



Réponse pluridécennale des littoraux sableux de la côte atlantique européenne aux modes de variabilité naturelle du climat

Bruno CASTELLE ¹, Gerd MASSELINK ², Tim SCOTT ²,
Aikaterini KONSTANTINOU ², Etienne KRAS ³, Arjen LUIJENDIJK ^{3,4}

1. Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC UMR 5805, Pessac, 33600, France.
bruno.castelle@u-bordeaux.fr
2. Coastal Processes Research Group, School of Biological and Marine Sciences, University of Plymouth, Plymouth, PL4 8AA, Royaume-Uni.
gerd.masselink@plymouth.ac.uk; timothy.scott@plymouth.ac.uk;
a.konstantinou@plymouth.ac.uk
3. Deltares, Boussinesqweg, Delft, 2629 HV, Delft, Pays-Bas.
etienne.kras@deltares.nl; arjen.luijendijk@deltares.nl
4. Delft University of Technology, Stevinweg, Delft, 2628 CN, Delft, Pays-Bas.

Résumé :

Nous nous intéressons aux évolutions interannuelles du littoral sableux de la côte atlantique européenne, et de ses liens avec les modes de variabilité naturelle du climat. Nous combinons des levés mensuels à bimensuels *in situ*, couvrant chacun ~20 ans, réalisés sur trois sites et des données de trait de côte sur tout le linéaire côtier issues de l'imagerie satellitaire optique (1984-2021, Landsat). Les résultats montrent que la variabilité interannuelle du trait de côte peut être expliquée par des indices climatiques atmosphériques, principalement la *West Europe Pressure Anomaly* (WEPA) et l'Oscillation Nord Atlantique (NAO), sans corrélation significative avec ENSO. Le sens et l'intensité de ces corrélations montrent une forte variabilité spatiale et dépendent fortement des caractéristiques (e.g. exposition, présence de cap rocheux, ...) des littoraux concernés.

Mots-clés :

Côtes sableuses, Erosion, Echelle régionale, Variabilité interannuelle, Mode de variabilité climatique, Exposition, Observations récurrente, Imagerie satellitaire.

1. Introduction

La morphologie des côtes sableuses montre souvent une variabilité interannuelle marquée, dont l'amplitude peut largement dépasser celle de la variabilité saisonnière. Cette variabilité interannuelle domine également les incertitudes quant aux évolutions des littoraux au cours des prochaines décennies, avant que l'augmentation du niveau marin ne devienne dominante dans la seconde partie du XXI^{ème} siècle (LE COZANNET *et al.*,

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

2016). Cette variabilité interannuelle des littoraux sableux peut être largement influencée par des modes de variabilité naturelle du climat à grande échelle (e.g. *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) ou *North Atlantic Oscillation* (NAO)), à travers une modulation des climats de vagues et des régimes de tempête. Comme la prévisibilité saisonnière à décennale de ces modes de variabilité climatique s’est récemment améliorée (ATHANASIADIS *et al.*, 2020), caractériser l’évolution des littoraux sur des échelles interannuelles à décennales, et à des échelles spatiales locales à régionales, devient crucial pour prédire l’avenir de nos côtes sur les échelles saisonnières à décennales.

L’Oscillation Nord Atlantique (*North Atlantic Oscillation*, NAO) est reconnue comme le mode de variabilité atmosphérique dominant dans l’Atlantique Nord en hiver. Si ce mode de variabilité explique une grande part de la variabilité interannuelle de la hauteur moyenne des vagues en hiver le long du littoral atlantique européen, les corrélations chutent entre les côtes du sud de l’Angleterre jusqu’au sud du Portugal, (voir Figure 1). Un nouvel indice climatique a été récemment proposé (CASTELLE *et al.*, 2017) permettant d’expliquer la variabilité interannuelle des vagues d’hiver dans cette zone. Cet indice hivernal (*West Europe Pressure, Anomaly WEPA*) est défini comme l’anomalie de la différence de pression normalisée mesurée entre les stations Valentia (Irlande) et Santa Cruz de Tenerife (Canaries). La phase positive de WEPA reflète une intensification et une translation vers le sud du gradient de pression atmosphérique entre la dépression islandaise et l’anticyclone des Açores. WEPA surpasse les autres indices climatiques sur les côtes européennes et marocaines au sud de 52°N et améliore de 100 à 150 % l’explication de la variabilité interannuelle des hauteurs moyennes dans le Golfe de Gascogne.

