



Réanalyses de capacité érosive par hiver (cumul), exemple de la côte Aquitaine entre 1994 et 2022

Benoit WAELES ¹, Arthur MOURAGUES ¹, Baptiste MENGUAL ¹,
Thomas GUÉRIN ¹

1. SAS WAELES MARINE Consultants - 53 rue du Cdt Groix - 29200 Brest, France.

benoit.waeles@wm-consultants.fr ; arthur.mouragues@wm-consultants.fr ;

baptiste.mengual@wm-consultants.fr ; thomas.guerin@wm-consultants.fr

Résumé :

Les projets d'aménagement ou de confortement du trait de côte requièrent la définition d'un « MNT de projet », c'est-à-dire de niveaux sédimentaires (généralement sableux) exceptionnellement bas. Ces derniers sont défavorables à double titre pour les ouvrages : par effet direct de déchaussement et indirect dans la mesure où ils peuvent être soumis à des conditions de vagues plus énergétiques.

Une approche de type réanalyse de la capacité érosive des vagues est présentée ici, selon deux méthodes : une première empirique (approche itérative du calcul de *runup* adaptée à partir de la formulation de STOCKDON *et al.*, (2006) combinée à la méthode de LARSON *et al.*, (2004)), et une seconde déterministe basée sur l'application du modèle morphodynamique XBEACH. Les réanalyses sont réalisées le long d'un profil au Sud de Lacanau représentatif du littoral exposé de la Gironde, sur 28 hivers (1994 à 2022), pour lesquels les conditions de vagues incidentes (données *Ifremer Resourcecode*) et les niveaux de marée (marée astronomique + surcote atmosphérique) peuvent être conjointement caractérisés.

Des analyses statistiques d'extrême sont réalisées sur une quantité de type cumul (sur un hiver) des séquences érosives, à partir des résultats des deux méthodes (empirique et morphodynamique). La méthode morphodynamique permet aussi une analyse de l'érosion résiduelle hivernale, et ainsi d'être comparée aux observations. En se basant sur le cumul des séquences érosives de chaque hiver entre 1994 et 2022, les résultats issus des deux méthodes sont cohérents du point de vue du classement des différents hivers. La méthode empirique, plus simple à mettre en œuvre, peut donc tout à fait convenir dans le cadre d'études en ingénierie côtière, afin d'estimer de façon suffisamment réaliste la période de retour de situations exceptionnelles post-hivernales. La période de retour de l'hiver 2013/2014 (i.e. la durée moyenne qui sépare deux hivers de capacité érosive équivalente ou supérieure à celle de l'hiver 2013/2014) est notamment évaluée entre 100 et 300 ans.

Mots-clés : Erosion littorale, Calculs empiriques de R2 et de capacité érosive, Modèle morphodynamique cross-shore XBEACH, Réanalyses, Analyses statistiques d'extrêmes.

Thème 6 – Risques côtiers

1. Introduction

La situation d'un littoral sableux en fin d'hiver dépend notamment de l'ensemble des séquences érosives qui se sont succédées, avec un certain cumul des volumes érodés. Les tempêtes de l'hiver 2013-2014 ont par exemple été intenses et nombreuses dans le Golfe de Gascogne : pas moins de 5 tempêtes ont une période de retour (pour le paramètre Hs) estimée supérieure ou égale à 1 an (BRGM, 2014). Certaines tempêtes se sont produites lors d'une marée de fort coefficient (e.g. Christine 03/03/2014, coef. 112-114) à laquelle s'ajoute nécessairement (en condition de tempête) une surcote atmosphérique significative. Il n'est donc pas étonnant que l'érosion cumulée sur cet hiver ait conduit à des situations sans précédent sur la côte aquitaine, un des exemples les plus frappants étant le littoral de Lacanau (la majeure partie des ouvrages de front de mer a subi des désordres importants, certains ouvrages se sont retrouvés à l'état de ruine et les enjeux en arrière étaient directement menacés).

