



La donnée spatiale au service de la gestion intégrée des zones côtières : de l'observation globale à l'action locale – L'ambition du Projet ESA Coastal Erosion

Valentin PILLET¹, Oscar VOISIN¹, Manon BESSET¹, Virginie LAFON¹,
Aurélie DEHOUCK¹, Olivier REGNIERS¹, Nicolas DEBONNAIRE¹,
Stéphane COSTA²

1. i-Sea, 30 avenue de Canteranne, 33600 Pessac, France.

valentin.pillet@i-sea.fr

2. Université de Caen, CNRS, LETG, 14000, Caen, France.

Résumé :

De nombreux outils et méthodes d'observation (GPS, LiDAR...) sont déployés pour assister les acteurs en charge de la gestion des littoraux dans leurs politiques de réduction des risques et apporter des connaissances robustes sur la dynamique côtière. Si ces données offrent une excellente précision verticale et/ou horizontale, leur déploiement est limité à des zones restreintes et leur coût est généralement élevé. Dans le cadre du projet de ESA *Coastal Erosion*, le consortium *Space for Shore* propose une stratégie complémentaire, reproductible et abordable déployée à grande échelle ; elle repose sur la télédétection satellitaire et l'extraction automatique d'indicateurs de suivi morphologiques côtiers (trait de côte, bathymétrie...) à différentes échelles spatio-temporelles. Au total, et sur la base de milliers d'images satellites, l'évolution de 4500 km de côte a été suivie et analysée dans 6 pays européens (France, Norvège, Allemagne, Portugal, Grèce et Roumanie) sur les 25 dernières années. Pour répondre au mieux aux attentes des gestionnaires du littoral, l'ensemble des indicateurs repose sur les besoins exprimés et l'évaluation des produits par une soixantaine d'utilisateurs impliqués dans le projet (agences gouvernementales, autorités régionales, élus locaux, scientifiques). Sur ces bases, l'objectif est de proposer un outil d'aide à la décision fiable et abordable pour (1) servir de système d'alerte précoce permettant d'identifier les secteurs où une attention particulière doit être portée à l'érosion et à la vulnérabilité physique du système côtier, pour (2) optimiser les coûts relatifs au suivi de la dynamique côtière et connexes au déploiement d'instruments de mesure in situ en identifiant à l'échelle locale, régionale ou nationale les secteurs les plus dynamiques et (3) pour accompagner les acteurs locaux dans la gestion des risques littoraux en proposant une actualisation cartographique constante et rapide.

Mots-clés : Érosion côtière, Gestion du littoral, Observation de la terre par satellite, Télédétection, Copernicus, Projet européen.

Thème 7 – Risques côtiers

1. Introduction

De nombreux outils et méthodes d'observation in situ sont déployés pour assister les acteurs en charge de la gestion des littoraux dans leurs politiques de réduction des risques et apporter des connaissances sur la dynamique côtière. Si ces données offrent une excellente précision verticale et/ou horizontale, leur déploiement est limité à des zones restreintes et leur coût est généralement élevé. Dans le cadre du projet de ESA *Coastal Erosion*, le consortium *Space for Shore* propose une stratégie complémentaire, reproductible et abordable déployée à grande échelle ; elle repose sur la télédétection satellitaire et l'extraction automatique d'indicateurs de suivi morphologiques côtiers (trait de côte, bathymétrie...) à différentes échelles spatio-temporelles. Depuis 2019, le consortium a étudié plus de 4500 kilomètres de côtes à l'échelle européenne (Figure 1, A).

Les littoraux étudiés sont représentatifs du large spectre de systèmes côtiers observés en Europe, tant en termes de régimes de marée que de morphologies (c.-à-d. systèmes cordon-lagune, plage-dune, côtes à falaises, fjords polaires...). En France, le suivi pluri-décennal (1995-2022) par satellite couvre près de 1000 km de littoral, répartis sur l'ensemble des façades maritimes métropolitaines (Normandie, Bretagne, Pays de la Loire, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie et Région Sud) (Figure 1, A). L'objectif de cette étude est de proposer un exemple de synthèse de données quantitatives d'évolutions complexes issues d'imageries satellitaires en un indice d'exposition à l'aléa d'érosion, accessible à tous les acteurs du littoral, quel que soit leur niveau d'expertise. Pour cela, un échantillon de résultats est présenté en Vendée sur un site-atelier de 72 km de côtes sableuses, s'étendant du nord de l'île de Noirmoutier aux Sables-d'Olonne (Figure 1, A).