Comprendre le lien entre ces modes de variabilité climatique et la réponse du trait de côte nécessite des données d’observation long terme (> 10 ans) et relativement haute fréquence (e.g. mensuelle) de la morphologie littorale, qui ne sont disponibles que sur une poignée de sites le long de la côte atlantique européenne. Toutefois, en seulement quelques années, l’imagerie satellitaire optique a transformé l’étude du trait de côte des systèmes littoraux d’un domaine « pauvre » en données long terme et grande échelle, vers un domaine « riche » (VITOUSEK *et al.*, 2023). Ces images permettent désormais de générer des bases de données de l’échelle locale à régionale (VOS *et al.*, 2023) voir même globale (LUIJENDIK *et al.*, 2018). Toutefois, ces données sont entachées d’incertitudes parfois prohibitives, en particulier le long des côtes énergétiques et à marée comme le long de la côte Atlantique européenne, et leur utilisation nécessite des traitements appropriés pour ne pas aboutir à des conclusions erronées (WARRICK *et al.*, 2024).

Dans cette étude, nous combinons des levés mensuels à bimensuels *in situ* localisés couvrant ~20 ans et des données de trait de côte issues de l’imagerie satellitaire optique (1984-2021, Landsat, *ShorelineMonitor*, LUIJENDIJK *et al.*, 2018) sur ~11000 km du littoral atlantique européen pour décrire la distribution spatiale des liens entre modes de variabilité climatique et réponse du trait de côte le long des secteurs sableux (~2840 km).

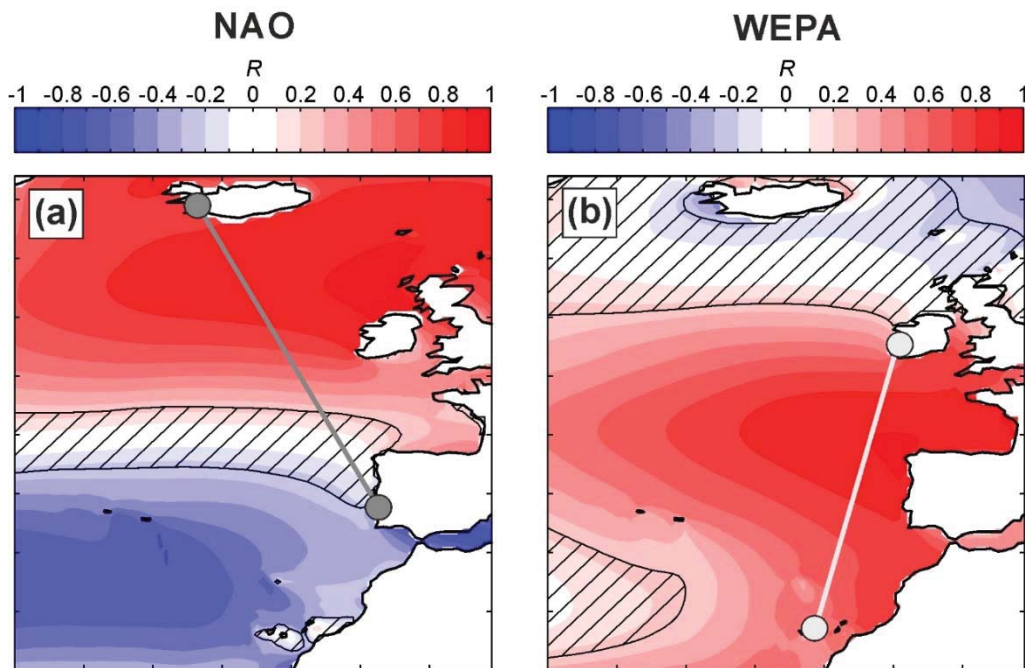


Figure 1. Coefficient de corrélation R entre les moyennes hivernales de H_s et les indices climatiques (a) NAO et (b) WEPA (1948-2016). Les zones hachurées montrent les zones où les corrélations ne sont pas statistiquement significatives (CASTELLE *et al.*, 2017)