Les retours d'expérience sur des situations de post-hiver exceptionnellement érodées sont limités puisque les données pour la caractérisation d'une situation morpho-sédimentaire sont relativement récentes. Même si on peut noter des premiers suivis réguliers datant de 1997 (plage du Truc-Vert, cf. Université de Bordeaux), les suivis topographiques n'ont été systématisés (combinaisons de levés in-situ par profils et de levés LIDAR), à l'échelle de l'ensemble de la côte Aquitaine, que dans les années 2010 (cf. Observatoire Côte Nouvelle-Aquitaine). Les photographies aériennes les plus anciennes datent certes des années 1930 à 1950 (e.g. IGN le long des littoraux français), mais ce type d'image ne renseigne que sur une position approximative de la transition plage/dune et la couverture temporelle est discontinue avec de longues périodes sans images dans les années 1950/1960 (e.g. 6 ans sans image entre 1957 et 1963 à Lacanau). Il faut aussi rappeler que les programmes d'urbanisation « en dur » (constructions en béton, routes, parkings...) du littoral sableux aquitain datent des années 1970 sous l'impulsion de la Mission Interministérielle d'Aménagement de la Côte Aquitaine (MIACA, initiée à la fin des années 1960, cf. CASSOU-MOUNAT, 1976). Ces enjeux urbains récents sont de plus significativement avancés sur le cordon dunaire bordier par rapport à la situation antérieure (l'esplanade panoramique de Lacanau et le poste central de secours en mer, construits en 1976, sont par exemple avancés d'environ 50 m vers la mer par rapport à l'alignement des maisons visible sur les images aériennes des années 1950). Ainsi, il n'y a pas eu avant les années 1970 de relevé in-situ dédié (pour caractériser une situation exceptionnelle), puisque qu'il n'y avait pas eu lieu de s'inquiéter de situations post-hiver très érodées, ou de besoins de travaux de confortement d'urgence (la première défense à Lacanau, constituée par un ouvrage longitudinal en blocs d'enrochement de 800m et des épis, date de la fin des années 1980, cf. L.C.H.F., 1987).

L'objectif des méthodes d'analyse développées dans cette étude est : d'évaluer le caractère exceptionnel de certaines situations morpho-sédimentaires post-hivernales, par

une grandeur statistique de type période de retour ; de contribuer à estimer des « MNT de projet » (niveaux sédimentaires, en l'occurrence sableux, exceptionnellement bas, de période de retour en pratique de 100 ans). L'approche retenue consiste à évaluer la capacité des conditions hydrodynamiques (vagues qui se propagent sur un niveau d'eau variable) à éroder un littoral sableux, compte tenu d'une couverture temporelle de ces paramètres pendant près de 30 ans et donc de la possibilité (puisque la couverture temporelle est continue) d'extrapoler vers des périodes de retour plus longues. L'originalité de l'approche proposée consiste à s'intéresser à des quantités d'érosion cumulées par hiver, déclinée selon deux approches :

- Evaluation empirique (calcul de paramètre *runup* 2% (R_2) et d'un volume érodé cf. LARSON *et al.*, 2004), linéaire dans le sens où les quantités érodées se somment sans tenir compte des évolutions morphologiques qui en résultent.
- Approche de type processus, morphodynamique, en utilisant le modèle XBEACH en 1D (cross-shore).

2. Matériel et méthode

2.1 Profils de plage

La présente étude exploite le suivi de l'évolution des plages sableuses mené par l'Observatoire de la Côte de Nouvelle-Aquitaine (OCNA) depuis ~15 ans en différents transects répartis le long de la côte Aquitaine. En se concentrant sur la portion centrale du littoral exposé de la Gironde (Figure 1) et en ciblant les années où des levés à la fois « pré-hiver » et « post-hiver » sont disponibles tout en caractérisant un signal d'érosion significatif (i.e. mois d'octobre et avril généralement), un profil « pré-hiver moyen » est obtenu en moyennant les profils associés au transect G13 (Lacanau – Le Lion). Ce profil moyen, couvrant initialement la zone comprise entre la dune et l'estran, est ensuite étendu ~15 km au large en exploitant le MNT « ARCACHON » du SHOM (2022). Il est alors considéré en tant que profil initial pour appliquer les deux approches d'évaluation de volumes érodés cumulés par hiver considérées dans cette étude et décrites ci-après. A noter que les transects G9 à G14 sont quant à eux exploités pour l'évaluation des volumes érodés « observés » (cf. section 3.2), la prise en compte de plusieurs transects permettant d'intégrer l'influence de la variabilité naturelle des plages (dont morphodynamique des systèmes barres- baïnes) sur la mesure de ces volumes érodés « observés ».

