



Détection des barres sableuses basée sur l'imagerie satellite multispectrale pour la classification des plages Application à la mission haute résolution Venüs avec revisite journalière sur Saint-Louis du Sénégal

Salomé FRUGIER¹, Rafael ALMAR¹, Erwin BERGSMA², Thierry GARLAN³,
Boubou Aldiouma SY⁴, Abdoulaye NDOUR⁵

1. IRD/LEGOS, Toulouse, France.
salome.frugier@ird.fr, rafael.almar@ird.fr
2. CNES, Toulouse, France.
Erwin.Bergsma@cnes.fr
3. SHOM, Brest, France.
thierry.garlan@shom.fr
4. Université Gaston Berger, Saint-Louis, Sénégal.
boubou-aldiouma@ugb.edu.sn
5. Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.
abdoulaye17.ndour@ucad.edu.sn

Résumé :

La morphologie des plages sableuses joue un rôle crucial dans le développement des zones côtières. Cependant, malgré leur importance, la documentation détaillée de ces plages est limitée, notamment leur évolution temporelle. En particulier, les barres sableuses sont clés de par leur rôle de protection de la plage par dissipation de l'énergie des vagues et de réservoir sédimentaire. L'étude combine l'utilisation de données satellitaires haute résolution (Satellite Venüs) avec un algorithme d'extraction de la position des barres sableuses et du trait de côte pour suivre l'évolution spatio-temporelle de la plage de Saint-Louis au Sénégal. Les résultats confirment l'influence des paramètres hydrodynamiques, notamment des facteurs saisonniers tels que les régimes de vagues, et la position des barres. Cette étude souligne la pertinence de la surveillance de la morphologie côtière par satellite.

Mots-clés :

Barres sableuses, Télédétection, Satellite Venüs, Trait de côte, Classification, Erosion.

1. Introduction

Les barres sableuses, formations sous-marines influencées par les vagues, sont présentes dans de nombreux environnements sablonneux côtiers. Leur nombre, espacement et géométrie dépendent de divers facteurs tels que la pente du littoral, la taille des grains de sable, les marées, l'énergie et l'angle des vagues, ainsi que l'apport de sédiments

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

(PRICE *et al.*, 2014 ; DUBARDIER *et al.*, 2015 ; SPLINTER *et al.*, 2018). WRIGHT & SHORT (1984) ont établi une classification des états de plage couramment utilisée, décrivant trois états de base : Réfléchissante (R), intermédiaire et Dissipative (D), formant six états au total (conditions énergétiques allant de élevées à faibles : Barre Longitudinale avec Creux (LBT), Barre et Plage Rythmique (RBB), Barre Transversale et Courant (TBR) et Terrasse de Marée Basse (LTT)). Les conditions énergétiques influent sur la migration des barres vers le large, avec une érosion ou une accrétion de la plage selon l'activité des vagues (WRIGHT & SHORT, 1984 ; THORTON *et al.*, 1996 ; HOEFEL & ELGAR, 2003). La surveillance de la morphologie côtière est cruciale pour les scientifiques et les gestionnaires, et les données satellitaires offrent de nouvelles opportunités pour étudier ces régions, notamment dans la détermination du trait de côte (VOS *et al.*, 2019 ; ALMAR *et al.*, 2023) et de la bathymétrie côtière (ALMAR *et al.*, 2021a). Cependant, l'utilisation de la télédétection optique satellite pour détecter les barres sableuses reste limitée (LAFON *et al.*, 2004 ; ATHANASIOU *et al.*, 2018 ; TĀTUI & CONSTANTIN, 2020). Notre étude se concentre sur l'évaluation de la capacité du satellite Venµs à surveiller ces formations dans le temps et dans l'espace.

2. Zone d'étude

Située sur la Langue de Barbarie, à l'embouchure du fleuve Sénégal, Saint-Louis est un site urbanisé avec des zones habitées, des ports de débarquement, des infrastructures touristiques, et un parc national précieux, Figure 1. Les quartiers de pêcheurs de Gueth Ndar et Ndar Toute, principalement situés à moins de 2 mètres au-dessus du niveau de la mer, sont vulnérables aux inondations fréquentes qui affectent les habitants, principalement des communautés de pêcheurs (SALL, 2006 ; Cisse *et al.*, 2022).

