



# Gestion côtière assisté par les outils d'observation de la Terre



# Introduction

L'érosion côtière est un problème croissant avec de nombreuses conséquences socio-économiques. Le processus érosif n'est pas linéaire et varie en fonction des saisons et des activités anthropiques (ingénierie côtière). De nombreux facteurs influencent l'érosion, mais il est évident que le changement climatique augmente la fréquence et l'intensité des tempêtes ce qui aggrave le processus érosif sur nos côtes. La cartographie et le suivi de la ligne de côte, à l'aide d'imagerie satellitaire, au cours du temps, nous permet d'accéder, à l'échelle nationale, aux effets de l'érosion à différentes échelles temporelles. Les informations satellitaires ainsi que les analyses associées, permettent de soutenir les prédictions futures et guident la mise en œuvre de stratégies d'atténuation pour une meilleure gestion des côtes.

Les données satellitaires sont considérables et complexes, par conséquent, les différents utilisateurs – ingénieur et acteurs décisionnaires, ont besoin d'une vue complète des processus d'extraction des indicateurs actuels et historiques afin de pouvoir effectuer leurs analyses. Les différents indicateurs côtiers produits sont compatibles avec les principaux systèmes d'information géographique (SIG) pour faciliter leur interprétation.

Ce document a été conçu pour aider le lecteur à mieux appréhender comment les produits d'observation de la terre permettent :

- D'obtenir une compréhension plus complète des zones côtières
- De mesurer les changements, accrétion et érosion, à l'aide de données satellitaires
- D'améliorer la planification et la gestion côtière.





The Sentinel-2 satellite repeatedly images a point on the earth's surface every 2-5 days.

## LES DONNEES SATELLITAIRES POUR AMELIORER LA PLANIFICATION DE LA GESTION COTIERE ?

Les satellites tournent autour de la Terre sur des orbites prédéfinies et collectent des images du même emplacement à intervalles réguliers. Les données collectées permettent d'identifier les conditions changeantes sur le terrain au cours de temps. Les différents capteurs embarqués offrent également une haute résolution spatiale<sup>1</sup> et collectent les données sur des bandes spectrales spécifiques qui compose l'ensemble du spectre électromagnétique. Cela permet une analyse variée et optimise le nombre d'informations ainsi obtenues.

Afin d'améliorer la protection de la côte, il est nécessaire d'analyser les données spatiales actuelles et historiques à différentes échelles temporelles afin d'identifier les différents types de cycles et changements dans les dynamiques sédimentaires. Grâce aux images satellitaires et à la capture répétitive d'images, on peut suivre ces changements sur de grandes étendues et établir des modélisations à grande échelle, qui

---

<sup>1</sup> Sentinel-2 et LANDSAT sont deux constellations dont les données sont en accès libre. Ces données ont une résolution spatiale de 10m et 30m, respectivement.

Pour plus d'information: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>

seraient difficilement réalisables avec des données terrain. Cela fait des images satellites un outil indispensable, efficace et rentable pour aider la prise de décision.

Lors de l'utilisation de données d'observation de la terre, il faut souvent faire un compromis entre le coût, la résolution spatiale, le rapport signal/ bruit et la précision spatiales des capteurs. Par conséquent, chaque étude doit identifier les paramètres les plus appropriés pour leur sujet d'intérêt. Il existe une tendance à préférer les capteurs à haute résolution spatiale au détriment de données plus précises spectralement et moins coûteuses. Un équilibre doit être considéré en fonction des critères requis pour le suivi et l'analyse de phénomènes spécifiques. Cela comprend, la précision spatiale des données pour identifier les potentiels changements (les taux d'érosion sont souvent observés en mètre plutôt qu'en dizaine de mètres, la précision spatiale doit répondre à cette contrainte), la répétabilité d'acquisition de l'image (afin de cadrer les événements réels, tels que les tempêtes ou construction d'infrastructures, et de suivre leur impact) et la précision ou résolution spectrale (pour distinguer les différents objets au sol).

Le processus de sélection des paramètres appropriés, des méthodes de traitement et d'analyse est essentiel pour représenter une situation sur le terrain et déterminer quels seront ses impacts. De plus, les données et indicateurs dérivées d'images satellitaires peuvent être vérifiés avec des données terrains pour fournir une validation de l'approche adoptée. Un ensemble de données, une fois validé, est considéré comme fiable et permet de rationaliser les processus d'analyse et donc de réduire les coûts.

