenue par les équations théoriques généralement utilisées pour déterminer les seuils de mouvement. Néanmoins, dans notre cas particulier, la vague identifiée se distingue des autres vagues par la durée particulièrement importante sur laquelle cette vitesse est maintenue, ce qui semble souligner l'importance de ce facteur pour ce phénomène de déplacement de méga blocs.

Mots-clés :

Vague extrême, Déplacement de blocs, Vitesse du Courant, Tempête, Modèle VARANS.

1. Introduction

Le déplacement de blocs de tailles importantes par des vagues est un phénomène intéressant pour qualifier les événements côtiers extrêmes historiques. En effet, la présence de blocs à des hauteurs inhabituelles peut se révéler une indication d'événements passés tels que des tempêtes ou des tsunamis (par exemple COX *et al.*, 2018 ; SHAH-HOSSEINI *et al.*, 2013). Dans ce cadre, si des équations théoriques permettent de déterminer les conditions nécessaires au mouvement de tels blocs (NOTT, 2003 ; NANDASENA, 2011 ; WEISS & DIPLAS, 2015), pour l'instant, elles ne peuvent être validées par des observations ou mesures de terrain, puisqu'aucune observation d'un tel mouvement n'a encore eu lieu par le passé.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

En février 2017, un bloc de 50T a été déposé par une vague extrême sur la crête de la digue de l'Artha à Saint-Jean-de-Luz lors d'une tempête. Par chance, cet événement a été capturé par un photographe, ce qui a permis de déterminer approximativement l'instant du déplacement du bloc. L'objectif de cet article sera de modéliser les conditions hydrodynamiques générées par une telle vague à proximité de la digue de l'Artha, afin de les comparer aux critères utilisés pour étudier les mouvements de blocs.

Pour cela, deux modèles numériques imbriqués sont utilisés. En amont, un modèle non-hydrostatique non-linéaire en eau peu profonde (NLSW) en 1 dimension (SWASH, ZIJLEMA *et al.*, 2011) permet d'obtenir la transformation des vagues de la bouée jusqu'aux abords de la digue de l'Artha. Puis, un modèle en 2 dimensions verticales basé sur les équations de Navier-Stokes moyennées au sens de Reynolds (OlaFlow, HIGUERA, 2017) simule les conditions hydrodynamiques à proximité de et sur la digue. Ces conditions seront comparées aux formules analytiques proposées par NOTT (2003).



Figure 1. Bloc de béton déposé sur le couronnement de la digue de l'Artha par une vague le 28 février 2017 (Crédit Photo : société Komcébo).

2. Contexte de l'étude

La digue de l'Artha, située à l'entrée de la baie de Saint-Jean-de-Luz, est composée d'une carapace de blocs de béton de $4 \times 2.5 \times 2$ m³ surmontée d'un caisson maçonné de 9 m de hauteur.

Le 28 février 2017, un des blocs composant la carapace de la digue de l'Artha a été déplacé par une vague sur le caisson de la digue (figure 1). Le déplacement d'un bloc de 50T à une hauteur de 8m correspond à la limite supérieure dans la régression proposée par COX *et al.* (2018), ce qui classe cet événement parmi les événements extrêmes de déplacements de blocs par les vagues. Un travail initial à partir des photographies a permis de déterminer que le déplacement du bloc s'est produit à 17:24 UTC, avec 40s de marge d'erreur. À cet instant, le marégraphe de Socoa, situé à moins d'1 km de la digue de

l'Artha, relève un niveau de la marée à 4.5 m, soit l'un des niveaux les plus élevés enregistrés durant le mois de février 2017.