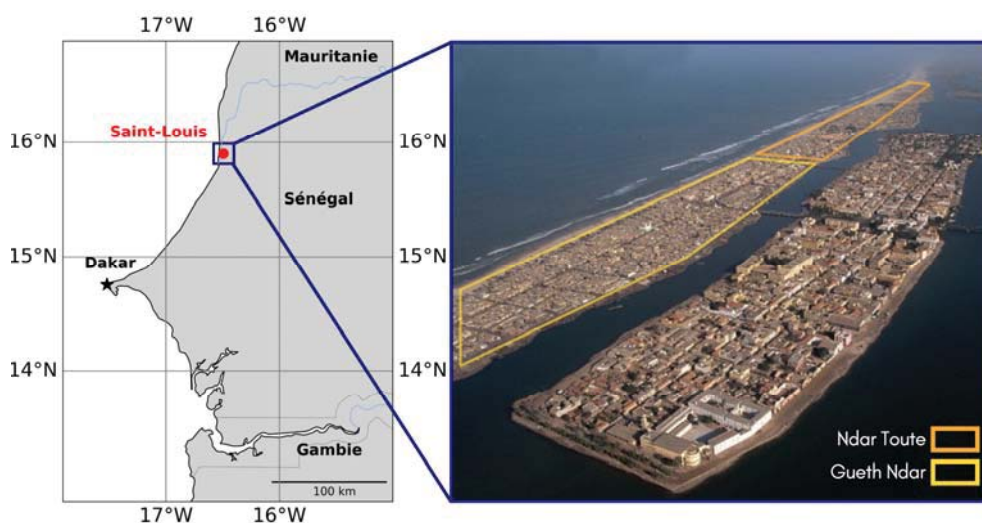


Figure 1. Localisation de la zone d'étude, la plage de Saint-Louis au Sénégal, notamment les quartiers de pêcheurs de Ndar Toute et Gueth Ndar (Ph. Paul Brislin).

3. Méthode et données

L'analyse sur le terrain a longtemps été privilégiée pour étudier les barres sableuses et leur évolution. Cependant, cette approche est limitée dans son étendue spatiale et représente un investissement en temps et en ressources considérable. Heureusement, la télédétection optique offre une alternative efficace. La localisation des zones d'écume peut servir à repérer les barres sableuses immergées (LIPPMAN & HOLMAN, 1989 ; VAN ENCKEVORT & RUESSINK, 2001 ; ALMAR *et al.*, 2010). Les satellites à revisite régulière, comme Venùs, permettent une surveillance quotidienne avec une résolution de 4m.

3.1 Données satellites Venùs

Notre étude repose sur un ensemble de 195 images satellite multispectrales de Saint-Louis, capturées par le satellite Venùs sur près d'un an, du 15 décembre 2022 au 25 novembre 2023. Les images, prises par la caméra multispectrale VSSC, couvrent une gamme de 12 bandes spectrales étroites, du visible au proche infrarouge. Malgré les possibles lacunes causées par la couverture nuageuse, la période de revisite journalière et l'accès gratuit et illimité aux données via THEIA en font un outil de surveillance continue idéal. Nous avons utilisé des produits de niveau 1C sans correction atmosphérique, car seules les réponses relatives entre bandes spectrales étaient pertinentes pour notre étude, et les valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère étaient adaptées à nos besoins. Seules les images sans nuages/ombres ont été incluses, puisque la correction de ces interférences n'était pas pertinente pour notre objectif.

3.2 Algorithme d'extraction des barres sableuses

Avant d'extraire la position des barres sableuses, plusieurs étapes de prétraitement des images satellite multispectrales sont nécessaires. Tout d'abord, les images sont recadrées pour correspondre à la zone d'étude, réduisant ainsi la quantité de données à traiter. Ensuite, la sélection d'un indice SBI (SandBar Index) optimal est cruciale, résultant d'une combinaison de différentes bandes spectrales :

$$SBI = B + 2.5 * V - 1.75 * PIR \quad (1)$$

Chaque entité éclairée possède sa propre signature réfléchissante sur le spectre électromagnétique, ce qui permet de mettre en évidence certaines zones par rapport à d'autres, notamment l'eau, l'écume, le sable et les terres (Figure 2c). L'écume se forme suite aux vagues qui se brisent dans la zone de déferlement et a tendance à diffuser et à réfléchir les courtes longueurs d'onde de lumière, comme le bleu et le vert, rendant ces bandes particulièrement réactives à sa présence. Tandis que l'ajout de la bande du proche infrarouge permet de limiter l'influence des caractéristiques terrestres sur la détection de l'écume. En soustrayant une valeur NIR, l'indice élimine la contribution des zones terrestres tout en mettant en évidence la réponse de l'eau et de l'écume.

