

SUIVI PAR SATELLITE DE L'ÉVOLUTION DES PLAGES AMÉNAGÉES : L'EXEMPLE DE LA PETITE CÔTE (SÉNÉGAL, AFRIQUE DE L'OUEST)

Cheikh Omar T. CISSÉ¹, Adélaïde TAVENEAU², Rafael ALMAR², Erwin W. J. BERGSMA³

ABSTRACT

Satellite monitoring of coastal dynamics: case study of beach management effects at the "Petite Côte" (Senegal, West Africa).

The aim of this study is to show the evolution of the coastline on the beaches of Rufisque, Ndayane and Saly, located on the "Petite Côte" of the Senegalese coast. The methodological approach includes a multitemporal analysis of Landsat 5, 7 and 8 and Sentinel 2 satellite images, using the "CoastSat" tool, over a 38-year time sequence (1984-2022). The first order linear regression applied to these data reveals that the accretion trend predominates the erosion trend between 1984 and 2022. The study highlights a seasonal cycle of the coastline: coastline advances during the dry season, and retreats during the rainy season – a period when the swell is more energetic. Our results also illustrate the impact of protection structures on coastal morphodynamics. The site where the impact of coastal protection structures is most visible by detecting changes in the position of the coastline is the city of Saly. Thus, our results underline that the breakwaters have allowed a lateral extension of the beaches at this site. On the other hand, on the beaches where the presence of a groin is observed, it is possible to see the impact of the groin on the blocking of longitudinal sediment transport: the beach undergoes a significant accretion upstream of the structure, while the sections located downstream undergo erosion. This situation is observed at Rufisque and Ndayane. According to our results, the construction of protection structures has caused disparate and even asymmetrical evolution dynamics of the "Petite Côte", marked by sectors well served in sediment giving rise to morphotypes such as tombolos in Saly, and others that are under-fed with the consequence of a retreat of the coastline (Ndayane). In the medium term, the use of soft management measures, in particular sediment cell nourishment, appears highly desirable.

KEYWORDS

Remote sensing, coastline change monitoring, CoastSat tool, accretion, erosion, coastal structures, Senegal.

RÉSUMÉ

Cette étude cherche à montrer l'évolution du trait de côte sur les plages de Rufisque, Ndayane et Saly, situées sur la Petite Côte du littoral sénégalais. La démarche méthodologique inclut une analyse diachronique des images-satellites Landsat 5, 7 et 8 et Sentinel 2, à partir de l'outil « CoastSat », sur une séquence temporelle de 38 ans (1984-2022). La régression linéaire de premier ordre appliquée à ces données révèle que la tendance d'accrétion prédomine la tendance d'érosion entre 1984 et 2022, et met en avant en avant un cycle saisonnier du trait de côte : le trait de côte avance pendant la saison sèche, et recule pendant la saison des pluies – période où la houle est plus énergétique. Nos résultats mettent également en évidence l'impact des ouvrages de protection sur la morphodynamique côtière. Le site où l'impact des ouvrages de protection de la côte est le plus visible par détection de changement de position du trait de côte est la ville de Saly. Ainsi, nos résultats soulignent que les brise-lames ont permis une extension latérale des plages sur ce site. Par contre, sur les plages où l'on observe la présence d'un épi, il est possible de voir l'impact de l'épi sur le blocage du transport sédimentaire longitudinal : la plage subit une accrétion significative en amont de l'ouvrage, tandis que les sections situées en aval subissent l'érosion. Cette situation est observée à Rufisque et à Ndayane. D'après nos résultats, l'édification de structures de protection a provoqué des dynamiques d'évolution disparates, voire asymétriques, marquées par des secteurs bien servis en sédiments donnant naissance à des morphotypes à l'instar des tombolos à Saly, et d'autres qui sont sous alimentés, avec comme conséquence un recul

1. Université Gaston Berger, Laboratoire Leïdi "Dynamique des Territoires et Développement", BP 234 Saint-Louis, Sénégal, cheikhmartidjaniciss@yahoo.fr

2. Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (Université de Toulouse, CNRS, IRD, CNES), Toulouse, France.