# SUIVRE LES CHANGEMENTS COTIERS DEPUIS L'ESPACE

Les zones côtières sont des environnements dynamiques en constante évolution. Le suivi des évolutions du littoral est essentiel pour les communautés qui vivent le long des côtes, notamment avec la montée du niveau de la mer et l'intensification des ondes de tempêtes. Le suivi côtier est traditionnellement effectué par des campagnes terrain qui relèvent le trait de côte à l'aide de points géoréférencés. Cependant, celles-ci peuvent être excessivement coûteuses et sont difficiles à réaliser à l'échelle régionale ou nationale. Cela peut être démontré en considérant la longueur du littoral de la Grande-Bretagne continentale, définie par l'*Ordnance Survey* à environ 15 400 km. Cela équivaut à 34 images satellites individuelles et représente plus de 4 To de données qui devront être traitées et analysées.

Le retrait de la côte peut varier naturellement au fil des saisons ou annuellement, l'utilisation des données à différentes échelles spatiales et temporelles est nécessaire pour une compréhension globale de ces processus. Une évaluation régulière des mouvements côtiers permet de déterminer si le littoral subit une érosion à long terme ou des schémas plus complexes de gains et de pertes saisonniers. L'identification et la différenciation entre les changements à court et à long terme permet d'avoir une compréhension approfondie des évolutions et permet une allocation efficace des ressources. Cela est particulièrement vrai si la solution recherchée implique des constructions d'infrastructure de protection ou l'acquisition de terres pour permettre la mise en place de solution naturelle (restauration de zone humide, de mangroves, etc.). Si les décisions d'aménagement sont basées sur des données limitées, il existe un risque d'aliasing. Cela se produit lorsque l'analyse de changement n'est pas réalisée à une fréquence appropriée et fournit une représentation faussée d'une situation. Une série temporelle présentant les tendances historiques est l'approche la plus complète pour comprendre pleinement le système sédimentaire et élaborer des plans opérationnels.

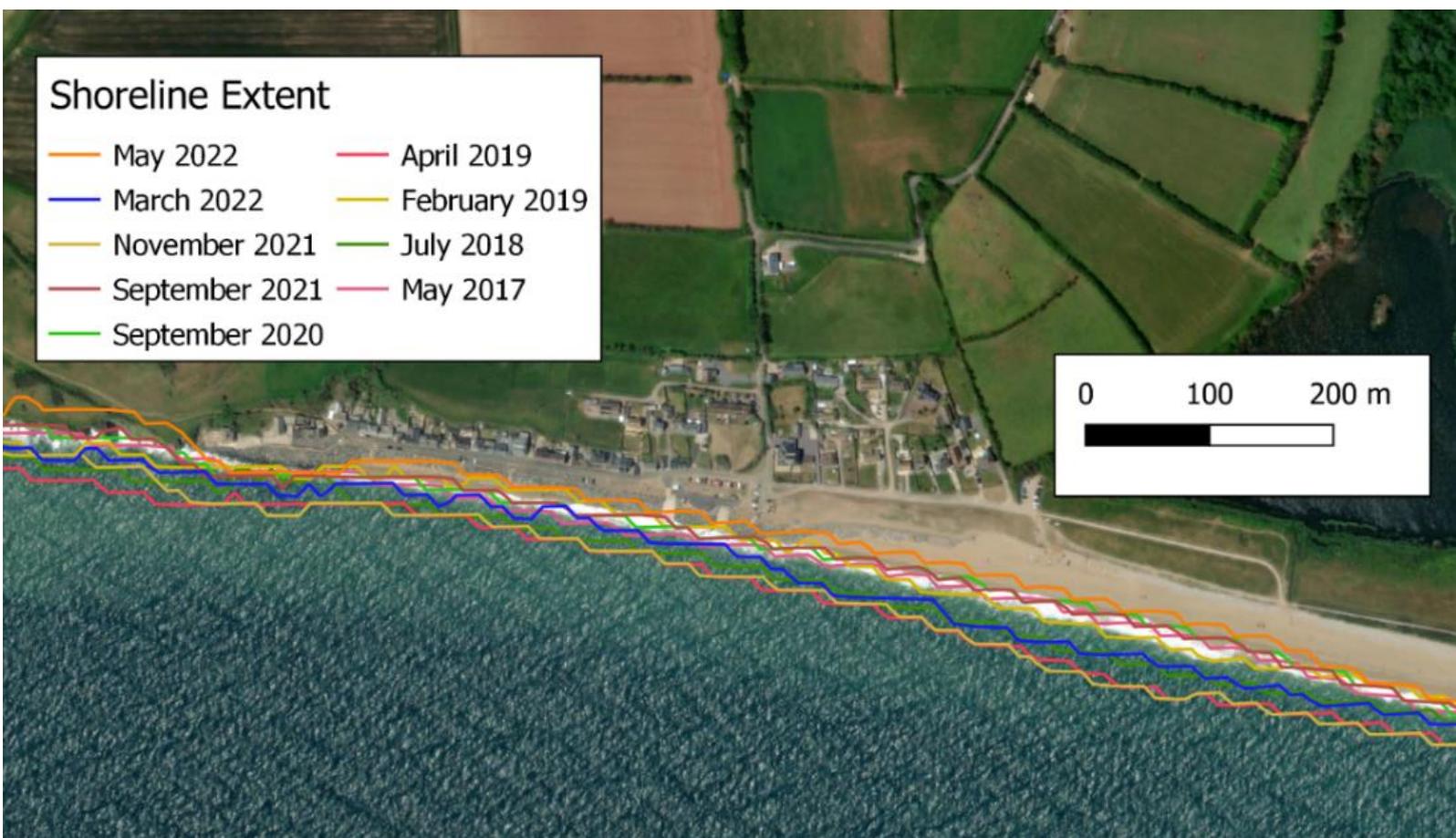
Un ensemble de méthodes existe pour suivre l'érosion, celles-ci incluent l'extraction et le suivi de la ligne de côte, le suivi des dynamiques sédimentaires et l'influence de la bathymétrie. La fréquence d'extraction et d'analyse de ces indicateurs est adaptée aux besoins spécifiques des utilisateurs et le set de données partagé contient les informations nécessaires pour planifier les politiques d'atténuation des risques.