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

L'inclusion de multiples bandes contribue à réduire le bruit et les artefacts dans les données et ainsi de produire des résultats plus robustes. Suite à un processus d'optimisation empirique des coefficients, la pondération de la bande bleue est limitée à une seule fois, en raison de sa sensibilité accrue à l'influence atmosphérique. En revanche, la bande verte est pondérée 2.5 fois, car elle offre la meilleure association avec le coefficient de 1.75 du proche infrarouge. Des valeurs aberrantes sont observées lorsque le coefficient du proche infrarouge atteint ou dépasse 2. Néanmoins, toute autre opération qui peut augmenter la réponse spectrale des barres sableuses pourrait être utilisée à la place. La procédure d'extraction des barres sableuses commence par la mise en place d'un réseau de 113 profils perpendiculaires au trait de côte, avec un espacement de 20 mètres et une longueur de 963 mètres chacun. Le long de chaque profil, les valeurs de l'indice SBI sont extraites (Figure 2a). Un seuil/filtre de 20% au-dessus de la première valeur de la réponse spectrale de l'indice SBI, qui correspond à la réponse dans l'eau, est appliqué (Figure 2c). Seuls les pixels présentant une intensité très élevée, indiquant la présence de barres sableuses (écume blanche), dépassent ce seuil (Figure 2d). Il est communément admis que Saint Louis présente un système de double-barres (BERGSMA *et al.* 2020 ; TAVENEAU, 2023), ce qui est corroboré par la réponse spectrale du transect s'étendant du large vers la plage : la présence de deux pics permet de distinguer la barre externe du littoral du premier pic et la barre interne du second.

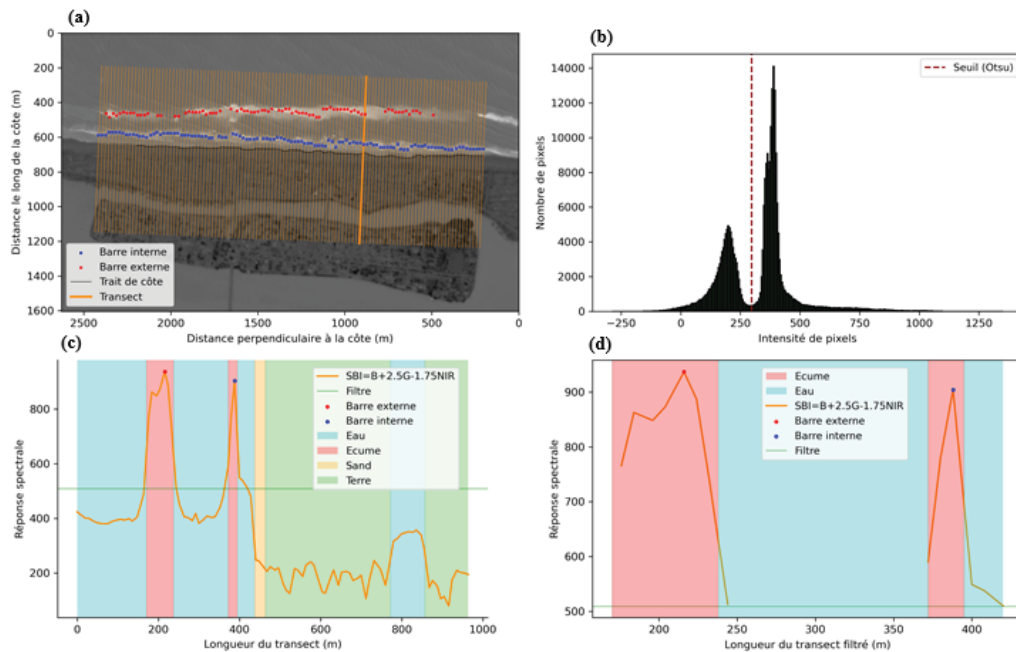


Figure 2. Exemple d'une image Venüs du 3 janvier 2023, révélant un régime de vague énergétique : a) Répartition des profils transversaux (lignes orange) ; b) Méthode d'Otsu ; c) Signature spectrale sur un transect ; d) Signature spectrale filtrée.

3.3 Algorithme d'extraction du trait de côte

Pour extraire le trait de côte de chaque image, nous avons utilisé la méthode d'Otsu (VOS *et al.* 2019). Pour chaque seuil potentiel (chaque valeur d'intensité), la variance intra-classe et inter-classe sont calculées. La variance intra-classe mesure la dispersion des intensités des pixels à l'intérieur d'une classe (dans notre cas, pixels d'eau ou de terre), tandis que la variance inter-classe mesure la séparation entre les classes. Le seuil optimal est celui qui maximise le rapport des variances inter-classe sur intra-classe. Nous sélectionnons ensuite le seuil qui maximise la variance inter-classe, ce qui indique une séparation maximale entre les pixels d'eau et de terre (Figure 2b).