3. Earth Observation Lab, Centre National d'Études Spatiales (CNES), Toulouse, France.

du trait de côte (Ndayane). À moyen terme, le recours à des mesures d'aménagement douces, notamment le nourrissement en cellule sédimentaire, apparaît hautement souhaitable.

MOTS-CLÉS

Télédétection, évolution du trait de côte, outil CoastSat, accrétion, érosion, ouvrages de protection maritime, Sénégal.

Article reçu le 24 février 2023, accepté le 9 mars 2023

RÉFÉRENCES

- Aleman N., Michel C., Robin N. (2012). Impact des ouvrages portuaires sur la morphodynamique des barres sédimentaires d'avant-côte du Languedoc-Roussillon. *XII^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil*, Cherbourg, France, 12-14 juin 2012, doi:10.5150/jngcgc.2012.018-A.
- Almar R., Kestenare E., Boucharel J. (2019). On the key influence of remote climate variability from tropical cyclones, north and south Atlantic mid-latitude storms on the Senegalese coast (West Africa). *Environmental Research Communications*, 1(7): 071001.
- Almar R., Ranasinghe R., Bergsma E. W. J., Diaz H., Melet A., Papa, F., Vousdoukas M., Athanasiou P., Dada O., Almeida L. P., Kestenare E. (2021). A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping. *Nature communications*, (2021)12:3775.
- Almar R., Stieglitz T., Addo K. A., Ba K., Ondo G. A., Bergsma E.W. J., Bonou F., Dada O., Angnuureng D., Arino O. (2022). Coastal zone changes in West Africa: Challenges and opportunities for satellite earth observations. *Surveys in Geophysics*, 44, 249–275.
- Alves B., Angnuureng D. B., Morand P., Almar R. (2020) A review on coastal erosion and flooding risks and best management practices in West Africa: what has been done and should be done. *Journal of Coastal Conservation*, 24 (3), 1–22.
- ANCORIM (2017). Panorama des solutions douces de protection des côtes, 56 p. Document disponible en ligne : https://corimat.net/wp-content/uploads/2017/03/2_Outil2_56P_FR.pdf.
- Anthony, E. J. (1995). Beach-ridge development and sediment supply: examples from West Africa. *Marine Geology*, 129 (1-2), 175–186.
- Assogba L. P. (2018). Étude de la dynamique du trait de côte et des stratégies de gestion du risque d'érosion côtière: cas de Cotonou au Bénin de 1955 à 2018. Mémoire de Mastère de Spécialisation en Gestion des Risques et Catastrophes, Université de Liège, Belgique, 70p.
- Bakhoun P. W., Niang I., Sambou B., Diaw A. T. (2018). Une presqu'île en érosion côtière ? Dakar la capitale sénégalaise face à l'avancée de la mer dans le contexte de changement climatique. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, 2 : 91–108.
- Balouin Y., Belon R., Stépanian A., Bodéré G. (2012). Étude générale pour la protection du littoral de la plaine orientale de Corse : préconisations de gestion. *Rapport BRGM/ RP 61650-FR*, 52 p.