Thème 6 – Risques côtiers

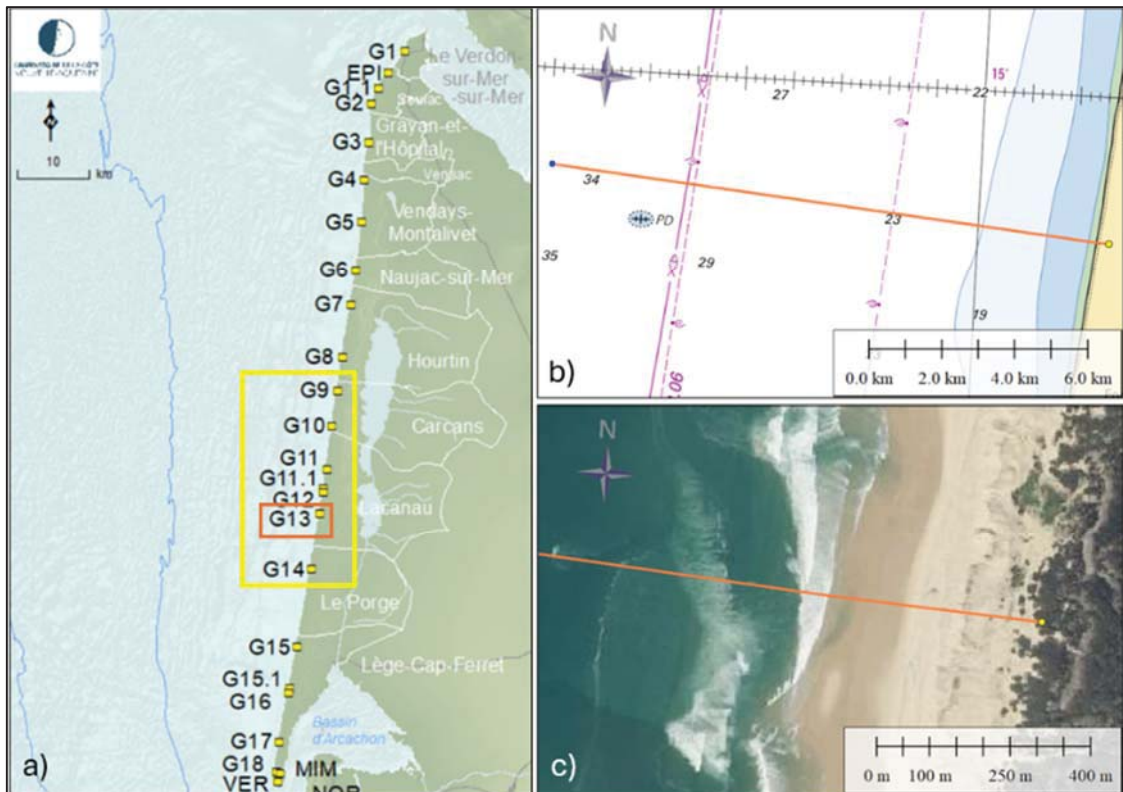


Figure 1. a) Localisation des transects de l'OCNA (<https://www.observatoire-cote-aquitaine.fr/Fiches-transect-Cote-sableuse>) considérés dans l'étude : transect G13 (Lacanau – Le Lion) en orange, et transects G9 à G14 en jaune. b) Vue globale (fond carte SHOM) et c) zoom (fond IGN BD-ortho) sur le profil considéré pour l'application des deux approches d'évaluation des volumes érodés cumulés par hiver.

2.2 Approche empirique

L'approche empirique développée dans cette étude exploite le paramètre de *runup* 2% (R_2), soit le niveau atteint ou dépassé 2% du temps par le jet de rive (*swash*) et pour des conditions de vagues incidentes données, ce paramètre étant calculé suivant une méthode de type STOCKDON *et al.*, (2006) (i.e. $R_2 = 1.1(\langle \eta \rangle + S/2)$ où $\langle \eta \rangle$ et S sont respectivement associés au *setup* et au *swash*). La méthode de STOCKDON *et al.*, (2006) n'utilisant qu'une seule valeur de pente de plage alors que les pentes associées à la zone de déferlement et à la zone de jet de rive peuvent fortement différer, le calcul du R_2 est ici adapté en s'inspirant de l'approche proposée par MAYER & KRIEBEL (1994) pour un profil de plage bilinéaire : une première valeur de pente (β_{surf}) associée à la zone de déferlement est considérée pour le calcul du *setup*, tandis qu'une seconde valeur de pente (β_{swash}) est considérée pour le calcul du paramètre S relatif au *swash*. Et plus précisément, puisque l'on ne connaît pas en première itération le niveau atteint par le jet de rive, l'approche itérative suivante est employée : 1) la pente β_{surf} est utilisée pour une première estimation de S , puis 2) la pente β_{swash} , déduite du R_2 obtenu en itération 1), est utilisée

pour une seconde estimation de S (plus consistante puisque cette fois associée à la zone d'action du jet de rive) et donc du R_2 .

En exploitant le jeu d'états de mer RESOURCECODE (ACCENSI *et al.*, 2022) conjointement aux données ERA5 (HERSBACH *et al.*, 2023) pour estimer la surcote atmosphérique, une série temporelle de hauteur significative (H_s), période pic (T_p) et niveau d'eau est obtenue en extrémité de profil pour les 28 hivers couvrant la période 1994 à 2022 (où un hiver est ici défini du 1^{er} octobre au 1^{er} avril, soit 6 mois). La méthode proposée par LARSON *et al.*, (2004) est finalement employée pour obtenir un volume érodé par hiver, ce dernier étant obtenu en sommant sur les 6 mois de chaque hiver le volume érodé dV (en m^3/ml) calculé en chaque pas de temps de la série temporelle ($dt = 1h$) suivant l'équation :

$$\frac{dV}{dt} = -4C_S \frac{(Z_{R2} - z_D)^2}{T_p}, \quad (1)$$

où Z_{R2} est l'altitude atteinte par R_2 , z_D est une altitude de référence au-dessus de laquelle est calculé le volume érodé, et C_S est un coefficient de transport adimensionnel (jouant le rôle de coefficient de calibration).