4. Résultats

4.1 Evolution des barres sableuses

La position géographique à basse latitude du Sénégal engendre un régime saisonnier distinct, avec une saison sèche de novembre à mai (fond rouge, Figure 3) et une saison des pluies de juin à octobre (fond jaune). Pendant la période couverte par les données satellites Venus (15/15/22 - 25/11/23), la hauteur significative des vagues atteint 1.16 m en moyenne, avec une période de crête de 7.64 s (Figures 3b), données obtenues à partir du modèle de réanalyse ERA5 (HERSBACH *et al.*, 2020).

Les spectres de vagues (Figure 3a) indiquent des vagues plus énergétiques pendant la saison sèche, principalement de la direction NO à NNO, tandis qu'une dispersion accrue, avec des vagues moins énergétiques provenant de directions variées allant du SO au NO, est observée pendant la saison des pluies. La série temporelle du marnage (Figure 3b) confirme qu'il s'agit bien d'une plage à micro-marée avec un marnage ne dépassant pas les 1.5 m, données issues du modèle FES2014 (LYARD *et al.*, 2021). Cette alternance saisonnière exerce une influence significative sur la dynamique côtière, particulièrement sur le système de barres sableuses immergées. La réponse de la barre interne aux variations du régime des vagues se révèle extrêmement dynamique, avec des déplacements rapides atteignant une distance maximale de 84 m. En revanche, le déplacement de la barre externe est bien plus progressif mais sur une distance considérable, atteignant 212 m entre fin mars et mi-octobre 2023 (Figure 3b). En effet, la corrélation entre la position de la barre interne et la hauteur significative des vagues est de 0.50, tandis que pour la barre externe, elle s'établit à 0.40. La configuration de la barre interne se montre plus complexe : pendant la saison sèche, elle adopte une structure fortement tridimensionnelle, puis devient plus linéaire lorsque l'intensité des vagues diminue (de juillet à octobre).