- Benveniste J., Cazenave A., Vignudelli S., *et al.* (2019). Requirements for a coastal hazards observing system. *Frontiers in Marine Science*, 6 :348, doi: 10.3389/fmars.2019.00348 .
- Bergsma, E. W. J. and Almar R. (2020). Coastal coverage of ESA Sentinel 2 mission. *Advances in Space Research*, 65 (11), 2636–2644.
- Bergsma, E. W., Sadio, M., Sakho, I., Almar, R., Garlan, T., Gosselin, M. and Gauduin, H. (2020). Sand-spit evolution and inlet dynamics derived from space-borne optical imagery: Is the Senegal-river inlet closing? *Journal of Coastal Research*, 95(SI), 372–376.
- Bird, E. C. F. (1985). *Coastline changes: a global review*. John Wiley, New-York-Toronto, 219 p.
- Bongarts Lebbe T., Rey-Valette H., Chaumillon E., *et al.* (2021). Designing coastal adaptation strategies to tackle sea level rise. *Frontiers in Marine Science*, 1640. <https://hal.science/hal-03413498/> .
- Bouvier C. (2019). Barres d’avant côte et trait de côte : dynamique, couplage et effets induits par la mise en place d’un atténuateur de houle. Thèse de Doctorat, Physique de l’environnement, Université de Bordeaux, 221 p.
- Brahmi N., Mohsen D., Rabia C. M. (2018). Impacts de l’élévation du niveau de la mer sur l’évolution future d’une côte basse à lagune de la péninsule du cap Bon (nord-est de la Tunisie): approche cartographique. *Association Cartographique Internationale*, 1, 1–14.
- Calderaro N. et Lacrouts J. (2005). *Le littoral : protection, mise en valeur et aménagement des espaces littoraux*. Le Moniteur, 552 p.
- Charlier, R. H. & De Meyer C. P. (1995). Beach nourishment as efficient coastal protection. *Environmental Management and Health*, 6 (5) 26-34.
- Coly A. & Dieme B. (2011). Étude sur la vulnérabilité du secteur touristique à Saly et de ses implications socio-économiques sur l’économie locale au niveau de la station touristique. *Rapport final provisoire*, Projet Intac, 40 p..
- Dada O., Almar R., Morand P., Ménard F.(2021). Towards West African coastal social-ecosystems sustainability: Interdisciplinary approaches. *Ocean & Coastal Management*, 211:105746.
- De la Torre Y., Belon R., Balouin Y., Steparian A. (2014). Inventaire et analyse de solutions douces de gestion de l’érosion côtière et applicabilité au littoral corse. Rapport final BRGM/RP-63034, 59 p.
- Diadhiou Y., Ndour A., Niang I., Fall-Niang A. (2016). Étude comparative de l’évolution du trait de côte sur deux flèches sableuses de la Petite Côte (Sénégal): cas de Joal et de Djiffère. *Noroi*, 240 (3), 25–42.

- Diallo S. (1982). Evolution géomorphologiques du littoral sur la petite côte à Rufisque. Mémoire de Maîtrise, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 124 p.
- Diombera M. (2020). Dynamiques territoriales et développement touristique: quelles stratégies environnementales durables à Saly (Petite Côte, Sénégal)? *Études caribéennes*, 6, <https://doi.org/10.4000/etudescaribeennes.19388> .
- Diouf S., Bérubé D., Robichaud A. (2021). Impacts des structures de protection rigides sur la côte néo-brunswickoise de la Baie des Chaleurs, Canada. *VertigO - la revue électronique des sciences de l'environnement*, 21 (2), <https://doi.org/10.4000/vertigo.32393> .
- Dupuis L. (2016). L'érosion des anses de la ville de Schoelcher: détermination des dynamiques et processus en jeu. Mémoire de Maîtrise de géographie, Université des Antilles, 151 p.
- El Abdellaoui J. E. & Ozer A. (2007). Étude diachronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc). *Téledétection*, 7 (1-2-3-4), 157-171, disponible en ligne : <https://www.archivescontemporaines.com/articles/314> .
- Ghaderi, D. & Rahbani M. (2020). Detecting shoreline change employing remote sensing images (Case study: Beris Port, east of Chabahar, Iran). *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 3 (4), 1-8.
- Goussard J. (2014). Présentation du plan régional de prévention des risques côtiers en Afrique de l'ouest et de la mission d'observation du littoral ouest africain. Actes du Colloque international « *Connaissances et compréhension des risques côtiers. Aléas, Enjeux, Représentations, Gestion* », Brest, France, 3-4 juillet 2014, 154–162.
- Guérin K. (2003). Dynamique du littoral sableux de Thiaroye à Bargny (Baie de Gorée-Sénégal). Mémoire de Maîtrise, Université Paris-1 Panthéon-Sorbonne, 198 p.
- IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jestin C., Grunnet N., Kristensen S. E., Forain N. (2016). Modélisation morphodynamique à long terme pour la gestion sédimentaire du littoral portuaire dunkerquois. XIV^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Toulon, 29 juin au 1er juillet 2016, DOI:10.5150/jngcgc.2016.024 .
- Konlechner T. M., Kennedy D. M., O'Grady J. J., Leach C., Ranasinghe R., Carvalho R. C., Luijendijk A. P., McInnes K. L., Ierodiaconou D. (2020). Mapping spatial variability in shoreline change hotspots from satellite data; a case study in southeast Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 246:107018.