2. Matériel et méthodes

2.1 Observation topographiques

Les trois sites sélectionnés sont Perranporth, Slapton Sands et le Truc Vert (Figure 2). Perranporth et Truc Vert sont pleinement exposées aux houles générées dans l'Atlantique Nord, tandis que Slapton Sands est soumise à un climat de vagues bimodal, en houles provenant par réfraction de l'Atlantique Nord et des mers de vent d'est. L'évolution morphologique des sites de Perranporth et Slapton Sands est suivie depuis 2006 par le Coastal Processes Research Group (Plymouth University) à une fréquence mensuelle. La morphologie de la plage du Truc Vert est quant à elle suivie par Methys/EPOC (Université de Bordeaux) depuis 2003, de manière mensuelle puis bimensuelle depuis 2009. Les évolutions morphologiques sont complétées par des mesures et/ou simulations rétrospectives des conditions de vagues. Pour plus de détails sur ces sites d'observation récurrente et les différents protocoles expérimentaux, le lecteur peut se référer à CASTELLE *et al.*, (2020) et McCARROL *et al.*, (2023). Ces données ont permis notamment de calculer l'évolution du trait de côte x , son évolution durant l'hiver Δx et, pour Slapton Sands qui est dominée par une dynamique de rotation de plage l'indice de rotation RI (WIGGINS *et al.*, 2020) pendant l'hiver, avec $RI > 0$ ($RI < 0$) signifiant une rotation de la plage dans le sens horaire (anti-horaire). Une description des post-traitements utilisés ici est donnée dans MASSELINK *et al.*, (2023).

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

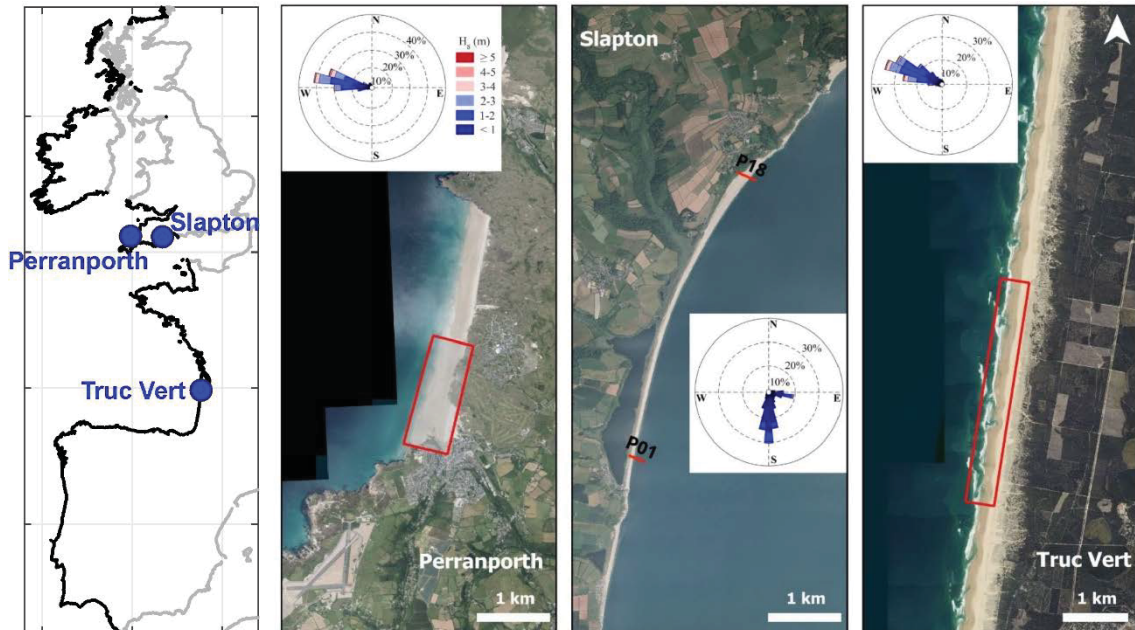


Figure 2. Localisation des trois plages étudiées via les observations topographiques et leurs vues aériennes (@GoogleEarth) avec leur rose de vagues. De la gauche vers la droite : un secteur de plage de Perranporth (rectangle rouge), deux profils (P01 et P18) à chacune des extrémités de la plage de Slapton Sands et un secteur de la plage du Truc Vert (d'après MASSELINK *et al.*, 2023).