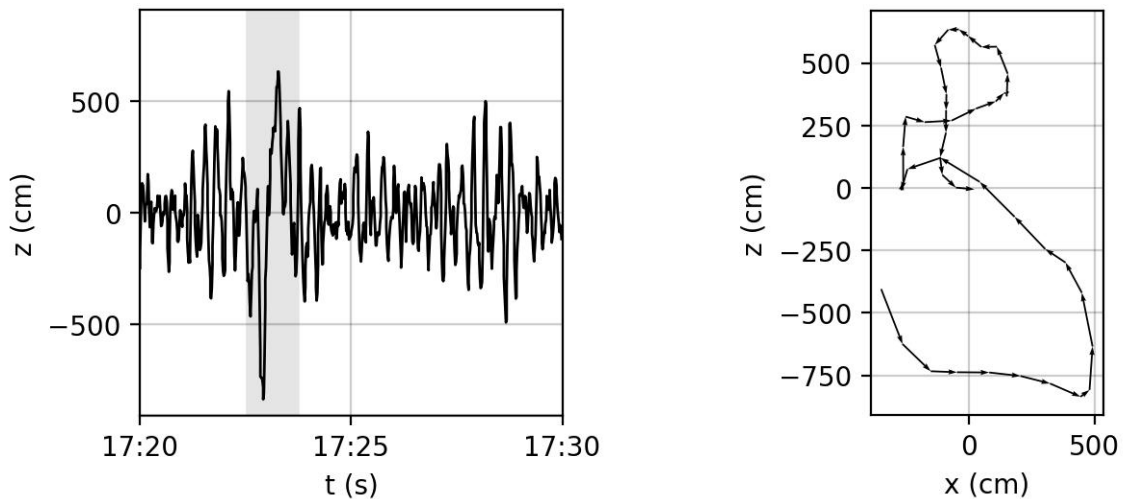


Figure 2. Gauche : Surface libre mesurée durant la vague extrême mesurée le 28 février 2017 à 17:23 UTC ; Droite : Trajectoire de la bouée lors du passage de cette vague particulière.

Une bouée Datawell DWR-G du réseau CANDHIS située à 1.2 km au large de la digue a permis de retrouver les conditions des vagues qui ont probablement mené au déplacement du bloc de béton. Ainsi, une vague extrême d'amplitude 14 m a été identifiée à 17:23:08 UTC (figure 2a). Une analyse préliminaire (PARVIN, 2020) a permis, à l'aide d'un modèle unidimensionnel BOSZ, de montrer que le temps nécessaire à la transmission de la vague extrême identifiée correspondait bien à l'instant de déplacement du bloc sur la digue.

La trajectoire de la bouée tracée en figure 2b permet d'identifier la vague extrême mesurée comme une combinaison de deux vagues se propageant dans le même sens. Étant donné le sens de rotation des orbites, les vagues semblent être incidentes (se propageant dans le sens x positif, soit vers la digue). Cela permet de confirmer qu'il ne s'agit pas de vagues réfléchies se propageant vers le large.

3. Méthodes

3.1 Modèle SWASH

Un premier modèle a été développé afin de modéliser la transformation des vagues entre la bouée et la digue. L'objectif est double : vérifier l'influence de la réflexion générée par la digue sur les mesures de la bouée, puis obtenir l'état de mer, à une distance plus proche de la digue, utilisable comme condition aux limites pour un modèle Navier-Stokes bidimensionnel.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Le modèle SWASH a été choisi pour cela puisqu'une première étape de calibration a déjà été réalisée pour l'étude de la digue de l'Artha (PONCET, 2021). Un maillage régulier unidimensionnel de résolution 1 m a été utilisé. Les données de bathymétries utilisées sont issues de bases de données SHOM ainsi que du modèle de la digue réalisée par PONCET (2021). La carapace de la digue est modélisée comme un milieu poreux de porosité 0.4. Le modèle SWASH est configuré avec 2 couches, afin d'obtenir des résultats corrects à proximité de la zone poreuse sans compromettre la stabilité du modèle. Un domaine long de 1750 m est utilisé, la bouée étant située à 200 m et la digue à 1450 m. Un premier modèle, utilisant comme condition à la limite, le spectre obtenu par la bouée in-situ, est réalisé, avec deux bathymétries différentes : la première étant la bathymétrie réelle, et la seconde étant une bathymétrie adaptée dans laquelle la digue est retirée, l'objectif étant de vérifier l'influence de la réflexion sur la digue sur les mesures à la bouée. Ce modèle est exécuté sur une durée de 4h afin d'obtenir un échantillon représentatif des conditions possibles à partir du spectre mesuré. Un second modèle est réalisé, avec comme condition à la limite, la série temporelle mesurée par la bouée, sur la période de 17:00 à 18:00 le 28 février 2017.