- Kulp S. A. & Strauss B. H. (2019). New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communications*, 10 (1), 1-12.
- Lacroix D., Mora O., De Menthère N., Béthinger A. (2019). La montée du niveau de la mer : conséquences et anticipations d'ici 2100, l'éclairage de la prospective. Rapport d'étude, AllEnvi/INRA, 169 p.
- Lebunetel J. & Farnole P. (2011). Impact de digues ISC sur la dynamique littorale : étude de cas des plages de Saint-Hilaire de Riez en Vendée. *Revue Paralia*, 4, 9.1-9.10.
- Luijendijk A., Hagenaars G., Ranasinghe R., Baart F., Donchyts G., Aarninkhof S. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific Reports*, 8 (1), 1-11.
- Luo S., Cai F., Liu H., Lei G., Qi H., Su X. (2015). Adaptive measures adopted for risk reduction of coastal erosion in the People's Republic of China. *Ocean & Coastal Management* 103 (2015) 134-145.
- Makponse M. & Hounsou B. (2017). Dynamique de la côte après la réalisation des épis, ouvrages de protection situés à l'est de l'épi de Siafato à Cotonou au sud-Bénin. *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé*, 19 (1), 203-226.
- Marone A. (2016). Diagnostic des inondations continentales et marines: application à l'échelle des communes de Rufisque (Sénégal). Thèse de doctorat de géographie, Université de Caen, 427p.
- Masria A., Iskander, M., Negm A. (2015). Coastal protection measures, case study (Mediterranean zone, Egypt). *J. of Coastal Conservation*, 19 (3), 281-294.
- McAllister E., Payo A., Novellino A., Dolphin T., Medina-Lopez E. (2022). Multispectral satellite imagery and machine learning for the extraction of shoreline indicators. *Coastal Engineering*, 2022, 174, 104102.
- Melet A., Teatini P., Le Cozannet G., Jamet C., Conversi A., Benveniste J., Almar R. (2020). Earth observations for monitoring marine coastal hazards and their drivers. *Surveys in Geophysics*, 41(6), 1489–1534.
- Ndiaye M. (2016). Dynamique, vulnérabilité socio-économique et gouvernance des littoraux de Saly Portudal (Mbour) et de la Langue de Barbarie (Saint-Louis). Thèse de doctorat de géographie, Université Gaston Berger de Saint-Louis, Sénégal, 339 p.
- Ndour A. (2015). Evolution morpho-sédimentaire et impacts des ouvrages de protection sur le littoral de Rufisque, Petite Côte. Thèse de doctorat, Département de géologie de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, 243p.
- Ndour A., Laibi R. A., Sadio M., Degbe C. G., Diaw A. T., Oyédé E. J., Lucien M., Anthony, P., Dussouillez H., Sambou H., Dièye E. H. B. (2018). Management strategies for coastal

erosion problems in West Africa: Analysis, issues and constraints drawn from the example of Senegal and Benin. *Ocean & Coastal Management*, 156, 92–106.