Cette première approche n'est pas morphodynamique puisque le même profil de plage (i.e. profil « préhiver moyen » présenté en section 2.1) est considéré en chaque pas de temps (calcul du dV), contrairement à la seconde approche présentée en section suivante.

2.3 Approche morphodynamique

2.3.1 *Présentation du modèle XBEACH*

XBEACH (eXtrem Beach behaviour ; ROELVINK *et al.*, 2009) est un modèle hydro-sédimentaire résolvant les équations pour la propagation des vagues, les circulations, le transport sédimentaire ainsi que l'évolution de la morphologie des fonds. L'une des particularités de ce modèle deux dimensions horizontales (2DH) à phase moyennée est sa capacité à simuler les processus physiques à l'échelle des groupes de vagues (bande infragravitaire ; 0.001 – 0.01 Hz ; configuration XB-SB), jouant un rôle important sur la réponse morphodynamique du haut de plage telle que l'érosion des dunes soumises à des contraintes hydrodynamiques extrêmes (e.g. vagues énergétiques, niveaux d'eau extrêmes). XB-SB est couramment utilisé pour modéliser les évolutions morphologiques d'un profil cross-shore (1DH) lors d'évènements énergétiques de quelques heures (e.g. RAFATI *et al.*, 2021). Dans cet article, XB-SB est utilisé pour simuler l'évolution morphologique d'un profil 1D pendant la période hivernale (6 mois : octobre – mars) de 28 années (1994 - 2022).

2.3.2 *Configuration et paramétrisation du modèle*

Le profil topo-bathymétrique implémenté est le même que le profil utilisé dans l'approche empirique, et est découpé en mailles de 20 m au large et jusqu'à 2 m proche de la plage.

Thème 6 – Risques côtiers

De la même manière, les mêmes séries temporelles de la hauteur de vagues, période pic et niveaux d'eau, incluant la marée et la surcote atmosphérique, pour chaque période hivernale sont forcées à la frontière du large (cf. section 2.2).

Une distribution granulométrique caractéristique du littoral girondin est paramétrée (d_{15} , d_{50} et d_{90} respectivement à 250, 400 et 450 μm , cf. L.C.H.F., 1987). De plus, XBEACH repose sur un certain nombre de paramètres ajustables nécessitant d'être calibrés pour minimiser l'écart entre le modèle et la mesure. Un des paramètres ayant un effet significatif sur les processus morphodynamiques pris en compte dans le modèle est le coefficient *facua* qui contrôle l'effet de la non-linéarité des vagues (asymétrie verticale et horizontale des vitesses orbitales) sur le transport de sédiments. Ce paramètre est souvent calibré afin de renforcer le transport de sédiments vers la plage et de contrebalancer le transport excessif de sédiments vers le large (induit par le courant de retour) modélisé par XBEACH pendant les événements énergétiques (e.g. RAFATI *et al.*, 2021). La valeur de *facua* = 0.25 est prise comme celle minimisant les écarts entre les volumes érodés résiduels simulés et mesurés pour l'hiver 2018-2019 (pris comme référence car étant associé à une dispersion relativement faible des volumes érodés mesurés pour les profils G9 à G14 ; cf. Figure 3 (haut)). Ainsi, mis à part le diamètre de grain et *facua*, l'ensemble des paramètres du modèle est pris par défaut (la dissipation de l'énergie des ondes courtes par déferlement bathymétrique est décrite suivant ROELVINK (1993) avec $\gamma = 0.5$, et le coefficient de frottement au fond pour les courants moyens et les ondes longues est calculé suivant Chezy avec $C = 45 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$). Enfin, le volume érodé cumulé $V_{\text{ero,cum,XB}}$ est calculé en sommant le volume érodé, au-dessus du niveau de référence z_D uniquement, entre deux profils successifs modélisés (sorties toutes les heures). La portion *cross-shore* sur laquelle est calculée ce volume change donc à chaque itération puisque le profil peut évoluer au gré des séquences d'accrétion et d'érosion.