3.2 Modèle Olaflow

Afin de déterminer les conditions hydrodynamiques ayant causé le déplacement du bloc de béton, un modèle bidimensionnel basé sur OlaFlow a été construit. Le domaine étudié couvre 150 m de long, avec un maillage de résolution 50 cm. Le modèle résout les équations VARANS (volume-averaged Reynolds-averaged Navier-Stokes). Il a été calibré très qualitativement sur la base de photos prises le 28 février 2017. Le modèle de turbulence choisi est un modèle $k-\omega$ SST, permettant a priori, de modéliser assez précisément les turbulences dans les zones à fort gradient de vitesses. Sur la base des photos prises au moment de l'événement, on montre que ce modèle donne une représentation plus correcte du déferlement à proximité de la digue que le modèle $k-\epsilon$ qui génère trop de viscosité. La carapace de la digue est représentée par une zone poreuse de porosité 0.4. Différents tests effectués montrent que l'influence des paramètres de friction dans le milieu poreux sur les résultats obtenus est faible. La condition limite imposée au large est une condition en vitesse et hauteur d'eau basée sur les résultats du modèle SWASH précédent. Le modèle est étudié sur 400 s autour de la vague extrême identifiée afin de permettre au modèle d'atteindre un régime établi aux instants étudiés.

4. Résultats

4.1 Modèle SWASH

Le premier modèle SWASH, utilisant en condition à la limite le spectre mesuré par la bouée, nous permet de vérifier la possibilité de reproduire une vague telle que la vague observée le 28 février 2017. La vague la plus grande observée sur les résultats du modèle

à la position de la bouée est tracée en figure 3. On observe une amplitude maximale de 13.9m dans le cas de la bathymétrie réelle. En revanche, l'absence de digue diminue cette amplitude maximale à 12.1m.

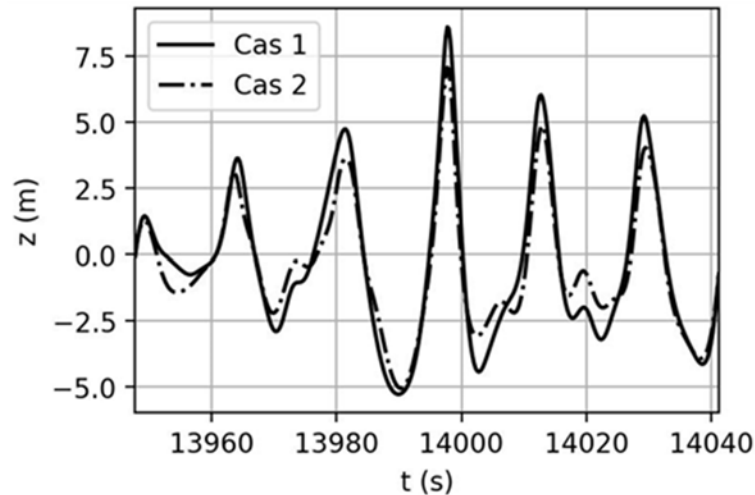


Figure 3. Évolution de la surface libre calculée par SWASH avec condition à la limite de spectre à la position de la bouée. Le tracé est centré sur la vague la plus grande obtenue. Cas 1 : Bathymétrie réelle (avec digue) ; Cas 2 : Bathymétrie simplifiée (sans digue).

La différence de 13 % entre les deux valeurs met en évidence l'impact de la réflexion sur la digue sur la taille maximale de vagues. Cependant, cet écart reste relativement faible, et la taille de vague maximale obtenue en l'absence de digue tend à indiquer que la vague observée le 28 février 2017 pourrait être une combinaison uniquement de vagues incidentes.

Le second modèle vise à modéliser la propagation de la vague identifiée de la bouée jusqu'à la digue de l'Artha. Les résultats obtenus sont tracés en figure 4. On peut observer une forte transformation de la vague avant son arrivée sur la digue. Ainsi, l'amplitude de la vague diminue, mais sa longueur d'onde reste importante. D'autre part, le temps de propagation calculé par le modèle correspond bien à ce qui avait été trouvé préalablement avec un modèle Boussinesq (PARVIN, 2020). L'instant d'impact de cette vague correspond bien (à la marge d'erreur près) à l'instant où la photo a été prise confirmant ainsi le rôle de cette vague particulière dans le mouvement du bloc.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