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

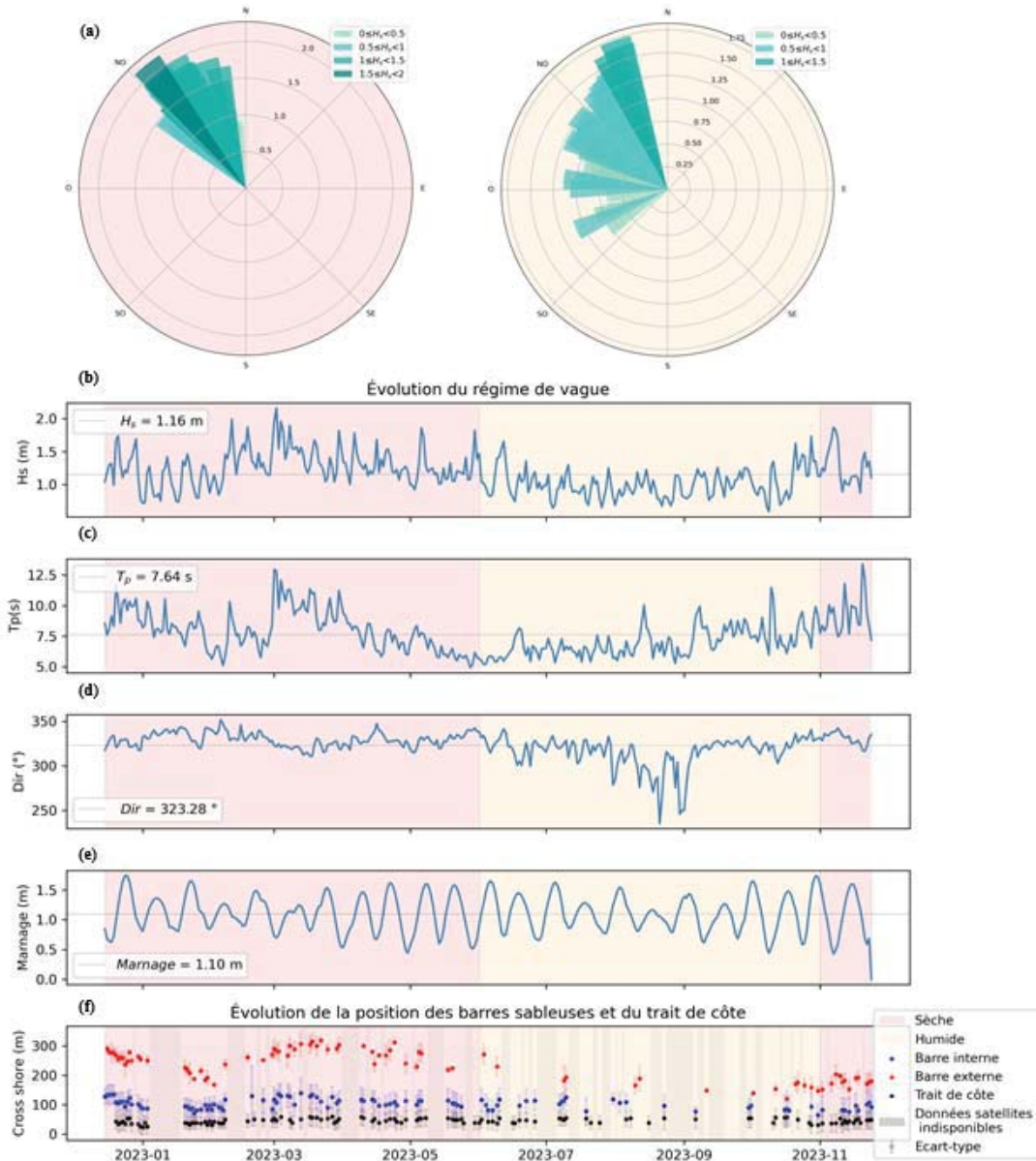


Figure 3. a) Spectres de vagues sur la période sèche (rouge) et humide (jaune) ;
 b) Séries temporelles des vagues au large durant la période de Venüs.

4.2 Paramètres de classification des barres sableuses

L'objectif de cette partie est d'explorer les corrélations entre les paramètres utilisés pour classer les plages, et la variabilité des barres sableuses détectée par télédétection à Saint-Louis : le paramètre de Dean (Ω , WRIGHT & SHORT, 1984), l'amplitude de marée relative (RTR, MASSELINK & SHORT, 1993), et l'indice de contrainte hydrodynamique (HFI, ALMAR *et al.*, 2010).