3. Résultats

3.1 Résultats de l'approche empirique

La Figure 2 ci-dessous synthétise l'application de l'approche empirique décrite en section 2.2 pour les 28 hivers couvrant la période 1994 à 2022. Le niveau des Plus Hautes Mers Astronomiques (PHMA) est considéré pour le paramètre z_D , soit +2.53 m NGF en se rattachant au site du Cap Ferret d'après le SHOM (2022), conjointement avec une valeur de 2.5×10^{-4} pour le paramètre C_s (cf. éléments de discussion concernant la valeur du C_s dans la section 4). D'après un ajustement statistique de type loi de Gumbel sur les 13 plus hautes valeurs de volume érodé cumulé par hiver (ce nombre de 13 valeurs permettant de satisfaire les tests de pertinence d'un ajustement de type Gumbel, i.e. méthode de la moyenne des excès ou diagramme quantile-quantile), une période de retour comprise globalement entre 100 et 250 ans (suivant la méthode de calcul des paramètres de position et d'échelle associés à la loi de Gumbel) est obtenue pour l'hiver 2013-2014

(avec un volume érodé cumulé de $\sim 415 \text{ m}^3/\text{ml}$ se distinguant très nettement par rapport aux autres hivers).

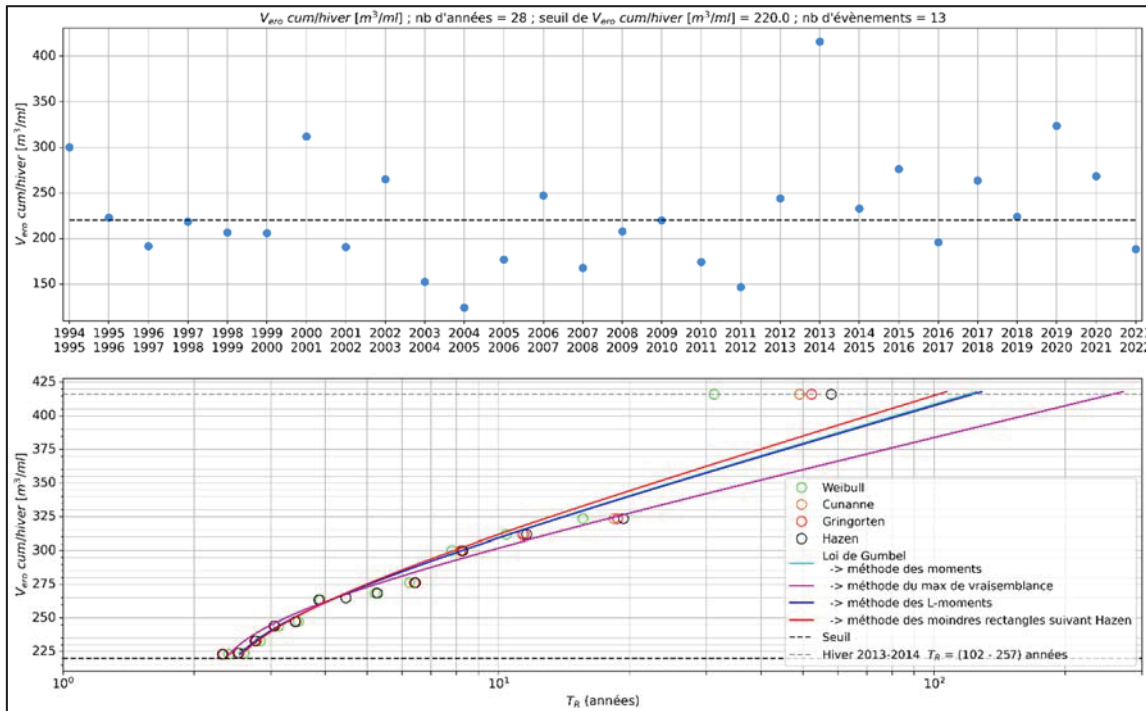


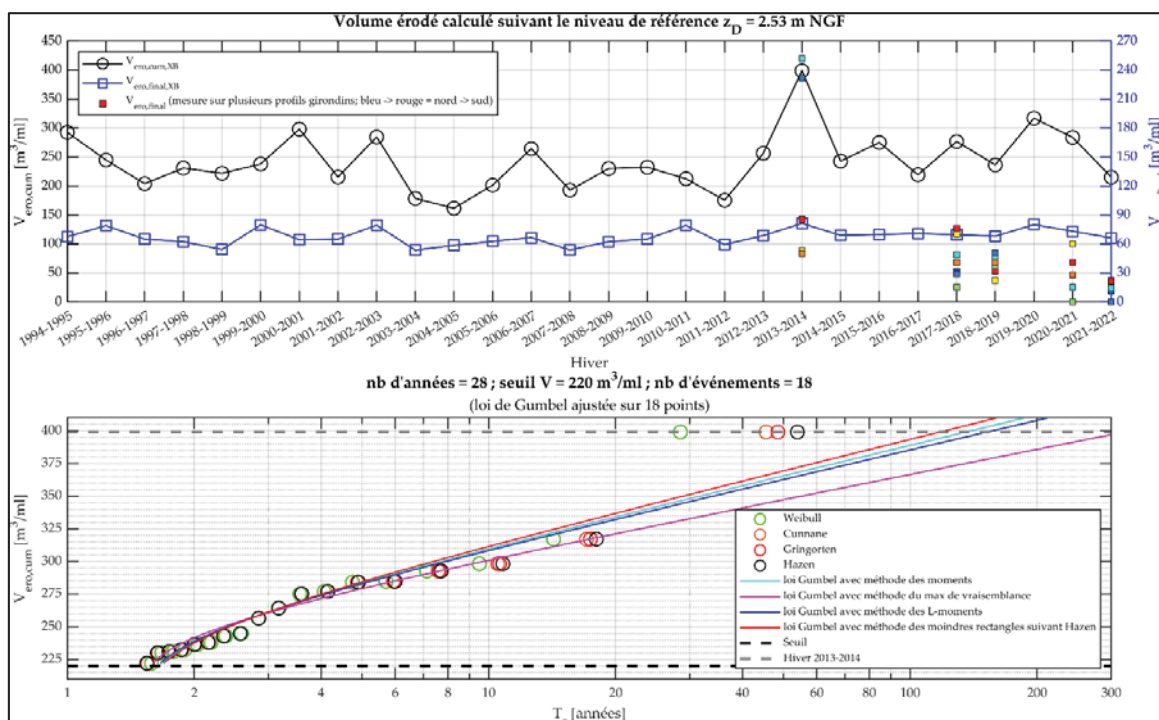
Figure 2. Synthèse de l'application de l'approche empirique (niveau de référence $z_D = +2.53 \text{ m NGF}$) au cas du transect G13 (Lacanau - Le Lion), avec volumes érodés par hiver (en haut) et ajustement statistique des périodes de retour associées aux 13 hivers donnant les volumes érodés les plus forts (en bas). Une période de retour de ~ 100 à ~ 250 ans est évaluée pour l'hiver 2013-2014.

3.2 Résultats de l'approche morphodynamique