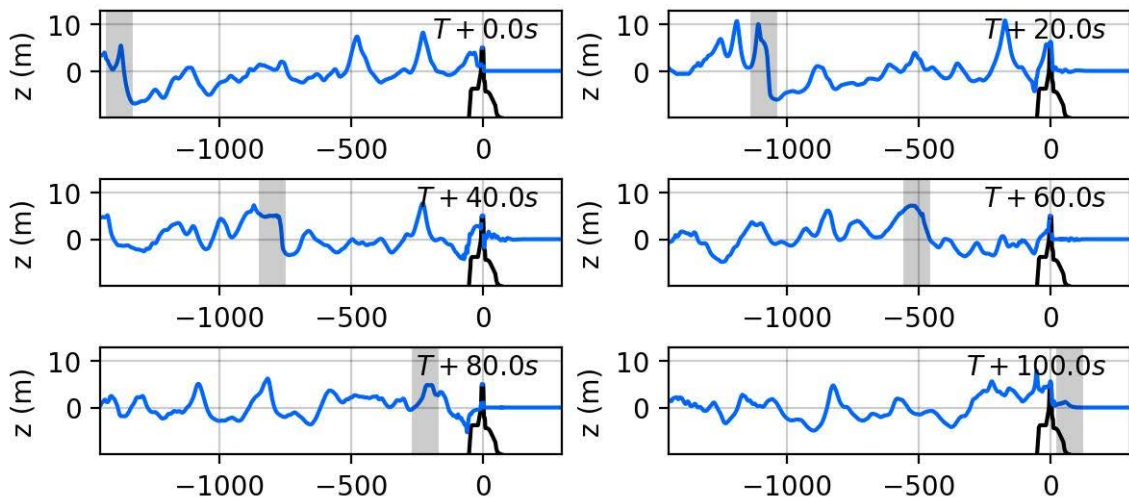


Figure 4. Propagation de la vague supposée responsable du déplacement jusqu'à la digue de l'Artha ; zone grisée : position estimée qualitativement de la vague identifiée.

4.2 Modèle Olaflow

Le modèle Olaflow réalisé nous permet de connaître les conditions hydrodynamiques générées par la vague identifiée à proximité de la digue. On observe en figure 5 la vitesse du courant généré à 20m en amont du sommet de la digue. La vague identifiée précédemment atteint la digue à $t=175s$. On peut observer lors de son impact une vitesse maximale du courant de 14.5 m/s. On remarque que la vitesse d'écoulement qui est atteinte pendant la vague identifiée n'est pas la plus élevée atteinte dans le modèle. En effet, d'autres vagues plus courtes produisent des vitesses d'écoulement sur le brise-lames, similaires voire supérieures (e.g., 17.3 m/s à $t=100$ et 120 s), mais la durée de cette vitesse est 2 fois plus courte que dans le cas de la vague identifiée.

5. Discussion

En considérant un bloc initialement submergé, les équations analytiques proposées par NANDASENA *et al.* (2011) donnent une vitesse d'écoulement minimale qui conduirait à un déplacement du bloc par saltation de 19.4 m s⁻¹. Les résultats du modèle Olaflow sont donc 25% inférieur au seuil théorique de mise en saltation. Ces résultats tendent à confirmer les recherches récentes de LODHI *et al.* (2020), où il a été constaté que le seuil calculé par ces équations analytiques tend à surestimer la vitesse d'écoulement réellement nécessaire pour initier le mouvement du bloc dans diverses situations. Dans notre cas, la vague identifiée se distingue par la durée sur laquelle la vitesse maximale est maintenue. Cela confirme l'importance du facteur durée pour le phénomène de déplacement des blocs. Ce résultat est conforme aux travaux présentés par WEISS & DIPLAS (2015), qui ont suggéré que l'utilisation d'équations dépendant du temps pour le déplacement des blocs permettrait une meilleure compréhension du phénomène. Une autre façon de voir les choses est de se ramener à la théorie des chocs solides. La quantité de mouvement

acquise par le bloc est égale à l'impulsion de force ($F\Delta t$ si F , la force, est constante). F étant généré par un impact fluide, est proportionnelle au carré de la vitesse du courant. Δt le temps d'application de la force est forcément lié à T la période de vague. Le paramètre clé du phénomène est donc U^2T . On retrouve ici ce résultat puisque la vague responsable du déplacement du bloc associe une vitesse et un temps d'application importants, ce qui est nécessaire pour obtenir la quantité de mouvement extrême nécessaire pour le déplacer sur la crête de l'ouvrage. Cet angle de vue s'affranchit néanmoins de la complexité supplémentaire relatives aux conditions initiales du bloc (i.e., les forces de friction).