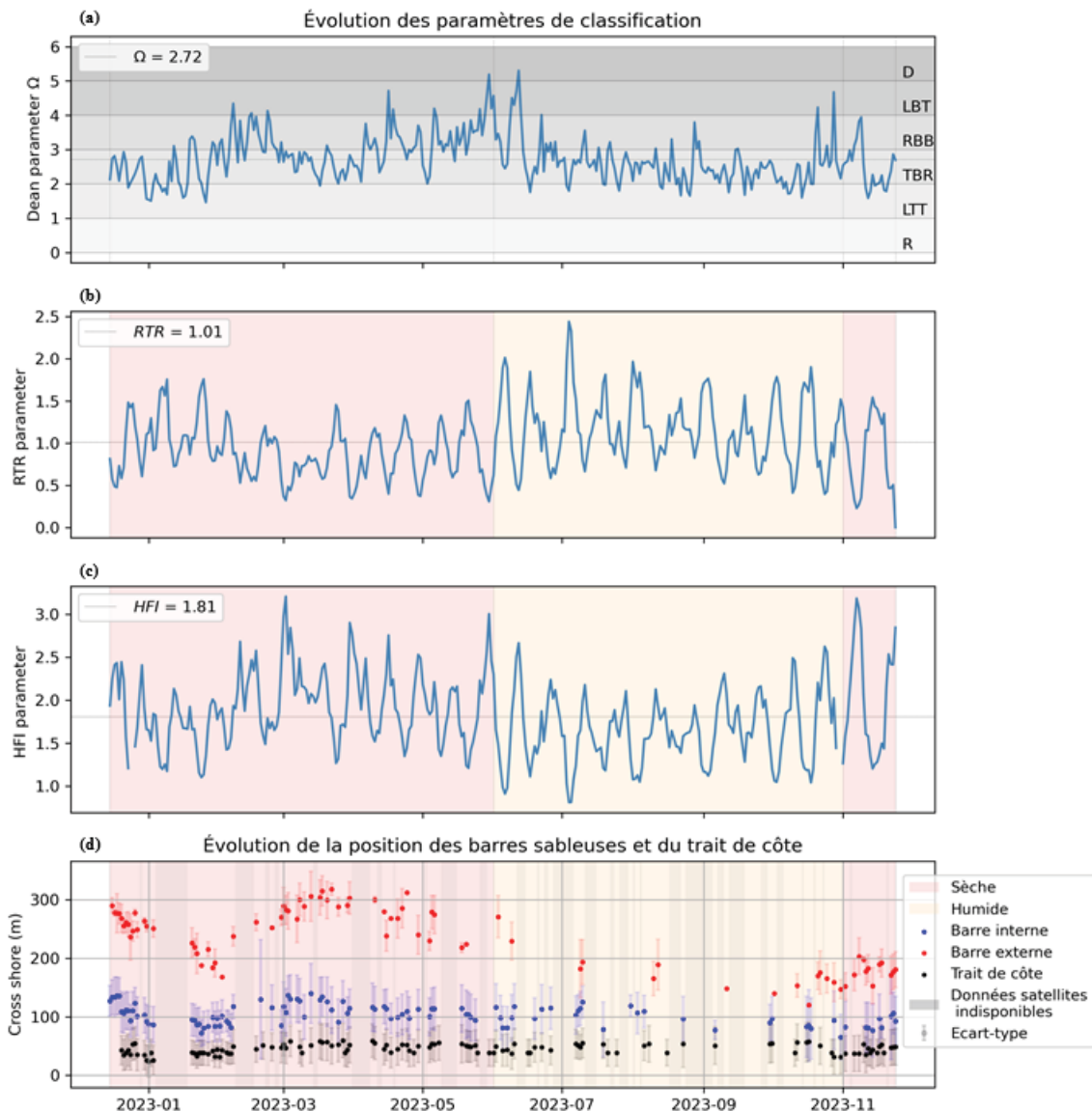


Figure 4. Séries temporelles des paramètres de classification : a) Dean Ω ; b) RTR ; c) HFI ; d) Position perpendiculaire à la côte des barres sableuses et du trait de côte.

Le paramètre de Dean, souvent appelé vitesse de chute sans dimension, est largement utilisé pour déterminer la direction probable du transport sédimentaire et prévoir les changements morphologiques de la plage. Cependant, sa corrélation avec la barre interne à Saint-Louis est faible (0.23), ce qui soulève des questions sur son adéquation. La différence entre l'utilisation habituelle de la hauteur de vague cassante et notre choix de la hauteur de vague significative, combinée à une vitesse de chute fixe basée sur une taille de grain constante ($D_{50}=0.21$ mm, GARLAN *et al.*, 2023), pourrait expliquer cela, en raison du manque de données in situ. De même, le paramètre d'amplitude de marée relative montre une corrélation négative (-0.57) avec la position de la barre interne, ce qui indique une compensation plutôt qu'une amplification des effets des

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

vagues. Par conséquent, nous avons exploré l'indice de contrainte hydrodynamique, qui intègre l'effet cumulatif des vagues et du marnage. Une corrélation améliorée (0.55) avec la position de la barre sableuse a été observée, suggérant que cet indice pourrait mieux expliquer la dynamique observée. L'idée serait donc de trouver un nouveau paramètre qui permettrait d'expliquer plus précisément la dynamique observée.

4.3 Coévolution des barres sableuses et du trait de côte

Cette section vise à examiner le couplage entre les barres sableuses et le trait de côte, un phénomène complexe, où les configurations spatiales des systèmes de double barre sableuse demeurent peu expliquées (PRICE *et al.*, 2011). Nous avons constaté sur la plage de Saint-Louis une corrélation de 0.71 entre les deux barres. La barre externe, en raison de sa plus grande profondeur, est principalement influencée par les vagues, tandis que la barre interne peut être davantage affectée par les variations saisonnières et le niveau d'eau. Les données montrent également une dynamique interdépendante entre le trait de côte et la barre interne, avec une corrélation notable de 0.56. En se concentrant sur la saison sèche, où le régime des vagues est plus énergétique, les corrélations s'améliorent : la corrélation entre les barres sableuses atteint 0.73, tandis que celle entre la barre interne et le trait de côte atteint 0.70. Cependant, le manque de données pendant la saison des pluies rend difficile l'analyse de la dynamique des barres, remettant en question la cohérence des données pour étudier la dynamique des barres sableuses et du trait de côte à cette période.

4.4 Limitations

Les données satellitaires fournissent des instantanés des vagues sans pouvoir lisser les variations individuelles, créant ainsi une incertitude quant à la localisation des bancs de sable et du trait de côte. Pour une analyse plus précise, il serait avantageux de corriger la position des barres sableuses, comme le démontre l'étude de VAN ENCKEVORT & RUESSINK (2001). Cette recherche souligne l'importance d'une approche holistique intégrant des variables environnementales et géomorphologiques pour une compréhension complète de la dynamique côtière. Cependant, la rareté des données in-situ à Saint-Louis pose un défi pour la validation des modèles mais nous espérons que les collectes de données satellitaires en perpétuelle amélioration introduiront une nouvelle renaissance collaborative. Il reste nécessaire d'améliorer les algorithmes de détection. Cela implique également d'explorer des méthodes alternatives pour étudier les barres sableuses en l'absence de vagues, soulignant la complexité de cette tâche. Une approche prometteuse réside dans l'utilisation du Machine Learning (ML) et du Deep Learning (DL). Ces méthodes offrent une opportunité d'améliorer la détection des barres sableuses grâce à leur capacité à intégrer et à manipuler efficacement de grandes quantités de données. Diverses méthodes de segmentation et de classification d'images basées sur le DL ont été appliquées pour caractériser les formes terrestres côtières, les