De même que pour la figure précédente, la Figure 3 présente les valeurs, issues de la modélisation, de $V_{\text{ero,cum,XB}}$ pour les 28 hivers. Tout comme l'approche empirique, le volume érodé cumulé de l'hiver 2013-2014 est le plus important et se détache nettement des 27 autres hivers, avec un volume modélisé atteignant $400 \text{ m}^3/\text{ml}$ soit 25% de plus que le 2^{ème} volume le plus important ($317 \text{ m}^3/\text{ml}$ pour l'hiver 2019-2020). Une comparaison est également faite entre les volumes érodés résiduels $V_{\text{ero,final}}$ (i.e. associés à la différence entre profil final et profil initial) modélisés et mesurés pour plusieurs profils *cross-shore* le long de la côte girondine (G9 à G14 ; cf. Figures 1a et 3 (haut)). Si une forte variabilité *longshore* des volumes est notable sur la mesure, notamment pour 2013-2014, la Figure 3 suggère que les volumes résiduels modélisés et mesurés sont en moyenne du même ordre de grandeur. En réalisant un ajustement statistique suivant la même méthodologie que pour l'approche empirique (18 valeurs considérées ici pour satisfaire les critères de pertinence d'ajustement), la période de retour de l'hiver 2013-2014 vis-à-vis des volumes

Thème 6 – Risques côtiers

érosés cumulés se situe entre 120 et 300 ans suivant la méthode utilisée pour le calcul des paramètres de la loi de Gumbel.



4. Discussion et conclusion

Des réanalyses de la capacité érosive des vagues ont été réalisées pour chaque hiver sur la période 1994-2022 le long d'un profil *cross-shore* situé au Sud de Lacanau (côte Girondine), en se basant sur deux méthodes, empirique (formalisme de LARSON *et al.*, (2004) basé sur le calcul du *runup* 2%) ou déterministe (modèle morphodynamique XBEACH).

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

Malgré une approche simplifiée en configuration 1DH, le modèle XBEACH permet de reproduire à l'échelle d'un hiver des évolutions morphologiques résiduelles cohérentes (i.e. en termes d'ordre de grandeur de volume érodé résiduel) par rapport aux observations basées sur des levés topo-bathymétriques pré/post hiver réalisés le long du même profil. Le paramètre d'ajustement du modèle est lié à l'asymétrie des vagues.