# INDICATEURS OBTENUS A PARTIR DES DONNEES SATELLITAIRES

## Indicateur Waterline

La délimitation horizontale entre la terre et la mer est identifiée par les *Waterlines*. Une *Waterline* représente la limite terre/mer au moment où l'image satellite a été prise, la position de la *Waterline* obtenue dépend donc de la hauteur de la marée au moment de la mesure et des conditions météorologiques (comme une basse pression et de fortes vagues).

L'identification précise de la frontière terre/ mer repose sur une analyse des caractéristiques spectrales le long de la côte en examinant, pour de petits segments de côte, différents indices spectraux pour en déduire un seuil humide/sec spécifique. Grâce à ce seuil, adapté localement, une *Waterline* est identifiée et tracée en tenant compte des informations des pixels voisins. Un control qualité interne permet d'évaluer les *Waterlines* en fonction de différentes spécifications telles que la longueur de la ligne, sa rugosité et d'autres caractéristiques géométriques. Le score obtenu permet d'indiquer une confiance dans la précision des résultats.



Les *Waterlines* sont extraites pour toutes les images disponibles (quand la ligne de flottaison n'est pas obstruée par des nuages) fournissant un set de donnée à haute fréquence temporelle permettant des évaluations annuelles et/ou saisonnières. Ces analyses permettent d'améliorer la réponse à court terme aux catastrophes naturelles et d'évaluer les dépenses programmées.

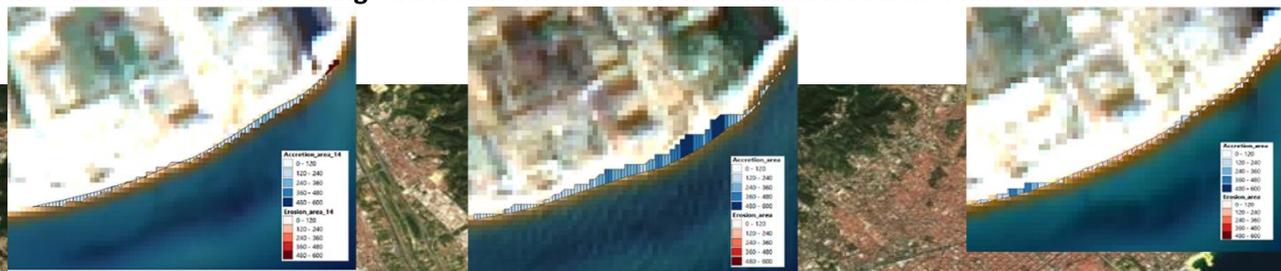
L'identification des *Waterlines* est une première étape essentielle pour calculer les lignes de rivage (*Shorelines*) dont la variation permet de suivre les changements de la côte au fil du temps. La position des *Waterlines* évoluent naturellement en fonction des conditions de marée et de houle ce qui ne permet pas de les comparer et ainsi de suivre les changements côtiers au fil du temps. Par conséquent, les *Waterlines* doivent être transformés en *Shoreline*, ligne de rivage représentant la limite terre/mer à un niveau de marée spécifique, en tenant compte la pente de la plage et de la hauteur de l'eau (vague et marée).