sédiments, l'hydrodynamique, les lignes de rivage, l'érosion des plages et les états morphodynamiques (VITOUSEK *et al.*, 2023). Ces techniques pourraient ainsi repousser les limites des algorithmes actuels, notamment pendant les saisons humides (absence de vagues). De plus, la combinaison des bandes spectrales des satellites pour dériver la bathymétrie côtière grâce au transfert radiatif offre une perspective intéressante. Cette approche permet d'extraire des informations précieuses sur la bathymétrie côtière et les caractéristiques du fond à partir des images satellites, ouvrant ainsi la voie à une alternative potentiellement prometteuse pour la détection des barres sableuses et la reconstruction de la bathymétrie.

5. Conclusion

L'algorithme mentionné précédemment ouvre la voie à l'étude de la dynamique des barres sableuses dans une ampleur qui aurait été hors de portée sans les images satellites. Il permet non seulement d'extraire automatiquement les crêtes des barres sableuses, mais également d'analyser de manière automatique les données extraites afin de reproduire les schémas saisonniers et pluriannuels du comportement des barres sableuses, similaires aux méthodes traditionnelles telles que les relevés bathymétriques. Les résultats confirment l'influence des paramètres hydrodynamiques, notamment des facteurs saisonniers tels que les régimes de vagues, et la position des barres. De plus, une coévolution entre les barres sableuses et le trait de côte est observée. Il est également pertinent de souligner que les corrélations entre les données hydrodynamiques ainsi que celles entre les paramètres de classification tels qu'Omega, RTR et HFI, ne sont pas très robustes. Il est fort probable que nous négligions un processus important. Une piste à explorer pourrait être l'impact potentiel du fleuve Sénégal et de la flèche sableuse de la Langue de Barbarie sur la dynamique côtière à Saint-Louis. Il a été observé que l'amplitude du niveau de la mer régional altimétrique (SLA) et les effets atmosphériques (DAC), estimés à 5 cm et 2 cm respectivement (description dans ALMAR *et al.*, 2021b), sont significatifs le long des côtes de Saint-Louis. Afin de mieux comprendre l'influence de ces variables sur la dynamique des barres internes et externes, nous proposons d'étendre notre série temporelle sur 40 ans en utilisant des données satellitaires de systèmes comme Landsat et Sentinel-2. Cette analyse approfondie, rendue possible par une couverture satellitaire étendue, permettra une gestion côtière améliorée, notamment à Saint-Louis, tout en bénéficiant à d'autres régions confrontées à des défis similaires.

6. Références bibliographiques

ALMAR R., BERGSMA E.W.J., THOUMYRE G., BABA M.W., CESBRON G., *et al.* (2021a). *Global satellite-based coastal bathymetry from waves*. Remote Sens. 13, 4628. <https://doi.org/10.3390/rs13224628>