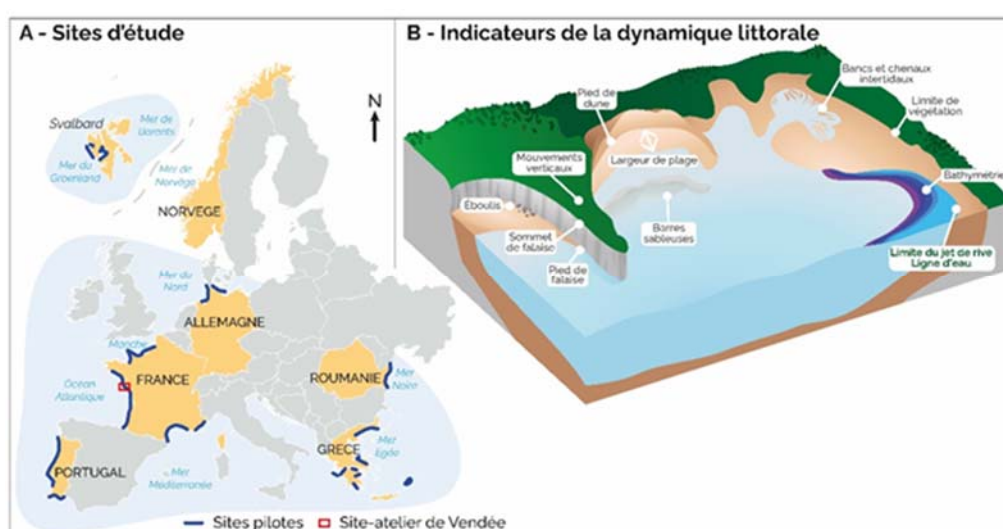


Figure 1. A : Localisation des sites pilotes dans les six pays européens impliqués dans le projet Space for Shore. B : Indicateurs de la dynamique littorale extraits.

2. Matériel et méthodes

2.1 Collecte des besoins des gestionnaires du littoral

Sur la durée du projet (2019-2022), plus de 70 structures publiques, Universités et entreprises privées ont pu être rencontrées, dont 34 en France, réparties dans 6 des 8 régions métropolitaines disposant d'une façade maritime. Un questionnaire commun a été utilisé pour conduire les entretiens à l'échelle européenne. Il a permis d'identifier les principaux enjeux (économiques, démographiques, environnementaux) des zones gérées par les acteurs et ainsi sélectionner collectivement les sites d'étude. Ce questionnaire a aussi fait émerger les besoins des acteurs en charge de la gestion des zones littorales, notamment en ce qui concerne les indicateurs prioritaires pour suivre leur dynamique, la fréquence et la temporalité d'acquisition, ainsi que la précision attendue. La feuille de route de production du consortium *Space for Shore* est basée sur les informations extraites de ces entretiens et tient compte des spécificités géomorphologiques, anthropiques et écologiques de chaque site étudié.

2.2 Extraction des principaux indicateurs de la dynamique littorale en France

À l'échelle européenne, plus de dix indicateurs de la dynamique côtière (Figure 1, B) ont été extraits à partir des archives de données satellitaires à haute (p. ex. Sentinel) et très haute résolution (p. ex. Pléiades). Les méthodes élaborées et les outils utilisés dans le cadre du projet s'inspirent des derniers travaux publiés (LUIJENDIJK *et al.*, 2018 ; TOURE *et al.*, 2019 ; VOS *et al.*, 2019 ; EVAGOROU *et al.*, 2019 ; MAVRAEIDOPOULOS *et al.*, 2019 ; MISRA *et al.*, 2019 ; PEREIRA *et al.*, 2019). Des développements complémentaires ont permis de tendre vers une automatisation des méthodes d'analyse des images satellites. Les détails des méthodes déployées sont donnés dans les rapports du projet (*Technical Specification* : PILLET *et al.*, 2022).

Ici, seuls les résultats relatifs à l'évolution de la position du jet de rive sont présentés, car ce dernier a été utilisé pour produire l'indice synthétique d'exposition à l'aléa érosion en Vendée, décrit en section 2.3. Le jet de rive est défini comme la limite d'excursion de l'eau sur la plage. Pour s'affranchir des fluctuations instantanées liées au déferlement à l'instant d'un cliché satellitaire, sa position est obtenue à partir d'une combinaison de plusieurs dates proches dans le temps. Cet indicateur est extrait grâce à une classification supervisée réalisée à partir d'un modèle générique composé de 14 classes sur un ensemble d'images sur une courte période (max. 2 mois). L'évolution de la position du jet de rive est ensuite calculée en utilisant l'outil *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) (THIELER *et al.*, 2017), extension du logiciel ArcGIS© (une mesure tous les 20m le long du littoral).