Ngom H., Ndour A., Niang I. (2018). Impacts of protective structures on sandy beaches: example of the Saly balnear station, Petite Côte, Senegal. *Journal of Coastal Research*, 81, 114–121.

Niang-Diop I. (1995). L'érosion côtière sur la petite côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque. Thèse de doctorat, Université d'Angers, 285 p.

Njutapvouli F. N., Onguene R., Abessolo O. G., Rudant, J. P., Bogning S, Stieglitz T., Tomedi, E. M. (2021). Seasonal to decadal scale shoreline changes along the Cameroonian coastline, Bay of Bonny (1986 to 2020). *Regional Studies in Marine Science*, 45, 101798.

Nmiss M., Amyay M., Ouammou A. (2020). Apport du SIG et de la télédétection dans la détermination et le suivi de la dynamique de la ligne de rivage: application sur le littoral de la baie d'Agadir et des chetouka ouest. *Geomaghreb*, 16, 34-43.

Oppenheimer M., Glavovic B., Hinkel J., *et al.* (2019). Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities. IPCC Spec. Rep. *Ocean Cryosph. Change Clim* 355, 126–129.

Phillips M. & Jones A. (2006). Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone: Problems, consequences and management. *Tourism Management*, 27(3), 517–524.

Rey-Valette H., Rocle N., Mineo-Kleiner L., Longépée E., Bazart C., Lautrédou-Audouy N. (2019). Acceptabilité sociale des mesures d'adaptation au changement climatique en zones côtières : une revue de dix enquêtes menées en France métropolitaine. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], volume 19 numéro 2 | octobre 2019, DOI : <https://doi.org/10.4000/vertigo.26537>

Sadio M., Anthony E. J., Diaw A. T., Dussouillez P., Fleury J. T., Kane A., Almar R., Kestenare E. (2017). Shoreline changes on the wave-influenced Senegal River delta, West Africa: The roles of natural processes and human interventions. *Water*, 9(5), 357.

Saengsupavanich C., Yun L. S., Lee L. H., Sanitwong-Na-Ayutthaya S. (2022) Intertidal intercepted sediment at jetties along the Gulf of Thailand. *Front. Mar. Sci.* 9:970592. doi: 10.3389/fmars.2022.970592 .

Sagne P., Fall B., Ba K., Sow E. H. (2019). Evolution morphosédimentaire des plages des Mamelles et de Ouakam (Dakar, Sénégal). *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, 3 (4), 238–252.

Saidi H., Souissi R., Zargouni F. (2012). Environmental impacts of single and successive breakwaters along the Mediterranean coastline at Rade's–Ezzahra, N. E? Tunisia. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 71, 519–527.