La méthode empirique nécessite la définition d'un coefficient C_s dont la valeur varie de plusieurs ordres de grandeur selon les applications (typiquement entre 10^{-5} et 10^{-3}). En se

basant sur plusieurs jeux de données, LARSON *et al.*, (2004) ont proposé une relation entre le C_S et le ratio entre la hauteur moyenne des vagues au large (H_{rms}) et la granulométrie médiane de la plage (d_{50}). En pratique, ils suggèrent néanmoins d'ajuster un coefficient constant spécifique aux conditions du site étudié. Pour notre application, le coefficient C_S permettant d'obtenir des volumes érodés cumulés par hiver cohérents avec ceux obtenus avec le modèle XBEACH est 2.5×10^{-4} . En se basant sur la relation proposée par LARSON *et al.*, (2004) pour un d_{50} de 400 μm , cette valeur de C_S est obtenue pour le percentile 85 des H_{rms} au large du profil étudié sur la période 1994-2022.

En se basant sur le cumul des séquences érosives de chaque hiver entre 1994 et 2022, les résultats issus des deux méthodes sont cohérents du point de vue du classement des différents hivers. La méthode empirique, plus simple à mettre en œuvre, peut donc tout à fait convenir dans le cadre d'études en ingénierie côtière, afin d'estimer de façon suffisamment réaliste la période de retour de situations exceptionnelles post-hivernales. D'autre part, l'approche de modélisation numérique basée sur les processus confirme bien que les événements les plus défavorables vis-à-vis de la capacité érosive correspondent à la conjonction de vagues incidentes énergétiques et de niveaux de pleine mer hauts (e.g. marée de vive-eau associée à une surcote), ce qui constitue l'hypothèse de base de l'approche empirique.

En se focalisant sur les évolutions intervenant au-dessus d'un niveau de PHMA (+2.53 m NGF), la capacité érosive des conditions hydrodynamiques de l'hiver 2013/2014 se distingue très nettement par rapport aux autres hivers de la réanalyse 1994-2022, avec une période de retour (cohérente pour les deux approches) globalement estimée entre 100 et 300 ans. Ce résultat corrobore les conclusions d'études menées sur d'autres sites, à savoir qu'une succession de tempêtes « classiques » (e.g. de période de retour annuelle) peut conduire à des volumes érodés nettement supérieurs à ceux induits par une tempête exceptionnelle de période de retour plus importante (KARUNARATHNA *et al.*, 2014). Il est également intéressant de souligner que, bien que basée sur un autre proxy en l'occurrence les hauteurs significatives au large moyennées sur une fenêtre temporelle de 8 semaines (réanalyse sur 60 ans), cette estimation de période de retour est cohérente avec celle mentionnée par SCOTT *et al.*, (2016) pour l'hiver 2013/2014 sur la côte Sud-Ouest anglaise. A noter que la période de retour évaluée dans la présente étude augmente sensiblement lorsque le niveau de référence est progressivement réhaussé vers des cotes altimétriques proches de la transition avec le cordon dunaire (e.g. T_R comprise entre 300 et 500 ans pour un niveau de référence à +5 m NGF).

Les résultats de réanalyses (en l'occurrence sur près de 30 ans) de capacité érosive présentent un intérêt pour contribuer à distinguer les tendances d'évolution à moyen/long terme (dont celles liées aux variations du niveau marin ou des apports sédimentaires par les fleuves et rivières) dans le diagnostic de situations actuelles. Les méthodologies peuvent aussi contribuer à l'évaluation des évolutions futures, avec une prise en compte

Thème 6 – Risques côtiers

relativement explicite (dans les deux méthodes), et qui peut être progressive, de la montée attendue du niveau marin.

Du point de vue des limitations et perspectives de l'étude, les points suivants sont à souligner :

Les analyses sont réalisées en 1D (cross-shore) et ne tiennent pas compte des structures morphodynamiques 2D (e.g. système barres-bâines sur la côte Aquitaine).

Bien que les évolutions résiduelles simulées avec XBEACH au cours de plusieurs hivers soient cohérentes avec celles déduites d'observations vis-à-vis des volumes érodés, certaines différences sur les tendances d'érosion/dépôt le long du profil suggèrent que les séquences de ré-engraissement pendant les périodes de moindre énergie pourraient être mieux reproduites. Outre certaines limitations propres au modèle XBEACH mentionnées dans la littérature (e.g. VOLPANO *et al.*, 2022), une attention particulière pourra être accordée à la distinction entre les effets respectivement induits par l'asymétrie horizontale et verticale des vitesses orbitales.

Il serait également pertinent d'étendre les analyses de bilans sédimentaires jusqu'à des profondeurs plus importantes, typiquement au-delà de la zone de déferlement en conditions exceptionnellement énergétiques, durant lesquelles les vagues sont susceptibles de favoriser le transport de sable en direction de la côte (HARLEY *et al.*, 2022).

Les effets du vent ne sont pas pris en compte, ni pour évaluer la surcote atmosphérique (uniquement liée aux variations de pression atmosphérique), ni dans les calculs de transport sédimentaire (à ce stade uniquement hydro-sédimentaires). Les flux éoliens pourraient être intégrés d'abord de manière linéaire (sommations positives ou négatives, le résiduel étant positif sur la côte Aquitaine ; e.g. méthode de VAN RIJN & STRYPSTEEN, 2020) ou simulés plus explicitement avec le modèle DUNA couplé au modèle XBEACH (ROELVINK & COSTAS, 2019).