Thème 7 – Risques côtiers

Un effort particulier a été fait pour évaluer l'incertitude des produits extraits des images satellites, afin de déterminer s'ils peuvent ou non répondre aux besoins de prise de décisions et d'actions. Les incertitudes ont été calculées pour l'ensemble des algorithmes utilisés et des pays impliqués dans le projet *Space for Shore* en comparant les données extraites par satellite avec des données de référence mises à disposition par les partenaires du projet. Les détails des méthodes et des résultats obtenus sont présentés dans le rapport dédié (*Validation Report* : BESSET *et al.*, 2022).

2.3 Produire un indice d'exposition synthétique à l'aléa érosion côtière

2.3.1 *Segmenter le littoral en boîtes d'égales dimensions pour synthétiser l'information*

La méthode adoptée s'inspire des travaux menés par le laboratoire LETG-Nantes depuis une dizaine d'années sur le littoral métropolitain français (p. ex DEBAINE & ROBIN, 2012 ; ROBIN *et al.*, 2019 ; JUIGNER *et al.*, 2021), notamment en ce qui concerne la segmentation de la frange côtière en boîtes d'égales dimensions. Cette approche permet d'adjoindre des informations spatiales complexes de manière à produire un indice d'exposition à l'érosion synthétique et uniforme à l'échelle des sites d'études. Une zone tampon de onze kilomètres est segmentée à intervalles réguliers par des transects perpendiculaires au rivage générés avec DSAS. Selon l'échelle (p. ex. Européenne, nationale, régionale, communale...), l'intervalle varie de 500 m à 20 m, afin d'offrir un niveau d'information adapté aux besoins des gestionnaires du littoral (Figure 2, A).

2.3.2 *Critères pris en compte dans l'élaboration de l'indice d'exposition à l'érosion*

L'indice d'exposition au risque d'érosion côtière est la résultante du croisement pour chaque boîte (1) des données de l'aléa érosion déduit des résultats du projet et (2) des niveaux d'enjeux dérivés des données d'occupation du sol, extraits de la base de données Corine Land Cover (CLC, 2018). L'indicateur d'aléa est issu du suivi de l'évolution de la position du trait de côte, dont la méthode est décrite à la section 2.2 (p.3). Ces résultats sont renseignés en mètres par an et sont hiérarchisés en cinq classes (Figure 2, B), allant de *forte accrétion* à *forte érosion*. Les données d'occupation du sol (CLC, 2018) sont renseignées sur 500 m depuis le trait de côte dans chaque boîte et l'information est subdivisée tous les 100 m afin de pondérer l'enjeu en fonction de sa proximité à la côte. Le niveau d'enjeu est ainsi catégorisé en 5 classes (Figure 2, C). L'indice d'exposition au risque d'érosion côtière les données d'aléa et d'enjeux, au travers de cinq niveaux d'exposition, allant de *très faible* à *très forte exposition* à l'érosion côtière (Figure 2, D).