## Indicateur Shoreline

Une *Waterline* est convertie en *Shoreline* par un déplacement horizontal lié à la correction de la marée, en fonction du niveau souhaité, aux conditions de vagues et à la pente de la plage. Par conséquent, une *Shoreline* représente l'intersection entre la terre et la mer à une référence fixe (plus haute mer astronomique, plus basse mer astronomique, niveau moyen, etc.).

**Les *Shorelines* permettent de cartographier la côte sur des décennies et leur variation peut être analysée à l'aide de logiciel SIG. Les changements côtiers associés aux variations saisonnières, aux tempêtes, aux interventions humaines (telles que les infrastructures côtières) et aux tendances à long terme peuvent alors être identifiés. Des évaluations régulières permettent d'établir des schémas complexes d'accrétion et d'érosion saisonniers à partir desquels une estimation des taux de changement peut être calculée. Ces connaissances permettent de soutenir une gestion côtière efficace.**

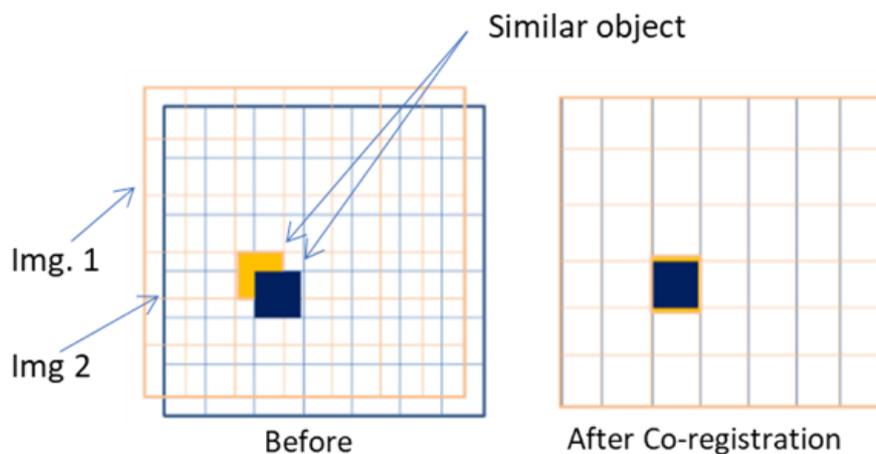
Mean annual shoreline change derived from the differences in individual shoreline extents.



## Précision spatiale des Indicateurs

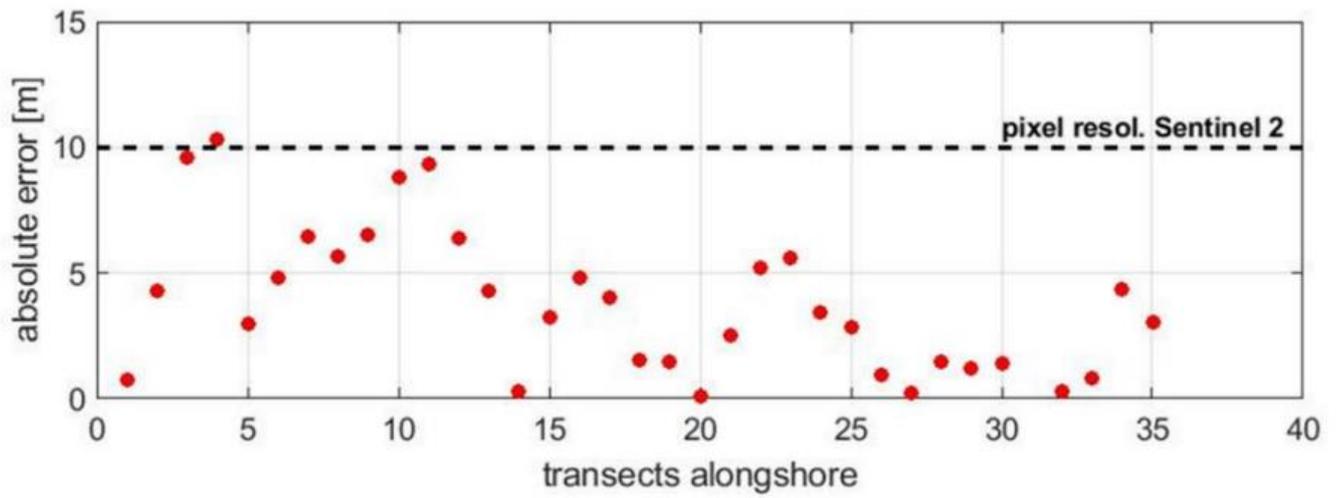
La précision spatiale des indicateurs est assurée par une étape de coregistration de l'ensemble des images satellitaires disponible sur une référence de grande précision (photographie satellitaire ou aérienne). Les images satellitaires sont prises à des moments différents et par différents capteurs. Elles peuvent, de ce fait, présenter de légères différences dans leur positionnement géographique, leur orientation et leur résolution, ce qui peut affecter la précision spatiale du produit final. La coregistration permet d'aligner deux images, ou plus, prises par des capteurs différents ou à des dates différentes. Le process permet d'assurer la parfaite superposition des différents objets et permet ainsi de comparer les indicateurs extraits de ces images au cours du temps.