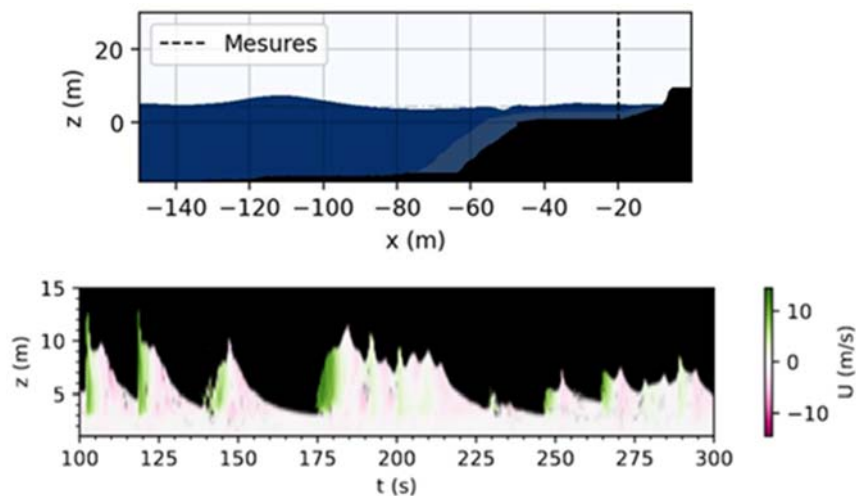


Figure 5. Vitesse du courant généré par les vagues sur la digue de l'Artha ($x=-20m$). La vague identifiée atteint ce point à $t=175s$.

6. Conclusions

La modélisation des conditions hydrodynamiques générées par une vague extrême suspectée d'avoir engendré le déplacement d'un bloc de béton sur la digue de l'Artha le 28 février 2017, a permis de mettre en évidence la vitesse du courant ayant amené au déplacement de ce bloc. Cette vitesse apparaît légèrement inférieure à celle obtenue par les équations de NANDASENA *et al.*, (2011), en général utilisées pour donner une estimation du seuil de mouvement. Néanmoins, la vague identifiée maintient cette vitesse sur une durée au moins 2 fois supérieure si on la compare aux autres vagues de l'état de mer concerné. Ces résultats semblent souligner la nécessité de prendre en compte l'évolution temporelle de la vitesse du courant pour mieux prédire ce phénomène de déplacement de bloc de taille importante, conformément aux résultats de WEISS & DIPLASS (2015).

Remerciements

Ces travaux ont été soutenus par le projet FEDER-FSE EZPONDA (subvention N° 2018-4619910) et le projet CRNA "Vagues extrêmes". Ces recherches sont également menées

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

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). Le laboratoire commun KOSTARISK est cofinancé par E2S UPPA, la Fondation AZTI et le centre Rivages Pro Tech de SUEZ.

7. Références bibliographiques

COX R., JAHN K.L., WATKINS O.G., COX P. (2018). *Extraordinary boulder transport by storm waves (west of Ireland, winter 2013–2014), and criteria for analysing coastal boulder deposits*. *Earth-Science Reviews*, Vol. 177, pp. 623-636.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.014>

HIGUERA P. (2015). *Application of computational fluid dynamics to wave action on structures*. Thèse Université de Cantabria. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/6261>

LODHI H.A., HASAN H., NANDASENA N.A.K. (2020). *The role of hydrodynamic impact force in subaerial boulder transport by tsunami—Experimental evidence and revision of boulder transport equation*. *Sedimentary Geology*, 408, 105745.

<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105745>

NANDASENA N.A.K., PARIS R., TANAKA N. (2011). *Reassessment of hydrodynamic equations: Minimum flow velocity to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis)*. *Marine Geology*, Vol. 281(1-4), pp 70-84.

<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.02.005>

NOTT J. (2003). *Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting*. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 210(1-2), pp 269-276.

[https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00104-3)

PARVIN A. H. (2020). *Processes allowing large block displacement under wave action*. Stage Université de Pau et des Pays de l'Adour.

PONCET P. A. (2021). *Characterization of wave impact loading on structures at full scale : field experiment, statistical analysis and 3D advanced numerical modeling*. Thèse Université de Pau et des Pays de l'Adour. Disponible en ligne sur URL :

<https://www.theses.fr/2021PAUU3022>

SHAH-HOSSEINI M., MORHANGE C., DE MARCO A., WANTE J., ANTHONY E. J., SABATIER F., MASTRONUZZI G., PIGNATELLI C., PISCITELLI A. (2013). *Coastal boulders in Martigues, French Mediterranean: evidence for extreme storm waves during the Little Ice Age*. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 57(4), pp 181-199.

WEISS R., DIPLAS P. (2015). *Untangling boulder dislodgement in storms and tsunamis: Is it possible with simple theories?*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. Vol. 16(3), pp 890-898. <https://doi.org/10.1002/2014GC005682>

ZILJEMA M., STELLING G., SMIT P. (2011). *SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters*. *Coastal Engineering*, Vol 58(10), pp 992-1012. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>