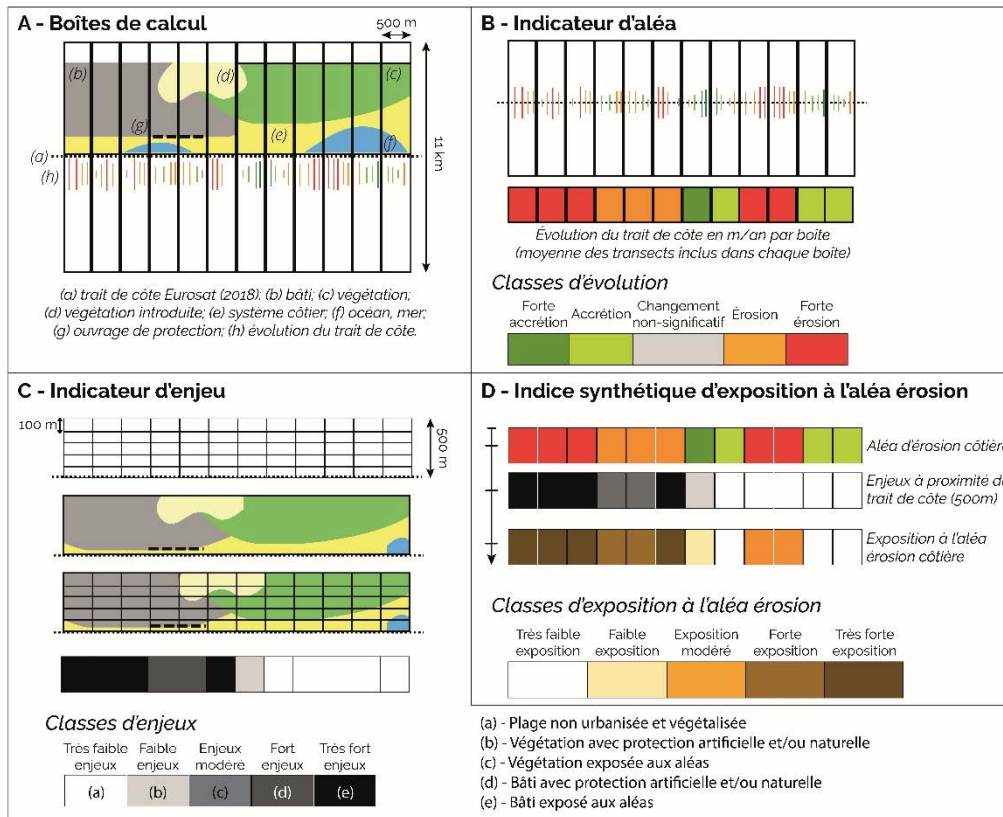


Figure 2. Élaboration de l'indice d'exposition à l'aléa érosion à l'échelle européenne.

3. Résultats

Les résultats présentés se focalisent sur un site pilote situé en Vendée et couvrent 72 km de côtes sableuses, de l'île de Noirmoutier aux Sables-d'Olonne (Figure).

3.1 Dynamique de la limite du jet de rive dans le nord Vendée

Entre 1995 et 2021, la limite supérieure du jet de rive est majoritairement stable en position et a évolué à une vitesse moyenne de 0,28 m/an. Toutefois, les valeurs d'évolutions par transects permettent d'affiner ce constat, puisque sur l'ensemble des transects utilisés pour évaluer la dynamique du trait de côte (3392), 51% (1714 transects) montrent une situation de recul (évolutions < -1 m/an), 19% (667) sont stables en position, tandis que 30% (1011) reflètent un état de progradation du trait de côte (évolutions > +1 m/an). À l'échelle du site d'étude, les vitesses d'évolutions minimales et maximales par transect sont relativement dispersées et témoignent de la forte variabilité longitudinale du comportement du trait de côte, puisqu'elles atteignent -18,80 m/an et +22,60 m/an, respectivement (Figure).