2.2 Trait de côte satellite

Nous nous sommes appuyés sur base de données globale *ShorelineMonitor* de trait de côte satellite (SM; <http://shorelinemonitor.deltares.nl>). Pour plus de détails sur cette base de données le lecteur peut se référer à LUIJENDIJK *et al.*, (2018). Nous avons utilisé une mise à jour de cette base de donnée avec, entre autres, une extension à la période 1984-2021 et une augmentation du nombre d'images utilisées en moyenne par composite sur la période 1990-2000. De plus, une nouvelle classification de la typologie de côte (sableuse, rocheuse, vaseuse, ...) a été utilisée (HULSKAMP *et al.*, 2023) qui permet grandement améliorer la détermination des secteurs sableux. Ici, nous nous sommes uniquement intéressés à la côte atlantique européenne (trait noir dans la Figure 3), c'est-à-dire environ 11000 km de linéaire côtier, comprenant environ 2840 km (25.8 %, 8281 transects espacés de ~350 m en moyenne) de linéaire sableux cumulé (Figure 3b) dont près de la moitié (~1380 km, 48.5 %) est exposé ouest ($\pm 45^\circ$, Figure 3c). En utilisant des composites annuels la position du trait S, défini ici comme la ligne d'eau, de côte chaque année est déterminée pour chaque transect (voir LUIJENDIJK *et al.*, 2018 pour une description de la méthodologie adoptée). Afin de réduire les incertitudes, une moyenne glissante spatiale de la position du trait de côte a été appliquée, en prenant soin de ne moyennner qu'avec les transects adjacents ayant une orientation similaire ($\pm 45^\circ$). Les analyses de cette base de données et les estimations des incertitudes sur la position

du trait de côte pour la côte atlantique européenne, le calcul de tendances et celui des variabilités annuelles sont détaillées dans CASTELLE *et al.*, (en révision).

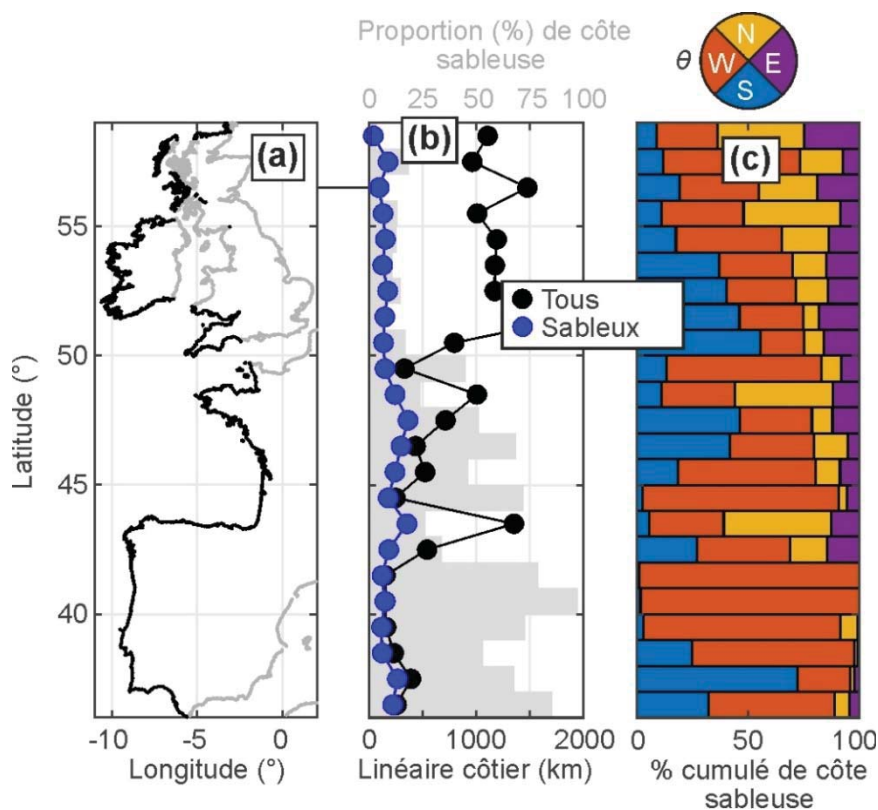


Figure 3. (a) Linéaire côtier (noir) et distribution latitudinale de (b) la proportion de littoraux sableux et (c) de leur exposition (d'après CASTELLE *et al.*, en révision).