- Sauvé P. (2017). Analyse multicritère des mesures de lutte contre l'érosion côtière : développement d'un outil d'aide à la prise de décision. Mémoire de Maîtrise en Génie de l'environnement, École de technologie supérieure, Université du Québec, 136p.
- Schoonees T., Gijón Mancheño A., Scheres B., Bouma T. J., Silva R., Schlurmann T., Schüttrumpf H. (2019). Hard Structures for Coastal Protection, Towards Greener Designs. *Estuaries and Coasts*, 42(7), 1709-1729.
- Sergent P., Prévot G., Trmal C. (2010). Renforcement des ouvrages situés en faibles profondeurs vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des océans. Recueil des actes des Journées « *Impacts des changements climatiques sur les risques côtiers* », 15-16 novembre 2010, BRGM, Orléans, France, 147–151.
- Sidibé I. (2013). Un territoire littoral dans un espace politique, économique et religieux du Sénégal : le cas de la baie de Ouakam (Dakar). *Espaces, Populations et Sociétés*, 1, 159–176.
- Splinter K. D., Harley M., Turner I. L. (2018). Remote Sensing Is Changing Our View of the Coast: Insights from 40 Years of Monitoring at Narrabeen-Collaroy, Australia. *Remote Sensing*, 10, 1744; doi:10.3390/rs10111744 .
- Staudt F., Gijsman R., Ganal C., Mielck F., Wolbring J., Hass H. C., Goseberg N., Schüttrumpf H., Schlurmann T., Schimmels S. (2021). The sustainability of beach nourishments: a review of nourishment and environmental monitoring practice. *Journal of Coastal Conservation*, 25: 34. <https://doi.org/10.1007/s11852-021-00801-y>
- Sy B. A. (2004). L'ouverture de la brèche de la Langue de Barbarie et ses conséquences, approche géomorphologique. *Revue de Géographie de Saint-Louis*, 4, 50-60.
- Tanaka N., Jinadasa K. B. S. N., Mowjood M. I. M., Fasly M. S. M. (2011). Coastal vegetation planting projects for tsunami disaster mitigation : effectiveness evaluation of new establishments. *Landscape Ecol. Eng.*, 7, 127–135.
- Taveneau A., Almar R., Bergsma E. W. J., Sy B. A., Ndour A., Sadio M., Garlan T. (2021). Observing and predicting coastal erosion at the Langue de Barbarie sand spit around Saint-Louis (Senegal, West Africa) through satellite-derived digital elevation model and shoreline. *Remote Sensing*, 13(13):2454.
- Thior M., Sané T., Diéye E. H. B. (2019). Erosion et impact socio-économiques dans la commune de Diembering en Basse Casamance (Sénégal). *Bulletin de l'IFAN Ch. A. Diop, sér. B, t. LIX*, n° 1-2, 83–99.
- Turmine V. (2000). Dynamique littorale entre Mbour et Joal. Mémoire de Maîtrise en Géographie, Université Paris VII Denis Diderot, 255 p.
- Turner I. L., Harley M. D., Almar R., Bergsma, E. W. J. (2021). Satellite optical imagery in coastal engineering. *Coastal Engineering*, 167:103919.

- Vos K., Splinter K. D., Harley M. D., Simmons J. A., Turner I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, 122:104528.
- Vousdoukas M. I., Clarke J., Ranasinghe R., *et al.* (2022). African heritage sites threatened as sea-level rise accelerates. *Nature Climate Change*, 12(3):256–262.
- Vousdoukas M. I., Mentaschi L., Voukouvalas E., Verlaan M., Jevrejeva S., Jackson L. P., Feyen L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications*, 9(1):1–12.
- WACA (2021). Cadre de gestion environnementale et sociale actualisé. Programme d'Investissement Régional de Résilience des Zones Côtières en Afrique de l'Ouest. Document World Bank, version provisoire, 131 p.
- Weissenberger S., Noblet M., Plante S., Chouinard O., Guillemot J., Aubé M., Meur-Ferec C., Michel-Guillou E., Gaye N., Kane A., Kane C., Niang A., Seck A. (2016). Changements climatiques, changements du littoral et évolution de la vulnérabilité côtière au fil du temps : comparaison de territoire français, canadien et sénégalais. *Vertigo, la revue électronique en sciences de l'environnement*, 16 :2–33, 2016.
- Xuan, T.L., Nguyen, P.C., Quoc, T.V., Tran, Q. Q., Wright, D.P and Anh, D.T. (2022). Multi-scale modelling for hydrodynamic and morphological changes of breakwater in coastal Mekong Delta in Vietnam. *Journal of Coastal Conservation*, 26:18.
- Yaacob R., Shaari H., Sapon N., *et al.* (2018). Annual changes of beach profile and nearshore sediment distribution off Dungun-Kemaman, Terengganu, Malaysia. *Jurnal Teknologi*, 80 (5), 57–66.

Comment citer cet article (*How to cite this paper*) :

Cissé C. O. T., Taveneau A., Almar R., Bergsma E. W. J., 2022 – Suivi par satellite de l'évolution des plages aménagées: l'exemple de la Petite Côte (Sénégal, Afrique de l'Ouest). *Photo Interprétation European Journal of Applied Remote Sensing*, 58, pp.45-56.