Thème 7 – Risques côtiers

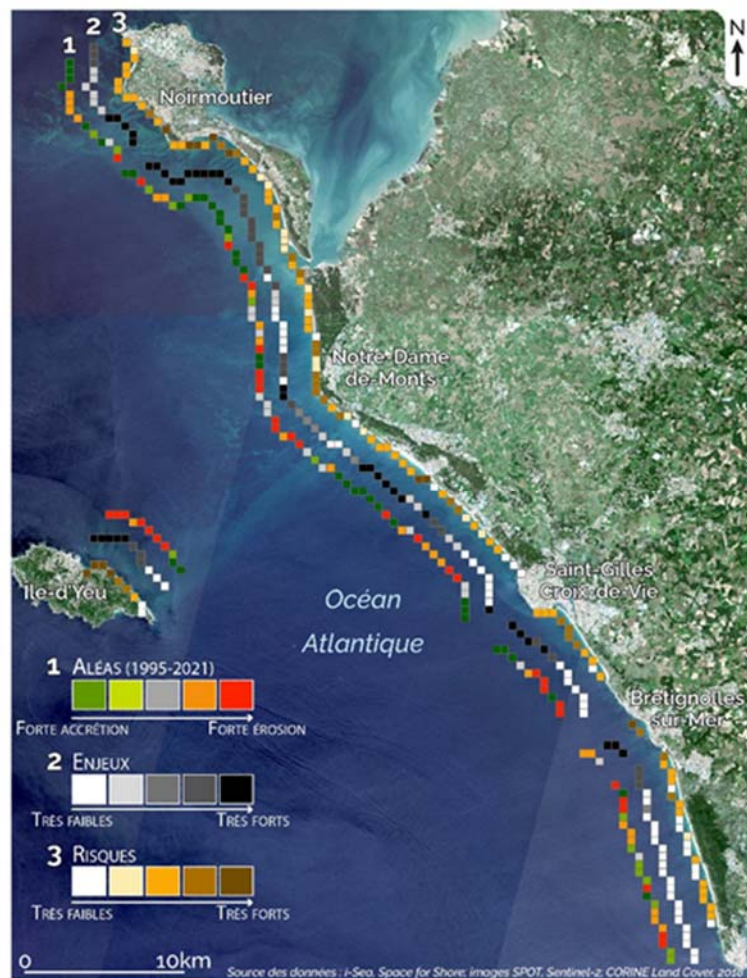


Figure 3. Indice d'exposition synthétique à l'aléa érosion dans le nord Vendée.

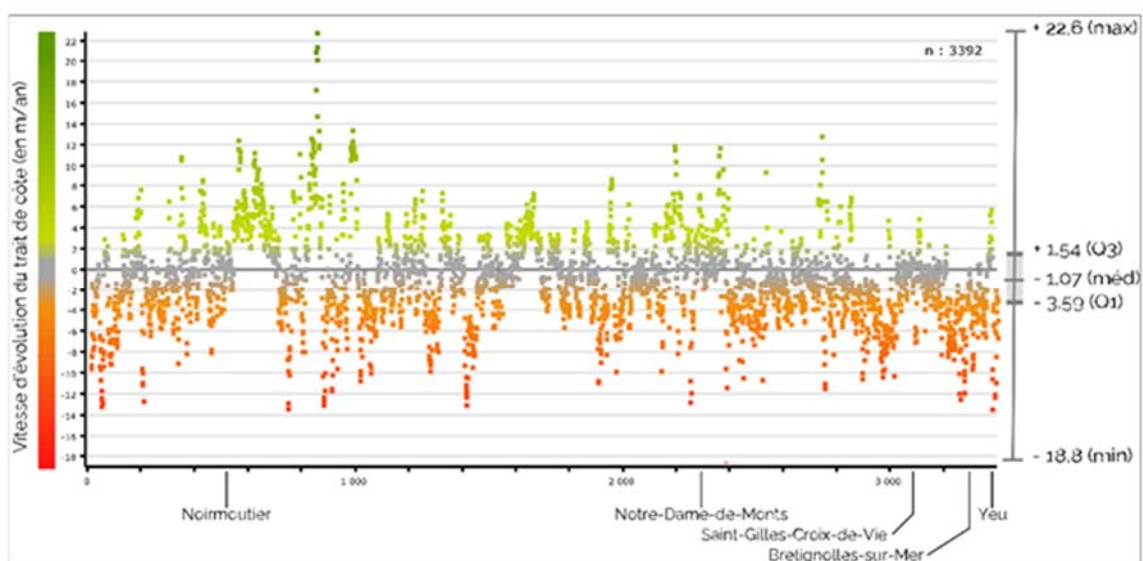


Figure 4. Valeurs d'évolution de la limite du jet de rive entre 1995 et 2021 en mètres par an.

3.2 Indice d'exposition synthétique à l'aléa érosion en Vendée

La zone d'étude (Figure) a été segmentée en 112 boîtes de calcul afin d'adjoindre les informations relatives à la dynamique du trait de côte et celles de l'occupation de sol (CLC, 2018). Les résultats montrent que la majorité des boîtes est dans une situation de prédisposition à l'aléa érosion, puisque 48% d'entre elles ont des valeurs d'évolution du trait de côte inférieures à -1 m/an (Figure). Parallèlement, 39% sont concernés par une situation d'accrétion. L'analyse des enjeux anthropiques présents dans une bande de 500m depuis le trait de côte démontre qu'une part importante des boîtes atteint un niveau de forts (23%) à très forts enjeux (26%), bien que 46% des boîtes ne contiennent que peu ou pas d'enjeux anthropiques. L'adjonction des données d'aléa et d'enjeux révèle que la majorité des boîtes (44%) est dans une situation d'exposition modérée à l'aléa érosion. Toutefois, une partie du littoral vendéen est exposé (20%) à fortement exposé (10%) à l'aléa érosion (Figure). Néanmoins, pour 26% des boîtes, la situation est moins préoccupante, puisqu'elles combinent une situation d'accrétion et une faible présence d'enjeux dans la bande des 500m, réduisant l'exposition à l'aléa érosion de faible à très faible.