La coregistration des produits satellitaires est une étape nécessaire pour toute analyse temporelle tel que la détection de changement ou le suivi de phénomènes. En alignant les images utilisées grâce à notre étape de coregistration en amont de la chaîne de traitement, la précision spatiale de toutes les images est améliorée et les données résultantes sont colocalisées et peuvent être utilisées pour identifier de véritables changements dans le paysage au fil du temps, tels que l'érosion côtière.



## Validation indépendante des indicateurs

Au cours du développement, une validation des indicateurs obtenus a été réalisée par les différentes autorités géologiques et géographique nationales au Royaume-Uni, en Espagne, en Italie, en République d'Irlande et dans la province de Québec. Cela a permis de contrôler et d'assurer la qualité des indicateurs issus de l'imagerie satellitaire. La précision d'un indicateur est exprimée par l'erreur quadratique moyenne (RMSE) qui mesure la distance entre la position réelle et la position observée des données. L'erreur absolue moyenne (MAE) et le RMSE obtenus étaient toujours inférieures à la résolution pixellaire des images à partir desquelles les indicateurs ont été obtenus ( images Landsat et Sentinel à une résolution de 30 m et 10 m, respectivement).

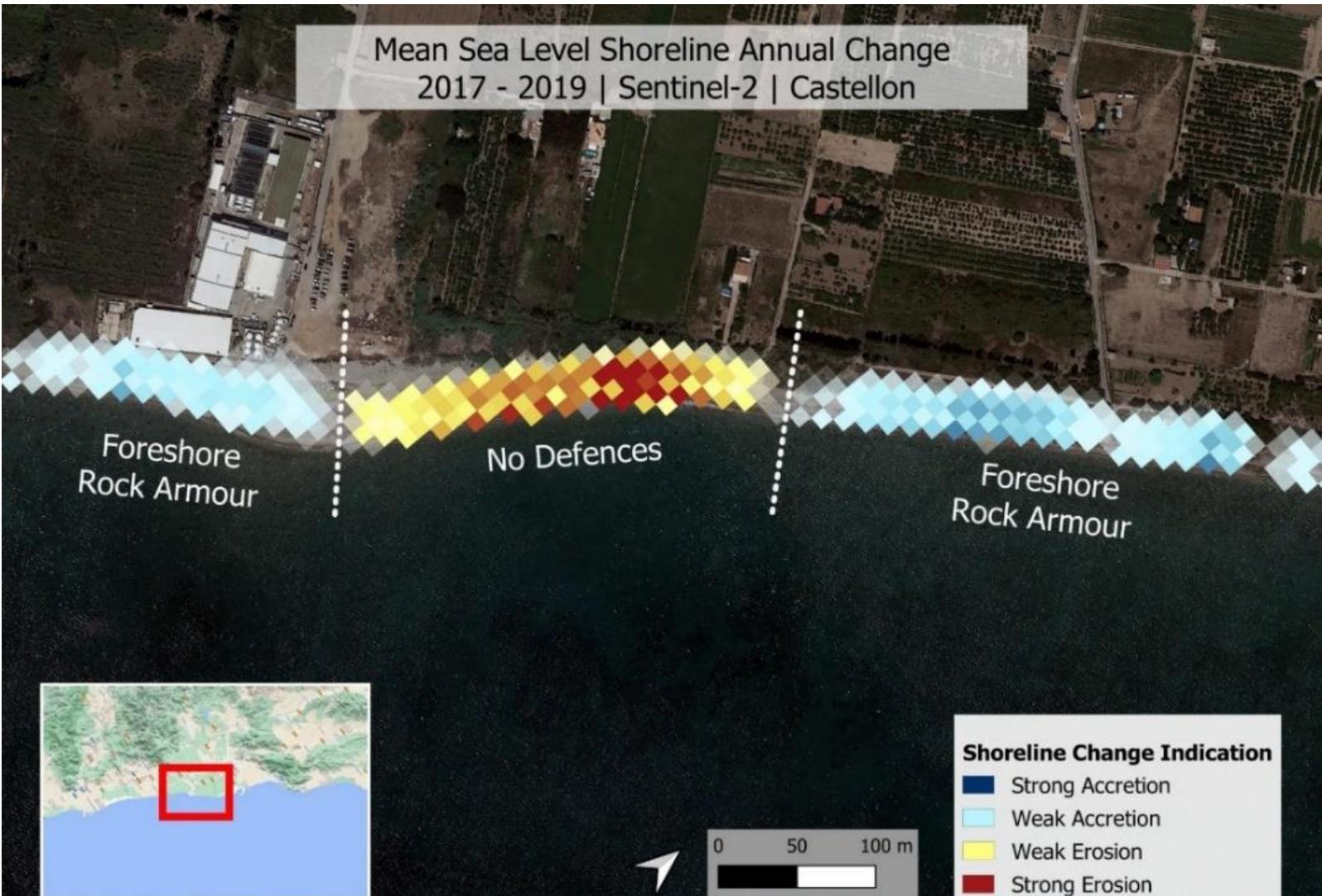


Précision spatiale des Waterlines à Tordera, Espagne.

# LES IMAGES SATELLITAIRES POUR UNE GESTION INTEGREE DU LITTORAL

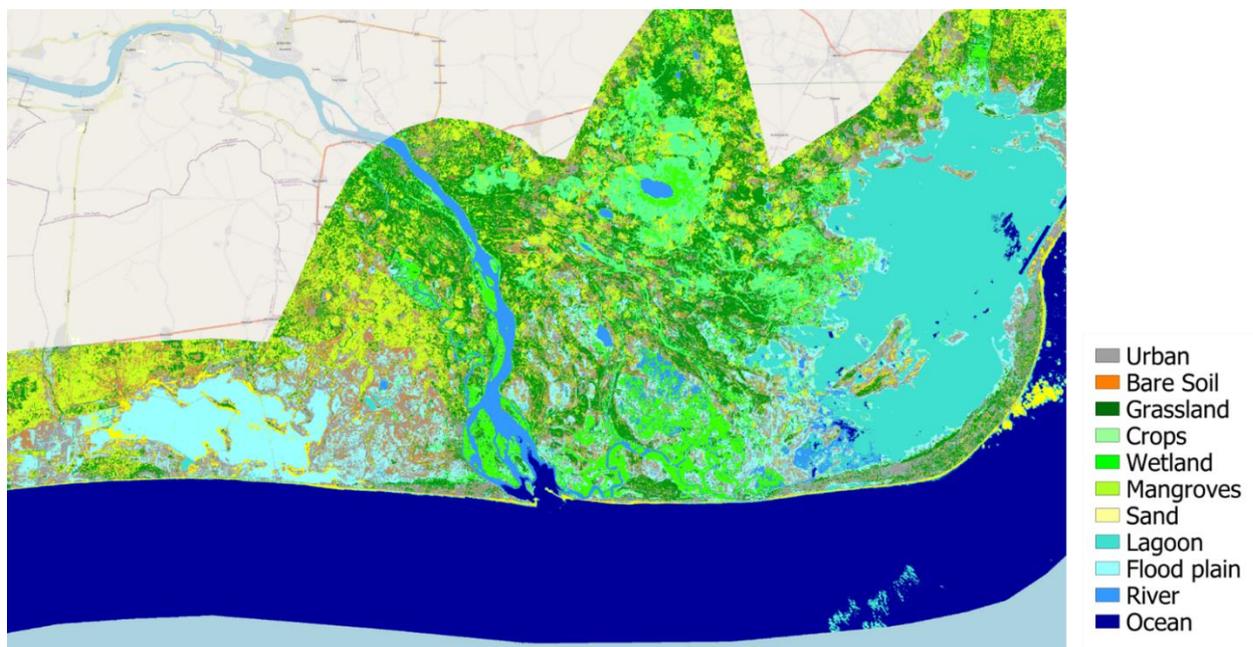
Ces nouveaux indicateurs permettent de réaliser des analyses plus détaillées et plus précises afin de mieux guider la prise de décision pour les aménagements côtiers. Les produits issus de ce service fournissent de nouvelles perspectives et permettent d'accéder à de nouvelles échelles spatiales et temporelles pour accroître l'efficacité des stratégies de suivi côtier.

Les *Shorelines*, et leur évolution au cours du temps, permettent de suivre les changements côtiers et ainsi d'évaluer et de quantifier les processus d'accrétion et d'érosion. Les différents schémas d'érosion saisonniers peuvent être comparés aux changements à long terme afin d'optimiser la planification des infrastructures côtières et d'assurer une hiérarchisation efficace des investissements dans les plans de gestion à long terme.