2.3 Données de vagues

Les données de vagues ont été récupérées depuis les réanalyses de 5^{ème} génération du European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ECMRWF disponible à l'échelle globale depuis 1940 (ERA5, HERSBACH *et al.*, 2023) et extrait ici sur la période 1984-2021 pour l'ensemble de la côte Atlantique européenne. Pour les 3 sites où les évolutions topographiques ont été analysées des données de bouées et des réanalyses ont été combinées (MASSELINK *et al.*, 2023). A partir de ces données le flux d'énergie local P a été calculé et sommé pendant l'hiver (ΣP). Comme Slapton Sands est largement affectée par des processus de rotation de plage, les composantes sud (ΣP_{south}) et est (ΣP_{east}) de P ont été calculées et utilisées pour estimer l'indice de puissance directionnel WDI (WIGGINS *et al.*, 2020).

2.4 Indices atmosphériques

Nous avons utilisé les valeurs moyennes hivernales (DJFM) des indices de téléconnexion dans cette région du monde, à savoir NAO, SCAND et EA disponibles sur la période

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

1980–2017 (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Climate Prediction Center; www.cpc.ncep.noaa.gov). De plus, la série temporelle hivernale WEPA a été calculée en normalisant (1942-2021) la différence de pression atmosphérique mesurée *in situ* aux stations météo de Valentia et de Santa Cruz de Tenerife d’après CASTELLE *et al.*, (2017). Ces données de pression atmosphérique sont disponibles grâce au projet ECA&D (<http://www.ecad.eu>) et le Service météorologique irlandais (<http://www.met.ie/climate-request/>) pour les données de l’Observatoire de Valentia. Contrairement aux autres indices NAO, SCAND et EA qui sont issus d’analyse EOF de la variabilité atmosphérique issues de réanalyses climatiques, WEPA a été élaboré spécifiquement pour essayer de mieux caractériser la variabilité interannuelle de l’activité des vagues en hiver au centre de la côte atlantique européenne. A noter que d’autres indices comme l’ENSO ont été testés, mais ne donnent pas de relations statistiquement significatives ni avec les vagues ni avec l’évolution du trait de côte.

2.5 Corrélations entre variabilité morphologique et indices atmosphériques

La série temporelle de la position du trait de côte moyennée dans le temps autour de la moyenne a été calculée, ainsi que son changement annuel dS . Des corrélations R et les p -values correspondantes entre dS et tous les indices climatiques ont ensuite été calculées pour explorer quels indices climatiques expliquent une certaine quantité de variabilité interannuelle du trait de côte, et comment ces corrélations varient spatialement.

3. Résultats

La réponse hivernale de la plage (Δx pour Perranporth et Truc Vert, et RI pour Slapton Sands) peut être expliquée dans l’espace paramétrique NAO-WEPA. Le recul du trait de côte le plus important en hiver à Perranporth et au Truc Vert est associé au quadrant NAO+/WEPA+ (Figures 4b,f), avec WEPA montrant des corrélations plus fortes avec Δx . À Perranporth, tous les hivers entraînent un recul du trait de côte ($\Delta x < 0$), tandis que les hivers les plus calmes à Truc Vert peuvent être associés à une légère reconstruction du trait de côte ($\Delta x > 0$). Pour Slapton Sands, le quadrant NAO+/WEPA+ se caractérise par la rotation la plus prononcée dans le sens horaire, et les deux hivers avec les plus grandes valeurs de RI (2013/14 et 2015/16) se situent en haut du quadrant NAO+/WEPA+. Des deux indices climatiques, WEPA montre une corrélation plus forte avec RI que NAO.