4. Discussions

4.1 La donnée spatiale complémentaire aux données de terrain

Les images satellites, parce qu'elles couvrent de vastes étendues, permettent de traiter de grandes portions du littoral en un temps très court. Depuis plusieurs années, l'utilisation des produits satellitaires pour l'étude de la dynamique côtière s'est démocratisée sur tous les types côtes à l'échelle mondiale (p. ex., LUIJENDIJK *et al.*, 2018; VOS *et al.*, 2019; milieux tempérés, SUANEZ *et al.*, 2010 ; zones polaires, NICU *et al.*, 2020; milieux tropicaux, KENCH *et al.*, 2018; PILLET *et al.*, 2019), et sa pertinence pour accroître les connaissances et accompagner les acteurs en charge de la gestion des zones côtières n'est plus à démontrer.

La force des images satellite réside également dans la fréquence d'acquisition offerte par certains capteurs, dont Sentinel-2 (revisite de 5 jours). Les archives abondantes d'images satellite (p. ex. programme Copernicus) permettent d'étudier à l'échelle pluri décennale des sites sur lesquels il n'existait pas de données quantifiées relatives à la dynamique littorale. Ces archives permettent aussi d'évaluer les impacts des événements météo-marins extrêmes sur le littoral, même en l'absence de données antérieures à l'événement. Les outils et méthodes déployés sur le terrain offrent un très haut niveau de précision, mais le coût de leur déploiement est parfois très élevé (MALLET *et al.*, 2012) (p. ex coût LiDAR topobathymétrique pouvant aller jusqu'à 6000€/km², BALOUIN & HEURTEFEUX, 2017) notamment pour les zones isolées et difficiles d'accès, expliquant parfois l'absence de données pérennes, et ce même sur le territoire français. L'outil satellitaire est une alternative qui offre un rapport coût-bénéfice (économique et social)

Thème 7 – Risques côtiers

très avantageux, notamment parce que de nombreuses images satellites d'archives sont accessibles gratuitement à l'utilisateur. Dans le cadre du programme Copernicus, l'Europe a investi dans la fourniture de données de surveillance pour accompagner les acteurs dans leur prise de décision (p. ex. réduction des risques, gestion des zones protégées, etc.) Si les investissements réalisés (8 milliards entre 2008 et 2019) sont importants, ils sont compensés par les opportunités de marché qui en découlent et les bénéfices générés (entre 16,2 et 21,3 milliards sur la même période) (Copernicus Market Report, EUROPEAN COMMISSION, 2019).

4.2 Un indice synthétique comme système d'alerte

La production d'un indice synthétique d'exposition des enjeux à l'aléa érosion permet d'offrir un niveau d'information accessible, même pour les utilisateurs non spécialistes. Cet indice, parce que sa finesse peut être adaptée à l'échelle des sites concernés (c.-à-d., de 500 à 20m), permet de synthétiser des informations spatiales complexes, de l'échelle européenne à l'échelle communale. Cette approche, qui s'appuie sur des données extraites à haute fréquence, facilite l'identification des zones sensibles à l'érosion. Elle accompagne les acteurs impliqués dans le suivi du littoral, notamment dans l'optimisation des coûts inhérents au déploiement d'instruments de mesure, en ciblant par exemple les zones les plus dynamiques.

L'indice proposé repose sur des données à haute résolution, mais il peut être aisément amélioré via l'utilisation d'images et de données très haute résolution. Par exemple, en France, la base de données « Occupation du sol à grande échelle » (OCS GE) du CEREMA pourrait utilement se substituer aux données CORINE Land Cover, afin d'offrir un niveau de détails plus en adéquation avec les problématiques de gestion du littoral à l'échelle locale. Ces données pourraient fournir un niveau de précision accrue sur les enjeux situés à proximité du trait de côte, et l'intégration des structures de protections qui fixent le littoral (JUIGNER *et al.*, 2021) et dont l'influence sur la dynamique côtière est aujourd'hui bien connue. Ici, les données relatives à la dynamique du littoral tiennent compte de la variabilité interannuelle et inter-saisonnière à l'échelle des 27 dernières années. Ce point a été soulevé par JUIGNER *et al.*, (2021), comme une piste d'amélioration substantielle pour tout indice d'exposition à l'aléa érosion. Enfin, l'intégration des produits bathymétriques extraits par satellites, tels qu'ils ont été produits par le consortium *Space for Shore*, permettrait de dépasser l'approche planimétrique imposée par les indicateurs de trait de côte et d'intégrer une composante volumétrique à cet indice d'exposition.