Le suivi des processus sédimentaires côtiers sur de longue période temporelle permet d'identifier les différentes propriétés physiques d'un environnement côtier et ainsi de mesurer et évaluer les conséquences des plans de gestion du littoral. Les plans de gestions permettent de définir des politiques durables qui tiennent compte des relations entre les différentes infrastructures et qui évitent, dans la mesure du possible, d'engager les générations futures dans des options de défense rigides et coûteuses. Les données issues de la télédétection permettent de quantifier des processus interdépendants sur de grande échelle et réduisent le besoin de campagnes d'acquisition de données terrain. Par exemple, la cartographie des schémas de transport sédimentaire le long de la côte, permet d'aider les décisions concernant les projets de recharge des plages.

Les données satellitaires peuvent également être utilisées afin d'identifier de de cartographier les différents écosystèmes côtiers. Les changements observés par l'analyse des *Shorelines* impactent différents écosystèmes dont ceux ayant un rôle naturel de protection contre l'érosion (mangroves, marais salant, etc.). L'étendue des changements observés dans ces environnements peut être identifiée permettant ainsi aux gestionnaires d'adapter les stratégies environnementales et de hiérarchiser les efforts de conservation pour ces zones vulnérables.



**Classification des écosystèmes côtiers autour de l'estuaire de la Volta, Ghana**

Dans l'ensemble, les données satellitaires fournissent de précieuses informations afin de soutenir une gestion durable de nos côtes et d'atténuer les effets de l'érosion. Une meilleure gestion côtière et des risques côtiers permet de mieux protéger les communautés locales ainsi que les écosystèmes côtiers des impacts de l'érosion et de l'élévation du niveau de la mer.

# LE SERVICE DE SUIVI COTIER PAR IMAGERIE SATELLITAIRE

Le service de suivi côtier par imagerie satellitaire développé par ARGANS fourni de nouveaux indicateurs afin de simplifier la détection de changement à différentes échelles. Ces indicateurs permettent de suivre l'état des côtes et peuvent être produits pour toutes les régions du monde à une résolution pixellaire de 10 m avec une précision spatiale de 1 à 2 m à partir de 2015. Les données historiques peuvent remonter jusqu'en 1984 à une résolution de 30 m. Les nouvelles constellations satellitaires permettent, à partir de 2017, de fournir une image d'une même zone tous les 5 jours, cela permet un degré d'analyse élevé et de déterminer si les changements observés résultent d'une intervention humaine, de fluctuation saisonnière naturelles ou sont indicatifs d'un déclin structurel à plus long terme. Un ensemble de techniques semi-automatisées ont été mise en place afin de traiter rapidement un vaste catalogue d'images satellites et d'optimiser l'extraction du trait de côte. Les *Waterlines* et *Shorelines* peuvent être intégrés rapidement dans les modèles de changement côtier et sont fournis dans un format compatible avec tout système d'information géographique (SIG) pour des applications de gestion spécifiques.

Ce service fourni différentes informations qui permettent de guider la planification des investissements en identifiant les zones prioritaires, les zones à risque, où les actions correctives sont nécessaires. Le service est composé des éléments suivants :

1. Accès aux données open-source Copernicus Sentinel-2 fournies par l'ESA et LANDSAT de l'United States Geological Survey (USGS).
2. Indicateurs côtiers sur mesure :
  - a. *Waterline* et contrôle qualité fournie à une précision spatiale de +/- 2m
  - b. *Shorelines* à différent niveau de marée. La correction nécessite des données auxiliaires supplémentaire.
  - c. Cartes de classification de sols afin de décrire les différents écosystèmes côtiers.
3. Une haute fréquence temporelle. Les produits sont dérivés d'images satellitaire à une résolution 10 m avec un décalage de 5 jours entre les acquisitions (en fonction des conditions météorologiques).
4. Les distorsions géométriques sont corrigées et la précision spatiale améliorée grâce au processus de coregistration.

5. Les différents indicateurs ont été validés par les institutions spécialisés des pays partenaires, comme la Commission géologique britannique, L'Institut d'hydraulique environnementale de Cantabria (Espagne), le Service géologique d'Irlande, l'Institut supérieur de protection et de recherche de l'environnement italien et ARCTUS en collaboration avec l'Université du Québec à Rimouski.

Lors de la mise en place du service de suivi des changements côtiers et des différents projets d'application, ARGANS et ses partenaires ont couvert plus de 7300 km de côtes, regroupant 21 sites géomorphologiques différents pour démontrer l'adaptabilité des techniques développées. Les pays partenaires sont, le Royaume-Uni (couverture complète de la Grande-Bretagne continentale), l'Italie, l'Espagne, l'Irlande, la province de Québec et le Ghana.