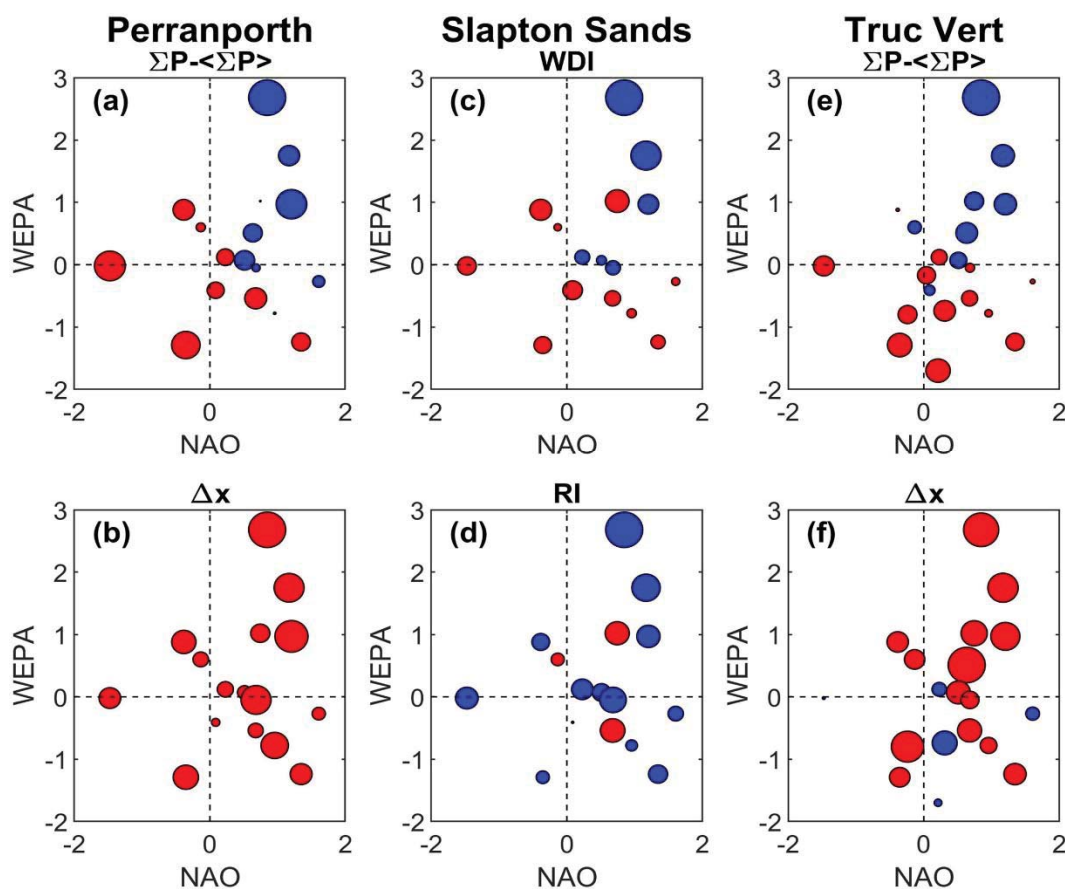


Figure 4. Paramètre des réponses morphologiques (Δx , RI) versus les valeurs moyennes hivernales ΣP et WDI décrivant le climat de vagues. Pour chaque variable morphologique, la taille du rond est proportionnelle à la valeur absolue et le bleu (rouge) dénote une valeur positive (négative). D'après MASSELINK *et al.*, (2023).

L'analyse issue de l'imagerie satellitaire optique (Figure 5) montre que la variabilité interannuelle du trait de côte dS est influencée par WEPA et NAO, les littoraux non exposés au climat de vague dominant montrant une corrélation plus faible et plus variable avec les indices. Ces calculs ont été réalisés en appliquant une moyenne glissante sur le trait de côte de 5 km ayant une exposition similaire afin de filtrer le bruit de la donnée (voir analyse de sensibilité dans CASTELLE *et al.*, en révision). En accord avec les analyses sur les trois sites de suivi ci-dessus, les côtes sableuses ouvertes (*e.g.* sud-ouest de la France, côte ouest du Portugal) montrent des motifs de corrélation beaucoup plus cohérents spatialement que les littoraux découpés. Nos résultats fournissent un continuum spatial entre les études locales précédentes et appellent à des applications basées sur une approche de moyenne glissante pertinente pour dévoiler le spectre de contrainte-réponse des littoraux sableux à l'échelle mondiale.