5. Conclusion

Dans le cadre du projet *ESA Coastal Erosion*, le consortium *Space for Shore* a élaboré des méthodes automatisées, standardisées et adaptées aux milieux à partir d'archives satellitaires hautes et très hautes résolutions. L'objectif étant de répondre aux urgences et

aux stratégies de gestion, les résultats du projet, bénéficiant d'une haute fréquence de suivi, d'une rétrospective de 25 années et d'une couverture spatiale européenne, constituent un atout majeur et complémentaire au suivi instrumenté sur le terrain.

Depuis 2019, plus d'une dizaine d'indicateurs planimétriques et volumétriques ont été extraits sur 4500 km de littoral européen au cours des dernières décennies.

Les résultats obtenus en Vendée, mais aussi sur les autres sites-ateliers français et européens, permettent de dresser un bilan à haute fréquence temporelle de la dynamique côtière sur l'ensemble des types de côtes qui bordent l'Europe.

Par un souci d'accessibilité et d'appropriation de l'information, le consortium a produit un indicateur synthétique de l'aléa et du risque à l'érosion côtière à partir des larges bases de données d'évolution produites au cours du projet. L'adjonction d'informations spatiales complexes – dans la présente étude (1) le comportement du trait de côte et (2) l'occupation du sol – permet d'offrir aux gestionnaires du littoral un outil d'aide à la décision fiable, simple, abordable et adaptatif. Ce dernier peut servir de système d'alerte précoce pour d'identifier, localiser et calibrer le déploiement de dispositifs de surveillance renforcée, de protection et d'adaptation aux aléas. Il peut ainsi permettre d'optimiser les coûts relatifs au suivi de la dynamique côtière pour un déploiement ciblé d'instruments de mesure sur les secteurs les plus dynamiques et à forts enjeux. Ces données peuvent accompagner les acteurs locaux dans la stratégie de gestion des risques littoraux et dans leur communication à destination des usagers du littoral, en bénéficiant d'une haute fréquence d'acquisition des images satellite et d'une actualisation cartographique constante et rapide de l'aléa érosion. Enfin, l'outil offre la possibilité d'intégrer la dynamique d'avant-côte pour inscrire le suivi sur le système plus complet de la plage.

Remerciements

Nous remercions l'Agence Spatiale Européenne, financeur de l'étude. Les auteurs remercient également l'ensemble des partenaires, experts et utilisateurs finaux impliqués dans le consortium *Space for Shore*.

6. Références bibliographiques

BALOUIN Y., HEURTEFEUX H. (2007). *Utilisation de la technologie LiDAR bathymétrique pour le suivi du littoral : Retours d'expériences sur le littoral méditerranéen*. Revue française de Photogrammétrie et de Télédétection, 186, 74–80.

BESSET M., PILLET V., KALOUSHI G., FRYGANIOTIS E., ANGHELIN G., CONSTANTIN S., STELZER K., SCHUETT E., GADE M., BAPTISTA M. P., LAFON V. (2022). *ESA EOEP-5 Coastal Erosion – CCN n°1 – Product Validation Report Consolidation*. Space for Shore Consortium, 20/07/2022.

CLC -CORINE Land Cover (2018). <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/corine-land-cover-edition-2018-france-metropolitaine/>