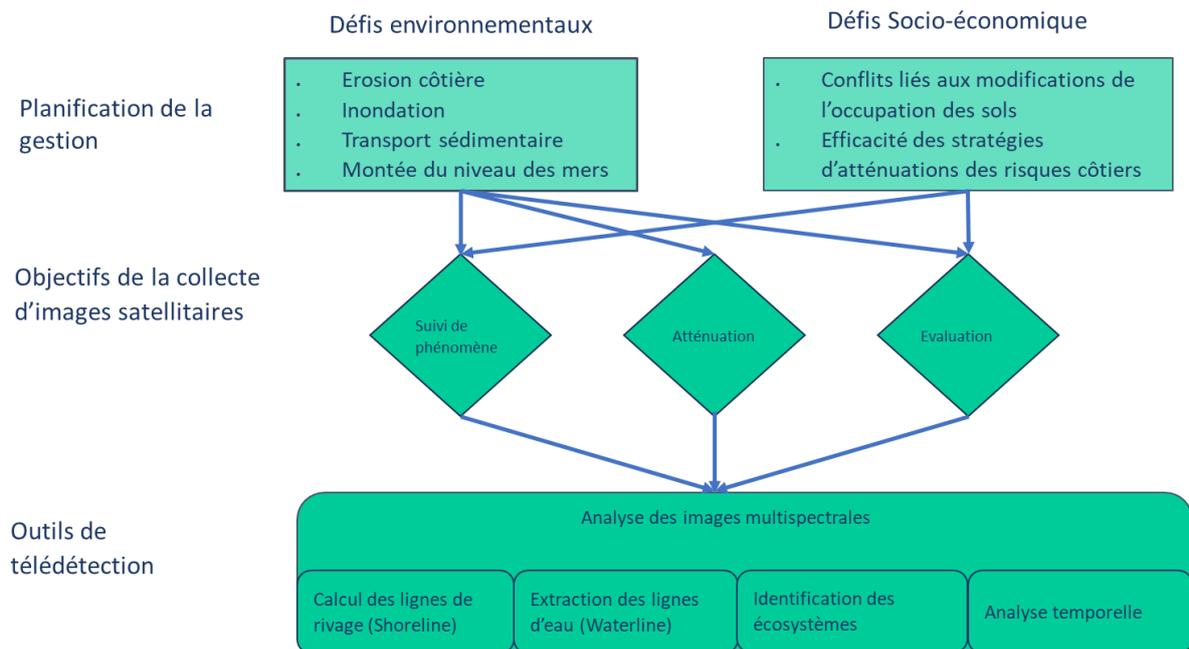
## Accès aux données

Les indicateurs de changement côtier pour n'importe quelle région du globe peuvent être commandés via le service de données ARGANS. Information sur notre site Web :

<https://coastalerosion.argans.co.uk/>

Vous pouvez également nous contacter via l'adresse : [coastalerosion@argans.co.uk](mailto:coastalerosion@argans.co.uk).

## Le rôle de la télédétection dans la planification de la gestion côtière



Remerciements :

Le projet « Coastal Erosion from Space », 4000126603/19/I-LG, a été commissionné dans le cadre du programme Science for Society de l'enveloppe Earth Observation n°5 (EOEP-5) de l'Agence spatiale européenne.



**Conclusion** Le consortium a développé une méthode pour optimiser le nombre de *Waterline* prêtes à l'emploi et de *Shorelines* géoréférencées couvrant 25 ans. Ces indicateurs côtiers ont été validées par les principaux experts géomorphologiques des cinq pays partenaires. Plus de 7 300 km de côtes ont été cartographiées. Ces produits offrent une précision inter-pixel, et grâce à une méthode de seuil localement adaptatif, la frontière terre/mer est déterminée avec précision. Les méthodes mises en place peuvent être appliquées afin de couvrir des nations entières dans le monde et chaque pays partenaire entend poursuivre ce travail pour assurer une couverture nationale. Nous avons également développé un processus de classification des sols qui décrit la bande côtière, y compris les caractéristiques des différents écosystèmes et leurs changements. Une étude poussée des différentes techniques d'extraction de la bathymétrie à partir d'image satellitaire a permis d'observer différentes caractéristiques du fond marins même dans des eaux chargées de sédiments.

Ce projet a été dirigé par ARGANS qui a formé un partenariat composé de fournisseurs de services de télédétection comprenant ARGANS Ltd (UK/Fr), isardSAT (Espagne) et adwaisEO (Luxembourg) qui ont livré à un groupe d'utilisateur finaux regroupant le British Geological Survey, les experts du gouvernement britannique, IHCantabria en Espagne au nom du Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), le Geological Survey Ireland, ministère irlandais de l'environnement, du climat et des Communications et ARCTUS représentant le monde universitaire canadien et les communautés locales du Québec. Lors de l'extension du contrat, un expert national italien supplémentaire a été ajouté au consortium, à savoir, l'Institut national italien de protection et de recherche environnementales.