Enfin, une approche intermédiaire entre les deux approches considérées ici pourrait être envisagée en exploitant les travaux de ZHANG et LARSON (2022), ces derniers proposant en quelque sorte une version morphodynamique du modèle de LARSON *et al.*, (2004) intégrant les améliorations apportées par ZHANG *et al.*, (2020) (i.e. paramétrisation de processus depuis le large jusqu'à la zone du jet de rive) couplées à un module d'évolution dunaire.

5. Références bibliographiques

- ACCENSI M., ALDAY GONZALEZ M.F., MAISONDIEU C. (2022). *RESOURCECODE-Resource characterization to reduce the cost of energy through coordinated data enterprise*. Database user manual. <https://doi.org/10.13155/86306>
- CASSOU-MOUNAT M. (1976). *Tourisme et espace littoral : l'aménagement de la côte aquitaine*. L'Espace géographique, n° 2, 1976, p. 132-144.

- HARLEY M.D., MASSELINK G., RUIZ DE ALEGRÍA-ARZABURU A., VALIENTE N.G., SCOTT T. (2022). *Single extreme storm sequence can offset decades of shoreline retreat projected to result from sea-level rise*. *Commun Earth Environ*, 3(1–11). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00437-2>
- HERSBACH H., *et al.* (2023). *ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present [Dataset]*. Copernicus Climate Change Service (C3S) - Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- KARUNARATHNA H., PENDER D., RANASINGHE R., SHORT A.D., REEVE D.E. (2014). *The effects of storm clustering on beach profile variability*. *Marine Geology*, 348(103–112). <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2013.12.007>
- LARSON M., ERIKSON L., HANSON H. (2004). *An analytical model to predict dune erosion due to wave impact*. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 675-696. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.003>
- L.C.H.F. (1987). *Catalogue sédimentologique des côtes françaises – Côtes de la Manche et de l'Atlantique, de la Baie du Mont-Saint-Michel à la frontière espagnole*.
- MAYER R.H., KRIEBEL D.L. (1994). *Wave runup on composite-slope and concave beaches*. *Proceedings of the 24th Coastal Engineering Conference*. ASCE, pp. 2325–2339. <https://doi.org/10.1061/9780784400890.169>
- RAFATI Y., HSU T.J., ELGAR S., RAUBENHEIMER B., QUATAERT E., VAN DONGEREN A. (2021). *Modeling the hydrodynamics and morphodynamics of sandbar migration events*. *Coastal Engineering*, Volume 166, 103885, ISSN 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103885>
- ROELVINK J.A. (1993). *Dissipation in random wave groups incident on a beach*. *Coastal Engineering*, 19(127–150). [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90021-Y](https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90021-Y)
- ROELVINK D., RENIERS A., VAN DONGEREN A.P., DE VRIES J.V.T., MCCALL R., LESCINSKI J. (2009). *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*. *Coastal Engineering*, 56(11-12), 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- ROELVINK D., COSTAS S. (2019). *Coupling nearshore and aeolian processes: XBeach and duna process-based models*. *Environmental Modelling & Software*, (115), 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.010>
- SCOTT T., MASSELINK G., O'HARE T., SAULTER A., POATE T., RUSSELL P., DAVIDSON M., CONLEY D. (2016). *The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England*. *Marine Geology*, 382(224–241). <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.10.011>
- SHOM (2022). *Références Altimétriques Maritimes (RAM) – Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. <https://diffusion.shom.fr/references-altimetriques-maritimes-ram.html>

Thème 6 – Risques côtiers

STOCKDON H.F., HOLMAN R.A., HOWD P.A., SALLENGER JR A.H. (2006). *Empirical parameterization of setup, swash, and runup*. Coastal engineering, 53(7), 573-588. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>

VAN RIJN L.C., STRYPSTEEN G. (2020). *A fully predictive model for aeolian sand transport*. Coastal Engineering, (156)103600. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103600>

VOLPANO C.A., ZOET L.K., ELMO RAWLING J., THEUERKAUF E.J. (2022). *Measuring and modelling nearshore recovery of an eroded beach in Lake Michigan, USA*. Journal of Great Lakes Research, 48(633–644). <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2022.03.012>

ZHANG J., LARSON M., GE Z.P. (2020). *Numerical model of beach profile evolution in the nearshore*. Journal of Coastal Research, 36(3), 506-520.

<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-19-00065.1>

ZHANG J., LARSON M. (2022). *A numerical model to simulate beach and dune evolution*. Journal of Coastal Research, 38(4), 776-784.

<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-21-00080.1>