Thème 7 – Risques côtiers

- DEBAINE F., ROBIN M. (2012), *A new GIS modelling of coastal dune protection services against physical coastal hazards*, Ocean & Coastal Management, Vol.63, 43-54. doi : 10.1016/j.ocecoaman.2012.03.012
- EUROPEAN COMMISSION - Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. (2019). *Copernicus market report*, February 2019. Issue 2, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/011961>
- EVAGOROU E., METTAS C., AGAPIOU A., THEMISTOCLEOUS K., HADJIMITSIS D. (2019). *Bathymetric maps from multi-temporal analysis of Sentinel-2 data: the case study of Limassol, Cyprus*. Advances in Geosciences, 45, 397-409. doi: 10.5194/adgeo-45-397-2019
- JUIGNER M., ROBIN M., AUDÈRE M., FATTAL P., HERVY B., KERGUILLEC R., SUZANNE J.B., COSTA S., LOPIN M., MAQUAIRE O., MEDJKANE M., PAGNY J., THULIE A. (2021). *Un nouvel indicateur de prédisposition au risque d'érosion côtière, application en Manche et en Vendée (France)*, Cybergeog: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage. doi : <https://doi.org/10.4000/cybergeog.37114>
- KENCH P.S., FORD M.R., OWEN S.D. (2018). *Patterns of island change and persistence offer alternate adaptation pathways for atoll nations*. Nature Communications. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02954-1>
- LUIJENDIJK A., HAGENAARS G., RANASINGHE R., BAART F., DONCHYTS G., AARNINKHOF S. (2018). *The state of the world's beaches*. Scientific Reports 8(6641.) doi:10.1038/s41598-018-24630-6
- MALLET C., MICHOT A., DE LA TORRE Y., LAFON V., ROBIN M., PREVOTEAUX B. (2012). *Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte*. Rapport BRGM/RP-60616-FR, 162 p., 100 fig., 7 ann.
- MAVRAEIDOPOULOS A.K., OIKONOMOU E., PALIKANS A., POULOS S. (2019). *A hybrid bio-optical transformation for satellite bathymetry modeling using Sentinel-2 imagery*. Remote Sensing, 11, 2746. doi: 10.3390/rs11232746
- MISRA A., RAMAKRISHNAN B., VOJINOVIC Z., LUIJENDIJK A., RANASINGHE R. (2019). *Assessment of complementary medium resolution satellite imageries for nearshore bathymetry estimation*. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 47 (3), 537-540. doi: 10.1007/s12524-018-0920-x
- NICU I.C., STALSBERG K., RUBENSDOTTER L., MARTENS V.V., FLYEN A.-C. (2020). *Coastal erosion affecting cultural heritage in Svalbard. A case study in Hiorthhamn (Adventfjorden)—An abandoned mining settlement*. Sustainability, 12(6), 2306. <https://doi.org/10.3390/su12062306>
- PEREIRA P., BAPTISTA P., CUNHA T., SILVA P.A., ROMÃO S., LAFON V. (2019). *Estimation of the nearshore bathymetry from high temporal resolution Sentinel-1A C-band SAR data - A case study*. Remote Sensing of Environment, 223, 166-178. doi: 10.1016/j.rse.2019.01.003

- PILLET V., BESSET M., STELZER K., KALOUSHI G., CONSTANTIN S., ANGHELIN G., MYTAKIDIS K., BAPTISTA M.P., GADE M. (2022). *ESA EOEP-5 Coastal Erosion – CCN n°1 - Technical Specification 4.1*. Space for Shore Consortium, 20/07/2022
- PILLET V., DUVAT V.K.E., KRIEN Y., CECE R., ARNAUD G., PIGNON-MUSSAUD C. (2019). *Assessing the impacts of shoreline hardening on beach response to hurricanes: Saint-Barthélemy, Lesser Antilles*. *Ocean & Coastal Management*, 174, 71–91. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.03.021>
- ROBIN M., JUIGNER M., LUQUET F., AUDERE M. (2019). *Assessing surface changes between shorelines from 1950 to 2011: The case of a 169-km sandy coast, Pays de la Loire (W France)*, *Journal of Coastal Research, Special Issue, No.88*, 122-134. DOI:10.2112/SI88-010.1
- SUANEZ S., CARIOLET J., FICHAUT B. (2010). *Monitoring of recent morphological changes of the dune of Vougot beach (Brittany, France) using differential GPS*. *Shore & Beach*, 78 (1), pp.37-47, HAL Id : hal-00430153, version 1
- THIELER E.R., HIMMELSTOSS E.A., ZICHICHI J.L., ERGUL A. (2017). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change* (ver. 4.4, July 2017) : U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. In Open-File Report. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20081278>
- TOURE S., DIOP O., KPALMA K., SEIDOU MAIGA A. (2019). *Shoreline detection using remote sensing: a review*. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 75. doi: 10.3390/ijgi8020075
- VOS K., HARLEY M.D., SPLINTER K.D., SIMMONSLAND J.A., TURNER L. (2019). *Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery*. *Coastal Engineering*, 150, 160-174. doi: /10.1016/j.coastaleng.2019.04.004
- VOUSDOUKAS M.I., RANASINGHE R., MENTASCHI L., PLOMARITIS T.A., ATHANASIOU P., LUIJENDIJK A., FEYEN,L. (2020). *Sandy coastlines under threat of erosion*. *Nature Climate Change*, 10(3), 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>

Thème 7 – Risques côtiers