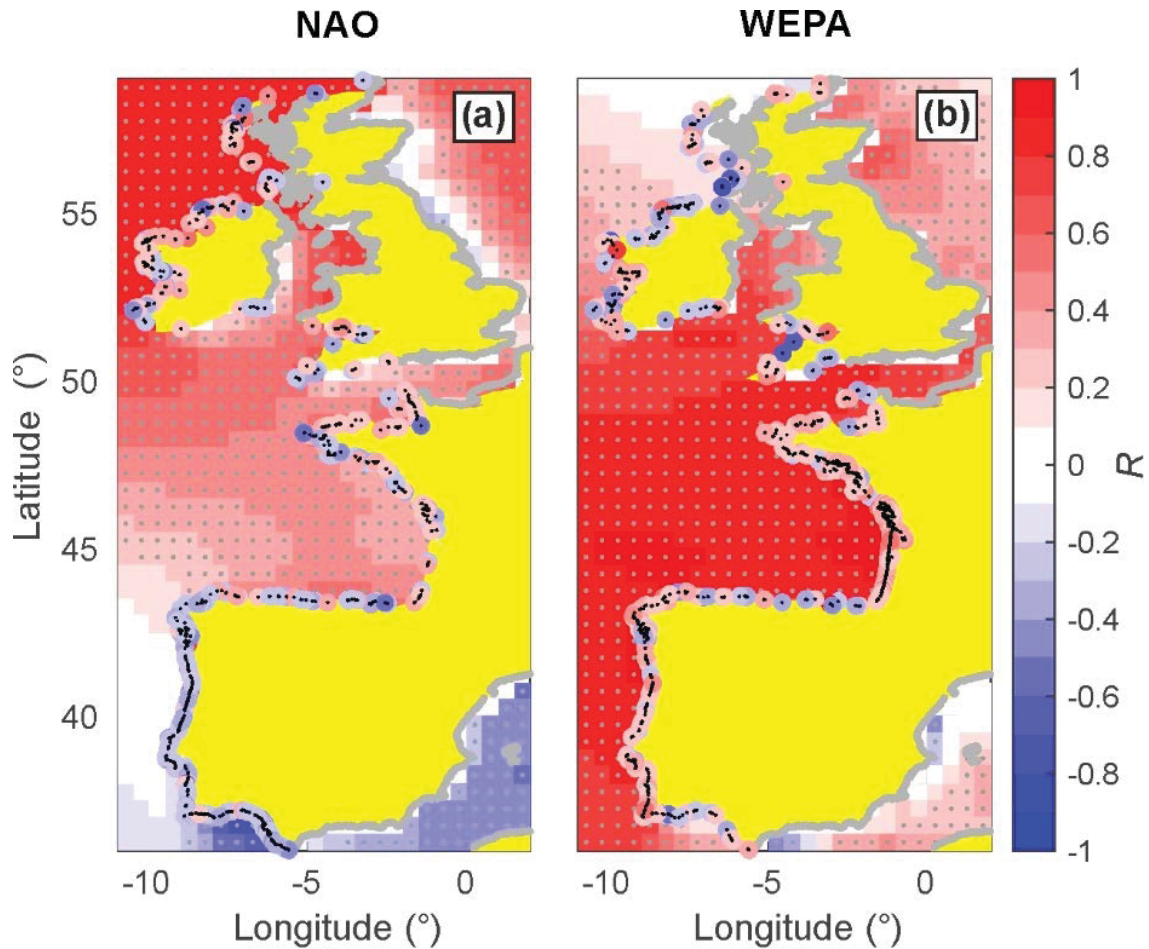


Figure 5. Coefficient de corrélation R entre la variabilité interannuelle du trait de côte (ou au large les moyennes hivernales de H_s) et les indices climatiques (a) NAO et (b) WEPA sur la période 1984-2021 (CASTELLE *et al.*, en révision). Les points noirs sur les traits de côte dénotent où les corrélations sont statistiquement significatives.

4. Conclusions

Ces travaux montrent que la variabilité interannuelle du trait de côte le long du littoral atlantique européen peut être corrélée (corrélations généralement faibles mais statistiquement significatives) avec des indices climatiques atmosphériques régionalement dominants, WEPA et NAO, et aucune corrélation avec ENSO (pas montré ici). Les littoraux abrités par des caps rocheux et/ou pas exposés Ouest, montrent une corrélation avec les indices climatiques souvent plus faible et plus variable spatialement, ou des relations avec deux indices pour les sites avec un climat de vagues bidirectionnel (e.g. Slapton Sands). Les données satellitaires fournissent un *continuum* spatial entre les études locales *in situ* et permettent d'améliorer la compréhension du spectre de forçage-réponse des littoraux sableux sur des grandes échelles spatio-temporelles. Le détail de ces travaux sont donnés dans MASSELINK *et al.*, (2023) et CASTELLE *et al.*, (en révision).

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR SHORMOSAT (ANR-21-CE01-0015); GM et TS soutenu par UK NERC (NE/M004996/1; projet BLUE-coast); AL et EK financés par le programme Deltares ‘Seas and Coastal Zones’. Truc Vert monitoring site is labelled by the Service National d'Observation (SNO) Dynalit, with surveys further funded by Observatoire de la Côte de Nouvelle-Aquitaine (OCNA) and Observatoire Aquitain des Sciences de l'Univers (OASU).

5. Références bibliographiques

- ATHANASIADIS, P. J. et al. (2020). *Decadal predictability of north atlantic blocking and the NAO*. npj Climate and Atmospheric Science. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0120-6>
- CASTELLE B., DODET G., MASSELINK G., SCOTT T. (2017). *A new climate index controlling winter wave activity along the Atlantic coast of Europe: The West Europe Pressure Anomaly*. Geophysical Research Letter, Vol. 44. doi:10.1002/2016GL072379.
- CASTELLE B., BUJAN S., MARIEU V., FERREIRA S. (2020). *16 years of topographic surveys of rip-channelled high-energy meso-macrotidal sandy beach*. Scientific Data. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00750-5>
- CASTELLE B., KRAS E., MASSELINK G., SCOTT T., KONSTANTINOOU A., LUIJENDIJK A. (en révision). *Satellite-derived sandy shoreline trends and interannual variability along the Atlantic coast of Europe*, Scientific Reports. doi: 10.21203/rs.3.rs-3696677/v1
- HERSBACH *et al.* (2023). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- HULSKAMP R., LUIJENDIJK A., VAN MAREN B. *et al.* (2023). *Global distribution and dynamics of muddy coasts*. Nature Communication, Vol. 14, 8259. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43819-6>
- LE COZANNET G., OLIVEROS C., CASTELLE B., *et al.* (2016). *Uncertainties in sandy shorelines evolution under the bruun rule assumption*. Frontiers in Marine Science, Vol. 3., <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00049>
- LUIJENDIJK A., HAGENAARS G., RANASINGHE R. *et al.* (2018). *The state of the world's beaches*. Scientific Reports, Vol. 8; 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- MASSELINK G., CASTELLE B., SCOTT T., KONSTANTINOOU A. (2023). *Role of atmospheric indices in describing shoreline variability along the Atlantic coast of Europe*. Geophysical Research Letters, Vol. 50, e2023GL106019. <https://doi.org/10.1029/2023GL106019>
- McCARROLL R.J., VALIENTE N.G., WIGGINS, M., *et al.* (2023). *Coastal survey data for Perranporth beach and start Bay in southwest England (2006–2021)*. Scientific data, Vol. 10, 258. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02131-0>

Thème 2 – Dynamique sédimentaire

VITOUSEK S., BUSCOMBE D., VOS K., *et al.* (2023). *The future of coastal monitoring through satellite remote sensing*. Cambridge Prisms: Coastal Futures, Vol. 1, e10, <https://doi.org/10.1017/cft.2022.4>

VOS K., SPLINTER K.D., PALOMAR-VÁZQUEZ J., *et al.* (2023). *Benchmarking satellite-derived shoreline mapping algorithms*. *Comm. Earth & Env.*, Vol. 3, 345. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01001-2>

WARRICK J.A. *et al.* (2024). *Coastal shoreline change assessments at global scales*. *Nature Communications*, Vol. 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46608-x>.

WIGGINS M., SCOTT T., MASSELINK G., MCCARROLL R.J., RUSSELL P. (2020). *Predicting beach rotation using multiple atmospheric indices*. *Marine Geology*, Vol. 426, 106207. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106207>