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

- ALMAR R., BOUCHAREL J., GRAFFIN M., ONDOA ABESSOLO G., *et al.* (2023). *Influence of El Niño on the variability of global shoreline position*. *Nat Commun* 14, 3133. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38742-9>
- ALMAR R., CASTELLE B., RUESSINK B.G., SENECHAL N., *et al.* (2010). *Two- and three-dimensional double-sandbar system behaviour under intense wave forcing and a meso–macro tidal range*. *Continental Shelf Research* 30, 781–792, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.02.001>
- ALMAR R., RANASINGHE R., BERGSMA E.W.J., DIAZ H., *et al.* (2021b). *A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping*. *Nat Commun* 12, 3775. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24008-9>
- ATHANASIOU P., DE BOER W., YOO J., RANASINGHE R., *et al.* (2018). *Analysing decadal-scale crescentic bar dynamics using satellite imagery: A case study at Anmok beach, South Korea*. *Marine Geol.*, 405, 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2018.07.013>
- BERGSMA E.W.J., SADIO M., SAKHO I., ALMAR R., *et al.* (2020). *Sand-spit evolution and inlet dynamics derived from space-borne optical imagery: Is the Senegal-river inlet closing?* *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 95*, 372–376. <https://doi.org/10.2112/SI95-072.1>
- CISSE C., BREMPONG E., TAVENEAU A., ALMAR R., *et al.* (2022). *Extreme coastal water levels with potential flooding risk at the low-lying Saint Louis historic city, Senegal (West Africa)*. *Front. Mar. Sci.* 9:993644. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.993644>
- DUBARDIER B., CASTELLE B., MERIEU V., RUESSINK G. (2015). *Process-based modeling of cross-shore sandbar behavior*. *Coastal Engineering* 95, 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.09.004>
- GARLAN T., BERGSMA E.W.J., GREGOIRE G., TAVENEAU A., *et al.* (2023). *Characteristics of the origin and dynamics of sediments of a sand-spit with an exceptional dynamics: Langue de Barbarie (Saint-Louis, Senegal)*. *Coastal Sediments 2023*, 978–994. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0091
- HERSBACH H., BELL B., BERRISFORD P., HIRAHARA S., *et al.* (2020). *The ERA5 global reanalysis*. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- HOEFEL F., ELGAR S. (2003). *Wave-induced sediment transport and sandbar migration*. *Science* 299, 1885–1887. <https://doi.org/10.1126/science.1081448>
- LAFON V., DE MELO APOLUCENO D., DUPUIS H., MICHEL D., *et al.* (2004). *Morphodynamics of nearshore rhythmic sandbars in a mixed-energy environment (SW France): I. Mapping beach changes using visible satellite imagery*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61, 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.05.006>
- LIPPMAN T.C., HOLMAN R.A. (1989). *Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation*. *J. Geophys. Res.*, 94, 995–1011, <https://doi.org/10.1029/JC094iC01p00995>

- LYARD F., ALLAIN D., CANCEZ M., CARRERE L., *et al.* (2021). *FES2014 global ocean tide atlas: design and performance*. *Ocean Sci.* 17, 615–649, <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>
- MASSELINK G., SHORT A.D. (1993). *The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model*. *Journal of Coastal Research*, vol. 9, no. 3, 785–800. <https://www.jstor.org/stable/4298129>
- PRICE T.D., RUESSINK B.G. (2011). *State dynamics of a double sandbar system*, *Continental Shelf Research* 31, 659–674. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.12.018>
- PRICE T.D., RUESSINK B.G., CASTELLE B. (2014). *Morphological coupling in multiple sandbar systems – a review*. *Earth Surf. Dynam.*, 2, 309–321. <https://doi.org/10.5194/esurf-2-309-2014>
- SALL M. (2006). *Flooding and sea level rise in Saint-Louis of Senegal: potential impacts and adaptation measures*. Thèse Université du Mans. <https://cyberdoc.univ-lemans.fr/theses/2006/2006LEMA3003.pdf>
- SPLINTER K.D., HARLEY M.D., TRUNER I.L. (2018). *Remote sensing is changing our view of the coast: Insights from 40 Years of monitoring at Narrabeen-Collaroy, Australia*. *Remote Sens.*, 10, 1744. <https://doi.org/10.3390/rs10111744>
- TĂTUI F., CONSTANTIN S. (2020). *Nearshore sandbars crest position dynamics analysed based on earth observation data*. *Remote Sensing of Environment* 237, 111555. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111555>
- TAVENEAU A. (2023). *Monitoring of Saint-Louis coast (Senegal) using multi-sensor remote sensing techniques*. Thèse Université Paul Sabatier Toulouse. <https://theses.hal.science/tel-04287443>
- THORTON E.B., HUMISTON R.T., BIRKEMEIER W. (1996), *Bar/trough generation on a natural beach*, *J. Geophys. Res.*, 101, 12097–12110, <https://doi.org/10.1029/96JC00209>
- VAN ENCKEVORT J., RUESSINK G. (2001). *Effect of hydrodynamics and bathymetry on video estimates of nearshore sandbar position*. *J. Geophys. Res.*, 106, 16969–16979. <https://doi.org/10.1029/1999JC000167>
- VITOUSEK S., BUSCOMBE D., VOS K., BARNARD P.L., RITCHIE A.C., WARRICK J.A. (2023). *The future of coastal monitoring through satellite remote sensing*. *Cambridge Prisms: Coastal Futures* 1, 1–18. <https://doi.org/10.1017/cft.2022.4>
- VOS K., SPLINTER K.D., HARLEY M.D., SOMMONS J.A., TURNER I.L. (2019). *CoastSat: A Google Earth engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery*. *Environmental Modelling & Software* 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
- WRIGHT L.D., SHORT A.D. (1984) *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis*. *Marine Geology* 56, 93–118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2)

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection