

UNIVERSITÉ ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR

UFR des Sciences et Technologies



École doctorale Sciences, Technologies et Ingénierie (ED-STI)

THÈSE DE DOCTORAT

Mention : Géographie

Spécialité : Géographie-Environnement

Spécialisation : Géomorphologie

**DYNAMIQUE MORPHOSÉDIMENTAIRE, CINÉMATIQUE ET SCÉNARIOS PROSPECTIFS
DU TRAIT DE CÔTE ENTRE LA PETITE-CÔTE ET LE DELTA DU SALOUM (SÉNÉGAL) :
IMPLICATIONS ENVIRONNEMENTALES ET SOCIOÉCONOMIQUES**

Préparée au Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE)

Présentée et soutenue publiquement le 30 avril 2026 par :

Djiby YADE

Directeur de thèse : **Pr Tidiane SANE**

COMPOSITION DU JURY

M. Amadou Tahirou DIAW, Professeur Titulaire, UCAD, Président

M. Boubou Aldiouma SY, Professeur Titulaire, UGB, Rapporteur

M. Cheikh MBOW, Professeur Titulaire, CSE/ISE, Rapporteur

M. Aïdara Chérif Amadou Lamine FALL, Maître de Conférences, UASZ, Rapporteur

M. Mamadou THIOR, Maître-Assistant, UCAD, Examineur

M. Tidiane SANÉ, Professeur Titulaire, UASZ Directeur de thèse

Année universitaire 2025-2026

Dédicaces

Louange à Allah, le Tout-Puissant, qui m'a permis de mener à bien ce travail.

Je dédie cette thèse à :

- mes chers parents, pour leur encadrement irréprochable, leur soutien, leur affection et leurs prières ;
- mon frère aîné, Moussa Yade, qui m'a toujours accompagné et encouragé ;
- mes frères et sœurs;
- toute la famille Yade de Keur Mbar ;
- mon oncle Babacar Gning, qui m'a éduqué et accompagné depuis le bas âge, ainsi qu'à toute sa famille ;
- tous les habitants de mon village, Keur Mbar.

Remerciements

Au terme de ce travail, j'exprime ma profonde gratitude à toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à son aboutissement.

- À mon directeur de thèse, le Professeur Tidiane Sané, pour sa confiance renouvelée et son encadrement attentif, après m'avoir déjà guidé durant mes travaux de Master. Je vous adresse ma reconnaissance la plus sincère.
- Au Dr Mamadou Thior, pour ses orientations, sa disponibilité et ses conseils précieux.
- Au président du jury et à l'ensemble des membres du jury, pour l'intérêt porté à ce travail et la qualité de leurs observations.
- À l'ensemble du corps enseignant du Département de géographie de l'Université Assane Seck de Ziguinchor pour la qualité des enseignements et sa disponibilité, notamment : Pr Oumar Sy, Dr El Hadji Balla Dièye, Dr Ibrahima Mbaye, Dr Oumar Sall, Pr Cheikh Faye, Dr Aïdara Chérif Amadou Lamine Fall, Dr Alvares Gualdino Foufoué Benga, Dr Abdourahmane Mbade Sène, Dr Cheikh Tidiane Wade, Dr Demba Gaye, Pr Pascal Sagna, Dr Alla Manga, Mme Dabo.
- Aux Dr Boubacar Demba Bâ et Boubacar Solly pour leur appui en géomatique, c'est grâce à vous que j'ai aimé la géomatique, pièce angulaire de cette thèse.
- À Hubert Gérard Goudiaby et à toute sa famille, à Mbour, pour leur accueil lors des travaux de terrain ; à Adama Mané et à sa famille, à Bétenty, qui m'ont accueilli et facilité les enquêtes dans les îles du Saloum.
- À la population de la Petite-Côte, de Saly Portudal aux îles du Saloum, pour les informations essentielles fournies ; aux autorités locales et aux services de l'État, ainsi qu'aux ONG et GIE, pour les données de qualité mises à notre disposition.
- À toute ma famille, ainsi qu'aux habitants de mon village, Keur Mbar, pour leur soutien moral et leurs encouragements ; à ma famille d'accueil à Ziguinchor.
- À Baba Ibou Gning et à toute sa famille, à Bambey Sérère, pour leur appui constant.
- Au Professeur Lat Grand Ndiaye, du Laboratoire de Physique de l'Université Assane Seck de Ziguinchor, pour m'avoir permis de réaliser des analyses granulométriques ; au Dr Himbane pour son aide lors des analyses de sédiments.

- À l'équipe du CSE pour m'avoir permis d'effectuer un stage au sein de la structure, particulièrement M. Mamadou Lamine Ndiaye (mon maître de stage), Dr Ousmane Bathiery et Dr Moussa Sall.
- À mon professeur de lycée, Félix Diouf, qui m'a fait aimer la géographie.
- À mon professeur en Histoire-Géographie au collège, Moussa Sall
- À toute la onzième promotion de géographie de l'Université Assane Seck de Ziguinchor, ainsi qu'aux aînés du Laboratoire de Géomatique et d'Environnement.
- À mes amis de l'université : Babacar Ndao, Ibrahima Barro, Modou Faye, Ousmane Sow, Pape Mor Gueye, Souleymane Ndiaye, Khadim Ndir, Mouhamed Badiane, Ndiouga Diouf, Ndeye Fama Diop, Yarame Nar Diop, Oumy Faye, Fatou Faye, Ndeye Mama, Adama Sarr, Ablaye Faye.
- À mes oncles depuis Bambey Sérère.
- À Ousmane Djabang et à toute sa famille.
- Au Président de l'ASC DEM BA DJEKH, Monsieur Ibrahima Faye
- Mes remerciements particuliers à mon ami et frère Ibra Faye, pour son soutien indéfectible depuis son arrivée à l'université.
- À toute l'équipe du laboratoire : en commençant par l'ex-directeur, le Pr Oumar Sy, et l'actuel directeur, le Pr El Hadji Balla Dièye, ainsi que notre responsable, M. François Ngor Sène, et l'ensemble des doctorantes et doctorants.
- À nos aînés docteurs : Bouly Sané, Henry Marcel Seck, Alexandre Badiane, Yancouba Sané, Abdou Kadry Sambou, Boubacar Barry, C. Abdou A S Sadio, Roger Coly.
- À mes amis d'enfance : Djibril Faye, mon jumeau, Abdoulaye Faye, Madiouf Faye

Sommaire

Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
Résumé	v
Abstract.....	vi
Liste des sigles et acronymes	vii
Introduction générale.....	1
Première partie : Cadre théorique et fondements scientifiques.....	8
Chapitre I : Cadre théorique et présentation de la zone d'étude.....	9
Chapitre II : Données et méthodologie de recherche	50
Conclusion de la première partie	96
Deuxième partie : Caractéristiques morphodynamiques, cinématique du trait de côte et projections.....	98
Chapitre III : Caractéristiques morphodynamiques et granulométriques.....	99
Chapitre IV : Cinématique du trait de côte à partir de l'imagerie satellitaire.....	199
Chapitre V : Projections futures de l'évolution du trait de côte (2055, 2085 et 2100)	217
Conclusion de la deuxième partie	236
Troisième partie : Implications environnementales, socio-économiques de l'érosion côtière et stratégies d'adaptation.....	238
Chapitre VI : Implications environnementales et socio-économiques de la dynamique du trait de côte	239
Chapitre VII : Analyse des stratégies d'adaptation	273
Chapitre VIII : Discussion sur les politiques et perspectives de gestion durable du littoral	298
Conclusion de la troisième partie.....	321
Conclusion générale	323
Bibliographie.....	327
Listes des illustrations	I
Table des cartes	I
Table des figures.....	I
Table des tableaux.....	III
Table des photos et planches	III
Annexes	V

Résumé

Le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, est caractérisé par une dynamique morpho-sédimentaire marquée, résultant de l'interaction entre forçages marins (houle, marée, élévation du niveau de la mer) et pressions anthropiques croissantes. Cette thèse a pour objectifs d'analyser la cinématique du trait de côte, d'identifier les principaux déterminants hydro-sédimentaires, d'évaluer les implications environnementaux et socio-économiques de l'érosion côtière, ainsi que d'examiner les trajectoires d'adaptation à partir de projections spatialisées. La méthodologie adoptée repose sur une approche intégrée combinant l'analyse diachronique d'images satellitaires Landsat (1973-2024), traitées à l'aide de l'outil DSAS (indices EPR et LRR), une caractérisation granulométrique normalisée (NF EN 12620) sur des sites représentatifs (Mbour, Djiffer, Bétenty), l'exploitation de données bathymétriques et topographiques incluant la profondeur de fermeture au sens d'Hallermeier, l'intégration de scénarios AR6/SSP d'élévation du niveau marin, ainsi que des enquêtes et entretiens de terrain. Les résultats mettent en évidence une tendance régionale dominante à l'érosion, avec une vitesse moyenne de recul du rivage estimée à -1,69 m/an et des valeurs extrêmes atteignant -11,6 m/an sur certains tronçons fortement exposés (entre Mbour et Pointe Sarène, Palmarin, Djiffer, Niodior, Bétenty). À l'inverse, des secteurs localisés d'accrétion subsistent, notamment en contexte de mangroves actives, avec une moyenne d'environ 1 m/an. Les plages sont majoritairement constituées de sables fins à moyens, tandis qu'un enrichissement local en fractions plus grossières en profondeur traduit des conditions hydrodynamiques énergétiques. Les projections aux horizons 2055, 2075 et 2100, fondées sur un cadre hybride intégrant les tendances LRR, l'élévation du niveau marin et le contrôle hydrodynamique, confirment la poursuite du recul côtier et permettent de produire des cartes d'exposition assorties d'intervalles d'incertitude, utiles à la hiérarchisation des actions de gestion. Sur les plans environnemental et socio-économique, l'érosion engendre un rétrécissement des plages, une dégradation des dunes et de la végétation littorale, une salinisation accrue, ainsi que des dommages aux habitats, aux infrastructures et aux activités clés (pêche artisanale, tourisme, agriculture littorale). L'analyse des stratégies d'adaptation montre que les interventions publiques sont globalement jugées plus efficaces que les initiatives individuelles, malgré leur caractère hétérogène et parfois générateur de transferts de risque. La thèse propose en réponse une trajectoire d'adaptation basée sur la combinaison de solutions fondées sur la nature, d'ouvrages souples à faible impact, de zones de recul opposables et d'une gouvernance intercommunale appuyée par un suivi-évaluation structuré. Les limites méthodologiques, liées notamment aux approximations des tendances et aux lacunes de données bathymétriques et de houle, plaident pour un monitoring instrumenté afin d'améliorer les diagnostics et d'orienter durablement l'aménagement.

Mots-clés : Littoral, Évolution, Morphodynamique, Trait de côte, Cinématique, Petite-Côte, Delta du Saloum, Sénégal.

Abstract

The Senegalese coastline, from the Petite Côte to the Saloum Delta, is characterized by highly active morpho-sedimentary dynamics driven by marine forcings (wave action, tides and sea level rise) and increasing anthropogenic pressures. This dissertation aims to analyze shoreline change dynamics, identify the main hydro-sedimentary drivers, assess the environmental and socio-economic implications of coastal erosion, and examine adaptation pathways based on spatialized projections. The methodological approach relies on an integrated framework combining diachronic analysis of Landsat satellite imagery (1973-2024), processed using the DSAS tool (EPR and LRR indicators), standardized granulometric characterization (NF EN 12620) at representative sites (Mbour, Djiffer, Bétenty), and the use of bathymetric and topographic datasets including Hallermeier's depth of closure. It also incorporates AR6/SSP scenarios of sea-level rise, along with surveys and field interviews. The findings reveal a dominant regional trend of erosion, with an average shoreline retreat rate of -1.69 m/yr and extreme values reaching -11.6 m/yr along highly exposed segments (between Mbour and Pointe Sarène, Palmarin, Djiffer, Niodior, Bétenty). Conversely, localized accretion zones persist, particularly within active mangrove systems, with a mean progradation rate of about 1 m/yr. Most beaches consist of fine to medium sands, while localized enrichment in coarser fractions at depth reflects energetic hydrodynamic conditions. Projections for 2055, 2075, and 2100, based on a hybrid framework integrating LRR trends, sea-level rise, and hydrodynamic controls, confirm the continuation of shoreline retreat and enable the production of exposure maps with uncertainty intervals that support the prioritization of management actions. From environmental and socio-economic perspectives, coastal erosion results in beach narrowing, degradation of dunes and coastal vegetation, increased salinization, and damages to habitats, infrastructure, and key local activities (artisanal fishing, tourism, coastal agriculture). Analysis of adaptation strategies shows that public interventions are generally perceived as more effective than individual initiatives, despite their heterogeneity and occasional risk-transfer effects. In response, the dissertation proposes an adaptation pathway that combines nature-based solutions, low-impact flexible structures, enforceable setback zones, and inter-municipal governance supported by a structured monitoring-evaluation system. Methodological limitations, particularly uncertainties in trend estimates and gaps in bathymetric and wave data, underscore the need for instrumented monitoring to improve diagnostics and guide sustainable coastal planning.

Keywords: Coastline, Evolution, Morpho-dynamics, Shoreline, Kinematics, Petite-Côte, Saloum Delta, Senegal.

Liste des sigles et acronymes

Sigle	Signification
ANSD	Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (Sénégal)
APIX	Agence pour la Promotion des Investissements et des Grands Travaux (APIX SA, Sénégal)
AR6	Sixième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, AR6)
ASPT	Agence Sénégalaise de Promotion Touristique
CEDEAO	Communauté Économique des États de l'Afrique de l'Ouest
COI	Commission océanographique intergouvernementale (UNESCO)
CSE	Centre de Suivi Écologique (Sénégal)
DEEC	Direction de l'Environnement et des Établissements Classés (Sénégal)
DSAS	Digital Shoreline Analysis System (Outil d'analyse du trait de côte)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme)
ECOWAS	Economic Community of West African States (CEDEAO)
EPR	End Point Rate (Taux d'évolution par points extrêmes)
EPSG	European Petroleum Survey Group (Codes de systèmes de coordonnées)
ERA5	Réanalyse météorologique de 5 ^e génération du ECMWF
ETM	Enhanced Thematic Mapper (Capteur Landsat)
GeoTIFF	Tagged Image File Format géoréférencé (Format raster)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC)
GIZC	Gestion intégrée des zones côtières
GPKG	GeoPackage (Format de base de données géospatiales)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (GIEC)
IVC	Indice de Vulnérabilité Côtière
KML	Keyhole Markup Language (Format de données géographiques)
KMZ	KML zippé (Format compressé)
KPI	Key Performance Indicator (Indicateur clé de performance)
LRR	Linear Regression Rate (Taux d'évolution par régression linéaire)
MNT	Modèle numérique de terrain
MOLOA	Mission d'Observation du Littoral Ouest-Africain
MSS	Multispectral Scanner (Capteur Landsat 1-3)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation)
NDWI	Normalized Difference Water Index (Indice d'eau)
NF EN 12620	Norme européenne « Granulats pour béton »
ODD	Objectifs de Développement Durable (ONU)
OLI	Operational Land Imager (Capteur Landsat 8-9)
ONL	Observatoire national du littoral (Sénégal)
ORLOA	Observatoire Régional du Littoral Ouest-Africain
PAP	Plan d'Actions Prioritaires
PAP-3	Plan d'Actions Prioritaires - phase 3 (PSE 2024-2028)
PAU	Plan d'Aménagement et d'Urbanisme
PCA	Plan de Continuité d'Activité
PNA	Plan national d'adaptation
PNA-ZC	Plan national d'adaptation - Secteur des zones côtières
PNACC	Plan national d'adaptation au changement climatique
PSE	Plan Sénégal Émergent

PU	Plan d'Urbanisme
ROI	Region Of Interest (Région d'intérêt)
SAPCO	Société d'Aménagement et de Promotion des Côtes et Zones Touristiques du Sénégal
SAR	Synthetic Aperture Radar (Radar à ouverture synthétique)
SCOT	Schéma de cohérence territoriale
SHP	Shapefile (Format vectoriel ESRI)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission (Modèle altimétrique)
SSP	Shared Socioeconomic Pathways (Scénarios socio-économiques partagés)
TIFF	Tagged Image File Format (Format raster)
TIRS	Thermal Infrared Sensor (Capteur Landsat 8-9)
TM	Thematic Mapper (Capteur Landsat 4-5)
UEMOA	Union Économique et Monétaire Ouest-Africaine
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator (Projection cartographique)
WACA	West Africa Coastal Areas (Programme de gestion du littoral ouest-africain)
WW3	WaveWatch III (Modèle de houle)

Introduction générale

Les travaux de recherche consacrés à l'évolution des littoraux au cours des quatre dernières décennies mettent en évidence une tendance généralisée au recul du trait de côte à l'échelle mondiale. Dès les années 1980, Paskoff (1981) et Bird (1985) soulignaient que les littoraux meubles en accrétion constituaient des situations exceptionnelles, la dynamique dominante étant celle de l'érosion côtière. Bird (1985) estimait ainsi que le taux moyen de recul du trait de côte se situait entre 1 et 4 m/an à l'échelle globale. Les études ultérieures confirment cette tendance, notamment celles de Niang-Diop (1995), Faye (2010), Sy (2013) et Thior (2020), qui montrent que les zones côtières sénégalaises et ouest-africaines sont majoritairement affectées par des processus érosifs. Cette dynamique revêt ainsi un caractère planétaire, bien que son intensité et ses modalités varient selon les contextes géographiques, géomorphologiques et environnementaux. Elle est, par ailleurs, amplifiée par la variabilité climatique et le changement global, en particulier par l'élévation du niveau moyen de la mer, comme l'indique le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2019). Les vitesses d'avancée marine présentent toutefois de fortes disparités spatiales, les littoraux constitués de formations meubles étant généralement plus vulnérables à l'érosion que ceux composés de matériaux plus résistants (Bowen *et al.*, 1996 ; Stefan *et al.*, 2017).

La dynamique régressive des littoraux représente aujourd'hui un enjeu majeur pour les sociétés humaines, dans la mesure où plus de la moitié de la population mondiale réside dans les zones côtières. Au-delà de leur fonction résidentielle, ces espaces concentrent des enjeux environnementaux, économiques et sociaux particulièrement complexes. La superposition des facteurs naturels et anthropiques, exacerbée par les changements globaux, accroît significativement la vulnérabilité des systèmes côtiers face à l'avancée de la mer. L'urbanisation rapide, le développement des infrastructures et la croissance démographique contribuent à fragiliser des milieux déjà instables. Plusieurs études, notamment celles de Ndiaye-Dia (2016) et Thior (2020), montrent que cette dynamique se traduit à la fois par une dégradation des écosystèmes côtiers (réduction des plages, salinisation des sols, disparition de la végétation littorale) et par des implications socio-économiques majeurs, tels que la perte d'activités, la destruction d'infrastructures et l'effondrement d'habitations.

À l'échelle régionale, la façade ouest-africaine, longue d'environ 4 400 km, est globalement marquée par une tendance au recul du trait de côte, avec des taux estimés entre 1 et 6 m/an sur les secteurs sableux (Ibe et Quelennec, 1987 ; Faye, 2010 ; Jonah *et al.*, 2016). Néanmoins,

certaines systèmes estuariens, notamment entre le Sénégal et la Guinée-Bissau, présentent localement des dynamiques d'accrétion, illustrant la forte variabilité spatio-temporelle des processus morphodynamiques côtiers dans la région. Selon les données d'urbanisation de l'OCDE (2016), une proportion significative de la population urbaine de l'Afrique de l'Ouest est concentrée sur le littoral (jusqu'à 78 % dans certains pays), et les villes côtières ont connu une expansion rapide de leurs superficies urbaines ces dernières décennies, reflétant une littoralisation marquée des dynamiques démographiques et socio-économiques dans la région. Cette forte concentration humaine et économique accentue la vulnérabilité des littoraux ouest-africains face à l'érosion marine, exposant directement les agglomérations, les infrastructures et les systèmes productifs à l'avancée de la mer.

La côte sénégalaise, longue de plus de 700 km, illustre particulièrement ces dynamiques. Elle présente des conditions naturelles favorables aux activités socio-économiques, ce qui explique la forte littoralisation observée au cours des dernières décennies. Cet espace constitue à la fois un territoire attractif soumis à des pressions anthropiques croissantes et un milieu abritant un patrimoine environnemental riche mais fragile (Ndaw, 2012). La concentration des activités et des grands pôles d'habitat sur le littoral sénégalais engendre des déséquilibres environnementaux qui renforcent la vulnérabilité de la côte face à l'érosion marine. L'évolution récente du littoral sénégalais (Niang-Diop, 1995 ; Diaw, 1997 ; Faye, 2010 ; Ndour *et al.*, 2018 ; Thior, 2020) est ainsi dominée par une dynamique régressive, favorisée par une topographie basse et une fragilité morphologique marquée. Le littoral est soumis à l'action combinée des agents hydrodynamiques (houle, courants marins, dérive littorale, vagues, vents) et à une pression anthropique intense liée aux activités socio-économiques, aux infrastructures et aux habitations implantées en bordure de mer. Les implications de cette dynamique se manifestent par l'avancée de la mer, la salinisation des terres agricoles, les inondations, l'ensablement des berges et la dégradation de la végétation littorale. Toutefois, l'intensité et les formes de l'érosion varient selon la nature des côtes (rocheuses, vaseuses ou sableuses), les côtes sableuses, telles que celles de la Petite-Côte sénégalaise, étant particulièrement exposées à ces processus.

La Petite-Côte sénégalaise et le delta du Saloum s'étendent sur une longueur d'environ 145 km et une profondeur comprise entre 2 et 10 km à partir du rivage (Ndiaye-Dia, 2016). Du point de vue géomorphologique, elle constitue un espace de transition particulièrement sensible, situé à l'interface des milieux terrestre et marin, dont les dynamiques sont étroitement imbriquées (Diop, 1990). Sa vulnérabilité est renforcée par sa position géographique, qui favorise le

piégeage des sédiments transportés par la dérive littorale nord-sud, notamment au niveau des canyons sous-marins de Dakar et de Kayar (Diaw, 1997).

Le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, est caractérisé par de longues plages sableuses bordées par un cordon littoral de faible largeur, ce qui accroît sa sensibilité aux forçages hydrodynamiques. Elle est soumise principalement aux houles de secteur nord-ouest, dont l'énergie est atténuée par les phénomènes de réfraction et de diffraction induits par la presqu'île du Cap-Vert. Elle subit également l'influence des houles de secteur sud-ouest et australe, qui participent aux processus de redistribution sédimentaire à l'approche de la côte. Par ailleurs, ce littoral présente une succession de caps et de baies dont l'organisation spatiale est largement contrôlée par les structures tectoniques régionales (Niang-Diop, 1995). L'ensemble de ces caractéristiques géomorphologiques, combinées aux changements environnementaux récents et à une pression anthropique croissante, renforce la fragilité de cette côte face à l'avancée de la mer.

Cette portion du littoral sénégalais est en effet soumise à une intense pression anthropique, matérialisée par l'expansion rapide des constructions, l'urbanisation littorale et le développement d'activités socio-économiques. De la Petite-Côte au delta du Saloum, le littoral se distingue par une forte attractivité liée à l'abondance de ses ressources physiques (ressources halieutiques, plages sableuses, potentialités énergétiques, hydrauliques et agricoles) et socio-économiques (tourisme, pêche, agriculture, commerce, artisanat, exploitation du sel). Cette attractivité se traduit par une forte littoralisation, caractérisée par l'implantation d'infrastructures souvent exposées aux agressions marines.

La dynamique du littoral sénégalais a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment celles de Niang-Diop (1995), Diaw (1997), Faye (2010), Ndiaye-Dia (2016) et Thior (2020), qui ont analysé les processus morfo-sédimentaires et les facteurs de vulnérabilité à partir d'approches combinant analyses granulométriques, modèles numériques de terrain et traitements d'images satellitaires. Ces travaux convergent vers le constat d'une tendance générale à la régression du trait de côte, avec des taux de recul estimés entre 1 et 4 m/an selon les secteurs. Les facteurs explicatifs relèvent à la fois des conditions hydrodynamiques (houles, courants, marées), de la variabilité climatique et de la pression anthropique liée à l'urbanisation, aux aménagements touristiques et aux infrastructures côtières.

Cette dynamique régressive constitue une menace majeure pour les écosystèmes littoraux et les activités socio-économiques, notamment dans les zones à sédiments meubles et à forte densité de mangroves, comme celles observées aux abords des bolongs du delta du Saloum. De la

Petite-Côte au delta du Sine-Saloum, le littoral sénégalais concentre plusieurs grandes agglomérations et abrite une diversité d'activités économiques, parmi lesquelles le tourisme, la pêche, l'agriculture et l'exploitation du sel occupent une place prépondérante. Le tourisme représente un pilier de l'économie nationale, constituant la deuxième source de devises du pays et contribuant à environ 7 % du PIB national (ANSD, 2020 ; Ministère du Tourisme et de l'Aviation civile, 2020). Cette importance explique la volonté des autorités publiques de faire du secteur touristique un levier stratégique de développement et de création d'emplois sur la Petite-Côte. La pêche occupe également un rôle majeur, avec une contribution estimée à 2,3 % du PIB national (ANSD, 2019), tandis que, dans le delta du Saloum, l'agriculture demeure la principale activité génératrice de revenus, représentant environ 9,4 % du PIB national (ANSD, 2019).

L'ensemble de ces activités, tout comme l'environnement physique de la zone, est fortement menacé par l'érosion marine. Celle-ci correspond à un processus naturel d'évolution de la surface terrestre, résultant du déplacement des sédiments sous l'action des vagues, et plus largement d'un déficit sédimentaire. Ce déficit, amorcé à la fin de la transgression postglaciaire, s'est accentué à l'époque contemporaine sous l'effet des activités anthropiques, notamment la construction de barrages fluviaux, l'artificialisation des côtes et la déforestation (Boudjéra, 2010). Selon Brunet *et al.* (2005), l'érosion résulte de l'enlèvement de matériaux par divers agents naturels, incluant les eaux courantes, les glaciers, les vents, la mer, ainsi que les mouvements de terrain. Dans cette perspective, l'érosion côtière constitue une réalité avérée sur la Petite-Côte sénégalaise et dans le delta du Saloum, avec des implications significatives sur les milieux naturels et les activités humaines.

L'intérêt de la présente étude réside dans l'analyse approfondie de la dynamique morpho-sédimentaire du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum, ainsi que dans l'évaluation de ses implications environnementaux et socio-économiques. Elle vise également à proposer des perspectives d'aménagement adaptées, en vue d'une gestion durable et intégrée de cet espace côtier. Dans un contexte de variabilité climatique et de changements globaux, plusieurs interrogations structurent cette réflexion : comment se manifestent les tendances spatio-temporelles actuelles de la dynamique morpho-sédimentaire sur ce littoral ? Quels sont les processus dominants d'érosion, de transport et de dépôt sédimentaire ? Quelle est la part respective des facteurs naturels (houle, marée, courants, topographie) et anthropiques (urbanisation, infrastructures, dragages) dans la mobilité du trait de côte ? Quels apports les outils d'analyse spatiale offrent-ils pour le suivi de cette dynamique ? Enfin, quelles stratégies

d'aménagement peuvent être envisagées pour une gestion durable du littoral au regard des dynamiques observées ?

- **Justification du choix du thème**

Le choix de cette thématique se justifie par la forte vulnérabilité du littoral de la Petite-Côte sénégalaise, s'étendant de Saly Portudal au delta du Saloum, face aux agents hydrodynamiques en raison de sa position géographique et de ses caractéristiques morphologiques. Ce littoral, majoritairement sableux et support d'importantes activités socio-économiques, est soumis à une dynamique côtière active, résultant de l'interaction entre les forçages naturels (houles, courants, marées) et les pressions anthropiques croissantes, dans un contexte marqué par le changement climatique. Les manifestations de cette dynamique, notamment l'érosion côtière et la mobilité accrue du trait de côte, soulèvent des enjeux environnementaux et socio-économiques majeurs.

Dans ce contexte, l'analyse de la cinématique du trait de côte à l'aide des outils de la géomatique apparaît indispensable pour caractériser les rythmes et les modalités de l'évolution littorale. Comprendre les implications locales du changement climatique et les mécanismes de l'érosion côtière constitue un préalable essentiel à une meilleure documentation scientifique de cette problématique, en vue de promouvoir une gestion préventive, intégrée et durable d'un environnement à la fois écologiquement fragile et économiquement stratégique. Cette réflexion scientifique a ainsi motivé le choix de cette thématique de recherche.

Ce travail s'inscrit par ailleurs dans la continuité de nos recherches antérieures, notamment celles menées dans le cadre de notre mémoire portant sur une portion du littoral de la Petite-Côte sénégalaise, plus précisément dans les communes de Mbour et de Saly Portudal.

Objectifs de la recherche

L'objectif général de cette thèse est d'analyser les processus morphodynamiques du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum, ainsi que leurs implications environnementales et socio-économiques, dans une perspective d'aménagement durable du littoral sénégalais.

De manière spécifique, il s'agit de :

- ✓ caractériser les aspects morphodynamiques du littoral sénégalais de la Petite-Côte au delta du Saloum ;
- ✓ quantifier l'évolution spatio-temporelle du trait de côte à travers l'analyse de sa cinématique sur la période 1973-2024 ;
- ✓ analyser les implications environnementaux et socio-économiques des processus d'érosion et d'accrétion sur les populations et les activités côtières ;

- ✓ discuter des stratégies de protection et les perspectives d'aménagement en vue d'une gestion durable de ce littoral, au regard de sa dynamique actuelle.

Hypothèses de recherche

L'hypothèse générale postule que les interactions entre les facteurs naturels (hydrodynamique, morphosédimentologie, climat) et les pressions anthropiques contrôlent les dynamiques d'évolution du trait de côte entre la Petite-Côte et le delta du Saloum et influencent différemment la vulnérabilité des territoires littoraux.

Cette hypothèse générale se décline en hypothèses spécifiques :

- ✓ la dynamique littorale de la zone d'étude est principalement contrôlée par des facteurs naturels, mais elle est significativement amplifiée par les interventions anthropiques ;
- ✓ l'évolution récente du littoral est étroitement liée à l'avancée de la mer dans un contexte de variabilité climatique et de changement climatique global ;
- ✓ les implications environnementales et socio-économiques induites par cette dynamique sont importantes et perturbent le fonctionnement des écosystèmes côtiers ainsi que les activités humaines qui y sont associées ;
- ✓ la mise en œuvre de stratégies d'aménagement adaptées permettrait d'atténuer les effets de l'érosion et de favoriser une gestion durable de ce littoral en mutation.

Thèse défendue

À l'instar de nombreuses façades littorales à l'échelle mondiale, le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, dispose d'importantes potentialités socio-économiques, qui expliquent son attractivité et sa forte occupation humaine. La thèse défendue repose sur le postulat selon lequel une gestion durable de ce littoral, à forte valeur écologique et économique, est devenue indispensable face à l'intensification des processus d'érosion côtière. Sa vulnérabilité résulte de facteurs naturels intrinsèques, mais elle est largement exacerbée par une pression anthropique croissante. L'interaction de ces facteurs avec les effets du changement climatique accentue la sensibilité bioécologique et socio-économique de cette portion du littoral sénégalais.

Ainsi, cette thèse soutient que la vulnérabilité du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum découle de l'interaction complexe entre les caractéristiques physiques (particulièrement les transformations induites par le changement climatique) et les pressions anthropiques liées aux activités humaines. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de définir et de proposer des

perspectives d'aménagement adaptées, fondées sur une connaissance approfondie des dynamiques côtières, afin de promouvoir une gestion durable et résiliente de ce littoral.

Organisation de la thèse

Pour répondre aux objectifs définis, le manuscrit est structuré en trois parties.

La première partie, intitulée *Cadre théorique et fondements scientifiques*, comprend le chapitre I, consacré au cadre théorique, au contexte général et à la présentation de l'aire d'étude, et le chapitre II, qui détaille la démarche méthodologique, les sources de données, les protocoles d'analyse et les limites de l'étude.

La deuxième partie, *Caractéristiques morphodynamiques, cinématique du trait de côte et projections*, regroupe le chapitre III, dédié aux caractéristiques morphodynamiques et granulométriques du littoral, le chapitre IV, qui analyse et quantifie la cinématique du trait de côte, et le chapitre V, consacré aux projections des positions futures du trait de côte aux horizons 2055, 2085 et 2100.

La troisième partie, *Implications environnementales, socio-économiques et stratégies d'adaptation*, comprend le chapitre VI, qui analyse les implications environnementales et socio-économiques de la dynamique littorale, le chapitre VII, consacré à l'analyse des stratégies d'adaptation existantes, et le chapitre VIII, qui propose des perspectives pour une gestion durable du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum.

Première partie : Cadre théorique et fondements scientifiques

L'érosion côtière constitue une problématique d'envergure mondiale, affectant l'ensemble des littoraux, bien que ses formes, son intensité et ses mécanismes varient selon les contextes géologiques, géomorphologiques et climatiques propres à chaque région. Cette thématique a fait l'objet de nombreux travaux scientifiques, mobilisant des approches méthodologiques pluridisciplinaires et adaptées aux objectifs spécifiques des études menées. Les processus d'érosion côtière résultent principalement des caractéristiques lithologiques et morphodynamiques des zones littorales, ainsi que de l'action de facteurs naturels tels que les houles, les courants, les marées et la variabilité climatique. Toutefois, ces processus sont aujourd'hui largement amplifiés par les activités anthropiques, qui contribuent à accélérer la dégradation des milieux côtiers et à perturber leur équilibre sédimentaire.

L'objectif de cette section est, dans un premier temps, de retracer l'évolution des connaissances relatives à l'érosion côtière à travers une analyse critique des principales études réalisées à différentes échelles spatiales, depuis le contexte global jusqu'aux études régionales. Dans un second temps, elle vise à caractériser les spécificités géologiques, géomorphologiques et socio-économiques du littoral sénégalais, en particulier sur le segment compris entre la Petite-Côte et le delta du Saloum. Enfin, cette section s'attache à détailler la méthodologie de recherche adoptée pour aboutir aux résultats présentés dans ce travail.

Chapitre I : Cadre théorique et présentation de la zone d'étude

Ce chapitre a pour objectif principal de présenter la problématique de l'érosion côtière à travers une revue critique de la littérature scientifique. Il s'agit, dans un premier temps, d'examiner et d'analyser les principaux travaux publiés sur ce thème, ainsi que les questions et enjeux qui y sont associés. Un état des lieux est ensuite dressé, accompagné d'une analyse critique et d'une discussion approfondie des concepts clés. Cette discussion s'appuie sur la comparaison des différentes définitions et approches proposées par divers auteurs, tout en intégrant notre positionnement scientifique, afin de clarifier et de structurer l'argumentaire développé dans cette recherche. Enfin, le chapitre se conclue par une présentation succincte de la zone d'étude, en mettant en évidence les éléments contextuels pertinents pour la compréhension de la dynamique littorale examinée.

1. Cadre conceptuel et opératoire

1.1. État de l'art

La problématique de l'érosion côtière constitue aujourd'hui un enjeu majeur des recherches en géomorphologie littorale et en sciences de l'environnement. Elle suscite un intérêt scientifique croissant en raison de l'intensification du phénomène sous l'effet combiné de la variabilité climatique et des pressions anthropiques. À cet égard, de nombreux travaux ont été menés à différentes échelles spatiales, donnant lieu à une production scientifique abondante. La zone d'étude considérée s'inscrit pleinement dans cette dynamique et a fait l'objet de plusieurs analyses mettant en évidence la vulnérabilité du littoral sénégalais.

Dans son étude intitulée *État de l'érosion côtière au Sénégal*, Sissoko (2001) souligne le caractère généralisé et préoccupant de l'érosion le long de l'ensemble du littoral sénégalais. L'auteur met en évidence le rôle conjoint des facteurs naturels, tels que l'intensité et la fréquence des houles, l'élévation du niveau marin et le déficit sédimentaire, et des facteurs anthropiques, notamment le prélèvement de sable marin, l'implantation anarchique d'infrastructures sur les plages, la construction d'ouvrages perpendiculaires à la côte perturbant les transits sédimentaires, ainsi que les rejets d'eaux usées contribuant à la dégradation du substrat littoral. L'étude montre également que l'érosion côtière engendre des impacts environnementaux et socio-économiques majeurs, parmi lesquels la destruction d'infrastructures et d'habitats, l'ensablement des chenaux d'accès, la formation de bancs sableux, l'enclavement de certaines îles (Djiffer et Dionewar, par exemple), la dégradation des formations végétales côtières telles que les filaos (Langue de Barbarie et Grande Côte), ainsi

que la rupture de la flèche sableuse de Sangomar. Enfin, Sissoko met en évidence les limites des stratégies de gestion mises en œuvre, dont l'efficacité demeure insuffisante face à l'ampleur du phénomène.

De son côté, Adjoussi (2001), dans son mémoire de DEA intitulé *Impacts du prélèvement du sable marin sur l'évolution du trait de côte à Yoff : essai d'étude de vulnérabilité (Presqu'île du Cap-Vert, Sénégal)*, analyse les effets directs du prélèvement de sable marin sur la dynamique du trait de côte. S'appuyant sur une approche méthodologique combinant des levés topo-bathymétriques, des analyses granulométriques et l'exploitation de photographies aériennes, l'auteur démontre que cette pratique constitue un facteur déterminant du recul du littoral à Yoff. Il souligne par ailleurs que le sable extrait alimente principalement les chantiers de construction, générant des revenus importants pour les acteurs impliqués dans cette activité. Face à cette situation, Adjoussi propose, en complément des savoirs et pratiques endogènes développés par les populations locales, des alternatives telles que l'utilisation de matériaux de substitution (dunes continentales et briques cuites), afin de réduire la pression exercée sur le sable marin. Il préconise également la mise en place d'un cadre réglementaire renforcé, fondé sur des lois, des règles et une planification intégrée, en vue d'assurer une gestion durable et rationnelle du littoral.

Dans sa thèse intitulée *Dynamiques sédimentaires et risques actuels dans l'axe Saint-Louis-Gandiol, littoral nord du Sénégal*, Sy (2013) analyse en profondeur les mécanismes contrôlant la dynamique du littoral de Saint-Louis. L'auteur met en évidence le rôle combiné des facteurs naturels et anthropiques dans l'évolution morphodynamique de ce secteur côtier. Parmi les facteurs naturels identifiés figurent les variations morpho-sédimentaires des plages, les caractéristiques granulométriques des sédiments, dominées par l'action des houles, ainsi que les processus de transfert sédimentaire assurés par les vagues, les houles et la dérive littorale, favorisés par le caractère essentiellement sableux de la côte. Sy souligne également l'influence déterminante de la morphologie des falaises dans le contrôle de cette dynamique. Par ailleurs, l'anthropisation croissante du littoral Saint-Louis-Gandiol, notamment à travers l'urbanisation et le prélèvement de sable marin, constitue un facteur aggravant de l'instabilité côtière. L'auteur démontre enfin que cette dynamique littorale exerce des effets négatifs significatifs sur les activités socio-économiques, qui constituent le socle de l'économie locale, et souligne l'inefficacité des stratégies d'adaptation mises en œuvre. À cet égard, il propose un modèle d'aménagement susceptible de renforcer la protection et la résilience de ce littoral.

Dans sa thèse intitulée *Littoral sénégalais : dynamique actuelle du milieu, modélisation et approche de la gestion des risques liés au changement climatique (de Joal à Palmarin, Petite-Côte, Sénégal)*, Diadiou (2016) met en évidence l'intensité et l'hétérogénéité spatiale de la dynamique littorale sur le tronçon Joal-Palmarin. À partir d'une méthodologie combinant l'interprétation de photographies aériennes, l'analyse d'images satellitaires et des levés topographiques par GPS, l'auteur montre qu'entre 1989 et 2013, le trait de côte a connu des évolutions contrastées, avec des taux variant de -4,42 à +1 m/an. Cette variabilité traduit une alternance de phases d'érosion et d'accrétion selon les secteurs considérés. Diadiou attribue cette dynamique, entre autres, aux effets des changements globaux, en particulier à l'élévation du niveau marin, qu'il identifie comme une cause majeure des processus d'érosion, des inondations saisonnières et de la salinisation des sols et des nappes phréatiques. Ces phénomènes sont renforcés par la pression anthropique, notamment l'occupation anarchique du littoral. En réponse, l'auteur préconise une approche de gestion intégrée fondée sur la prise en compte conjointe des dimensions biophysiques, économiques et démographiques, ainsi que sur une régulation concertée impliquant l'ensemble des acteurs du littoral.

Dans sa thèse intitulée *Dynamique, vulnérabilité socio-économique et gouvernance des littoraux de Saly Portudal et de la Langue de Barbarie au Sénégal*, Ndiaye-Dia (2016) analyse les déterminants physiques, socio-économiques et institutionnels de la dynamique côtière dans ces deux sites contrastés. Elle démontre que la dynamique littorale est principalement gouvernée par les agents hydrodynamiques et hydro-climatiques, tels que les houles, les courants marins, les vagues, la dérive littorale et les vents. Les analyses granulométriques révèlent une prédominance de sédiments fins à Saly Portudal et de sédiments moyens à la Langue de Barbarie, ce qui confère, selon l'auteure, une vulnérabilité accrue au littoral de Saly. En outre, la position géographique différenciée de ces sites explique leurs contrastes saisonniers : Saly Portudal, située sur la Petite-Côte, est davantage exposée aux processus érosifs durant la saison des pluies, tandis que la Langue de Barbarie, sur la Grande Côte, subit une érosion plus marquée en saison sèche sous l'influence des houles nord issues de l'anticyclone des Açores. Ces facteurs naturels sont amplifiés par une forte pression anthropique, caractérisée par une littoralisation intensive, la densification du bâti et le développement des infrastructures de pêche et de tourisme. À travers une analyse diachronique du trait de côte fondée sur des données géospatiales (photographies aériennes et images satellitaires), Ndiaye-Dia met en évidence un recul plus marqué à Saly Portudal (-0,58 m/an entre 1954 et 2006) que sur la Langue de Barbarie (-0,22 m/an entre 1968 et 2010). Elle conclut que cette dynamique exerce des impacts

environnementaux et socio-économiques significatifs, tandis que les stratégies d'adaptation, tant locales que nationales, présentent des résultats contrastés, justifiant la nécessité de perspectives de gouvernance renforcées.

Dans le rapport conjoint de la GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) et de l'État du Sénégal, à travers le Ministère de l'Environnement et du Développement durable (MEDD), intitulé *État des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière au Sénégal* (2018), dresse un bilan synthétique de la vulnérabilité du littoral sénégalais face à l'élévation du niveau marin. Fondé exclusivement sur une revue approfondie de la littérature scientifique, ce rapport montre que le littoral sénégalais est globalement marqué par une tendance au recul du trait de côte. Les auteurs identifient des facteurs naturels majeurs, tels que le déficit du transit sédimentaire, la variabilité des conditions hydrométéorologiques (tempêtes, précipitations) et l'élévation du niveau de la mer. Toutefois, ils soulignent que les actions anthropiques, notamment la forte littoralisation, les aménagements côtiers intensifs, la destruction des cordons dunaires et la perturbation des transits sédimentaires, constituent des facteurs accélérateurs de l'érosion côtière. Le rapport met également en évidence les conséquences environnementales (dysfonctionnements des écosystèmes côtiers, réduction des plages, pertes de terres agricoles, salinisation et contamination des nappes phréatiques) et socio-économiques (destruction d'infrastructures et fragilisation des activités littorales) de cette dynamique régressive.

Dans sa thèse intitulée *Dynamique du littoral de la Casamance : caractéristiques morphodynamiques, changements environnementaux et impacts socio-économiques*, Thior (2020) analyse l'évolution du littoral casamançais à partir d'une méthodologie intégrée combinant les outils d'analyse spatiale (systèmes d'information géographique et télédétection) et des approches géomorphologiques fondées sur des mesures de terrain. L'auteur montre que la dynamique du littoral de la Casamance s'inscrit dans les tendances générales observées à l'échelle du littoral sénégalais et plus largement de l'Afrique de l'Ouest. Il met en évidence le rôle conjoint des facteurs naturels et anthropiques dans l'évolution de la ligne de rivage. Parmi les facteurs naturels, Thior identifie la fréquence et l'intensité des houles et des vagues, l'élévation du niveau marin, les caractéristiques bathymétriques de l'embouchure du fleuve Casamance ainsi que la topographie régionale comme des déterminants majeurs de l'érosion côtière. Les facteurs anthropiques, quant à eux, sont principalement liés au développement des infrastructures touristiques, à l'extraction du sable, à l'exploitation des écosystèmes côtiers, aux

aménagements hydrauliques et à la réalisation d'infrastructures. En perspective, l'auteur souligne que la mise en œuvre de stratégies d'aménagement adaptées et intégrées pourrait favoriser une exploitation durable et résiliente de ce littoral.

Dans le volume 1 de sa thèse intitulée *Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo- interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes*, Faye (2010) analyse la cinématique des littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau, en quantifiant l'érosion et l'accumulation sur plusieurs décennies grâce à une approche diachronique combinant cartes marines, photographies aériennes et imagerie satellitaire. L'auteur établit des indicateurs précis pour définir le trait de côte et prend en compte les marges d'incertitude liées aux capteurs, au géoréférencement et aux marées. À l'échelle régionale, la dynamique côtière est contrastée : les systèmes estuariens montrent une tendance générale à l'accrétion (+15 à +140 m/an), avec des cas spectaculaires comme la Langue de Barbarie (+551 m/an sur 1979-1999), mais seuls 5,5 % du littoral prograde réellement. Localement, les facteurs anthropiques modulent fortement ces évolutions : à Nouakchott, le port provoque accumulation au nord et érosion au sud, tandis qu'à Saint-Louis, l'ouverture d'une brèche en 2003 a accentué l'instabilité. Les secteurs de Bargny et Mbour connaissent un recul quasi continu lié à la pression foncière et touristique. Faye conclut sur la nécessité d'un suivi régulier par observatoires et imagerie haute résolution, offrant une base de données géospatiale essentielle pour la gestion intégrée des littoraux ouest-africains.

En 1995, Niang-Diop s'était inscrite dans cette logique dans sa thèse intitulée *L'érosion côtière sur la Petite Côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque : passé - présent - futur*, en étudiant l'érosion côtière de la Petite Côte sénégalaise, en se concentrant sur Rufisque à travers une triple temporalité : passé, présent et futur. L'auteure combine approches géomorphologiques, sédimentologiques et prospectives, reconstituant l'évolution historique à partir de cartes topographiques et de photographies aériennes, et suivant annuellement dix profils de plage pour identifier les cycles de compensation et d'érosion. La dimension prospective mobilise des analyses vidéo pour évaluer la vulnérabilité des côtes face à l'élévation du niveau marin. Les résultats montrent un recul moyen du trait de côte de 1,30 m/an (1937-1980), causé par un déficit sédimentaire naturel et accentué par les activités humaines (extractions de sable, ouvrages de défense). La presqu'île du Cap Vert bloque les apports de sable, et la protection locale engendre souvent une érosion en aval. La thèse souligne la forte vulnérabilité du littoral sénégalais, due à la faible altitude, aux estuaires et mangroves, et à la

densité des populations et des activités économiques. Niang-Diop conclut sur l'urgence d'une gestion intégrée des zones côtières (GIZC) et la nécessité d'observatoires locaux pour anticiper les risques futurs.

Diop (1990), dans sa thèse intitulée *La côte ouest-africaine du Saloum (Sénégal) à la Mellacorée (Rép. de Guinée)* propose une comparaison des estuaires holocènes tropicaux des « Rivières du Sud », du Saloum à la Mellacorée en Guinée. Cette vaste zone littorale est dominée par les vasières à mangroves, associées aux tannes et aux cordons sableux disposés parallèlement à la côte. La méthodologie combine collecte de données climatiques et hydrologiques, stations de suivi fixes, sondages profonds dans différentes unités géomorphologiques, profils bathymétriques et prélèvements dans les principaux cours d'eau, ainsi qu'une cartographie détaillée réalisée à partir de photographies aériennes et d'images Landsat. Les résultats montrent que la succession d'années sèches a entraîné un recul des limites tidales, l'extension des tannes et une remontée du front salé dans les estuaires septentrionaux, notamment dans le Saloum et la Casamance. Trois régimes hydrologiques sont identifiés selon un gradient latitudinal : sahélien au Nord, tropical au Centre et tropical humide au Sud. Les mesures hydrodynamiques mettent en évidence un modèle d'« estuaire inverse » observable dans plusieurs secteurs. Les sondages révèlent un enfouissement progressif du bassin sédimentaire vers l'Ouest et une néotectonique plus active au Sud, tandis que les analyses sédimentologiques confirment un affinement textural du Nord au Sud. L'étude des groupements végétaux montre leur forte valeur indicatrice et met en évidence une évolution marquée des mangroves sous l'effet combiné des contraintes climatiques et des usages humains traditionnels ou agricoles. La thèse conclut en soulignant la solidité de plusieurs résultats clés (estuaire inverse, dynamique tannes-vasières, variations texturales) tout en appelant à des mesures de suivi plus continues pour affiner certaines interprétations encore provisoires.

Dans leur article intitulé *Changements climatiques, changements du littoral et évolution de la vulnérabilité côtière au fil du temps : comparaison de territoires français, canadien et sénégalais*, Weissenberger *et al.* (2016) mettent en évidence une augmentation significative de la vulnérabilité côtière liée à la proximité des populations avec le rivage, à la nature essentiellement sableuse et meuble du substrat côtier, ainsi qu'à l'accélération des processus d'érosion, en partie attribuée au changement climatique. Les auteurs montrent que cette situation constitue une menace croissante pour les populations littorales, notamment à Joal et à Mbour, deuxième centre de pêche du Sénégal. Dans ces localités, l'érosion côtière entraîne une réduction des espaces de halage et de stationnement des pirogues, générant d'importantes

contraintes logistiques pour la pêche artisanale et fragilisant les moyens de subsistance des communautés locales.

Enfin, dans son article intitulé *Approche géomorphologique pour déterminer le potentiel de franchissement du trait de côte par les vagues de tempête : l'exemple de la Petite-Côte sénégalaise*, Cissé (2023) évalue la vulnérabilité des plages de la Petite-Côte face au risque de submersion marine à partir d'une approche géomorphologique. Cette démarche repose sur la confrontation entre les altitudes maximales atteintes par les vagues de tempête, exprimées par le niveau marin augmenté du run-up maximal ($NM + R_{max}$), et les altitudes du trait de côte ou des ouvrages de protection existants. L'application de cette méthode permet à l'auteur d'identifier les secteurs présentant les niveaux de risque de submersion les plus élevés. Les sites de Sipres, Grand Mbao et Bata apparaissent ainsi comme particulièrement vulnérables, tandis que les secteurs de Petit Mbao et de Diokoul présentent une vulnérabilité plus faible. L'étude démontre en conséquence que les risques de submersion marine sont étroitement dépendants des caractéristiques physiques et morphologiques propres à chaque site.

1.2. Discussion conceptuelle

L'analyse et la discussion conceptuelles constituent une étape fondamentale dans tout travail scientifique, en ce qu'elles permettent de clarifier les notions mobilisées et d'en préciser les cadres d'interprétation. Elles contribuent à une meilleure compréhension de la thématique étudiée, facilitent la lecture du texte et garantissent la cohérence du raisonnement scientifique. Dans le cadre de cette étude, la clarification du concept de littoral et des autres principaux concepts utilisés dans ce travail s'avère indispensable, compte tenu de leur caractère polysémique et des multiples approches disciplinaires auxquelles ils donnent lieu.

Littoral

- ✓ Le concept de littoral : une notion polysémique

Le concept de littoral se caractérise par une grande diversité de définitions, liée à la pluralité des usages, des échelles d'analyse et des préoccupations scientifiques ou opérationnelles. Comme le souligne Miossec (2004), « la définition du littoral dépend de l'usage que l'on entend faire de cet espace », mettant ainsi en évidence le caractère contextuel et évolutif de la notion.

D'un point de vue étymologique, le terme littoral dérive du latin *litus*, signifiant « rivage », et renvoie à la zone de contact entre la mer et la terre (Lacoste, 2003). Toutefois, cette acception demeure restrictive, car elle ne prend pas pleinement en compte la complexité des interactions physiques, biologiques et humaines qui caractérisent cet espace.

Dans une approche géographique classique, De Martonne (1909) définit le domaine littoral comme « l'ensemble des espaces situés au-dessus et au-dessous du niveau moyen des eaux, soumis à l'action des forces responsables du tracé de la côte et de ses transformations ». Cette définition met l'accent sur la dynamique des processus naturels qui façonnent les côtes. Dans une perspective similaire, George et Verger (2013) considèrent le littoral comme « le domaine géographique où se déplace la ligne de contact instantané entre l'atmosphère, la lithosphère et l'hydrosphère », privilégiant ainsi une approche essentiellement physique du littoral, parfois au détriment de sa dimension humaine.

D'autres auteurs proposent des définitions plus descriptives et spatiales. Bailly *et al.* (2005) définissent le littoral comme « une bande de terre qui borde une étendue d'eau marine », tandis que le *Dictionnaire de l'Environnement « Normes »* (2001) le décrit comme « la bande de terre constituant la zone comprise entre une étendue maritime et la terre ferme, le continent ou l'arrière-pays ». Ces définitions soulignent la dimension de transition et d'interface propre au littoral.

Roussel (2007) insiste sur la pluralité des perceptions associées à cet espace en soulignant que le littoral est « une étendue de terres aux acceptions et aux ressentis multiples », variant selon les scientifiques, les gestionnaires, les décideurs et les populations qui y vivent ou l'investissent. Cette diversité d'approches est également illustrée dans le *Rapport Piquard* en France, qui propose une vision plus « géométrique » du littoral, défini comme une ligne de contact mobile entre la terre et la mer, le long de laquelle se concentrent des usages différenciés et souvent concurrents.

✓ Le littoral dans sa dimension physique

Dans une conceptualisation strictement physique, plusieurs auteurs définissent le littoral à partir de critères morphologiques et hydrodynamiques. Pour Akadje (2010), le littoral correspond à « la bande comprise entre le niveau des plus basses mers et celui des plus hautes mers », soit l'espace alternativement couvert et découvert par la mer. Niang (1995) considère le littoral comme une zone d'interaction entre l'hydrosphère, la lithosphère et l'atmosphère, dont la spécificité résulte de la combinaison de ces trois systèmes, pourvoyeurs d'énergie et de sédiments. Dans le même registre, Paskoff (1998) définit le littoral comme l'interface entre la lithosphère et l'hydrodynamisme marin. Ces approches mettent en avant les processus naturels et la dynamique morpho-sédimentaire qui structurent l'espace littoral.

✓ Le littoral dans sa dimension humaine et socio-économique

Au-delà de sa dimension physique, le littoral est également un espace profondément anthropisé. Miossec (2004) distingue ainsi le littoral physique du « littoral d'œkoumène », mettant en évidence l'occupation humaine et les formes d'anthropisation des côtes. Cette anthropisation se manifeste par la diversité des usages et des modes d'exploitation du littoral, qui influencent directement sa dynamique.

Dans cette perspective, Wade (2008) considère l'homme comme un agent morphogénétique à part entière, contribuant activement à la morphodynamique littorale. Selon cet auteur, l'intensification de l'anthropisation engendre des déséquilibres écologiques et accentue la vulnérabilité des milieux côtiers. Fauve (2008) prolonge cette analyse en définissant le littoral d'œkoumène comme un espace de forte concentration des activités économiques, résultant de la croissance urbaine, de l'industrialisation, du développement du tourisme et de l'extension des pratiques agricoles irriguées. Cette dynamique se traduit par une occupation croissante des côtes et une intensification des activités socio-économiques.

Dans la même logique, Ndao (2012) définit le littoral comme une bande côtière constituant un espace géographique privilégié, caractérisé par une forte attractivité socio-économique et par la présence d'un patrimoine environnemental riche, diversifié et particulièrement vulnérable.

✓ Le littoral comme espace institutionnel et réglementé

Enfin, le littoral s'inscrit dans un cadre institutionnel et juridique marqué par la multiplicité des acteurs impliqués : décideurs publics, investisseurs, usagers et populations autochtones. Cette diversité d'intérêts rend nécessaire l'élaboration de dispositifs réglementaires visant à encadrer les usages et à assurer une gestion durable de cet espace à la fois fragile et stratégique. L'exploitation du littoral est ainsi fréquemment source de conflits d'usage, opposant acteurs économiques, autorités publiques et communautés locales. Ces tensions justifient la mise en place de cadres juridiques et institutionnels spécifiques, destinés à concilier protection de l'environnement, développement socio-économique et équité territoriale.

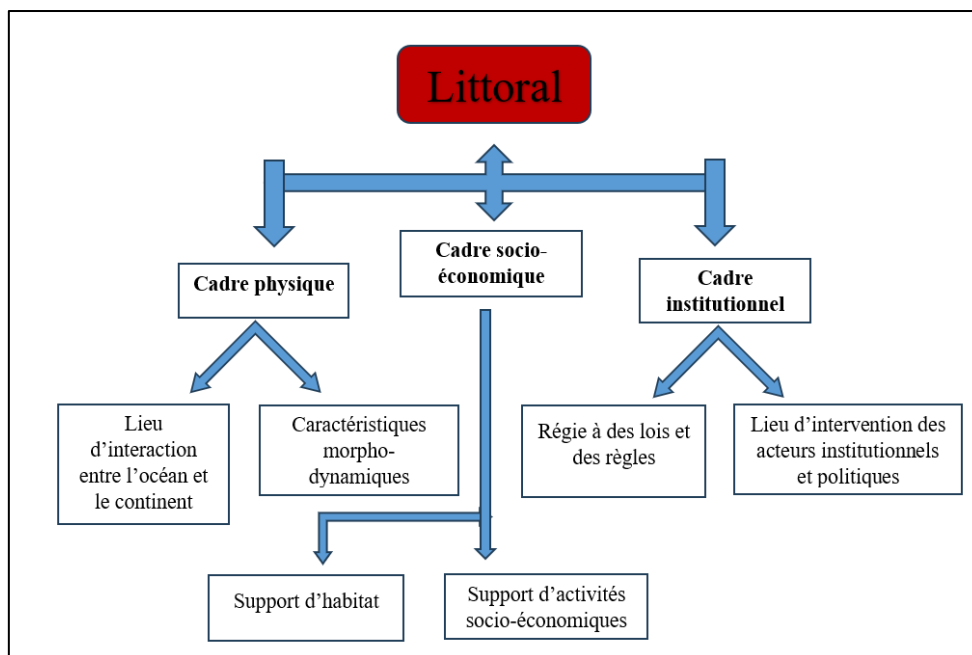


Figure 1 : Schémas d'analyse du concept de littoral

La figure 1 synthétise l'analyse du concept de littoral en mettant en évidence les trois dimensions fondamentales qui le structurent. La première correspond au cadre physique, défini comme un espace d'interface entre les milieux marin et continental, caractérisé par des processus morphodynamiques complexes résultant de l'action conjointe des agents hydrodynamiques, sédimentaires et climatiques. La deuxième renvoie au cadre socio-économique, dans lequel le littoral est envisagé comme un support privilégié d'habitat, d'activités économiques et de fonctions sociales, traduisant son attractivité et son rôle central dans les dynamiques de développement territorial. La troisième dimension concerne le cadre institutionnel et réglementaire, qui fait référence à l'ensemble des règles, normes et dispositifs juridiques encadrant les usages du littoral, ainsi qu'à la pluralité des acteurs intervenant dans sa gestion et son aménagement.

La prise en compte simultanée de ces trois dimensions met en évidence la complexité des enjeux qui caractérisent les zones côtières. Ces enjeux tendent à s'intensifier et à se complexifier davantage sous l'effet des changements globaux, notamment climatiques, et de l'accélération des processus de littoralisation, marqués par une pression anthropique croissante. Dans ce contexte, la difficulté à proposer une définition univoque et exhaustive du concept de littoral justifie l'élargissement de l'analyse à des notions complémentaires, telles que celles de dynamique et de vulnérabilité, afin de mieux appréhender les interactions entre les processus d'évolution du littoral, les pressions qui s'y exercent et les risques qui en découlent.

Dynamique

L'analyse du concept de dynamique constitue un exercice conceptuel délicat, dans la mesure où ce terme ne peut être appréhendé indépendamment de l'objet auquel il est appliqué. Plusieurs auteurs soulignent en effet que la notion de dynamique n'acquiert de sens qu'en relation avec un espace, un système ou un phénomène donné. Dans le cadre de cette thèse, le concept de dynamique est mobilisé pour rendre compte de l'évolution spatio-temporelle des zones côtières de la Petite-Côte sénégalaise.

Selon Lévy et Lussault (2003), la dynamique spatiale renvoie à « toute évolution ou tout changement impliquant une dimension spatiale ». Cette définition met l'accent sur le caractère évolutif des territoires et sur les transformations qui les affectent dans le temps et dans l'espace. De manière complémentaire, le dictionnaire de la géographie *GéoConfluences* définit la dynamique comme un changement ou une évolution et, par extension, comme une capacité à évoluer. Il convient toutefois de souligner que la dynamique ne doit pas être interprétée exclusivement en termes de croissance ou de progrès. Elle peut également traduire des processus de déclin, de régression, de contraction ou de déprise territoriale.

L'intérêt de la prise en compte des dynamiques dans l'analyse géographique réside précisément dans la possibilité de dépasser une approche strictement descriptive et statique des territoires. Toute situation géographique actuelle résulte en effet d'héritages passés et porte en elle les germes de transformations futures, dont certaines peuvent être anticipées à travers des analyses prospectives et des scénarios d'évolution.

Dans cette perspective, la dynamique littorale peut être définie comme l'ensemble des changements et des évolutions observables affectant le domaine littoral ou côtier. Ces transformations concernent aussi bien les composantes physiques et écologiques des zones côtières que leurs dimensions humaines et socio-économiques. L'analyse de la dynamique d'un espace géographique requiert ainsi une approche intégrant à la fois les dimensions spatiale et temporelle, justifiant le recours à une analyse spatio-temporelle permettant de caractériser l'ampleur, le rythme et la direction des changements observés.

Par ailleurs, parler de dynamique implique nécessairement une réflexion sur les évolutions potentielles à venir, c'est-à-dire sur les tendances futures du territoire étudié, appréhendées à partir de projections et d'hypothèses d'évolution. Dans ce sens, Faucon (2014) définit la dynamique spatiale comme l'ensemble des changements et des évolutions observables sur un territoire au fil du temps, en précisant que ces transformations peuvent être positives, lorsqu'un

territoire renforce son attractivité et ses capacités fonctionnelles, ou négatives, lorsqu'il connaît des processus de marginalisation ou de perte d'attractivité.

Enfin, l'analyse des dynamiques territoriales suppose, en amont, l'identification des moteurs ou facteurs à l'origine de ces transformations. Il s'agit notamment de mettre en évidence les déterminants naturels, socio-économiques et institutionnels qui influencent l'évolution de l'espace étudié. Cette analyse repose sur l'exploitation d'indicateurs pertinents permettant de mesurer la dynamique observée, tels que les échelles spatio-temporelles considérées, les changements morphologiques ou fonctionnels enregistrés, leurs impacts environnementaux et socio-économiques, ainsi que les tendances d'évolution à moyen et long terme.

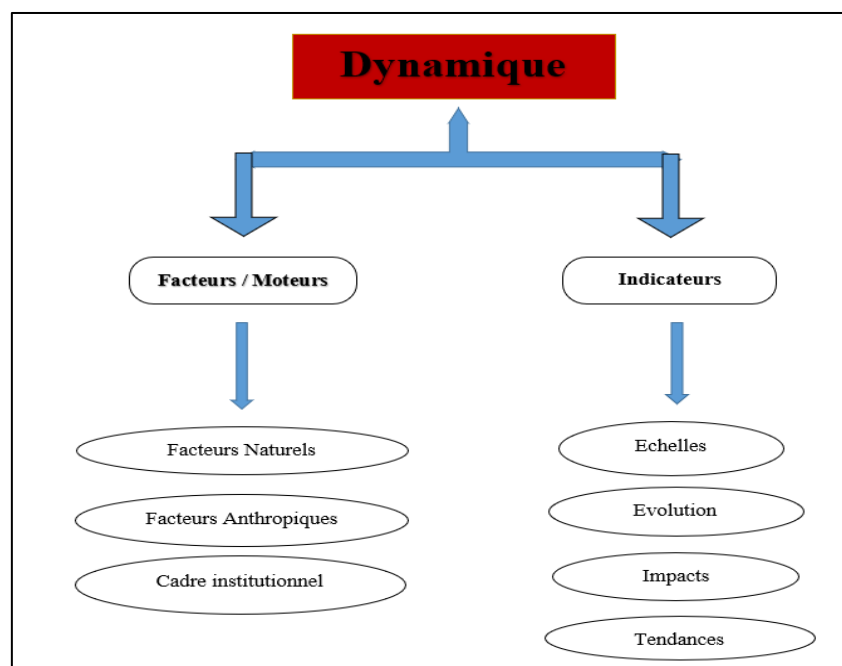


Figure 2 : Schémas d'analyse du concept de dynamique

La figure 2 présente une synthèse analytique du concept de dynamique, en mettant en relation les moteurs ou facteurs explicatifs et les indicateurs mobilisés pour l'analyse de la dynamique de la zone d'étude. Les facteurs à l'origine de la dynamique littorale sont regroupés en trois grandes catégories : les facteurs naturels, liés aux processus hydrodynamiques, climatiques et morphosédimentaires ; les facteurs anthropiques, résultant des usages, des aménagements et des pressions exercées par les activités humaines ; et le cadre institutionnel, qui renvoie aux dispositifs réglementaires, aux politiques publiques et aux modes de gouvernance encadrant la gestion du littoral.

L'évaluation de la dynamique littorale repose sur un ensemble d'indicateurs permettant d'en appréhender les manifestations spatiales et temporelles. Ces indicateurs incluent notamment

l'échelle géographique d'analyse, l'évolution du trait de côte, les implications environnementales et socio-économiques qui en découlent, ainsi que les tendances d'évolution à court, moyen et long terme. L'articulation de ces facteurs et indicateurs offre ainsi un cadre d'analyse intégré permettant de mieux comprendre les mécanismes, les effets et les perspectives d'évolution de la dynamique littorale.

Vulnérabilité

Le concept de vulnérabilité a suscité un intérêt croissant au cours du XX^e siècle, notamment dans les champs de la géographie des risques, des sciences sociales et des sciences de l'environnement. Dès la fin des années 1980, Chambers (1989) propose une définition fondatrice en considérant la vulnérabilité comme un concept fondamentalement probabiliste, qui renvoie à la relation entre un individu ou un système et la possibilité de subir un dommage. Selon cet auteur, la vulnérabilité résulte d'un processus cumulatif associant plusieurs dimensions du risque, à savoir l'exposition à une menace, la probabilité de matérialisation de cette menace et l'insuffisance des capacités de protection ou de réponse face à celle-ci.

Dans ses premières formulations, la vulnérabilité a souvent été appréhendée de manière réductrice comme un simple degré d'exposition au risque. Toutefois, sous l'effet des changements globaux et de la complexification des systèmes socio-environnementaux, cette conception a progressivement évolué. D'Ercole (1994, 1996) souligne ainsi la diversité des définitions de la vulnérabilité et distingue deux grandes approches : une approche sociale, qui appréhende la vulnérabilité comme une propension à l'endommagement, et une approche technique, qui l'envisage comme une mesure de l'endommagement potentiel. Dans cette perspective, D'Ercole *et al.* (1994) définissent la vulnérabilité comme la propension d'une société donnée à subir des dommages lors de la survenue d'un phénomène naturel ou anthropique.

Dans une approche centrée sur les sociétés humaines, Faucon (2014) définit la vulnérabilité comme la fragilité des sociétés face aux catastrophes potentielles, en soulignant le rôle déterminant du niveau de développement économique dans la capacité des sociétés à faire face aux crises. Ainsi, à intensité égale d'un aléa, les impacts peuvent varier significativement selon les ressources disponibles, les structures sociales et les capacités d'organisation collective.

Dans le champ des sciences du climat, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007) propose une définition largement mobilisée, selon laquelle la vulnérabilité correspond au degré auquel un système est sensible aux effets néfastes du

changement climatique, y compris la variabilité climatique et les événements extrêmes. Elle dépend à la fois de la nature, de l'ampleur et du rythme du changement climatique auxquels le système est exposé, de sa sensibilité intrinsèque et de sa capacité d'adaptation. Cette définition met ainsi en évidence que la vulnérabilité ne résulte pas uniquement de l'exposition à un aléa, mais également des capacités adaptatives des systèmes concernés.

Cette double dimension est également soulignée par Veyret et Reghezza (2006), pour qui la vulnérabilité renvoie à la fois aux dommages potentiels et à la probabilité de leur occurrence. Les auteures distinguent ainsi une approche mesurant l'endommagement potentiel des éléments exposés à un aléa et une approche visant à analyser les conditions de l'endommagement, incluant la capacité de réponse et de gestion du risque par les acteurs concernés.

Dans une perspective institutionnelle, les Nations Unies (1997) définissent la vulnérabilité comme un indicateur permettant d'évaluer l'impact potentiel d'une catastrophe sur des groupes sociaux, des infrastructures, des activités, des services ou des espaces géographiques, en tenant compte de leur nature et de leur localisation. Cette approche intègre explicitement les caractéristiques physiques, sociales et économiques des éléments exposés. Par ailleurs, Mordoch (1994) et Moser (1998) mettent l'accent sur la notion de résilience, en soulignant que la vulnérabilité diminue avec l'accroissement des capacités de réaction et d'adaptation face aux événements imprévus, et augmente avec la gravité des impacts subis.

Ainsi, la vulnérabilité d'un système, d'un territoire ou d'une société peut être appréhendée à partir de plusieurs composantes interdépendantes : la nature et l'intensité des aléas, le degré d'exposition et de sensibilité des éléments concernés, ainsi que les capacités d'adaptation, de réponse et de résilience. Dans cette même logique, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC/UNFCCC, 1992) définit la vulnérabilité comme la susceptibilité d'un système naturel ou humain à être affecté négativement par les effets du changement climatique, de la variabilité climatique et des événements extrêmes. Elle implique donc non seulement la capacité à anticiper et à résister aux impacts climatiques, mais également celle de s'y adapter et de s'en remettre durablement.

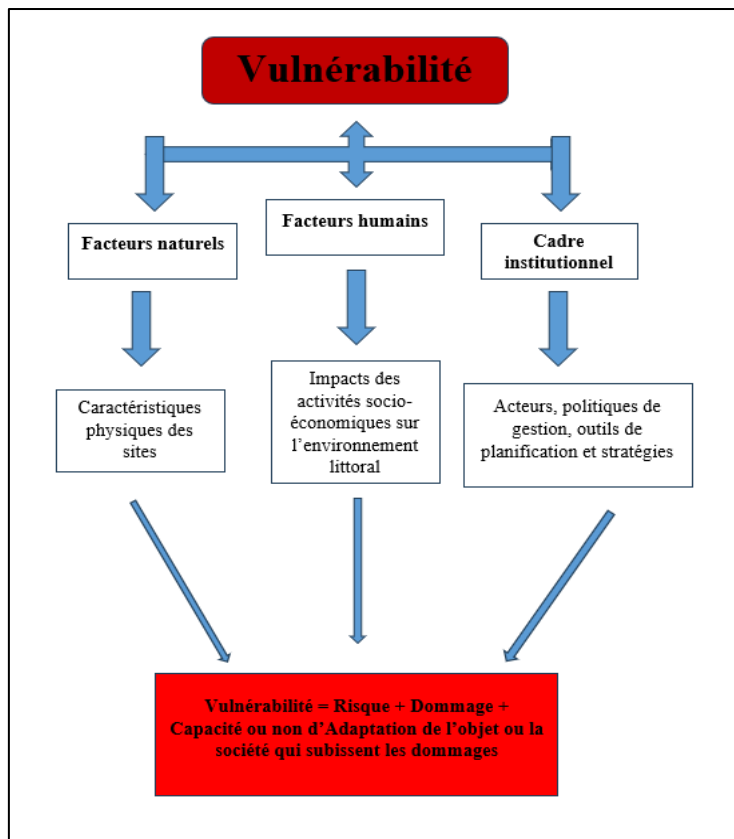


Figure 3 : Schémas d'analyse du concept de vulnérabilité

La figure 3 présente un schéma synthétique de l'analyse du concept de vulnérabilité. Cette représentation met en évidence que la vulnérabilité des zones côtières repose sur trois dimensions interconnectées : les caractéristiques physiques des sites, qui déterminent leur exposition et leur sensibilité aux aléas ; les impacts socio-économiques sur l'environnement littoral, reflétant les conséquences des aléas sur les populations, les infrastructures et les activités économiques ; et les influences institutionnelles, incluant les politiques publiques, les réglementations et les modes de gouvernance appliqués à la gestion des littoraux.

Ainsi, la vulnérabilité peut être définie comme la résultante de l'exposition aux risques, des dommages potentiels et de la capacité d'adaptation ou de résilience des systèmes, territoires ou sociétés concernés. Cette approche intégrée permet de saisir à la fois les dimensions physiques, humaines et institutionnelles qui conditionnent la vulnérabilité des zones côtières.

Dans la continuité de cette analyse, il sera nécessaire d'examiner d'autres concepts complémentaires mobilisés dans cette étude afin de mieux comprendre les interactions entre le littoral, sa dynamique et sa vulnérabilité, et d'établir un cadre conceptuel cohérent pour le développement ultérieur du travail.

Érosion côtière

Étymologiquement, le terme érosion côtière renvoie à l'action de « ronger », traduisant la dégradation progressive des côtes par différents agents naturels. Le concept a fait l'objet de multiples définitions, reflétant les approches physiques, géomorphologiques et anthropiques qui lui sont associées.

Brunet *et al.* (2005) définissent l'érosion comme « l'enlèvement de matières des sols et des roches par des agents naturels : eaux courantes (érosion fluviale et torrentielle), glaciers et fonte glaciaire (érosion glaciaire), vent (érosion éolienne), mer (érosion marine ou littorale), ainsi que par les éboulements et glissements ». De manière complémentaire, George et Verger (2006) considèrent l'érosion côtière comme un ensemble de phénomènes exogènes qui modifient les formes créées par les processus endogènes (tectonique et volcanisme). Ces définitions mettent en avant les transformations morphologiques observables, c'est-à-dire les modifications de la forme et de la structure des côtes. Dans ce cadre, le GIEC (2019) définit l'érosion côtière comme « un aléa naturel se traduisant par une perte graduelle de matériaux, entraînant le recul du trait de côte et l'abaissement des plages ».

Toutefois, le concept ne se limite pas aux seuls aspects physiques. Il intègre également les influences anthropiques. Boudjiéra (2010) définit ainsi l'érosion côtière comme « un phénomène naturel, observable et caractéristique de l'évolution superficielle de la croûte terrestre sous l'effet du déplacement des sédiments par les vagues. Il est notamment aggravé par une pénurie en sédiments, apparue à la fin de la transgression postglaciaire et accentuée par des activités humaines telles que la construction de barrages sur les fleuves, l'artificialisation des côtes et la déforestation ». De manière similaire, l'Observatoire de la Côte Aquitaine (2006) souligne que l'érosion résulte de l'action combinée des marées, de la houle, des courants induits par le vent, ainsi que des processus continentaux tels que les pluies et le ruissellement, et que son intensité est modulée par le déficit sédimentaire, qu'il soit d'origine naturelle ou anthropique.

L'érosion côtière peut être appréhendée comme le recul du trait de côte et l'abaissement des plages, traduisant la disparition progressive des stocks sédimentaires. Ce phénomène se manifeste par une avancée de la mer sur le continent et un rétrécissement des plages. Il résulte principalement de l'action des vagues, des courants marins, des précipitations et des vents, mais il est désormais amplifié par les activités humaines, notamment la construction de barrages, le

dragage et l'extraction de sédiments, ainsi que l'implantation d'infrastructures et d'habitats le long des côtes, qui perturbent le fonctionnement naturel des zones littorales.

Enfin, les changements globaux, en particulier l'élévation du niveau de la mer et la variabilité climatique, accentuent le processus d'érosion côtière en accélérant l'avancée de la mer sur le continent, ce qui en fait un phénomène d'importance critique pour la gestion durable des littoraux.

Trait de côte

Le concept de trait de côte est reconnu comme difficile à définir en raison de sa nature dynamique et de la multiplicité des critères pouvant le caractériser. Cette complexité est illustrée par les travaux de différents auteurs : en 2002, Marc Robin a identifié plus d'une douzaine de traits de côte, tandis qu'en 2005, Boak et Turner ont recensé 19 lignes génériques en se basant sur 45 indicateurs différents, incluant notamment la rupture de pente, la végétation côtière, le degré d'humectation de l'estran ou le niveau de marée conventionnel ou extrême. Cette diversité explique la variété des méthodes et techniques de détection et d'extraction du linéaire côtier.

Selon Faye (2010), ces approches métrologiques reposent sur la comparaison et la compilation de données acquises sur le terrain, à l'aide d'instruments topométriques tels que le niveau de chantier, le théodolite, le tachéomètre électronique, le Lidar ou le récepteur DGPS, et sur des traitements numériques d'images aériennes et satellitaires en laboratoire. L'auteur souligne que « cette notion, censée représenter la frontière entre les domaines maritime et terrestre, est problématique et sujette à controverse en raison de la grande diversité des critères d'identification : géomorphologie, marée, végétation ».

La définition du trait de côte dépend donc de l'usage que l'on souhaite en faire : suivi des fluctuations côtières et de leurs impacts, gestion des zones littorales, délimitation entre terres et mers sur des cartes marines, ou encore définition fonctionnelle adaptée aux types de littoraux étudiés.

Parmi les définitions classiques, Roubertou et Bonneval (1965) définissent le trait de côte comme « la limite correspondant aux plus hautes mers possibles, résultant du jeu normal de la marée astronomique et des autres variations du niveau de la mer, hors phénomènes météorologiques exceptionnels ». En accord avec ces auteurs, la dimension marégraphique liée au trait de côte est définie par Thior (2020) comme « la ligne qui marque la limite maximale atteinte par les eaux marines, correspondant à l'extrémité du jet de rive lors des tempêtes les

plus fortes et aux plus hautes mers de vives eaux ». Dans le dictionnaire *Géo-confluences*, le trait de côte est défini comme « la ligne de démarcation symbolique entre la terre et la mer, représentant la limite la plus extrême que peuvent atteindre les plus hautes eaux par temps de calme ». En France, cette limite correspond également au domaine public maritime.

D'autres définitions sont établies par Baulig (1956) qui décrit le trait de côte comme « la limite entre la côte et le rivage, qui se déplace avec l'état de la mer et la marée ». George et Verger (2013) le définissent comme « la limite entre la bande de terre adjacente à la mer et la zone soumise directement à l'action des vagues, en fonction de la marée ». Diatta (2020) le considère comme « la ligne de démarcation entre l'influence des eaux marines et la terre ».

Ainsi, le trait de côte correspond à une ligne imaginaire et mouvante délimitant la mer et le continent. Son identification peut s'appuyer sur des critères physiques (géomorphologiques, marégraphiques, botaniques, etc.) et/ou fonctionnels, en lien avec l'objet de l'étude ou l'usage que l'on souhaite en faire.

Variabilité climatique

Le terme variabilité climatique est fréquemment mobilisé pour préciser ou nuancer les discussions autour du concept de changement climatique, dont la définition peut prêter à controverse. L'émergence du concept de changement climatique est intimement liée à la révolution industrielle, qui a marqué un tournant majeur dans le développement économique mondial, particulièrement dans les pays du Nord, et qui a entraîné des émissions massives de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces émissions sont considérées comme la principale cause du réchauffement climatique, phénomène responsable du déséquilibre des systèmes environnementaux et ayant des répercussions importantes sur la vie humaine.

Dans la littérature scientifique, il convient de distinguer changement climatique et variabilité climatique. Le changement climatique est généralement attribué aux activités humaines modifiant la composition de l'atmosphère, tandis que la variabilité climatique correspond aux fluctuations naturelles du climat. La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) formalise cette distinction : « Les changements climatiques désignent des changements attribuables directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale, et qui viennent s'ajouter à la variabilité climatique observée sur des périodes comparables ».

Plusieurs organisations internationales ont travaillé sur ce concept, notamment le GIEC, l'ONERC et la CCNUCC. Selon l'ONERC (2007), la variabilité climatique représente les

variations de l'état moyen et des autres statistiques climatiques (écarts types, phénomènes extrêmes, etc.) à toutes les échelles temporelles et spatiales. Elle peut résulter de processus internes au système climatique (variabilité interne) ou de forçages externes, qu'ils soient naturels ou anthropiques (variabilité externe). De son côté, la CCNUCC (1992) précise que la variabilité climatique correspond aux variations naturelles intra- et interannuelles du climat, tandis que les changements climatiques sont des modifications du climat attribuables aux activités humaines, s'ajoutant à la variabilité naturelle.

Dans le dictionnaire *L'Environnement - Normes* (2001), la variabilité climatique est définie comme « l'ensemble des variations des caractéristiques climatiques en un lieu donné au cours du temps, incluant le réchauffement ou le refroidissement ». Ces variations peuvent être amplifiées par certaines formes de pollution atmosphérique résultant d'activités humaines, entraînant des conséquences majeures telles que l'élévation du niveau des mers, l'accentuation d'événements climatiques extrêmes (sécheresses, inondations, cyclones), la déstabilisation des forêts, la menace sur les ressources en eau douce, la désertification, la réduction de la biodiversité ou encore la propagation de maladies tropicales.

Le GIEC utilise le terme réchauffement climatique pour qualifier la variabilité climatique d'origine anthropique et définit ce phénomène comme « une augmentation générale des températures moyennes, liée notamment aux activités humaines, qui modifie durablement les équilibres météorologiques et les écosystèmes ». Depuis le début de la révolution industrielle, la température moyenne terrestre a connu une augmentation régulière, estimée entre 1 et 1,5 °C au-dessus des niveaux préindustriels en 2016 (GIEC, 2019).

En résumé, la variabilité climatique désigne toute modification ou fluctuation des paramètres et des propriétés du climat au cours d'une période donnée, dans un espace déterminé, quelle que soit son origine, naturelle ou anthropique. Elle englobe ainsi les changements observables à court, moyen ou long terme et constitue un concept central pour l'analyse des implications environnementaux et socio-économiques des phénomènes climatiques.

Implication

Le terme *implications* est largement utilisé dans la littérature scientifique pour désigner les effets, conséquences et significations plus larges qui découlent des résultats d'une recherche, d'un phénomène ou d'un changement, au-delà de l'observation immédiate. En contexte académique, il permet de répondre à la question « Qu'est-ce que cela signifie ? », autrement dit, d'analyser les implications des résultats pour la théorie, la pratique, les politiques publiques

et les recherches futures (Savolainen, 2025). Les implications ne se limitent pas à un effet mécanique, mais incluent une dimension réflexive et prospective qui situe les résultats dans un cadre plus large (AJE, 2025).

Dans la méthodologie de la recherche, discuter des implications est devenu une pratique normative dans les sections de discussion des articles scientifiques. Les implications d'une étude expliquent comment et pourquoi les résultats importent, en s'appuyant sur des preuves, en élargissant la compréhension théorique et en identifiant des pistes pour d'autres travaux ou pour la prise de décision (Savolainen, 2025). Elles servent ainsi de pont entre les résultats bruts et leur signification pour la communauté scientifique et les acteurs externes à celle-ci (ATLAS.ti, n.d.).

Les ouvrages et guides méthodologiques soulignent que les implications doivent être fondées sur les résultats obtenus et intégrées de manière cohérente dans la discussion, sans être confondues avec des recommandations spécifiques. Elles peuvent être théoriques (comment les résultats modifient ou enrichissent les cadres conceptuels existants), pratiques (quelles applications peuvent être envisagées dans des contextes réels) ou prospectives (quel impact pour les futures recherches ou politiques), ce qui les rend indispensables pour montrer la contribution d'une étude au savoir (AJE, 2025).

Sur le plan épistémologique, les implications opèrent comme des inférences soutenues par les données, permettant d'explicitier la portée d'une recherche dans différents domaines d'application. Elles traduisent une compréhension des résultats au-delà de leur simple constatation, offrant une lecture plus profonde de ce qu'on pourrait appeler « *la signification logique des résultats* » dans divers contextes disciplinaires (Savolainen, 2025).

Ainsi, le concept d'implications n'est pas un synonyme générique de *conséquences* ou de *résultats*, mais bien une catégorie analytique structurée qui relie les résultats empiriques à leurs significations potentielles, usages possibles et contributions à la création de connaissances (ATLAS.ti, n.m. ; AJE, 2025). Il engage une réflexion critique sur la portée des observations et ouvre sur des perspectives futures en termes de théorie, de pratique et de politique scientifique.

Ainsi, appliquer le concept d'implications permet de dépasser une simple description des dynamiques morphosédimentaires et de la cinématique du trait de côte pour situer ces phénomènes dans un cadre plus large d'enjeux environnementaux et socioéconomiques. Il s'agit de montrer non seulement ce que ces dynamiques font, mais aussi ce qu'elles signifient pour les écosystèmes littoraux, les stratégies de gestion côtière, les communautés locales et les

trajectoires prospectives du littoral. Ainsi, les implications deviennent un outil analytique essentiel pour articuler les données scientifiques, les tensions sociales et les orientations futures des politiques territoriales.

Résilience

Le terme résilience trouve son origine dans le latin *resilio*, *resilire*, qui signifie littéralement « rebondir » ou « se rétracter ». Étymologiquement, il renvoie à l'idée de réorganisation d'un système, qu'il soit écologique, social ou individuel, pour faire face à des perturbations susceptibles d'altérer son fonctionnement normal. La résilience traduit donc la capacité d'un système à absorber des chocs et à se réadapter à de nouvelles conditions tout en maintenant ses fonctions essentielles.

Timmerman (1981) est l'un des premiers à appliquer ce concept aux sociétés humaines confrontées aux changements environnementaux. Il définit la résilience comme « la capacité d'un système, ou d'une partie de celui-ci, à absorber un aléa et à se relever de son occurrence ». Cette définition met l'accent sur l'aptitude à surmonter un événement perturbateur.

Walker *et al.* (2004) proposent une définition plus large, intégrant les dimensions physiques et sociales. Selon eux, la résilience désigne la capacité d'un système à absorber les perturbations, à se réorganiser et à opérer des changements de manière à conserver ses fonctions, structures, identité et rétroactions essentielles, autrement dit à rester dans le même bassin d'attraction. La résilience devient ainsi un indicateur de l'adaptabilité d'un système ou d'une société face à des perturbations nouvelles.

Tisseron (2009) souligne l'étymologie du terme et précise que la résilience renvoie à la capacité d'un système à « rebondir » après une perturbation. En physique, il s'agit de la propriété d'élasticité et de résistance aux chocs d'un matériau, tandis que par analogie, dans le langage courant, elle traduit la résistance au changement. Quenault (2013) élargit cette notion en distinguant la résilience individuelle ou physique, capacité d'un individu ou d'une infrastructure à résister à un choc (par exemple, la résistance d'un bâtiment aux vents violents), de la résilience sociale ou dynamique, qui traduit la capacité d'une communauté, d'un territoire ou d'une société à se réorganiser, se reconstruire et s'adapter à l'aide de ses ressources économiques, institutionnelles et organisationnelles.

Ainsi, le concept de résilience peut être appliqué à un écosystème ou à une société pour caractériser leur aptitude à faire face à un phénomène perturbateur. Il renvoie à la capacité

d'adaptation et de réponse, c'est-à-dire à l'aptitude à se réorganiser, à atténuer les implications et à restaurer, autant que possible, le fonctionnement normal du système affecté.

Adaptation

Le concept d'adaptation est souvent rapproché de celui de résilience, mais une distinction essentielle existe entre les deux. La résilience se focalise sur la capacité d'un système ou d'une société à absorber et à se réorganiser face à une perturbation, alors que l'adaptation renvoie à la mise en œuvre de stratégies visant à ajuster les pratiques, les comportements ou les structures d'un système pour réduire sa vulnérabilité et exploiter les opportunités liées aux changements environnementaux, notamment dans le contexte de la variabilité et du changement climatique.

Le GIEC (2007) définit l'adaptation comme une démarche visant à ajuster les systèmes humains ou naturels aux conditions climatiques actuelles ou anticipées, ainsi qu'à leurs conséquences. Pour les systèmes humains, cela implique d'atténuer les effets préjudiciables et de tirer parti des effets bénéfiques. Pour les systèmes naturels, les interventions humaines peuvent faciliter ce processus d'ajustement afin d'accroître leur capacité à faire face aux impacts du climat. Cette définition a été précisée dans le rapport du GIEC de 2019, soulignant que l'adaptation concerne la réduction des impacts négatifs tout en exploitant les effets positifs du changement climatique.

Selon le GIEC / IPCC (2019), l'adaptation correspond aux modifications des attributs fondamentaux d'un système en réponse au changement climatique et à ses conséquences. Dans le domaine biologique, l'adaptation se traduit par des modifications d'un caractère anatomique, physiologique ou comportemental au sein d'une population, améliorant la survie et le succès reproductif des individus concernés. Par analogie, dans les systèmes socio-écologiques, l'adaptation se traduit par un ajustement des pratiques, des stratégies ou des structures pour répondre efficacement aux nouvelles conditions environnementales.

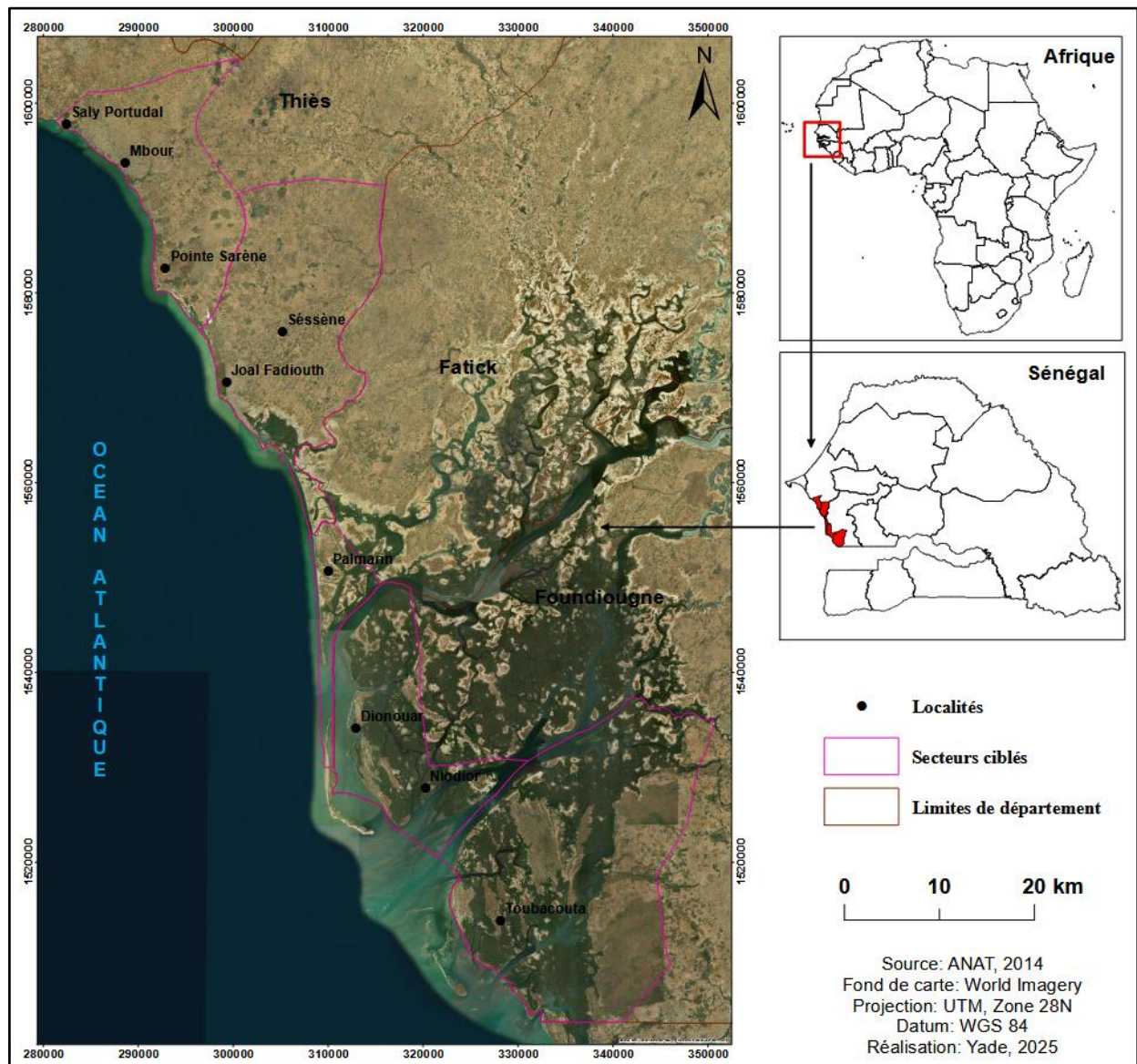
En termes opérationnels, l'adaptation peut être définie comme un processus par lequel un écosystème, une société ou un individu modifie ses fonctions, comportements ou pratiques afin de devenir plus résilient face aux changements environnementaux présents ou anticipés. Cela inclut l'anticipation des risques, la réduction des impacts négatifs et la capacité à exploiter les opportunités offertes par les transformations environnementales, tout en préservant la possibilité de bénéficier de ces changements. En d'autres termes, l'adaptation constitue la capacité d'ajustement stratégique et fonctionnel d'un système face à des perturbations nouvelles, telles que celles engendrées par le changement climatique.

2. Cadre géographique, physique et humaine de la zone d'étude

Cette section a pour objectif de présenter la zone d'étude, étape essentielle dans toute démarche scientifique, car elle permet de situer le contexte spatial et environnemental de la recherche. La zone étudiée correspond à une partie du littoral sénégalais, s'étendant de la Petite-Côte au delta du Saloum. L'analyse porte à la fois sur les caractéristiques physiques (géomorphologie, hydrologie, climat, dynamique côtière) et les caractéristiques humaines (occupation des sols, activités socio-économiques, démographie), afin de fournir une compréhension globale des interactions entre les composantes naturelles et anthropiques dans cette portion du littoral sénégalais.

2.1. Situation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude se situe à environ 80 km de Dakar, la capitale sénégalaise, et s'étend le long de la Petite-Côte, incluant les communes de Saly Portudal et de Mbour dans la région de Thiès, jusqu'au delta du Saloum, dans la région de Fatick (Carte 1). La bordure occidentale de cette zone est entièrement délimitée par l'océan Atlantique, exposant le littoral aux agents hydrodynamiques marins, principaux facteurs responsables de l'érosion côtière.



Carte 1 : Localisation de la zone d'étude

2.2. Cadre physique de la zone d'étude : des unités naturelles en mutation

Les caractéristiques physiques constituent des déterminants essentiels du fonctionnement des écosystèmes côtiers, influençant directement la dynamique des zones littorales. Elles conditionnent la morphologie, la stabilité et la résilience des côtes face aux processus naturels et anthropiques. Dans ce contexte, il s'agit de présenter succinctement les principales composantes physiques de la zone d'étude : la géologie, la géomorphologie, le climat et l'hydrodynamisme, éléments qui interagissent pour façonner l'évolution spatiale et temporelle du littoral.

2.2.1. Héritage géologique et géomorphologique de la Petite-côte au delta du Sine-Saloum

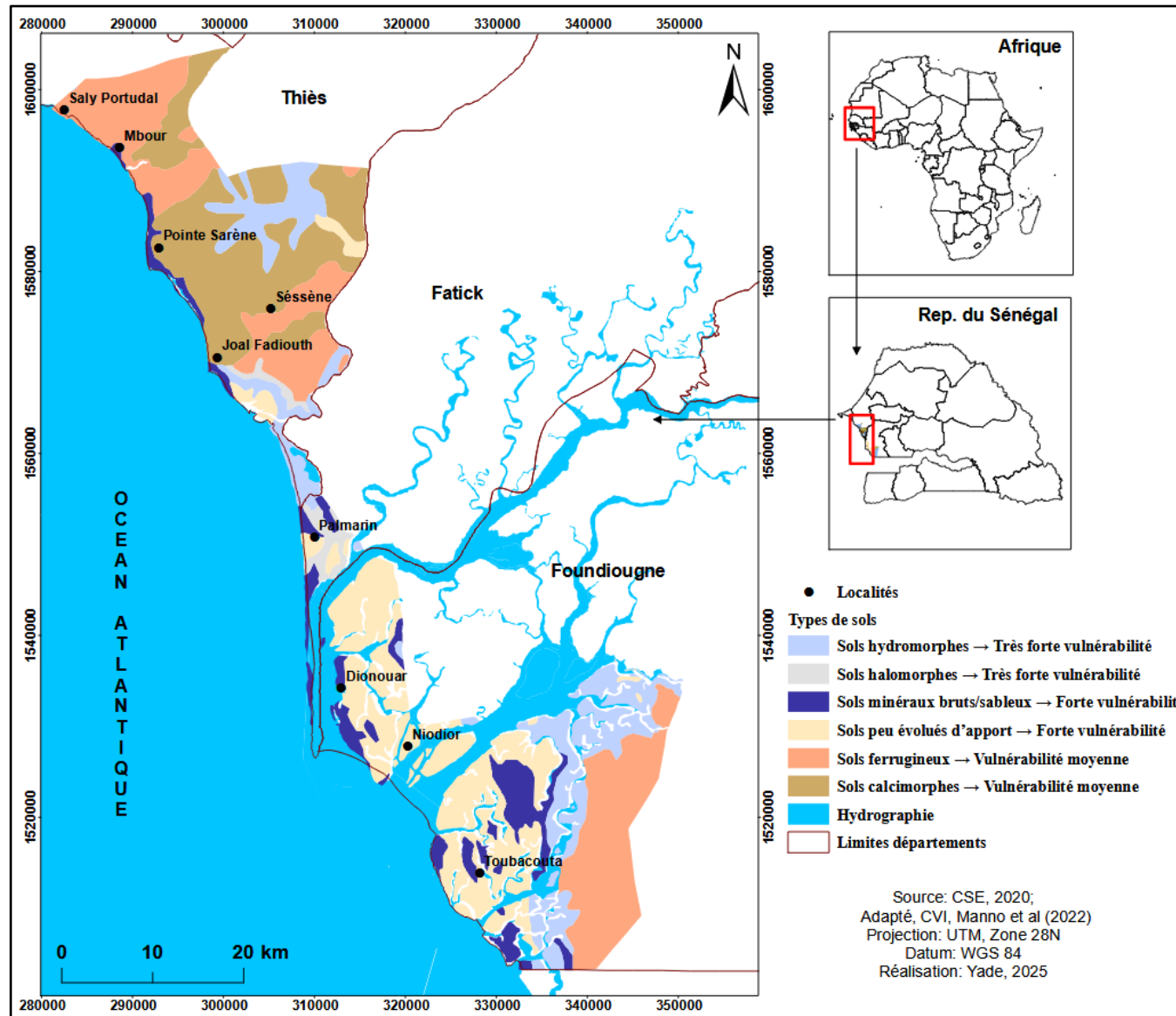
La côte sénégalaise, s'étendant de la Petite-Côte au delta du Saloum, s'inscrit dans le bassin sédimentaire sénégal-mauritanien, qui couvre environ 1 400 km, du Cap Barbas (Mauritanie) à Bissau (Guinée-Bissau). Ce bassin, dont la plus grande largeur (≈ 560 km) se situe au Sénégal (Diouf, 2015), repose sur un socle précambrien profond et présente une structuration faillée d'orientation Nord-Sud, résultant d'une évolution tectonique complexe. Dabo (2006) a identifié une anomalie gravimétrique positive, interprétée comme une intrusion profonde (~ 5 km) à l'origine d'une structure anticlinale affectant plusieurs failles régionales.

Les formations géologiques affleurantes sont constituées principalement de grès argileux et d'argiles sableuses du Maastrichtien supérieur au Paléocène, localement recouverts de bancs calcaires, marneux et argileux (Faye, 1993 ; Diouf, 2015). Cet empilement sédimentaire hétérogène, héritage des transgressions et régressions successives du Crétacé supérieur, conditionne la morphologie actuelle du littoral.

Dans la partie nord (Mbour-Joal), les reliefs côtiers se caractérisent par la présence de calcaires durs, grès de plage et dunes fossiles, dont la nature meuble et la discontinuité structurale favorisent l'instabilité et l'érosion marine (Elouard, 1967 ; Dabo, 2006). Dans la partie sud, vers le delta du Saloum, le paysage est dominé par des formations sableuses récentes : cordons littoraux, flèches, bancs et barres sableuses, parfois associées à des dépôts argilo-limoneux dans les estuaires et sur les îles (Sakho *et al.*, 2019).

Ainsi, les formations géologiques anciennes héritées du bassin sénégal-mauritanien conditionnent les dynamiques côtières contemporaines : la fracturation du socle et la nature meuble des sédiments augmentent la mobilité du trait de côte, tandis que les processus hydrodynamiques (houles, marées, dérive littorale) façonnent continuellement les cordons

sableux, flèches et deltas. Cet héritage géologique constitue un facteur majeur de la vulnérabilité morphodynamique actuelle de la Petite-Côte et du delta du Saloum.



Carte 2 : Sensibilité des sols à l'érosion côtière entre la Petite-Côte et le delta du Saloum (IVC : Indice de Vulnérabilité Côtière) adapté de Manno *et al.*, 2022).

La carte de sensibilité pédologique à l'érosion côtière, élaborée selon la méthodologie du *Coastal Vulnerability Index* (CVI) de Manno *et al.* (2022), met en évidence des contrastes significatifs entre les unités sédimentaires de la Petite-Côte et celles du delta du Saloum. Le modèle CVI repose sur une évaluation intégrée de la vulnérabilité, où chaque variable morpho-pédologique est notée en fonction de sa cohésion, de sa perméabilité et de son exposition aux forçages marins. Dans cette approche, ces critères ont été appliqués spécifiquement aux types de sols afin de hiérarchiser leur contribution à la stabilité littorale.

Dans la partie nord du littoral (Saly-Portudal, Mbour, Pointe Sarène), les sols sont majoritairement ferrugineux et calcimorphes, présentant une structure consolidée et une plasticité limitée. Leur vulnérabilité à l'érosion est modérée, car la matrice sableuse ferrugineuse confère une certaine cohésion mécanique. Ces sols reposent sur des cordons dunaires anciens, dont la stabilité est localement compromise par les aménagements touristiques et l'extraction de sable.

Vers la Pointe Sarène, Joal-Fadiouth, Palmarin et certaines parties du delta du Saloum (Dionewar, Niodior, Toubacouta), la pédologie se caractérise par des sols peu évolués d'apport et des sols minéraux récents. Leur faible cohésion les rend hautement sensibles à l'action de la houle et des marées. Ces secteurs, soumis à un hydrodynamisme intense et à une mobilité sédimentaire permanente, constituent des zones de transition entre plages ouvertes et marges deltaïques.

Dans la région du delta du Saloum, notamment au sud et à l'est de Toubacouta ainsi qu'au centre de la zone d'étude (entre Joal-Fadiouth et Palmarin), la prédominance de sols hydromorphes et halomorphes traduit des conditions de saturation quasi permanente en eau et de forte salinité. Cette combinaison entraîne une vulnérabilité très élevée, car la faible cohésion des matériaux, conjuguée à la subsidence naturelle et à l'intrusion marine, provoque une instabilité chronique des berges et une érosion rapide des îles et vasières. Ces milieux représentent ainsi les points les plus sensibles du littoral étudié.

Dans l'ensemble, la carte illustre clairement la relation entre nature pédologique, contexte géomorphologique et réponse érosive du littoral. Les unités les plus instables correspondent aux zones basses et marécageuses du delta, tandis que les formations ferrugineuses et calcaires de la Petite-Côte offrent une résistance relative, mais temporaire, face aux pressions marines et anthropiques.

2.2.2. Contexte climatique et hydrologique

Cette section examine les régimes pluviométriques, thermiques et éoliens qui déterminent les conditions climatiques de la zone d'étude.

Conformément au climat général du Sénégal, la zone étudiée présente une alternance nette entre deux saisons distinctes : une saison des pluies relativement courte, s'étendant sur trois à quatre mois, et une saison sèche plus longue, durant huit à neuf mois. Le régime pluviométrique de ce littoral se caractérise par une forte variabilité interannuelle, avec l'alternance d'années excédentaires et déficitaires en précipitations. Cette irrégularité influence directement la dynamique du trait de côte, notamment via les flux sédimentaires. En effet, les périodes de déficit pluviométrique entraînent une réduction des apports fluviaux et marins, diminuant les volumes de sédiments nécessaires au maintien de l'équilibre morphodynamique du littoral (Niang-Diop, 1995). Les sécheresses prolongées des années 1970 et 1980 ont accentué cette tendance, générant des implications durables sur les systèmes hydro-sédimentaires. Toutefois, les données postérieures aux années 1980 indiquent une légère reprise des précipitations, traduisant un retour progressif vers une normalisation relative du régime pluviométrique sur l'ensemble de la zone étudiée.

Sur le plan thermique, le littoral compris entre la Petite-Côte et le delta du Saloum relève du domaine climatique nord-soudanien, caractérisé par une alternance entre une saison fraîche (décembre-février) et une saison chaude (printemps jusqu'au début de l'hivernage). La proximité de l'océan Atlantique exerce un effet modérateur sur les températures, notamment par l'influence des alizés maritimes, qui diffusent une fraîcheur relative le long de la côte. Les stations climatiques de Mbour, Palmarin et du secteur méridional du delta du Saloum illustrent cette régulation thermique, atténuant partiellement les effets locaux du réchauffement climatique global. Cependant, l'analyse des séries de température pour la période 1981-2024 révèle une augmentation modérée mais significative des températures moyennes, traduisant une tendance régionale au réchauffement. Bien que ponctuellement entrecoupée de phases de refroidissement, cette évolution pourrait amplifier les processus d'érosion côtière et compromettre les équilibres biophysiques du littoral à terme.

La zone d'étude est principalement influencée par deux régimes éoliens : l'alizé maritime de décembre à avril et la mousson de mai à novembre (vent Ouest-Est). Ces vents, bien que de vitesses modérées (4 à 6 m/s), contribuent à la dynamique du trait de côte en modulant la circulation océanique et en influençant indirectement les processus d'érosion et de transport sédimentaire.

Enfin, sur cette façade littorale, les agents hydrodynamiques majeurs affectant la dynamique côtière comprennent les marées, les houles, les vents, les courants marins ainsi que la dérive littorale, qui interagissent pour façonner en permanence la morphologie du littoral.

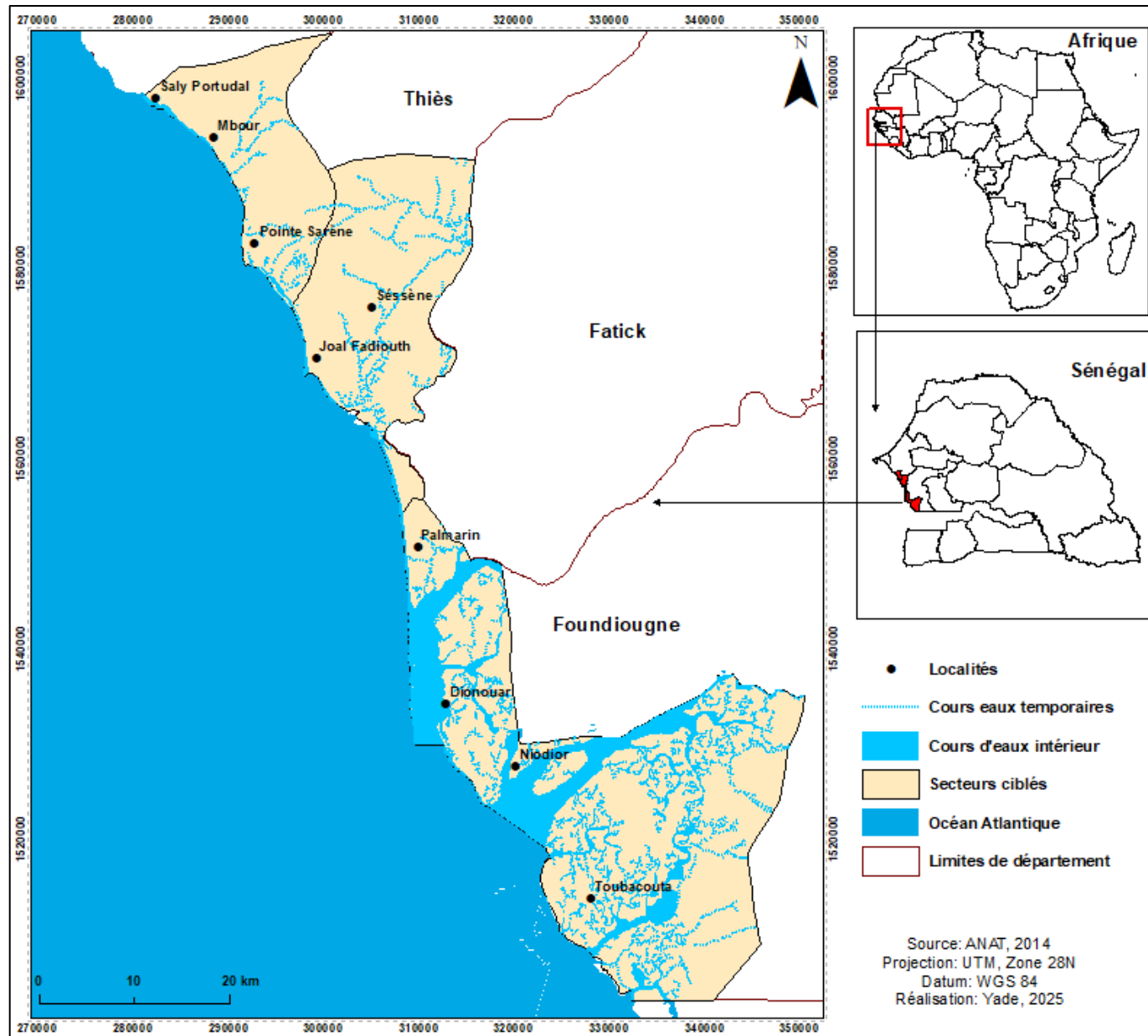
2.2.3. Caractéristiques hydrologiques de la zone d'étude

La Petite-Côte sénégalaise est caractérisée par un réseau hydrographique dense, dont la configuration résulte à la fois des caractéristiques géologiques et géomorphologiques de la zone et de la répartition spatiale de la pluviométrie. Ce réseau comprend à la fois des cours d'eau pérennes et des cours d'eau temporaires, avec une densité particulièrement élevée dans le secteur méridional, vers le delta du Saloum, où les précipitations sont plus abondantes.

Dans cette partie sud, le fleuve Saloum constitue l'un des principaux cours d'eau du pays, accompagné de complexes estuariens et lagunaires tels que le Saloum-Diombos et la lagune de Joal. Ces zones humides jouent un rôle écologique majeur, abritant une faune et une flore diversifiées et fournissant des ressources naturelles importantes (bois, combustibles ligneux, ressources halieutiques).

La richesse de ces écosystèmes est toutefois soumise à une forte pression anthropique, liée à l'intensification des activités économiques locales, ce qui accroît leur exposition aux aléas marins, notamment en raison de leur proximité avec l'océan Atlantique. Par ailleurs, les zones humides intérieures subissent également les effets du recul ou du déplacement frontal des dunes côtières vers le continent, ainsi que les implications de la variabilité et du changement climatique.

Ces pressions multiples entraînent des implications environnementales significatives, telles que la diminution des débits, le tarissement de certains cours d'eau et la dégradation de l'habitat naturel, compromettant la survie des populations de faune et de flore. La carte 3 illustre la répartition du réseau hydrographique le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum.



Carte 3 : Réseau hydrologique de la Petite-Côte au delta du Saloum

Le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, est caractérisé par un réseau hydrographique complexe, composé de cours d'eau temporaires et de cours d'eau intérieurs, qui joue un rôle déterminant dans la dynamique du trait de côte. Les cours d'eau temporaires, fortement liés aux précipitations saisonnières, conditionnent l'apport sédimentaire côtier. Lors des crues, ces cours d'eau transportent des sédiments vers l'interface terre-mer, contribuant à la formation et au maintien des cordons littoraux. À l'inverse, les périodes de sécheresse prolongées, combinées à l'élévation des températures, réduisent ces apports, accélérant l'érosion côtière, en particulier dans les secteurs où les défenses naturelles telles que les mangroves ou les dunes sont déjà fragilisées.

L'hydrographie régionale inclut également des cours d'eau intérieurs, notamment ceux associés aux bassins du Saloum et du Sine, qui forment des zones humides cruciales pour la régulation hydro-sédimentaire du littoral. Ces milieux atténuent l'impact des ondes de tempête et stabilisent les sols côtiers grâce à la végétation halophile. La modification du régime hydrologique, induite par le changement climatique et les activités anthropiques (endiguements, extraction de sable, urbanisation), entraîne une réduction des apports en eau douce et en sédiments, accentuant la submersion et le recul du trait de côte dans des secteurs particulièrement vulnérables, tels que Palmarin et Djiffer.

Par ailleurs, la dynamique littorale résulte de l'interaction continue entre les cours d'eau et l'océan Atlantique. Les embouchures des fleuves et des bolongs représentent des points de rupture hydrodynamique, où les processus d'érosion et d'accrétion sont particulièrement actifs. Dans le delta du Saloum, la pénétration des eaux marines modifie la composition des sols et l'équilibre écologique des zones humides, accentuant leur vulnérabilité.

Ainsi, la gestion intégrée et durable de ces cours d'eau constitue un enjeu majeur pour la résilience du littoral, en permettant de limiter l'érosion, de maintenir les apports sédimentaires et de préserver les fonctions écologiques essentielles des zones humides côtières face aux effets du changement climatique.

2.2.4. Dynamiques océanographiques et bathymétriques : l'énergie des houles et des courants comme architectes du littoral

L'évolution du littoral s'étendant de la Petite-Côte au delta du Saloum est fortement conditionnée par les processus océanographiques et bathymétriques, qui régulent à la fois la distribution de l'énergie marine et la mobilité sédimentaire. L'interaction de ces dynamiques avec la topographie sous-marine influence directement la morphologie côtière, ainsi que la

variabilité spatiale des phénomènes d'érosion et d'accrétion, en déterminant les zones de convergence et de divergence sédimentaire le long du littoral.

2.2.4.1. Caractéristiques des houles, marées et courants littoraux

Le littoral sénégalais est soumis à une dynamique hydrodynamique complexe, dominée par les houles de secteur nord-ouest à ouest, provenant de l'Atlantique Nord et générées par les dépressions océaniques et les vents alizés persistants (Diadhiou, 2016 ; Thior, 2020). Ces houles atteignent la Petite-Côte avec des hauteurs significatives comprises entre 1 et 2,5 m, et des périodes oscillant de 8 à 12 s, conférant ainsi au littoral une énergie moyenne à élever.

Durant la saison humide, le littoral subit également l'influence de houles de secteur sud-ouest, associées aux systèmes convectifs tropicaux, qui induisent des modifications temporaires de la direction et de l'intensité de la dérive littorale. Le régime de marée est de type semi-diurne, avec un marnage moyen d'environ 1,2 m (Sagna *et al.*, 2018), renforçant localement l'impact de l'hydrodynamisme sur les plages basses et les estuaires.

Les courants côtiers, orientés principalement du nord vers le sud, assurent un transport sédimentaire longitudinal prépondérant le long de la Petite-Côte. Ce processus est responsable de la dérive littorale et de la redistribution des sédiments vers le delta du Saloum, contribuant ainsi à la dynamique morpho-sédimentaire de la région (Faye, 2010 ; Ndiaye-Dia, 2016).

2.2.4.2. Bathymétrie et topographie sous-marine : rôle dans l'équilibre sédimentaire

La bathymétrie du plateau continental sénégalais se caractérise par une pente douce, généralement inférieure à 1 %, avec des fonds constitués de sables et de vases jusqu'à une profondeur d'environ 50 m (CSE, 2015). Cette faible inclinaison favorise une dissipation progressive de l'énergie des houles et détermine la profondeur de fermeture au sens d'Hallermeier (1981), au-delà de laquelle les sédiments ne contribuent plus au transport littoral.

Par ailleurs, le plateau présente des irrégularités topographiques, telles que des barres sableuses, des canyons et des hauts-fonds, qui modulent la réfraction et la diffraction des houles à l'approche du rivage. Ces structures sous-marines jouent un rôle déterminant dans la localisation des zones d'érosion et d'accrétion, expliquant par exemple la forte dynamique observée entre Mbour et Joal, où l'ouverture bathymétrique favorise la concentration de l'énergie des vagues (Thior, 2020).

2.2.4.3. Direction dominante du transport sédimentaire et zones d'érosion/accrétion

Le transport sédimentaire longitudinal, prédominant du Nord vers le Sud, constitue le principal moteur de la morphodynamique côtière sur la Petite-Côte (Faye, 2010 ; Ndiaye-Dia, 2016). Ce flux assure une redistribution graduelle des sédiments, transférant les matériaux depuis les secteurs en érosion, tels que Saly-Mbour, vers les zones d'accrétion, notamment Joal-Palmarin, avant de se diriger vers les embouchures du delta du Saloum.

Cependant, ce transit sédimentaire est fréquemment interrompu à proximité des promontoires, des ouvrages littoraux (digues, ports, brise-lames) ou des sites d'extraction, générant localement un déséquilibre entre apports et pertes sédimentaires. Ces perturbations expliquent la discontinuité morphologique observée le long du littoral et la formation de cellules sédimentaires semi-indépendantes, au sein desquelles les processus d'érosion et d'accrétion se manifestent simultanément à des échelles spatiales réduites.

2.3. Caractéristiques humaines de la zone d'étude

La zone d'étude englobe trois départements : Mbour, relevant de la région de Thiès, ainsi que Fatick et Foundiougne, situés dans la région de Fatick. Tous ces départements sont bordés à l'Ouest par l'océan Atlantique. Cette situation géographique littorale confère à la zone une attractivité particulière, résultant à la fois des conditions climatiques favorables et de la disponibilité des ressources et potentialités socio-économiques liées aux activités maritimes.

2.3.1. Population

Sur le plan démographique, les départements de Mbour, Fatick et Foundiougne présentent une densité et un poids démographique significatifs. Selon le Recensement général de la population réalisé par l'ANSD en 2023, le département de Mbour compte 935 304 habitants, Fatick 408 566 habitants et Foundiougne 375 388 habitants. Ce poids démographique exerce une pression directe sur l'environnement littoral, notamment à travers l'intensification des activités humaines susceptibles d'impacter la frange côtière.

Le département de Mbour se distingue par une forte diversité ethnique. Les groupes majoritaires incluent les Sérères, Socés, Lébous, Mandingues, Diolas, Maures, Peuls et Wolofs (Dabo, 1994). Toutefois, au-delà de sa dimension descriptive, cette diversité sociolinguistique permet d'appréhender les modalités différenciées d'occupation et d'exploitation de l'espace littoral. En effet, certains groupes, tels que les Lébous, sont historiquement spécialisés dans la pêche artisanale maritime, tandis que d'autres, comme les Sérères ou les Diolas, développent davantage des activités agricoles ou agro-pastorales, parfois combinées à des pratiques

halieutiques (Chauveau et al., 2000 ; Cormier-Salem, 1999). Ces spécificités socio-économiques contribuent à structurer les formes d'anthropisation du littoral et influencent, de manière différenciée, les pressions exercées sur les systèmes côtiers.

Dans les départements de Fatick et de Foundiougne, majoritairement peuplés par des Sérères, complétés par des Mandingues et des Bambaras, notamment dans le sud de Foundiougne et sur les îles du Saloum, les modes d'occupation de l'espace reposent largement sur des systèmes agraires et halieutiques intégrés. On y observe également la présence de Wolofs, concentrés dans la partie orientale de Foundiougne, ainsi que des Peuls et des Socés (Recensement général de la population et de l'habitat, 1988). Cette diversité des groupes s'accompagne d'une pluralité de pratiques économiques et territoriales, contribuant à des formes variées d'interactions entre les sociétés et leur environnement littoral.

Ainsi, la prise en compte de la structuration sociolinguistique des populations permet de mieux comprendre la distribution spatiale des activités économiques (pêche, agriculture, tourisme) et, par conséquent, les dynamiques anthropiques qui participent à l'évolution du trait de côte. L'organisation des territoires selon les logiques culturelles et économiques propres à chaque groupe influe en effet sur l'intensité et la nature des pressions exercées sur les milieux côtiers, contribuant à expliquer les contrastes observés dans les processus d'érosion et d'accrétion le long du littoral de la Petite-Côte et du delta du Saloum.

2.3.2. Activités socio-économiques

Le littoral de la Petite-Côte sénégalaise se distingue par des potentialités socio-économiques considérables. Cette diversité se traduit par la multiplicité des activités économiques développées par les populations locales, qui exploitent les ressources côtières et maritimes. Parmi ces activités, on peut citer le tourisme, la pêche, le commerce, l'agriculture, l'artisanat, l'exploitation du sel ainsi que diverses activités culturelles, chacune contribuant de manière spécifique au dynamisme économique et au développement local.

2.3.2.1. Tourisme

Le tourisme constitue un secteur stratégique pour l'économie et l'emploi dans la région de Thiès, et plus particulièrement dans le département de Mbour. L'offre touristique y est principalement balnéaire, centrée sur la station de Saly Portudal, suivie par les localités de Nianing, Somone, La Pointe Sarène et Joal-Fadiouth. La localisation côtière de ces sites constitue un atout majeur, complété par des plages étendues et ensoleillées, ainsi que par l'attractivité de l'écotourisme dans certaines zones (Somone, La Pointe Sarène, Joal-Fadiouth).

Le département bénéficie également d'un réseau routier dense et d'infrastructures modernes, telles que l'aéroport international Blaise Diagne et l'autoroute à péage, facilitant l'accessibilité. Les villes de Mbour et Saly Portudal disposent de nombreux services urbains (banques, établissements d'enseignement supérieur, etc.), tandis que l'artisanat et la commercialisation de produits halieutiques enrichissent l'expérience touristique locale.

Les potentialités culturelles constituent un autre levier du tourisme dans le département. Des événements tels que le FESCUM valorisent la diversité culturelle des ethnies locales, tandis que des sites historiques et patrimoniaux, Église de Ndiana, tumulus sérères de Mbafaye, Sangomar, île de Fadiouth, renforcent l'attractivité du territoire. En lien avec la stratégie nationale visant un tourisme responsable, éthique et compétitif, inscrite dans le Plan Sénégal Émergent (PSE), le département a développé une capacité d'accueil notable : en 2019, la région de Thiès comptait 63 hôtels, 127 auberges et 29 campements, représentant 3 444 chambres et 6 576 lits, principalement localisés dans le département de Mbour.

Malgré son importance économique, le tourisme sur la Petite-Côte sénégalaise est confronté à plusieurs contraintes. La faiblesse du tissu industriel et commercial limite la disponibilité de produits de qualité, tandis que la saisonnalité de l'activité réduit la continuité des revenus touristiques. D'autres difficultés incluent la faible diversification des activités et l'accès limité au financement pour les acteurs du secteur. Toutefois, la contrainte majeure reste l'érosion côtière, qui entraîne la destruction ou la fermeture de sites d'hébergement et menace la durabilité des infrastructures touristiques. Cela souligne la nécessité de stratégies d'adaptation et de gestion intégrée du littoral, afin de préserver ses fonctions écologiques et socio-économiques.

Dans les départements de Fatick et Foundiougne, le tourisme présente également un potentiel important. La région offre une richesse de sites naturels et culturels, comprenant de nombreux cours d'eau et bolongs, les îles du Saloum, le Parc national du delta du Saloum (76 000 ha), ainsi que plusieurs monuments historiques. Le parc accueille plus de 250 espèces d'oiseaux et constitue le premier site RAMSAR transfrontalier d'Afrique de l'Ouest, avec la Gambie. Des sites comme l'île des Oiseaux et l'île de Sipo, ainsi que l'AMPC de Bamboung, abritent des espèces emblématiques (pélican gris, singe vert, hyène tachetée, crocodile, dauphin à bosse). La région dispose également de réserves communautaires et de sanctuaires fauniques (Palmarin, Fathala), ainsi que de puits de sel à Palmarin, Soum et Niodior, renforçant la diversité des offres touristiques.

Les potentialités culturelles sont également significatives, avec plus de 218 sites de tumuli et amas coquilliers recensés, le musée de MAHICAO, l'écomusée de Diakhao et la maison natale du poète-président à Djilor. Des événements culturels tels que le Festival Niumy et le festival transfrontalier Sénégal-Gambie favorisent le tourisme culturel et interculturel. En termes d'infrastructures, les départements de Fatick et Foundiougne disposaient en 2019 de 1 143 chambres et 2 238 lits.

Malgré ces atouts, le secteur reste limité par plusieurs obstacles, notamment l'insuffisance de centres de formation en hôtellerie et tourisme, l'enclavement de certains sites, la faible implication des autorités locales dans la gestion du secteur (éclairage public, sécurité, assainissement), et le phénomène d'érosion côtière. Dans ce contexte, le développement de l'écotourisme, conformément aux orientations du PSE, et la création de festivals régionaux interculturels constituent des leviers essentiels pour renforcer la durabilité et la compétitivité du tourisme dans la zone.

2.3.2.2. Pêche

Le secteur de la pêche constitue un pilier stratégique de l'économie nationale, représentant 2,3 % du PIB en 2019 (ANSD, 2020). La région de Thiès occupe une position dominante dans la production et l'exploitation des ressources halieutiques, contribuant à hauteur de 44,9 % de la pêche artisanale nationale en 2020. Cette activité est concentrée principalement dans le département de Mbour, qui regroupe 80,4 % des pêcheurs de la région en 2021 et assure près de 75 % de sa production halieutique totale (Situation économique et sociale de la région de Thiès, 2020-2021).

Le département de Mbour bénéficie d'un littoral propice à la pêche, s'étendant sur 75 km entre Ndayane et Joal, et abrite plusieurs ports de pêche, notamment ceux de Mbour, Joal, Ngaparou et Pointe Sarène. La pêche artisanale constitue la modalité dominante, soutenue par des infrastructures telles que le quai de pêche de Teffess et diverses installations de soutien. En 2021, 72 450 pêcheurs y étaient recensés, utilisant 10 727 pirogues, pour une production annuelle de 149 900 tonnes de produits halieutiques, valorisée à 62,397 milliards FCFA. Cette activité génère également des emplois dans les sous-secteurs de la transformation et du commerce. Les espèces les plus exploitées incluent les poissons, les mollusques et les crustacés (Service régional de la pêche de Thiès, 2019).

Malgré son importance économique et sociale, le secteur fait face à de nombreuses contraintes. La production halieutique est en baisse, tant en quantité qu'en qualité. Les défis incluent la

conservation des produits en période de saturation du marché, les interactions avec la pêche industrielle, les implications du changement climatique, le manque d'infrastructures de transformation et des conditions sanitaires précaires pour les transformatrices. L'érosion côtière constitue une contrainte majeure, réduisant les plages destinées aux débarquements et provoquant la destruction de pirogues et d'infrastructures. Enfin, le financement des investissements demeure limité, freinant l'expansion du secteur.

Dans la région de Fatick, la pêche reste une activité clé, soutenue par la proximité du littoral et la présence du fleuve Sine-Saloum. En 2013, 4 % des ménages pratiquaient la pêche, proportion qui se maintient particulièrement dans les départements de Fatick et Foundiougne. La pêche contribue à la compétitivité régionale, à la sécurité alimentaire et nutritionnelle, à la création d'emplois, ainsi qu'au commerce et à la transformation des produits halieutiques. Selon le rapport économique et social de 2021, Fatick est la deuxième région pratiquant le plus la pêche artisanale et l'aquaculture (15 % des ménages), derrière Saint-Louis (19,6 %).

La région dispose de plusieurs infrastructures, notamment deux quais de pêche, quatre unités de fabrication de glace (dont deux opérationnelles), un centre de mareyage de crevettes, un centre de pêche et quatre sites de transformation artisanale. Le parc piroguier comptait 3 070 pirogues immatriculées en 2021, avec d'autres en attente d'immatriculation. La production halieutique régionale est estimée à 25 050 tonnes en 2021, dont 62,5 % proviennent du département de Fatick. Les espèces dominantes sont les poissons (69 %), les mollusques (24,7 %) et les crustacés (6,3 %), avec 78 % de la production destinée au mareyage, 4,7 % à la consommation locale et 3,4 % à la transformation.

Les contraintes dans la région de Fatick sont similaires à celles de Mbour et incluent la dégradation des ressources marines due aux changements globaux, l'érosion côtière, le manque d'infrastructures et de systèmes d'information fiables, le déficit de formation et de financement, ainsi que les implications environnementales liés à l'exploitation pétrolière.

Pour assurer une pêche durable, les autorités doivent développer des politiques adaptées aux changements globaux, encadrer l'exploitation des hydrocarbures pour préserver l'équilibre écologique et la survie des ressources halieutiques, soutenir financièrement les acteurs du secteur et mettre en place des infrastructures adéquates, telles que des chambres froides et des unités de transformation.

2.3.2.3. Commerce

Le commerce constitue un secteur stratégique dans l'économie nationale, représentant 10,9 % de la production globale selon la situation économique et sociale du Sénégal en 2023. La région de Thiès occupe une position prépondérante dans ce secteur, avec un total de 52 marchés recensés en 2021. Le département de Mbour concentre 19 de ces marchés, dont 11 permanents et 8 hebdomadaires (« loumas »), ce qui souligne l'importance du commerce dans l'économie locale et la création d'emplois.

Outre les marchés traditionnels, le département de Mbour dispose d'un réseau dense de supermarchés, supérettes et épiceries, favorisé par sa situation littorale et la présence d'un port facilitant les échanges. L'accessibilité est également renforcée par un réseau routier performant et la proximité de l'aéroport international Blaise Diagne (moins de 50 km), positionnant Mbour comme un carrefour commercial stratégique. La présence de sites industriels et le développement du tourisme, notamment à Saly Portudal, contribuent à dynamiser le commerce local, soutenu par un marché de consommation important, avec plus de 830 495 habitants. Néanmoins, le développement du secteur reste limité par certaines contraintes, telles que l'insuffisance d'entreprises industrielles de grande envergure et la forte prédominance du secteur informel.

Dans la région de Fatick, le commerce revêt également une importance notable, bien que le commerce de gros y soit moins développé. En 2021, la région comptait 59 marchés, dont 30 permanents et 29 hebdomadaires. Les départements de Fatick et Foundiougne concentrent 77,96 % de ces marchés, avec respectivement 21 (dont 9 permanents) et 24 (dont 14 permanents). Les produits les plus commercialisés incluent les denrées locales agricoles, halieutiques et le sel, reflétant la spécialisation économique de la région.

Malgré ce dynamisme, le secteur commercial de la région de Fatick et de Foundiougne est confronté à des obstacles significatifs. Le manque d'industries de grande taille limite la diversification des produits et la structuration du marché, tandis que le commerce informel occupe une place prépondérante, réduisant la capacité de régulation et d'optimisation du secteur. Ces contraintes freinent l'essor économique et la compétitivité de l'activité commerciale dans la région.

2.3.2.4. Agriculture

L'agriculture constitue l'une des activités économiques majeures au Sénégal, représentant 9,6 % du PIB national en 2019 (ANSD, 2022) et 65,8 % de la valeur ajoutée du secteur primaire

en termes nominaux. La région de Thiès occupe une position stratégique dans ce secteur, se classant première en production horticole et de manioc, et deuxième pour l'arboriculture fruitière. Le département de Mbour joue un rôle prépondérant dans la production agricole régionale. Selon l'ANSD (2022), Mbour a été le premier département en termes de production céréalière lors de la campagne 2020-2021. Le Service départemental du développement rural (SDDR) y a recensé 48 000 tonnes de production agricole pour la campagne 2022-2023, soulignant l'importance de l'agriculture dans le tissu économique local.

Le département de Mbour bénéficie de fortes potentialités agricoles, liées à la présence de nombreux cours d'eau et de nappes phréatiques exploitables, favorisant l'irrigation des terres. Les conditions pédoclimatiques des localités telles que Nguéniène (vallée de Fadiol) et Fissel en font des pôles majeurs de production agricole. Les cultures pratiquées incluent les cultures vivrières (céréales, arachides), les cultures maraîchères (IED AFRIQUE, 2021-2022) et les cultures agro-industrielles. L'agriculture contribue significativement à l'emploi des jeunes et au développement économique local, et une gestion optimisée des potentialités hydro-agricoles constituerait un levier stratégique pour le développement économique régional et national.

Dans la région de Fatick, l'agriculture représente également une activité centrale, couvrant 50 % de la superficie régionale et employant plus de 80 % de la population active (ANSD, 2013). Les cultures céréalières (mil, riz, sorgho, etc.) dominent la production et sont principalement destinées à la consommation locale. Les cultures de rente sont représentées principalement par l'arachide, suivie du coton, de la pastèque, du sésame, ainsi que des cultures maraîchères et fruitières. La répartition des superficies cultivées varie selon les départements : 44 % pour Gossas, 31 % pour Fatick et 25 % pour Foundiougne (PAPSEN, 2015).

Les départements de Fatick et Foundiougne présentent un potentiel pédologique et hydrologique important, avec des sols variés (sols Dior, sols de bas-fond, sols halomorphes) et une pluviométrie favorable au développement des cultures pluviales. Le réseau hydrographique dense et les nappes souterraines disponibles permettent également l'irrigation des terres agricoles.

Malgré ces potentialités, le secteur agricole fait face à plusieurs contraintes limitant son développement. Parmi celles-ci figurent la dégradation des sols (salinisation, ensablement des rizières), l'accès limité à des terres cultivables et à des semences de qualité adaptées à la variabilité climatique, ainsi qu'un déficit de formation et de financement des producteurs. La combinaison de ces facteurs constitue un défi majeur pour la pérennité et l'essor du secteur agricole dans ces départements.

Ces caractéristiques humaines, marquées par une densité démographique élevée et par la prédominance des activités économiques telles que la pêche, le tourisme et l'agriculture, exercent une influence directe sur la dynamique du littoral. Les interactions entre ces pratiques anthropiques et les processus naturels sont examinées en détail dans la section dédiée aux facteurs anthropiques de la dynamique côtière (Chapitre III).

Conclusion du chapitre I

Ce premier chapitre a permis de formuler la problématique centrale de cette étude à partir d'une revue bibliographique approfondie portant sur la dynamique du littoral sénégalais et, plus particulièrement, sur la zone d'étude. Cette analyse a conduit à l'établissement d'un état de l'art, fournissant un éclairage précis sur l'évolution historique et contemporaine de la morphodynamique côtière. Elle a également permis d'identifier les principaux facteurs explicatifs de cette dynamique ainsi que ses conséquences environnementales et socio-économiques.

Parallèlement, une discussion conceptuelle a été menée afin de clarifier les notions clés et les cadres théoriques mobilisés, contribuant ainsi à structurer la réflexion et à orienter l'analyse scientifique. Enfin, le chapitre s'est achevé par une présentation synthétique de la zone d'étude, mettant en évidence ses caractéristiques physiques (climatiques, géomorphologiques et hydrologiques) ainsi que ses dimensions humaines et socio-économiques. Ce chapitre a ainsi établi les bases nécessaires pour aborder de manière structurée les problématiques complexes liées à la dynamique côtière dans ce contexte régional.

Chapitre II : Données et méthodologie de recherche

Ce chapitre expose le cadre méthodologique adopté pour analyser la dynamique morphosédimentaire du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum. L'approche retenue repose sur une démarche intégrative combinant la revue systématique de la littérature scientifique, portant sur la thématique de l'érosion côtière, des analyses géospatiales, investigations de terrain et enquêtes socio-économiques, afin d'appréhender la complexité des interactions entre processus physiques et dynamiques anthropiques. Cette structuration méthodologique vise à garantir la fiabilité des résultats tout en assurant une lecture multi-scalaire des transformations du trait de côte.

1. Revue documentaire

La revue documentaire a permis de construire le cadre conceptuel et analytique de l'étude, en mobilisant les travaux relatifs à la dynamique du trait de côte, aux approches de télédétection et aux interactions sociétés-littoral. Elle a également contribué à identifier les controverses méthodologiques, notamment en ce qui concerne la définition et le suivi du trait de côte dans les environnements sableux tropicaux.

Cette recherche documentaire a été conduite à travers diverses sources et institutions. Elle a mobilisé les bibliothèques numériques des universités Assane Seck de Ziguinchor et Cheikh Anta Diop de Dakar, ainsi que la plateforme « Les rivières du Sud » de l'Université de Ziguinchor. Des informations ont également été collectées auprès d'institutions spécialisées telles que le Centre de Suivi Écologique (CSE), les services des pêches, les mairies locales, l'APIX SA, la SAPCO, et le service régional du tourisme de Thiès via son antenne de Mbour. Enfin, la documentation a été complétée par des recherches sur Internet afin d'actualiser et d'élargir les données disponibles.

2. Collecte et traitement des données

Pour cette étude, deux types de données ont été mobilisés : les données géospatiales et les données collectées directement sur le terrain. Ces deux catégories de données permettent de combiner l'analyse spatiale des dynamiques côtières avec des observations et mesures empiriques, assurant ainsi une compréhension intégrée du phénomène étudié.

2.1. Données de terrain

Les travaux de terrain ont permis d'aborder de manière approfondie la problématique étudiée, en établissant un contact direct avec la réalité locale. Ces travaux ont mobilisé plusieurs

méthodes et outils de collecte de données. Ils ont consisté, dans un premier temps, en des observations directes sur le terrain, complétées par l'administration de questionnaires auprès des riverains avec un taux de sondage de 7 %, ainsi que par la conduite d'entretiens semi-directifs. Par ailleurs, des prélèvements d'échantillons de sédiments ont été réalisés sur les plages pour analyse, et des photographies ont été prises afin d'illustrer et documenter les observations.

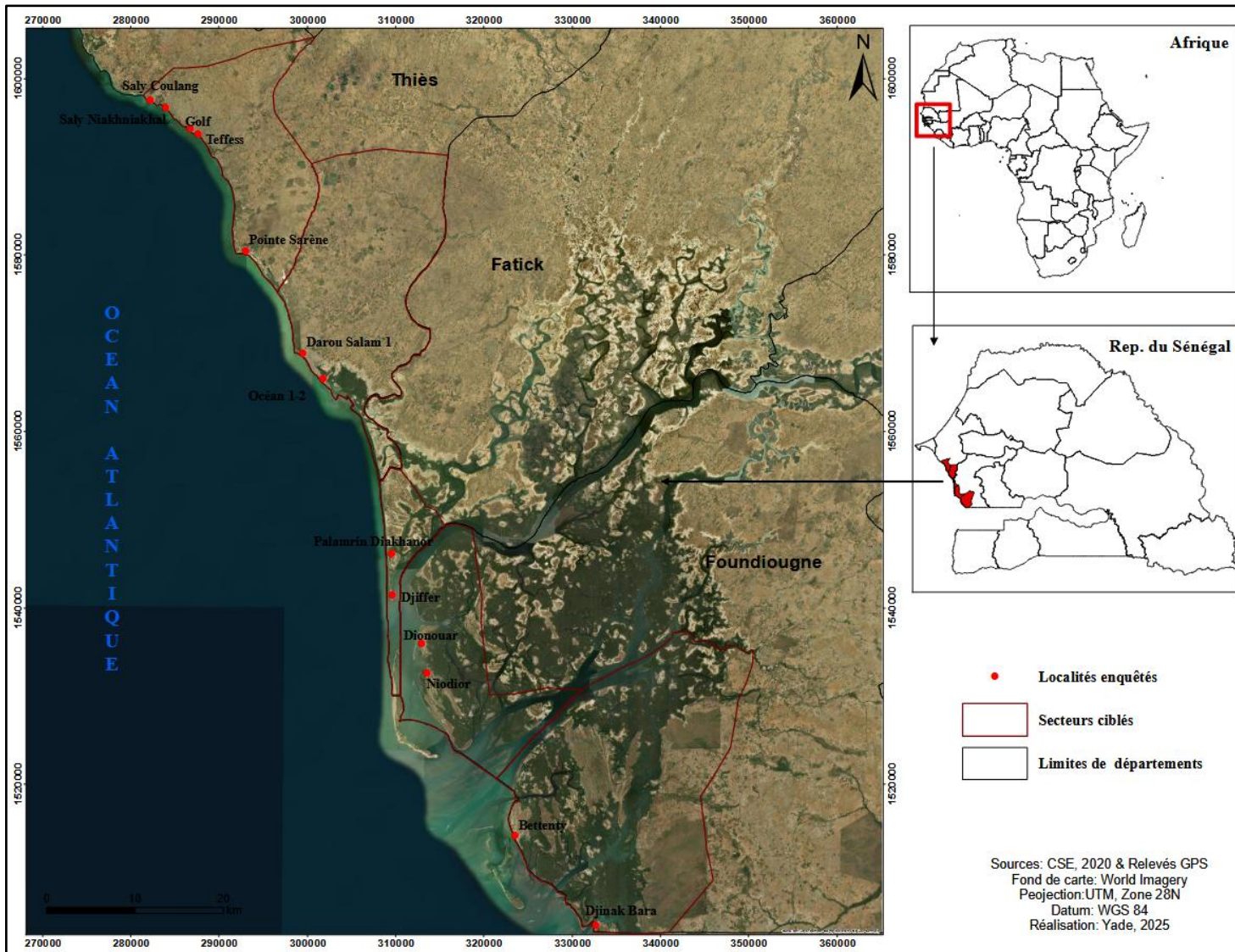
2.1.1. Observation directe

L'observation directe, méthode largement reconnue pour l'étude des phénomènes environnementaux, a constitué un outil essentiel pour appréhender la problématique de l'érosion côtière dans la zone étudiée. Cette approche a permis un contact immédiat avec les réalités du terrain, offrant une compréhension fine des dynamiques côtières. Selon Bastie et Dezert (1990), « pour une étude fiable, il est indispensable d'affronter le terrain afin d'appréhender directement sa réalité, ce qui constitue la seule méthode scientifique fiable ». Grâce à cette approche, il a été possible d'identifier et d'analyser les facteurs de l'érosion côtière, ses manifestations morphologiques, ainsi que ses implications environnementales et socio-économiques sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte jusqu'au delta du Saloum.

2.1.2. Enquêtes socio-économiques

La collecte de données socio-économiques auprès des populations côtières a permis d'appréhender la perception locale des dynamiques du littoral de la Petite-Côte aux îles du Saloum, en lien avec l'érosion côtière. Les enquêtes ont fourni des informations sur la manière dont les acteurs locaux perçoivent le recul du trait de côte et sur les pertes économiques associées. Elles ont également permis d'identifier les stratégies d'adaptation mises en œuvre, telles que le déplacement des habitations, la construction de digues artisanales, et d'évaluer les implications sociales des projets de protection côtière, tels que les épis ou les rechargements de plages.

Ces enquêtes ont été réalisées dans treize localités (cf. carte 4), sélectionnées à la suite d'un diagnostic préalable visant à identifier les quartiers, villages ou îles les plus affectés par l'érosion. Cette approche a assuré une représentativité des situations et a permis de recueillir des données pertinentes pour l'analyse des effets socio-économiques et des réponses locales face au phénomène.



Carte 4 : Localités de nos interlocuteurs (enquêtes de terrain)

Pour une population mère de 5 217 individus, avec une marge d'erreur fixée à 5 % et un niveau de confiance de 95 %, la taille d'échantillon calculée est d'environ 358 individus, correspondant à un taux d'échantillonnage de 7 % (voir tableau 1). Le calcul du taux d'échantillonnage a été réalisé en utilisant la méthode d'échantillonnage de Bernoulli, qui repose sur un cadre probabiliste simple mais fiable.

En effet, la méthode de Bernoulli consiste à attribuer à chaque unité de la population une probabilité d'inclusion dans l'échantillon et une probabilité complémentaire d'exclusion. Chaque unité est sélectionnée de manière indépendante, ce qui minimise les biais liés à des critères subjectifs. Dans ce contexte, la taille finale de l'échantillon devient une variable aléatoire, contrairement à d'autres méthodes où elle est fixée *a priori*. Ce processus suit une loi de Bernoulli, définie par une variable binaire indiquant si une unité est incluse ou non dans l'échantillon. Cette loi constitue la base de nombreux modèles statistiques, notamment en régression logistique et dans l'analyse de données binaires. Son utilisation garantit une distribution uniforme des observations et contribue à réduire les biais systématiques, en particulier dans les études portant sur de grandes populations.

Dans le cadre de notre étude sur la dynamique du littoral de la Petite-Côte, cette méthode a été employée pour constituer un échantillon représentatif des foyers affectés par l'érosion côtière, permettant d'analyser les comportements individuels, les tendances et les implications des politiques publiques.

La méthode de Bernoulli présente plusieurs avantages :

- ✓ facilité de mise en œuvre : la sélection des unités repose sur une simple probabilité et ne nécessite pas de bases de sondage complexes ;
- ✓ indépendance des observations : chaque unité est sélectionnée indépendamment, ce qui évite les effets de corrélation entre individus ;
- ✓ souplesse d'application : le taux d'inclusion peut être ajusté selon les besoins et les contraintes du terrain ;
- ✓ précision statistique : une probabilité d'inclusion correctement définie garantit des estimations non biaisées des paramètres de la population ;
- ✓ applicabilité universelle : la méthode peut être utilisée pour des études qualitatives ou quantitatives dans divers contextes.

Cependant, cette méthode comporte également certaines limites :

- ✓ variabilité de la taille de l'échantillon : la nature aléatoire du processus peut entraîner des fluctuations de la taille finale de l'échantillon, ce qui peut poser des difficultés de planification ;
- ✓ représentativité incertaine : sans stratification, certains sous-groupes peuvent être sous-représentés, notamment si la probabilité d'inclusion est faible ;
- ✓ nécessité d'une base de population fiable : la méthode suppose que chaque unité dispose d'une probabilité d'inclusion correctement définie ;
- ✓ dépendance à la taille de l'échantillon : dans les populations très hétérogènes, un échantillon insuffisant peut générer des erreurs statistiques importantes ;
- ✓ moins adaptée aux phénomènes rares : la faible occurrence d'un événement dans la population peut limiter sa présence dans l'échantillon et compliquer l'analyse.

Malgré ces limitations, l'échantillonnage de Bernoulli reste un outil efficace et polyvalent, dont l'application doit être adaptée au contexte de l'étude. Dans certains cas, il peut être combiné avec des méthodes de redressement statistique afin d'améliorer la représentativité des données.

Voici l'équation de Bernoulli que nous avons utilisée pour calculer le taux d'échantillonnage :

$$n = \frac{(Z)^2 \times N}{(Z)^2 + \alpha^2 \times (N - 1)}$$

Avec :

n = taille de l'échantillon

Z = est la valeur type correspondant au niveau de confiance choisi

N = taille de l'univers investigué

α = largeur de la fourchette exprimant la marge d'erreur

Tableau 1 : Nombre de ménages par quartier ayant fait l'objet d'enquêtes

Régions	Départements	Communes	Quartier	Nombre de ménages	Nombre de Ménages à enquêter par quartier	Pourcentage (%)
Thiès	Mbour	Mbour	Golf	538	37	10,31
Thiès	Mbour	Mbour	Teffess	822	56	15,76
Thiès	Mbour	Saly Portudal	Saly Niakh Niakh	324	22	6,21
Thiès	Mbour	Saly Portudal	Saly Coulang	182	12	3,49
Thiès	Mbour	Malicounda	Pointe Sarène	476	33	9,12
Thiès	Mbour	Joal Fadiouth	Darou Salam 1	326	22	6,25
Thiès	Mbour	Joal Fadiouth	Océan 1-2	19	1	0,36
Fatick	Fatick	Palmarin	Djiffer	763	52	14,63
Fatick	Fatick	Palmarin	Palmarin Diakhanor	93	6	1,78
Fatick	Foundiougne	Dionewar	Dionewar	481	33	9,22
Fatick	Foundiougne	Dionewar	Niodior	605	42	11,60
Fatick	Foundiougne	Toubacouta	Djinack Bara	51	3	0,98
Fatick	Foundiougne	Toubacouta	Béttenty	537	37	10,29
Total	3	7	13	5217	358	100.00
Taux échantillonnage	.....	.....	.....	7	.....	.....

Source : RGPG-5, ANSD, 2023

Pour réaliser ces enquêtes, nous avons choisi la méthode d'échantillonnage aléatoire simple, reconnue comme l'une des approches les plus fondamentales et rigoureuses pour constituer un échantillon représentatif au sein d'une population cible. Cette méthode repose sur le principe d'égalité des chances, selon lequel chaque individu de la population dispose de la même probabilité d'être sélectionné (Lohr, 2010). Son application nécessite toutefois la disponibilité d'une base de sondage complète, c'est-à-dire une liste exhaustive des unités statistiques composant la population étudiée.

Dans le cadre de nos travaux, cette approche s'est révélée particulièrement appropriée, permettant de collecter des données socio-économiques fiables sur les interactions entre les communautés littorales et leur environnement naturel. Le caractère aléatoire du tirage contribue à réduire les biais de sélection, renforçant ainsi la validité statistique des résultats et leur généralisation à l'ensemble de la population étudiée (Kish, 1965).

Selon Gumuchian et Marois (2000), l'échantillonnage aléatoire simple présente plusieurs avantages :

- ✓ généralisabilité : chaque individu de la population mère a une probabilité identique d'être inclus dans l'échantillon, ce qui favorise la représentativité ;
- ✓ simplicité de mise en œuvre : la méthode ne requiert pas de stratification préalable de la population et peut être appliquée directement sur une liste complète ;
- ✓ neutralité et objectivité : le caractère aléatoire du tirage limite les biais liés à l'intervention subjective du chercheur et assure une distribution équitable des unités sélectionnées.

Cependant, certaines limites doivent être considérées. Lorsque la base de sondage n'est pas véritablement exhaustive ou représentative de la diversité de la population, des biais peuvent subsister malgré le tirage aléatoire. De plus, pour des populations très nombreuses ou géographiquement dispersées, cette méthode peut présenter des contraintes logistiques importantes et engendrer des coûts élevés.

2.1.3. Guides d'entretien

Les guides d'entretien semi-directifs ont constitué des outils méthodologiques essentiels pour structurer la collecte de données qualitatives tout en laissant une marge de liberté aux interlocuteurs, favorisant ainsi des échanges riches et spontanés. Contrairement aux questionnaires fermés, souvent rigides, ces guides privilégient une approche souple et

adaptable, particulièrement adaptée à l’exploration des perceptions, des pratiques locales et des stratégies d’adaptation aux changements environnementaux (Blanchet et Gotman, 2010).

Ces outils ont permis d’engager un dialogue avec une diversité d’acteurs, notamment les autorités locales, les directeurs d’hôtels, les pêcheurs, les agriculteurs et les transformatrices de produits halieutiques. Ils ont également offert un accès à des savoirs situés, souvent absents des données quantitatives classiques, enrichissant ainsi la compréhension des réalités locales. L’entretien semi-directif s’est révélé indispensable pour appréhender la complexité des interactions entre les dynamiques naturelles (érosion côtière, salinisation des sols, submersion marine) et les logiques sociales (formes d’occupation et d’exploitation de l’espace, stratégies de résilience, etc.).

D’un point de vue scientifique, l’élaboration de guides d’entretien rigoureux constitue une condition nécessaire pour assurer la comparabilité des données recueillies tout en respectant la diversité des contextes locaux (Blanchet et Gotman, 2010). Ce type d’approche favorise la production de connaissances fines, ancrées et méthodologiquement solides, conformes aux standards de la recherche en sciences sociales et environnementales.

Ainsi, les enquêtes socio-économiques ont apporté, dans le cadre de cette étude, un complément indispensable aux données physiques et géospatiales, en mettant en évidence les interactions complexes entre les sociétés et leur environnement (voir tableau 2). Elles fournissent également des informations qualitatives et quantitatives utiles à l’aide à la décision pour les acteurs et décideurs locaux. Enfin, elles permettent de réaliser des diagnostics territoriaux plus précis, de vérifier les hypothèses formulées *a priori* et de proposer des modèles de politiques adaptées aux réalités locales.

Tableau 2: Objectifs et apports des enquêtes socio-économiques

Objectifs	Rôle des enquêtes socio-économiques
Connaissance du territoire	Identifier les usages et acteurs du littoral
Diagnostic des implications	Mesurer les effets humains et économiques de l’érosion
Compréhension sociale	Analyser les perceptions et savoirs locaux
Appui à la gestion	Proposer des solutions adaptées et participatives
Validation scientifique	Relier les données physiques aux réalités humaines

2.2. Données géospatiales

Pour atteindre les objectifs de cette recherche, nous avons mobilisé un ensemble diversifié de données géospatiales. Ces données comprennent à la fois des images satellitaires à haute et moyenne résolution et des fichiers vectoriels au format *Shapefile*, permettant une analyse spatiale fine et précise des phénomènes étudiés.

2.2.1. Inventaire des données géospatiales et traitement des images satellitaires

Le tableau 3 présente un résumé détaillé de l'ensemble des données géospatiales mobilisées dans le cadre de cette étude.

Tableau 3 : Données Géospatiales

Données images							
Années	Type	Origine et Capteur	Date d'acquisition	Bandes spectrales	Résolution	Format	Source
1973	Image satellite	Landsat1-MSS (NASA/USGS)	21/02/1973	MS	60 m	Numérique	Glovis
1987		Landsat5-TM (NASA/USGS)	11/03/1987	MS	30 m		
2002		Landsat7-ETM (NASA/USGS)	12/03/2002	MS+PANCH			
2013		Landsat8 OLI/TIRS (NASA/USGS)	28/04/2013	MS+PANCH			
2024		Landsat9 OLI/TIRS (NASA/USGS)	12/04/2024	MS+PANCH			
Données Shapefile							
Bathymétrie						Numérique	GEBCO
Limites administratives		RSTM				Shapefile	Diva-GIS/CSE
MNT	Image satellite				90 m	Numérique	Diva-GIS
Réseau routier						Shapefile	
Réseau Hydrographique						Shapefile	

2.2.1.1. Caractéristiques des données images

Les données images utilisées dans cette étude proviennent de satellites Landsat. Le programme Landsat résulte de la collaboration entre la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) et l'USGS (*United States Geological Survey*), constituant ainsi le premier programme civil d'observation terrestre par satellite. Depuis son lancement initial en 1972, neuf satellites Landsat ont été déployés. Toutefois, le Landsat 6, lancé en 1993, a échoué, et le Landsat 9 n'était pas encore achevé à la date de cette étude. Selon le numéro de série du satellite, différents capteurs ont été mobilisés, notamment le MSS (*Multispectral Scanner*), le TM (*Thematic Mapper*), l'ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) et l'OLI (*Operational Land Imager*), permettant l'acquisition d'images à diverses résolutions spatiales et spectrales adaptées à l'analyse des dynamiques littorales. Le recours aux images Landsat se justifie par leur disponibilité diachronique sur le long terme, permettant une analyse rétrospective de l'évolution du trait de côte depuis les années 1970. Toutefois, la résolution spatiale (30 m) et les différences entre capteurs constituent des sources d'incertitude, notamment dans les zones à forte variabilité morphologique, nécessitant des opérations de prétraitement et de validation rigoureuses.

❑ Capteur MSS (Multi Spectral Scanner)

Le radiomètre multispectral (MSS) constitue le premier capteur développé après l'apparition de la caméra RVB (*Return Beam Vidicon*). Il est composé de quatre bandes spectrales, numérotées de 4 à 7, dont les deux premières couvrent le spectre visible et les deux dernières le proche infrarouge. La résolution spatiale du MSS à bord de Landsat 1 est de 60 mètres, offrant ainsi une capacité d'observation adaptée à l'analyse des dynamiques terrestres et littorales à moyenne échelle.

❑ Capteur TM (Thematic Mapper)

Le capteur *Thematic Mapper* (TM) embarqué sur Landsat 5 est composé de sept bandes spectrales, numérotées de 1 à 7, offrant une résolution spatiale de 30 mètres pour les six premières bandes et une résolution thermique de 120 mètres pour la septième bande. Comparé au capteur MSS, le TM présente une résolution spatiale et spectrale nettement améliorée, permettant une observation détaillée dans le spectre visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen. Cette combinaison de bandes spectrales et de résolutions spatiales distinctes permet d'analyser avec précision la couverture terrestre et les processus environnementaux, y compris les dynamiques littorales et côtières.

❑ **Capteur ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)**

Le capteur *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) constitue une version améliorée du capteur TM. Il conserve les sept bandes spectrales du TM tout en intégrant une huitième bande panchromatique, offrant une résolution spatiale de 15 mètres. Par ailleurs, la résolution spatiale de la bande thermique, initialement de 120 mètres sur le TM, est améliorée à 60 mètres sur l'ETM+. Ces améliorations permettent une observation plus fine et détaillée de la couverture terrestre et des processus environnementaux, renforçant la capacité d'analyse des dynamiques littorales et côtières.

❑ **Capteur OLI (Operational Land Imager) / TIRS (Thermal Infrared Sensor)**

Le capteur *Operational Land Imager* (OLI) est un radiomètre multispectral qui observe dans neuf bandes spectrales, allant du visible au moyen infrarouge. Il conserve les sept bandes spectrales présentes sur l'instrument ETM+ de Landsat 7 et ajoute deux canaux supplémentaires : un canal bleu à 440 nm destiné à la correction atmosphérique et un canal à 1 380 nm pour la détection des nuages. Les bandes dans l'infrarouge thermique sont désormais mesurées par l'instrument TIRS (*Thermal Infrared Sensor*, voir ci-dessous).

La technologie utilisée sur OLI diffère radicalement de celle des instruments précédents. Le scanner à miroir oscillant (*whiskbroom*) est remplacé par une barrette fixe de détecteurs qui capture simultanément les données sur l'ensemble de la largeur du champ optique, selon le principe du *pushbroom*. Cette technologie, testée sur le satellite expérimental EO-1, permet une meilleure uniformité radiométrique et une amélioration de la qualité des données. La résolution spatiale est de 30 mètres pour toutes les bandes, à l'exception de la bande panchromatique qui présente une résolution de 15 mètres.

Le TIRS est un radiomètre infrarouge thermique multispectral doté de deux canaux, conçu pour observer des longueurs d'onde spécifiques qui n'étaient pas couvertes par l'OLI tout en assurant la continuité des mesures des anciens satellites Landsat. Comme OLI, TIRS utilise la technologie *pushbroom*. La résolution spatiale des images est de 100 mètres, contre 60 mètres pour l'instrument thermique de Landsat 7. Pour l'infrarouge thermique, TIRS est équipé de capteurs *QWIP* (*Quantum Well Infrared Photodetector*), technologie mature offrant une sensibilité accrue. Le développement de TIRS, intégré tardivement dans la charge utile de Landsat 8, a été réalisé par la NASA, avec une durée de vie nominale estimée à trois ans.

2.2.2. Données Vecteurs

Les données vectorielles mobilisées dans le cadre de cette étude proviennent de la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) et ont été téléchargées via la plateforme DIVA-GIS. Elles comprennent principalement : les modèles numériques de terrain (MNT), le réseau routier, les données hydrographiques, les données bathymétriques et les limites administratives.

Les MNT sont exploités pour cartographier les variations topographiques de la zone d'étude, tandis que les données bathymétriques permettent d'estimer les profondeurs des plages immergées. Les autres données vectorielles sont utilisées pour représenter le réseau routier et hydrographique ainsi que les limites administratives de la zone, facilitant ainsi l'analyse spatiale et l'intégration des différentes couches d'information géographique dans le SIG.

2.2.3. Traitement des données pour la cinématique du trait de côte

Les données image utilisées dans le cadre de cette étude (tableau 3) présentent des caractéristiques variées, tant au niveau de la résolution spatiale et spectrale que de l'étendue des scènes. En conséquence, un prétraitement des données a été effectué afin de corriger et d'harmoniser les images avant d'entreprendre le traitement analytique proprement dit.

2.2.3.1. Prétraitement des images satellitaires

L'image de 1973 présente des caractéristiques particulières par rapport aux autres images utilisées dans cette étude, notamment en termes de résolution spatiale, de résolution spectrale et de couverture de la zone d'étude. Afin d'harmoniser la couverture de la zone, nous avons procédé au mosaïquage des deux scènes composant cette image (figure 4).

Mosaïquage : Les images satellites sont acquises sous forme de scènes, chaque scène correspondant à une portion spécifique de la surface terrestre. Lorsque la zone d'étude est couverte par plusieurs scènes, le mosaïquage est nécessaire pour obtenir une image unique homogène représentant l'intégralité de la zone d'intérêt. Cette opération implique le téléchargement des scènes concernées et leur assemblage selon des critères géométriques et radiométriques précis.

Toutefois, les scènes à mosaïquer peuvent présenter des différences de contraste et de tonalité, entraînant une variabilité des niveaux de gris pour un même objet dans l'image finale. Pour corriger ces divergences, un rééquilibrage des contrastes et une harmonisation des histogrammes sont appliqués. Selon Caloz et Collet (2001), cette procédure consiste à ajuster

les histogrammes des images à mosaïquer afin que leur distribution sur l'échelle des gris soit comparable à celle d'une image de référence.

Dans le cadre de cette étude, le mosaïquage a été appliqué à l'image de 1973, initialement acquise en deux scènes distinctes, afin de produire une image unique, cohérente et prête pour l'analyse ultérieure.

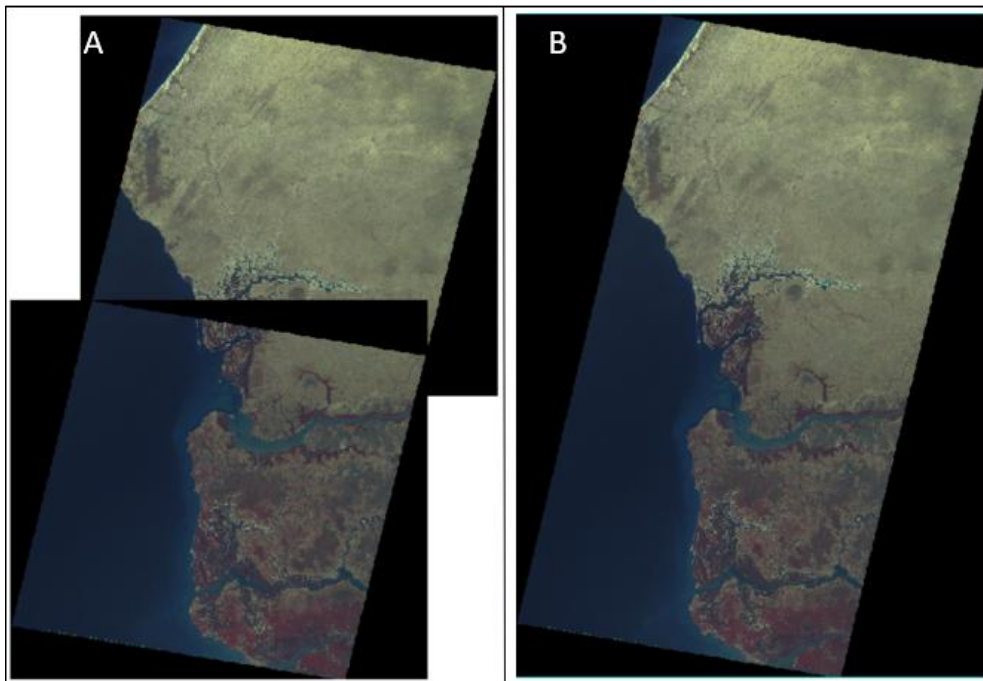


Figure 4 : Deux scènes d'images qui couvrent la zone d'étude (A) ; Fusion des images : mosaïque (B)

Géoréférencement : Après le mosaïquage de l'image de 1973, une composition colorée en fausse couleur infrarouge a été réalisée. Ce choix est justifié par la configuration du capteur MSS, équipé de quatre bandes spectrales : deux dans le visible (vert et rouge) et deux dans le proche infrarouge (PIR1 et PIR2). Cette configuration a permis de procéder au géoréférencement en utilisant une image de référence acquise en 2024, pour laquelle une composition en fausse couleur infrarouge avait également été employée, facilitant ainsi l'identification des points de contrôle au sol (*GCP - Ground Control Points*).

Le géoréférencement de l'image de 1973 a été effectué dans le but de corriger sa résolution spatiale et de permettre sa superposition précise avec les autres images de l'étude. L'objectif principal de cette opération était d'harmoniser la résolution initiale de 60 m de l'image MSS à une résolution de 30 m, correspondant à celle des autres images utilisées, afin de faciliter les analyses comparatives et les traitements multi-temporels.

Pour cette opération, le logiciel ENVI a été utilisé. La qualité du géoréférencement dépend directement de la précision et de la répartition des GCP sur l'ensemble de l'image, notamment dans les zones présentant un relief marqué. Dans cette étude, l'erreur de géoréférencement a été évaluée à 0,27, attestant d'une précision satisfaisante.

Enfin, un rééchantillonnage a été réalisé afin d'ajuster les valeurs numériques des pixels de l'image géoréférencée en fonction de celles de l'image de référence, garantissant ainsi la cohérence spatiale et radiométrique nécessaire pour les analyses ultérieures.

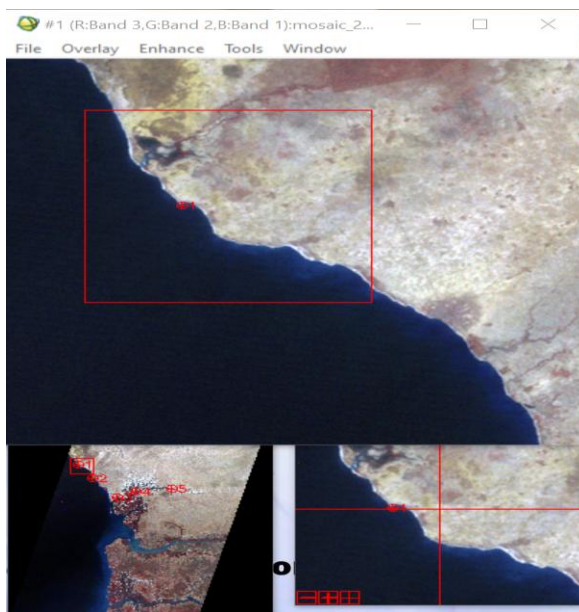


Figure 5 : Image à corriger

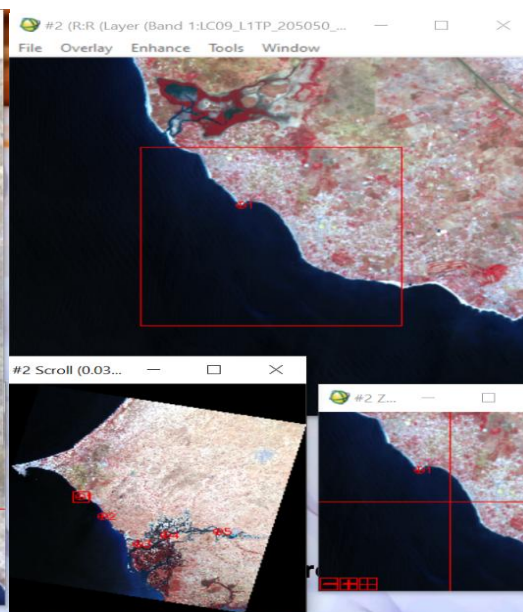


Figure 6 : Image de référence

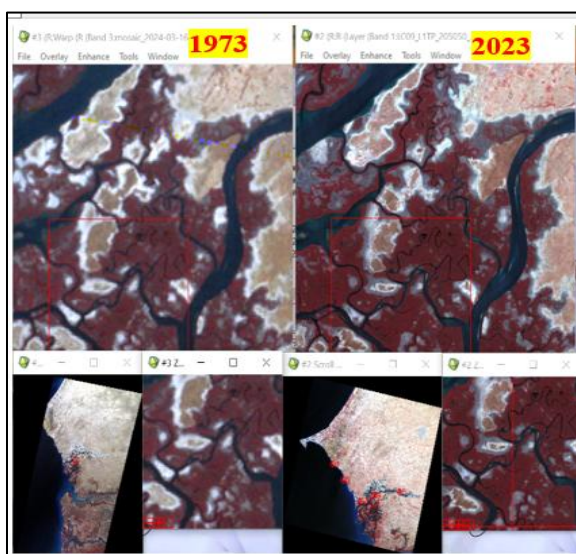


Figure 7 : Image géoréférencée

#	Base X	Base Y	Warp X	Warp Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
#1+	2396.00	3808.00	1163.00	1857.00	1163.0110	1856.9897	0.0110	-0.0113	0.0158
#2+	2901.00	4498.00	1414.00	2201.00	1414.0278	2200.9715	0.0278	-0.0285	0.0398
#3+	3734.00	5418.00	1831.00	2662.00	1831.1764	2661.8196	0.1764	-0.1804	0.2523
#4+	4369.00	5130.00	2149.00	2517.00	2148.6393	2517.3689	-0.3607	0.3689	0.5159
#5+	5570.00	5002.00	2749.00	2453.00	2749.1454	2452.8513	0.1454	-0.1487	0.2080

Figure 8 : Tableau des GCP

Extraction de la zone d'étude : Après les prétraitements, la zone d'étude a été délimitée par extraction à l'aide d'un ROI (Region Of Interest). Cette opération consiste à définir précisément les limites géographiques de la zone étudiée sur toutes les images multi-temporelles afin d'assurer une cohérence spatiale pour l'ensemble des analyses. L'extraction a été réalisée à l'aide du logiciel ENVI 5.6, garantissant une sélection précise et uniforme de la zone d'intérêt sur toutes les dates considérées.

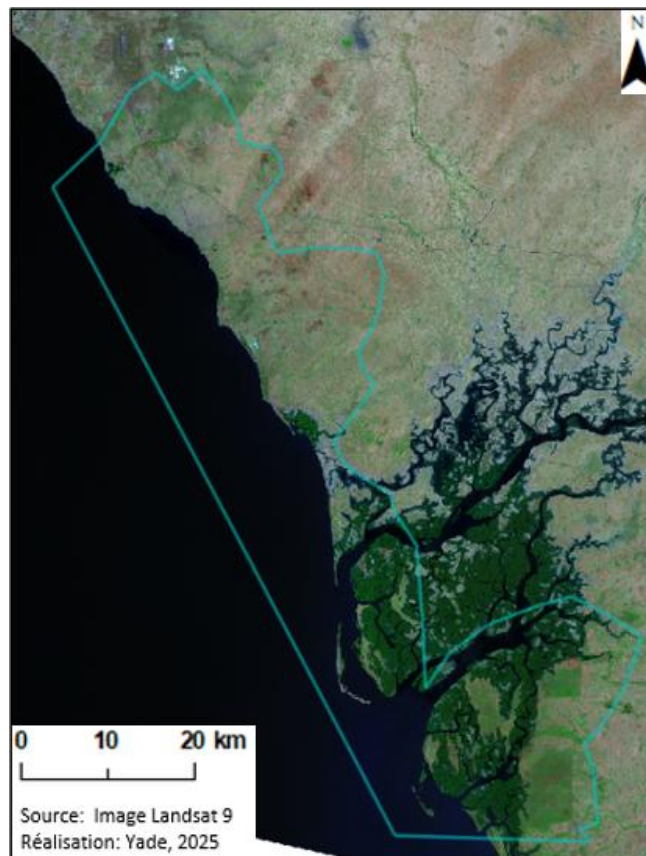


Figure 9 : Extraction de la zone d'étude

2.2.3.2. Identification, choix et protocole d'extraction de la ligne de référence

Cette section a pour objectif de présenter les critères scientifiques utilisés pour déterminer la position du trait de côte, de justifier le choix de la ligne de référence et de détailler le protocole méthodologique adopté pour son extraction.

2.2.3.2.1. Identification et choix de la ligne de référence

Le choix du référentiel pour représenter la position du trait de côte nécessite préalablement l'identification des différents types de lignes de référence existant dans la zone d'étude. Les travaux antérieurs sur la cinématique du littoral mettent en évidence la complexité de la définition du trait de côte, en raison du caractère très dynamique des plages et de la diversité de

leurs morphologies et sédiments. Dans ce contexte, il est indispensable d'identifier d'abord les différents types de traits de côte présents, puis de sélectionner la ligne de référence la plus appropriée en fonction des caractéristiques de la zone étudiée et de la nature des données géospatiales disponibles.

2.2.3.2.1.1. Identification de la ligne de référence

La complexité de la définition du trait de côte réside à la fois dans sa dynamique et dans sa variabilité morphologique. Fondamentalement, le trait de côte correspond à la limite séparant le domaine marin du domaine terrestre. Selon la littérature, trois principaux types de critères permettent de l'identifier : les caractéristiques marégraphiques, les caractéristiques botaniques et les caractéristiques géomorphologiques. Cette diversité d'approches explique pourquoi les définitions du trait de côte varient selon les auteurs et les objectifs des études, conduisant à des résultats parfois divergents dans les travaux sur la dynamique littorale.

Bourles (1998) définit le trait de côte principalement en fonction des marées, considérant qu'il s'agit d'une limite très mouvante qui se déplace en fonction de l'état de la mer et du cycle marégraphique. À l'inverse, Boak et Turner (2005) recensent 19 types de traits de côte sur la base de 45 indicateurs relevés dans environ 80 publications, illustrant ainsi la multiplicité des formes et des critères d'identification de ce concept. Juigner (2012) résume cette complexité en affirmant que « le trait de côte n'a pas une seule définition mais plusieurs, selon les indicateurs que les auteurs lui attribuent pour l'identifier ».

Dans sa thèse intitulée "Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approche régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes" (Faye, 2010, vol. 1), l'auteur souligne également la délicatesse de la caractérisation du trait de côte. Dans le cadre de notre étude, et en fonction des caractéristiques physiques de la côte étudiée, nous avons identifié plusieurs lignes de référence pouvant être assimilées au trait de côte, permettant ainsi d'assurer une base cohérente pour l'analyse de la dynamique littorale.

2.2.3.2.1.1.1. Critères géomorphologiques

De manière générale, le segment de la Petite-Côte compris entre Saly Portudal et les îles du Saloum se caractérise par un profil bas et sableux, comprenant de longues plages bordées de cordons dunaires, des baies plus ou moins ouvertes et, vers le sud, des interfaces dunes-mangroves (CSE, 2004). Les falaises consolidées y sont rares, et les escarpements observés

correspondent principalement à des falaises dunaires ponctuelles (scarps éoliens ou marins) formées lors d'épisodes énergétiques exceptionnels.

Dans ce contexte, quatre lignes de référence morphologiques ont été définies pour identifier le trait de côte et suivre son évolution spatio-temporelle (voir figure 10).

- **Haut de falaise**

Il correspond à une rupture de pente supérieure entre un plateau et un versant littoral abrupt. Dans le périmètre étudié, cette ligne de référence est applicable uniquement localement, là où des talus consolidés ou anthropisés sont présents. Le recul de cette ligne indique une instabilité du littoral, résultant notamment du sapement par la houle, de l'érosion liée au ruissellement et du décapage de la végétation.

- **Pied de falaise**

Rupture de pente inférieure à l'interface entre la base du versant et la plage active (zone intertidale), cette ligne de référence est pertinente uniquement dans les secteurs où une falaise est effectivement présente. Sur les tronçons constitués exclusivement de plages sableuses, cette rupture de pente est absente et ne peut donc être utilisée comme indicateur du trait de côte.

- **Sommet de falaise dunaire**

Crête d'un corps dunaire entaillé (falaise dunaire) : cette ligne de référence est ponctuelle dans le secteur étudié et se manifeste principalement après des épisodes de tempêtes ou de surcotes, ainsi que dans des zones présentant un déficit sédimentaire, comme les segments urbanisés de Saly-Mbour ou les tronçons exposés de Pointe Sarène à Joal-Fadiouth. Le recul de la crête dunaire indique une perte de volume du corps dunaire, liée notamment au piétinement, à l'extraction de sable et à la dégradation de la végétation stabilisatrice.

- **Pied de dune**

Rupture marquant l'interface dune-plage (limite supérieure de l'estran en conditions ordinaires), cette ligne de référence constitue la plus répandue et la plus stable sur l'ensemble de la zone d'étude (de Saly aux îles du Saloum). Son déplacement vers l'intérieur du littoral traduit le recul du système dunes-plages, résultant de l'action combinée de la houle, des surcotes, de l'élévation du niveau de la mer et de la rigidification du rivage due à la présence d'ouvrages, d'enrochements ou d'emprises construites au pied des dunes.

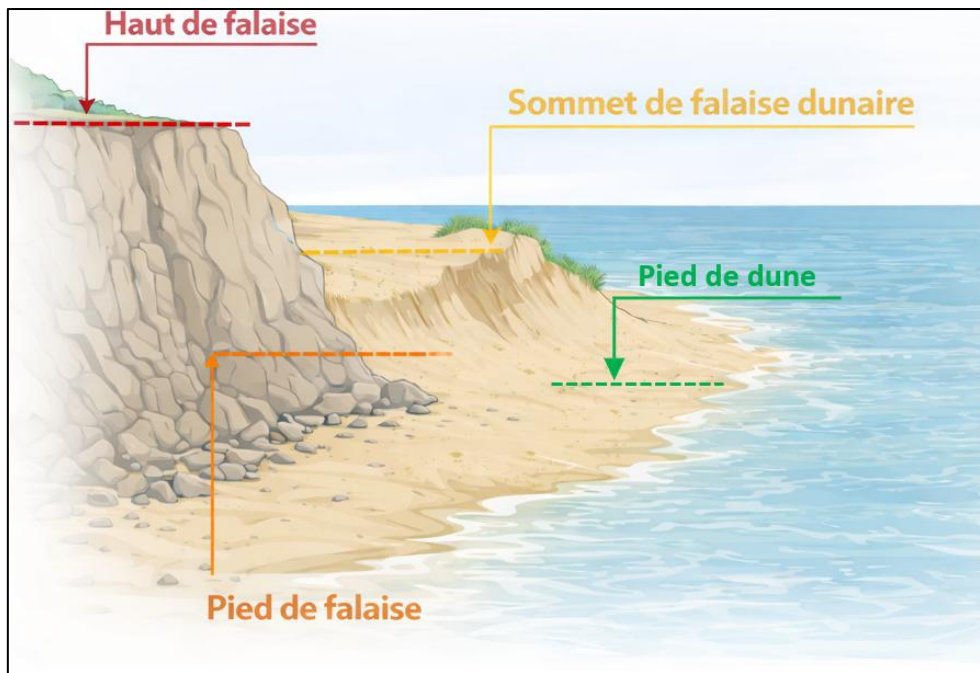


Figure 10 : Lignes de références géomorphologiques (Réalisation : Yade, 2025).

L'analyse des lignes de référence géomorphologiques sur la Petite-Côte sénégalaise révèle une forte variabilité spatiale du trait de côte et met en évidence l'influence combinée de l'érosion marine et des pressions anthropiques sur la dynamique littorale.

2.2.3.2.1.1.2. Critères botaniques

Ces lignes correspondent à des marqueurs pouvant être assimilés aux traits de côte et sont matérialisées par la végétation littorale. Les limites de cette végétation sont fréquemment utilisées comme ligne de référence pour suivre l'évolution historique du trait de côte, car elles sont facilement identifiables sur les images satellites, les photographies aériennes et l'imagerie Google Earth. En général, les limites botaniques coïncident avec le bord des cordons littoraux, permettant ainsi l'utilisation d'un indicateur unique le long d'un segment côtier. Elles correspondent également, dans la plupart des cas, au niveau maximal saisonnier de l'eau le long des rivages aménagés (Faye, 2010 ; Thior, 2020).

Sur la Petite-Côte sénégalaise, il est possible de distinguer les limites inférieures des pelouses dunaires et celles associées à une végétation pérenne (arbres, arbustes, etc.). Au nord de la côte, notamment dans le département de Mbour, la végétation pérenne est plus abondante que les pelouses dunaires, tandis que dans le reste de la zone d'étude, on observe une combinaison des deux types de marqueurs végétaux.

L'utilisation des limites de végétation comme ligne de référence nécessite une connaissance approfondie du contexte local, car la variation spatiale de ces limites n'est pas systématiquement corrélée aux processus d'érosion ou d'accrétion. La dynamique de la végétation peut résulter d'activités anthropiques, telles que la stabilisation artificielle des dunes (plantations, aménagements), ou de perturbations comme le piétinement des pelouses dunaires (Faye, 2010 ; Thior, 2020). Par ailleurs, il convient de prendre en compte les implications naturels, tels que la destruction ou la dégradation de la végétation littorale liée aux événements climatiques extrêmes.

- **La limite inférieure de la pelouse dunaire :**

Ce type de végétation se développe principalement sur les arrières-dunes fossiles, dans des secteurs abrités caractérisés par une granulométrie fine, des sols neutrophiles enrichis en matière organique, et un substrat sablo-humifère mésoxérophile. Elle peut également se rencontrer sur des placages sableux éoliens, notamment sur des falaises de nature géologique variée. Cependant, la dynamique de cette végétation peut être modulée par des facteurs anthropiques, tels que le piétinement ou les aménagements côtiers, ainsi que par des perturbations climatiques extrêmes.

Cette limite végétale peut également être assimilée au pied des dunes végétalisées, en particulier dans les zones à faible pente où la végétation rampante domine. Son intérêt réside dans sa capacité à refléter la dynamique du littoral, car l'expansion ou le recul de la végétation est directement lié à la mobilité des dunes et, par extension, à l'érosion ou à l'accrétion côtière.

Il convient toutefois de noter que la dynamique des dunes est fortement influencée par les conditions sédimentaires de la plage considérée. Par conséquent, l'utilisation de cette limite végétale comme indicateur du trait de côte historique peut introduire certaines sources d'erreur, qu'il est indispensable de prendre en compte lors de l'interprétation des résultats.

- **Limite inférieure de la végétation pérenne :**

La limite d'expansion de l'oyat (*Ammophila arenaria*) constitue un indicateur fiable de la position du trait de côte, particulièrement adapté au suivi à long terme. Cette plante pérenne se développe principalement sur l'arrière-plage, en raison de sa faible tolérance aux submersions marines, ce qui explique sa localisation en retrait par rapport au front de mer. Les limites des populations d'oyats sont ainsi facilement identifiables sur les fronts dunaires et peuvent servir de référence pour l'étude de la dynamique côtière.

Sur les côtes à dunes à pente raide, le recul des limites d'oyats coïncide généralement avec le recul des pieds de dunes, permettant d'appréhender l'érosion littorale. Par ailleurs, sur les plages où la végétation a été artificiellement implantée, la présence de végétation ligneuse peut également constituer un indicateur de l'érosion côtière, notamment lorsque ces plantations visent à stabiliser les dunes et à limiter le recul du trait de côte.

Cependant, il convient de souligner que la limite de la végétation artificielle ne constitue pas un indicateur fiable pour l'estimation des tendances historiques naturelles du trait de côte, telles que la progradation ou l'érosion naturelle, en raison de l'intervention humaine sur sa dynamique.

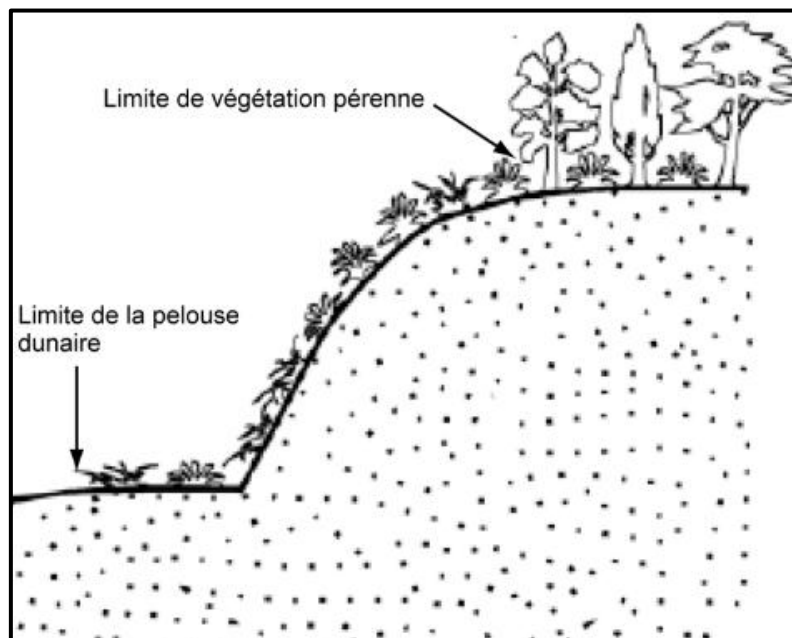


Figure 11 : Limites de végétation dunaire et pérenne (Source : Boak et Turner, 2005 ; Modifié par Faye, 2010).

Ces types de marqueurs végétaux sont fréquemment utilisés sur les côtes végétalisées en raison de leur facilité d'identification sur les images satellitaires et aériennes employées pour le suivi historique du trait de côte. Cependant, dans les zones urbanisées, l'utilisation des limites de la végétation nécessite une vigilance particulière, car leur position peut être fortement modifiée par les interventions anthropiques sur le littoral. Dans ces contextes, il est alors recommandé de recourir à d'autres lignes de référence, telles que les limites marégraphiques, afin d'identifier de manière fiable le trait de côte (Faye, 2010).

2.2.3.2.1.1.3. Lignes de références marégraphiques

Les lignes de référence marégraphiques correspondent aux positions atteintes par le trait de côte en fonction des différents niveaux de la marée. Leur localisation est conditionnée par les variations des conditions météorologiques et marines, et elles matérialisent les limites du jet de rive au fil du temps. Plusieurs types de lignes de référence marégraphiques peuvent ainsi être distingués, chacun reflétant des variations spécifiques du niveau marin et permettant de caractériser la dynamique littorale à différentes échelles temporelles.

- **La ligne instantanée de rivage :**

La ligne instantanée de rivage, très mobile, correspond à la limite de contact entre le jet de rive et la terre ferme. Sa position est fortement influencée par les conditions météorologiques, l'intensité des vents, la hauteur des vagues et le niveau de la marée, ainsi que par la morphologie de la pente littorale. Elle fluctue au rythme des mouvements du jet de rive et du retrait de la nappe d'eau, et ces variations sont principalement dictées par la pente du littoral, l'énergie des vagues, les conditions atmosphériques et le niveau de la marée (Faye, 2010).

Sur les littoraux macro- et méso-tidaux, l'amplitude des variations de la ligne instantanée de rivage peut atteindre plusieurs dizaines de mètres, tandis que sur les littoraux micro-tidaux, elle est généralement plus faible. Toutefois, Stafford et Langfelder (1971) ont montré que des fluctuations significatives peuvent également se produire sur les côtes micro-tidales, en fonction des conditions d'acquisition et des paramètres météo-marins. Dans le cas de la Petite-Côte sénégalaise, caractérisée par un littoral micro-tidal, les amplitudes de fluctuation de la ligne instantanée de rivage peuvent être importantes, malgré la faible amplitude de marée, en raison de la combinaison des conditions météorologiques et de la morphologie côtière.

- **Limite de la zone de saturation :**

Selon Dolan *et al.* (1978), Faye (2010) et Thior (2020), la ligne de limite du jet de rive correspond à l'extrémité atteinte par le jet de rive à marée haute. Lors de la marée descendante, cette limite migre vers le large tout en matérialisant le bord terrestre des sables humidifiés par le déferlement. Ce marqueur est particulièrement observable sur les côtes à faible altitude, où les zones estuariennes, comme le delta du Saloum, favorisent la régularité de ce type de mouvements, facilitant ainsi sa détection.

Cependant, à l'instar des autres limites d'humectation, la position de cette ligne est sensible aux variations météo-marines locales, ce qui peut perturber sa régularité. Sur la

Petite-Côte sénégalaise, comme sur l'ensemble des côtes sénégalaises, la zone de saturation varie en fonction des marées, lesquelles présentent une double variation quotidienne ainsi qu'une modulation par cycle de quinzaine. Cette variabilité rend l'utilisation de ce marqueur pour le suivi historique du trait de côte complexe, car la superposition d'images prises à marée haute et à marée basse peut induire des erreurs : la zone de saturation étant plus avancée en marée haute qu'en marée basse, le positionnement du trait de côte peut être surestimé ou sous-estimé selon l'état de la marée lors de l'acquisition de l'image.

- **Limites sable mouillé/sable sec :**

Cette limite correspond à l'extrémité du jet de rive à marée haute et, durant la marée descendante, elle migre vers le large tout en marquant la limite terrestre des sables assombris par le déferlement (Dolan *et al.*, 1978). Elle n'est pas strictement conditionnée par la zone de saturation, mais plutôt par les niveaux des plus hautes mers, car c'est à partir de cette limite (limite des pleines mers) que l'on peut distinguer, de manière relativement précise, la transition sable mouillé/sable sec. Elle peut ainsi être assimilée, dans certains contextes, à la limite des pleines mers.

Les travaux de Dolan *et al.* (1980) comme soulevés par Faye (2010) montrent que, sur une côte micro-tidale et en l'absence de perturbations météo-marines, la position de cette ligne d'humectation varie peu au cours d'un cycle de marée. Toutefois, comme pour toutes les lignes d'humectation, son positionnement est sensible aux conditions météo-marines et atmosphériques au moment de l'observation. La limite sable mouillé/sable sec peut ainsi fluctuer en fonction de l'ensoleillement, de la vitesse du vent et d'autres paramètres climatiques, ce qui rend sa détection plus difficile. Par conséquent, l'utilisation de ce marqueur pour le suivi du trait de côte nécessite des précautions méthodologiques afin de minimiser les sources d'erreur.

- **Limite des pleines mers :**

Cette limite est fréquemment utilisée pour le suivi de l'évolution historique du trait de côte. Crowell *et al.* (1991) la définissent comme le niveau atteint par la dernière marée haute, correspondant ainsi à la plus haute limite atteinte par les dernières pleines mers sur l'estran. Elle constitue l'indicateur le plus couramment employé dans les études anglo-saxonnes sur la dynamique littorale. Stafford et Landfelder (1971) considèrent cette limite comme un bon marqueur de l'évolution du rivage, à condition que les différentes lignes comparées soient acquises dans des conditions similaires.

Toutefois, la position de la limite des pleines mers est étroitement liée aux caractéristiques locales du littoral. Elle dépend de la présence ou non de marées astronomiques, des variations saisonnières du profil de plage, de la granulométrie des sédiments, des conditions climatiques (vents, températures, tempêtes), de la variabilité inter-journalière du niveau des hautes mers, ainsi que des phénomènes de surcote et de décote (Pajak et Leatherman, 2002). Sa détection peut également être difficile sur les plages à sables très clairs ou très sombres (Fletcher *et al.*, 2003).

Toutes ces sources d'incertitude peuvent introduire des erreurs dans le suivi historique du trait de côte. Il est donc essentiel de les prendre en compte dans les calculs statistiques et les analyses d'évolution du littoral afin de garantir la fiabilité des résultats

- **Limites des pleines mers habituelles :**

L'utilisation de cette limite requiert, au préalable, la prise en compte des autres critères morphologiques et écologiques définissant la côte étudiée, au-delà des seuls indicateurs liés au niveau instantané des pleines mers. Cela permet d'identifier de manière plus fiable la position habituelle des marées hautes sur l'estran (Nichols et McLaughlin, 1984 ; Thieler *et al.*, 2001 ; Ruggiero *et al.*, 2003). Cette limite est généralement repérable par la présence de ruptures de pente (microfalaises, escarpements d'érosion, bermes, etc.), par la limite de la végétation ou encore par les laisses de mer (débris, bois flotté, etc.). Bien que cette limite corresponde à la position moyenne des plus hautes marées, elle ne peut toutefois pas être assimilée à un datum marégraphique officiel, car elle ne fournit pas une référence absolue et stable du niveau de la mer (Faye, 2010).

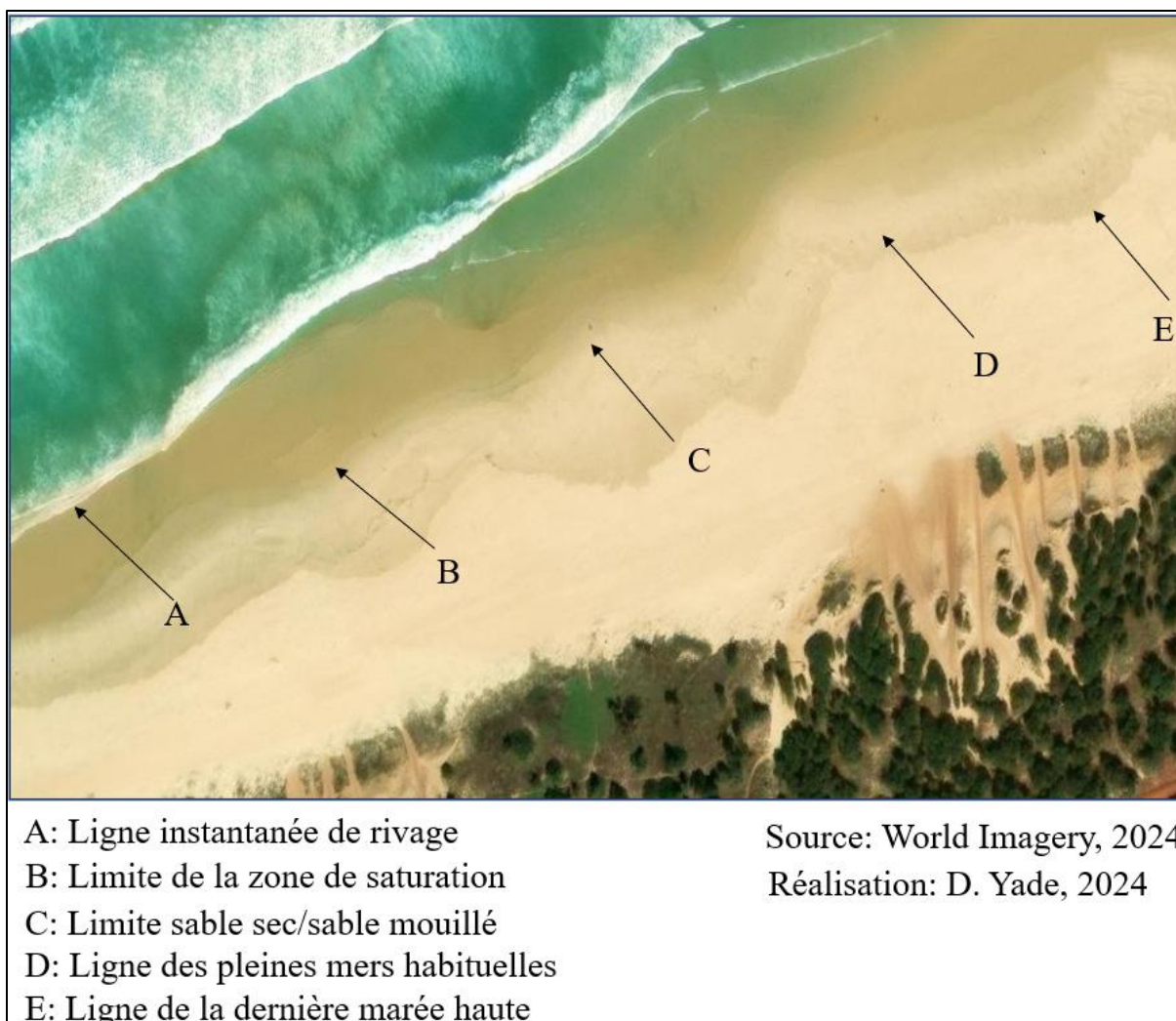


Figure 12 : Lignes de références marégraphiques.

2.2.3.2.1.1.4. Limite Terre-mer

La ligne de référence terre-mer, telle qu’observable sur les images satellitaires utilisées dans cette étude, constitue un indicateur fondamental pour l’analyse des dynamiques côtières. Elle matérialise la transition entre l’océan Atlantique et le continent, et représente ainsi un repère essentiel pour identifier le trait de côte. Cette ligne est dynamique et soumise à l’influence de processus naturels, tels que l’érosion marine, l’accrétion sédimentaire et les variations du niveau de la mer. Sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte aux îles du Saloum, le suivi de cette ligne est particulièrement important pour comprendre les transformations du littoral face aux pressions anthropiques croissantes et aux impacts du changement climatique.

L’exploitation des images satellitaires pour délimiter cette ligne de référence constitue une approche efficace pour étudier les évolutions côtières. Les séries temporelles d’images à haute résolution permettent de suivre la mobilité du trait de côte sur plusieurs décennies. Toutefois,

la précision de cette approche dépend fortement de la résolution spatiale des capteurs et des conditions météorologiques lors de l'acquisition, ce qui peut introduire des incertitudes dans la localisation exacte de la ligne terre-mer.

Parmi les méthodes les plus utilisées pour l'extraction automatique de cette ligne à partir d'images satellitaires figure l'indice NDWI (*Normalized Difference Water Index*), proposé par McFeeters (1996). Basé sur la réflectance des bandes du vert et du proche infrarouge, le NDWI permet de discriminer efficacement les surfaces en eau des surfaces émergées. Dans le contexte du littoral sénégalais, cet indice s'avère particulièrement utile pour analyser la variabilité saisonnière du trait de côte et évaluer l'impact des marées ou des épisodes de tempêtes sur le rivage. Cependant, son efficacité peut être limitée dans les zones d'eaux turbides ou de zones humides côtières, comme le delta du Saloum, où la distinction entre terre et mer devient plus complexe.

En définitive, l'utilisation de la ligne de référence terre-mer extraite d'images satellitaires et d'indices spectrales tels que le NDWI constitue un outil précieux pour le suivi du trait de côte. Néanmoins, elle doit être systématiquement complétée par des validations de terrain afin d'assurer sa fiabilité. L'hétérogénéité des littoraux, la diversité des substrats (sables, mangroves, roches) et les effets des marées imposent une approche intégrée combinant imagerie satellitaire, modèles numériques et observations *in situ*. Une telle méthodologie permet d'améliorer la compréhension des dynamiques côtières et d'optimiser les stratégies de gestion du littoral face aux enjeux environnementaux et socio-économiques.



Figure 13 : Limite terre-mer (Source : Image Landsat 9).

En définitive, plusieurs types de lignes de référence peuvent être assimilés au trait de côte. Leur sélection repose sur des critères variés, pouvant être géomorphologiques, botaniques ou marégraphiques, en fonction des objectifs de l'étude et des caractéristiques spécifiques du littoral considéré. Par ailleurs, le choix de la ligne de référence peut également dépendre de la qualité et de la résolution des données géospatiales disponibles, c'est-à-dire de la capacité à identifier de manière fiable et lisible les lignes de référence sur les images utilisées.

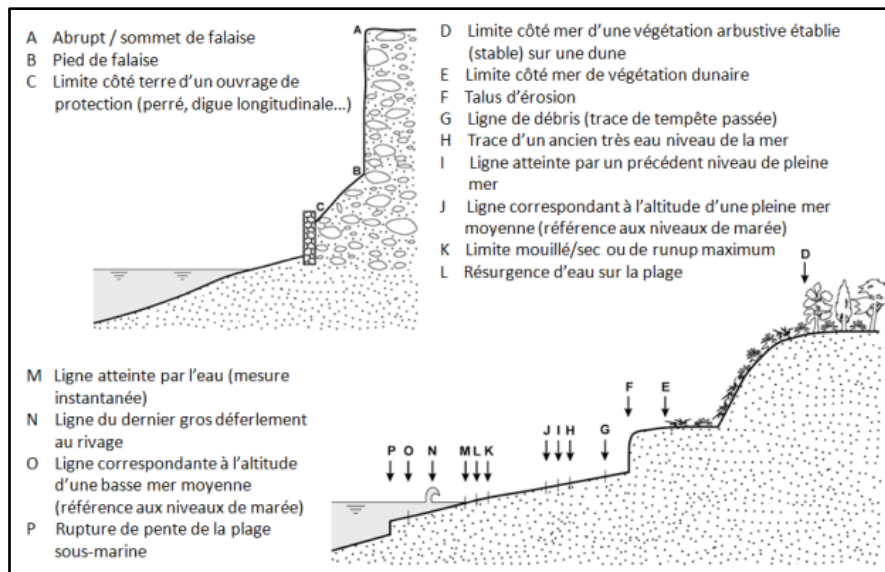


Figure 14 : Schéma de différentes lignes de référence du trait de côte (source : Boak et Turner, 2005 ; adapté et traduit par le BRGM, 2012).

2.2.3.2.1.2. Choix de la ligne de référence

Le choix de la ligne de référence repose avant tout sur sa lisibilité sur l'ensemble des images satellitaires sélectionnées pour l'analyse de l'évolution historique du trait de côte. Ce choix peut également être conditionné par la méthodologie de traitement adoptée. Dans le cadre de cette étude, la limite la plus clairement identifiable sur toutes les images est la transition entre la mer et la terre ferme. Cette limite présente l'avantage d'être bien visible, ce qui facilite la superposition des images issues de différentes dates et garantit une cohérence temporelle dans l'analyse.

La longueur étendue de la zone d'étude complique l'identification d'autres types de lignes de référence, tandis que la limite « terre-mer » demeure lisible sur l'ensemble du littoral étudié. Par ailleurs, la méthodologie choisie pour l'extraction du trait de côte favorise l'utilisation de cette limite. En effet, l'Indice Normalisé de Différence de l'Eau (NDWI) a été employé pour différencier les surfaces hydriques des surfaces émergées. Grâce à cette approche, la « limite terre-mer » a été retenue comme ligne de référence principale pour suivre l'évolution du trait de côte sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte aux îles du Saloum entre 1973 et 2024.

2.2.3.2.2. Protocole d'extraction de la ligne de référence

Après avoir défini la limite entre le continent et l'océan comme ligne de référence, nous avons procédé à l'extraction du trait de côte en utilisant l'Indice Normalisé de Différence de l'Eau (NDWI). Proposé par McFeeters en 1996, le NDWI permet de distinguer les surfaces

aquatiques des surfaces terrestres et de la végétation, ce qui en fait un outil particulièrement adapté à la cartographie des étendues d'eau dans les images satellites.

L'indice repose sur la réflectance des bandes spectrales verte et proche infrarouge (NIR), permettant de détecter avec précision la présence d'eau et de suivre les variations spatiales et temporelles des bassins aquatiques. Cette approche est particulièrement pertinente dans le contexte des études côtières, où elle facilite l'identification de la ligne terre-mer et la surveillance des modifications du trait de côte.

Grâce à l'application du NDWI, il a été possible de différencier de manière fiable les zones submergées des surfaces émergées, garantissant ainsi une extraction précise du trait de côte le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum. Toutefois, certaines limitations doivent être prises en compte. L'indice peut en effet être influencé par la présence d'infrastructures artificielles, telles que routes, bâtiments ou autres constructions côtières, ce qui peut conduire à une surestimation de la surface d'eau. Ce biais impose une interprétation attentive des résultats, en particulier dans les zones urbanisées, afin d'assurer la fiabilité de l'extraction du trait de côte.

Voici l'équation qui permet de calculer l'NDWI :

$$NDWI = \frac{\text{bande Vert} - \text{PIR}}{\text{bande Vert} + \text{PIR}}$$

Exemple avec Landsat 8 et 5 :

- Pour Landsat 5 (image 1987) on a :

$$NDWI = \frac{b2 - b4}{b2 + b4}$$

- Pour Landsat 8 (image 2024) on a :

$$NDWI = \frac{b3 - b5}{b3 + b5}$$

Après le calcul de l'indice NDWI, nous avons appliqué une opération de seuillage afin de générer une image binaire. Cette transformation consiste à classifier les pixels en deux catégories distinctes : les pixels représentant l'eau et ceux correspondant à l'ensemble des autres

surfaces (non-eau). Le seuillage constitue une étape essentielle dans la segmentation des images, permettant de simplifier la discrimination des objets d'intérêt à partir des images multispectrales.

Parmi les méthodes classiques de seuillage, l'algorithme d'Otsu est largement utilisé en raison de sa simplicité et de sa facilité d'implémentation. Cependant, son efficacité diminue lorsque le calcul devient complexe, car l'algorithme nécessite d'examiner tous les niveaux de gris compris entre 0 et (L-1) afin de déterminer le seuil optimal. Pour pallier cette limitation, nous avons proposé une amélioration de l'algorithme d'Otsu en combinant sa logique avec un algorithme génétique, reconnu pour sa capacité d'optimisation et de recherche globale. Les tests effectués sur plusieurs images médicales ont montré que cette approche permettait de réduire significativement le temps de calcul tout en améliorant la qualité du seuillage par rapport à l'algorithme d'Otsu classique (Affaf *et al.*, 2018).

Les rasters issus du NDWI ont été convertis en entités vectorielles afin d'obtenir des lignes représentant le trait de côte pour chaque date d'observation. Cette étape a été suivie d'un processus de nettoyage et de simplification géométrique visant à éliminer les artefacts liés au bruit spectral et aux erreurs de classification. Un lissage des lignes de côte a été appliqué afin d'obtenir une représentation continue et cohérente du rivage, indispensable pour les analyses diachroniques. Cette opération permet de réduire les irrégularités locales tout en conservant la structure générale du trait de côte.

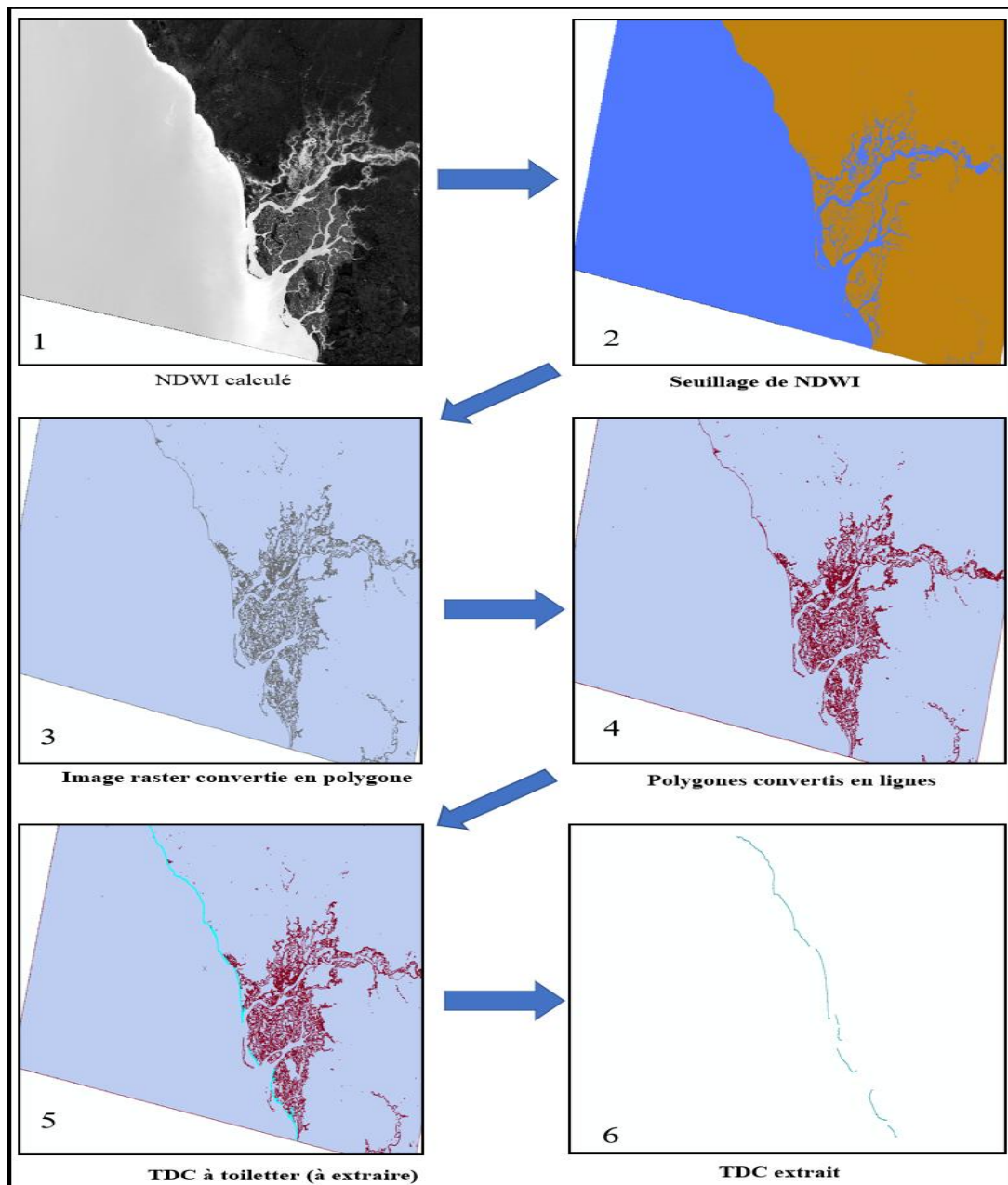


Figure 15 : Schéma récapitulatif du protocole d'extraction du trait de côte

Après avoir extrait les traits de côte pour l'ensemble des dates étudiées, nous avons procédé au calcul des taux d'évolution du trait de côte afin de quantifier les variations spatiales et temporelles de la ligne littorale.

2.2.3.3. Technique de calcul de l'évolution du trait de côte avec l'outil *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*

Pour estimer les taux d'évolution du trait de côte, nous avons utilisé DSAS 5.1, une extension du logiciel ArcGIS spécialement conçue pour l'analyse des dynamiques littorales. Développé par l'US Geological Survey en 1990, DSAS fournit une méthodologie standardisée et

reproductible permettant de calculer les statistiques d'évolution du trait de côte et d'analyser les changements passés, présents et futurs du littoral (Thieler *et al.*, 2009). Comme le souligne Emmanuel (2017), les méthodes statistiques et d'extrapolation des tendances sont couramment employées pour étudier la dynamique côtière et anticiper l'érosion, en particulier à l'aide d'outils d'analyse spatiale.

Dans cette étude, le trait de côte a été extrait automatiquement pour toutes les dates considérées à l'aide de l'indice NDWI. Une fois les lignes littorales obtenues, nous avons procédé au calcul des vitesses d'évolution à l'aide de DSAS 5.1. Le principe fondamental de cet outil repose sur la mesure des écarts spatiaux entre les traits de côte d'une même série temporelle, permettant le calcul des statistiques de variation en mètres par an. Cette analyse nécessite, au minimum, deux traits de côte correspondant à des dates distinctes.

Pour garantir la précision des calculs, les données doivent être préalablement organisées dans une géodatabase personnalisée comprenant : une ligne de base, les lignes de référence (*shorelines*), une zone tampon (*buffer*) autour des traits de côte, ainsi que la création de transects équidistants perpendiculaires aux linéaires côtiers. Il est également nécessaire d'estimer les incertitudes liées à la méthodologie et de définir les indices statistiques pertinents pour l'évaluation des taux d'évolution du trait de côte (Crowell *et al.*, 1991 ; Faye *et al.*, 2011 ; Juigner *et al.*, 2012 ; Thior, 2020 ; Thior *et al.*, 2021).

Après paramétrage complet, DSAS génère automatiquement les transects selon le mode de mesure choisi. Ces transects servent à mesurer de manière rigoureuse les écarts entre les traits de côte et à calculer les taux d'évolution, offrant ainsi un outil fiable pour quantifier les changements littoraux au fil du temps.

2.2.3.3.1. Opérations de précalcul

Les opérations de précalcul constituent la mise en place d'une géodatabase personnalisée composée de plusieurs éléments majeurs : une ou plusieurs ligne (s) de référence encore appelée ligne de base nommée (*Baseline*) numérisée sur ArcGIS, les traits de côte déjà extraits, désignés sous le terme de *shorelines* et une zone tampon, ou *buffer-shoreline*, nécessaire à la stabilisation de l'espace linéaire sur lequel sont positionnés les traits de côte.

✓ *Baseline*

La *baseline* est une ligne imaginaire tracée parallèlement aux traits de côte et constitue le repère à partir duquel DSAS génère les transects perpendiculaires aux *shorelines*. Elle sert de référence pour l'ensemble des mesures et doit être positionnée de manière cohérente pour éviter les

intersections ou anomalies dans la création des transects, notamment lorsque la côte présente des sinuosités ou des irrégularités. Dans de tels cas, les transects aberrants doivent être corrigés ou supprimés afin de garantir la fiabilité des mesures. Dans cette étude, toutes les *baselines* ont été tracées du côté terrestre, à une distance de 150 m des *shorelines*, conformément à la configuration du *buffer-shoreline*.

✓ *Shorelines*

Les *shorelines* correspondent aux traits de côte extraits et stockés dans la géodatabase. Parallèles à la *baseline*, ces lignes sont utilisées pour mesurer les variations spatiales du trait de côte dans DSAS. Pour calculer les indices d'évolution choisis, notamment l'EPR (*End Point Rate*) et le LRR (*Linear Regression Rate-of-change*), il est nécessaire de disposer d'au moins deux *shorelines* correspondant à des dates ou heures différentes.

✓ *Buffer-shoreline*

Le *buffer-shoreline* représente la zone tampon qui stabilise l'espace linéaire sur lequel les mesures d'évolution du trait de côte sont effectuées. Cette zone sert de référence pour le tracé de la *baseline* et définit les extrémités des transects, garantissant ainsi leur cohérence spatiale. Dans cette étude, la distance entre les *baselines* et les *shorelines* a été fixée à 150 m, côté terre, afin d'assurer une couverture homogène et une mesure fiable des écarts entre traits de côte.

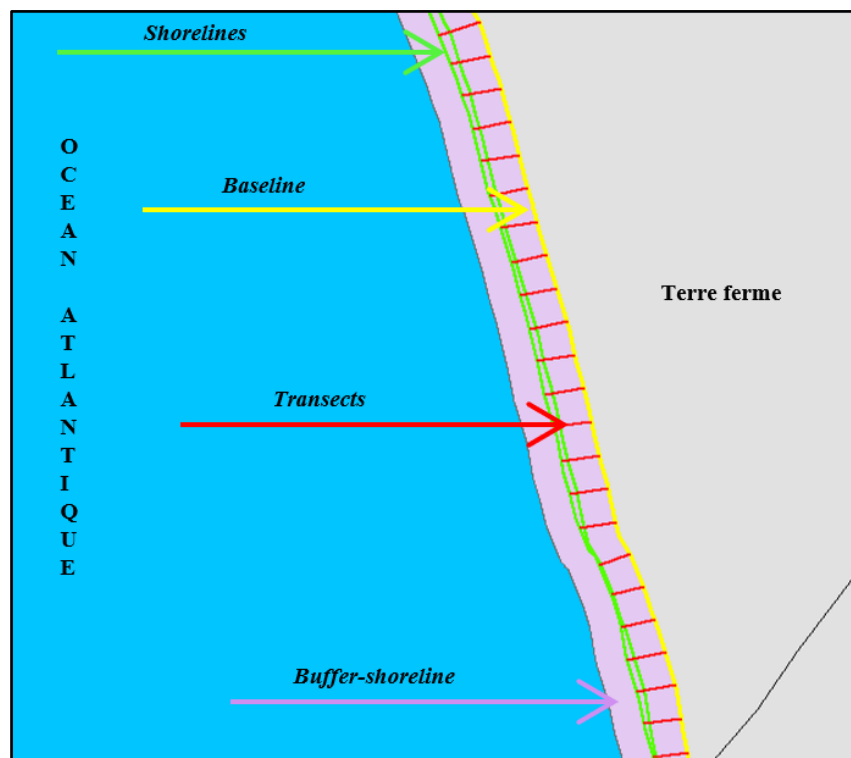


Figure 16 : Les entités d'une géodatabase personnalisée

2.2.3.3.2. Calcul des statistiques

Le processus comprend d'abord la mise en place des transects perpendiculaires aux traits de côte, suivie de la sélection des indices d'évolution à calculer, ensuite du calcul effectif de ces indices et enfin de leur représentation graphique.

2.2.3.3.2.1. Mise en place des transects

Après la constitution de la géodatabase et l'insertion des entités dans l'interface de DSAS, le logiciel génère automatiquement les transects. Ces transects, profils perpendiculaires à la *baseline* et croisant les *shorelines*, permettent de mesurer les variations du trait de côte au fil du temps. Le nombre de transects est proportionnel à la longueur du segment côtier étudié et, dans cette étude, l'espacement entre deux transects consécutifs a été fixé à 25 m.

Dans certaines portions de la zone d'étude, comme au niveau de Mbour ou à l'ouverture des embouchures du delta du Saloum, la ligne côtière présente des irrégularités. Ces configurations peuvent générer des transects aberrants qui ne croisent pas correctement les *shorelines* correspondantes, faussant ainsi les mesures des écarts entre les traits de côte sur différentes dates (Himmelstoss *et al.*, 2009 ; Mathieu, 2014 ; Faye, 2010 ; Thior, 2020). Il est donc indispensable de corriger ces anomalies afin d'éviter des mesures nulles ou erronées.

Une fois les transects correctement générés et validés, l'étape suivante consiste à sélectionner les indices appropriés pour quantifier les statistiques d'évolution du trait de côte et analyser sa dynamique historique.

2.2.3.3.2.2. Choix des indices à calculer

Les mesures de l'évolution du trait de côte ont été effectuées à deux échelles temporelles. La première consiste à quantifier l'évolution entre deux dates successives, en fonction des intervalles temporels définis selon l'objectif de l'étude et la disponibilité des données géospatiales. La seconde correspond à l'évaluation de l'évolution globale du trait de côte sur l'ensemble de la période considérée, de 1973 à 2024. Pour chacune de ces échelles, l'indice le plus approprié a été sélectionné : l'indice EPR (*End Point Rate*) pour l'évolution entre deux dates successives, et l'indice LRR (*Linear Regression Rate-of-Change*) pour l'évolution sur l'ensemble de la période étudiée, conformément aux recommandations de Faye (2010) et Thior (2020).

L'indice EPR permet de mesurer la variation du trait de côte entre deux dates successives en calculant l'écart spatial entre le trait de côte ancien et le trait de côte récent. Cet indice est

particulièrement adapté lorsqu'on dispose de deux traits de côte, car il fournit des statistiques fiables sur les taux d'évolution ponctuels (Thieler *et al.*, 2005 ; Himmelstoss, 2017 ; Tahri *et al.*, 2017 ; Faye, 2010 ; Thior, 2020). Dans cette étude, l'EPR a été appliqué aux intervalles suivants : 1973-1987, 1987-2002, 2002-2013 et 2013-2024.

L'indice LRR, quant à lui, permet de calculer l'évolution du trait de côte en considérant l'ensemble des intervalles de temps disponibles, fournissant ainsi une estimation de la tendance globale sur la période totale. Pour garantir la pertinence des résultats, cette méthode nécessite la disponibilité d'au moins deux segments temporels. Le LRR prend en compte l'ensemble des variations du trait de côte sur toute la période d'étude, offrant une mesure synthétique et fiable de l'évolution linéaire du littoral (Faye *et al.*, 2013). Le LRR est particulièrement pertinent dans les études diachroniques, car il permet de lisser les variations interannuelles et d'identifier les tendances à long terme. Toutefois, il suppose une évolution linéaire du trait de côte, ce qui peut constituer une limite dans les environnements fortement dynamiques ou soumis à des événements extrêmes.

2.2.3.3.2.3. Calcul des indices et représentations graphiques

Après avoir sélectionné les indices les plus pertinents pour suivre l'évolution du trait de côte, nous avons utilisé l'outil DSAS pour calculer automatiquement les statistiques des taux d'évolution. DSAS réalise une analyse systématique de l'ensemble des transects, permettant de quantifier les variations du trait de côte, de classer les différents types d'évolution observés le long du littoral étudié et de déterminer les valeurs moyennes correspondantes (Morton *et al.*, 2004 ; Juigner, 2012 ; Touré, 2012 ; Faye *et al.*, 2013 ; Mathieu, 2014 ; Thior, 2020).

Suite à ces calculs, la table attributaire associée aux transects contient l'ensemble des indices utilisés lors de l'analyse. Pour cette étude, nous avons retenu les deux indices principaux, à savoir l'EPR (*End Point Rate*) et le LRR (*Linear Regression Rate-of-change*), considérés comme les plus appropriés pour caractériser l'évolution du trait de côte sur la Petite-Côte sénégalaise. La figure 17 illustre la table attributaire des transects, incluant les valeurs calculées pour ces indices.

Table

Cinématique du trait de cote 1979-2024

FID	Shape *	OBJECTID	TransectID	BaselineID	GroupID	TransOrder	Azimuth	ShrCount	TCD	SHAPE Leng	SCE	NSM	LRR	LR2	EPR
0	Polyline	7	7	1	1	7	61,40634	5	150	170,231257	20,13721	-6,712388	-0,126188	0,120515	-0,723328
1	Polyline	8	8	1	1	8	57,331099	5	175	170,858544	20,239353	-6,746451	-0,126828	0,120516	-1,232401
2	Polyline	9	9	1	1	9	52,705462	5	200	169,556082	19,116121	-6,827593	-0,126646	0,13698	-1,187469
3	Polyline	10	10	1	1	10	48,230188	5	225	165,356593	15,117899	-6,95157	-0,123517	0,217683	-0,703335
4	Polyline	11	11	1	1	11	49,838099	5	250	161,180865	10,644528	-10,644528	-0,173511	0,543645	0
5	Polyline	12	12	1	1	12	53,837163	5	275	162,536118	10,734026	-10,734026	-0,17497	0,543645	0
6	Polyline	13	13	1	1	13	56,731779	5	300	171,632645	20,600215	-10,832899	-0,188785	0,274491	-0,66345
7	Polyline	14	14	1	1	14	57,337592	5	325	179,930714	29,264625	-15,771887	-0,312162	0,358744	-1,438775
8	Polyline	15	15	1	1	15	52,984139	5	350	182,525523	32,131268	-19,603007	-0,404338	0,470042	-1,971587
9	Polyline	16	16	1	1	16	48,479108	5	375	182,155495	31,878558	-23,442949	-0,474705	0,605049	-1,632303
10	Polyline	17	17	1	1	17	45,60959	5	400	181,830072	31,821606	-29,066013	-0,557587	0,725945	-1,234922
11	Polyline	18	18	1	1	18	45,000018	5	425	181,819781	31,819805	-31,819805	-0,586206	0,739679	-1,232401
12	Polyline	19	19	1	1	19	44,999987	5	450	181,819781	31,819805	-31,819805	-0,519151	0,551002	-1,809987
13	Polyline	20	20	1	1	20	45,000001	5	475	181,819781	31,819805	-31,330205	-0,505698	0,526094	-1,948606
14	Polyline	21	21	1	1	21	45,000015	5	500	181,819781	31,819805	-22,996859	-0,382528	0,392487	-1,692298
15	Polyline	22	22	1	1	22	44,437321	5	525	181,828549	31,82134	-21,214226	-0,356182	0,354937	-1,035539
16	Polyline	23	23	1	1	23	41,661297	5	550	182,128907	31,873905	-21,24927	-0,356771	0,354937	-0,274367
17	Polyline	24	24	1	1	24	37,173038	5	575	183,840363	33,420801	-22,714458	-0,380734	0,372816	0
18	Polyline	25	25	1	1	25	32,547698	5	600	187,208752	36,602036	-28,674765	-0,474376	0,484476	0,84211
19	Polyline	26	26	1	1	26	28,509208	5	625	189,156313	39,069928	-35,743121	-0,583791	0,594444	1,952
20	Polyline	27	27	1	1	27	26,687437	5	650	193,269118	43,268786	-43,268786	-0,701669	0,645042	3,72954
21	Polyline	28	28	1	1	28	26,565066	5	675	198,732554	48,732541	-48,732541	-0,790731	0,642526	4,020465
22	Polyline	29	29	1	1	29	26,373018	5	700	204,137204	54,136348	-54,136348	-0,878816	0,638609	4,119635
23	Polyline	30	30	1	1	30	24,338624	5	725	208,203396	58,090063	-58,090063	-0,943261	0,635428	3,790825
24	Polyline	31	31	1	1	31	21,204878	5	750	211,595405	61,273207	-61,273207	-0,995134	0,632962	3,008578
25	Polyline	32	32	1	1	32	18,065684	5	775	212,371516	61,999819	-61,999819	-1,007665	0,621041	1,916219
26	Polyline	33	33	1	1	33	14,674325	5	800	211,859712	61,850408	-61,850408	-1,006165	0,601001	1,15504
27	Polyline	34	34	1	1	34	11,016189	5	825	212,141205	61,932587	-61,932587	-0,993778	0,581592	0,969396
28	Polyline	35	35	1	1	35	7,287273	5	850	212,526376	62,278124	-62,278124	-0,98467	0,562152	1,429099
29	Polyline	36	36	1	1	36	8,611172	5	875	207,524886	52,172292	-49,200846	-0,802084	0,510672	2,381892
30	Polyline	37	37	1	1	37	16,694499	5	900	194,152253	43,487359	-12,047045	-0,450767	0,313813	3,208964
31	Polyline	38	38	1	1	38	27,434773	5	925	179,586583	22,250663	-11,125331	-0,354366	0,518957	3,713376
32	Polyline	39	39	1	1	39	38,912486	5	950	166,58613	15,73554	-10,666751	-0,29623	0,647094	3,388507
33	Polyline	40	40	1	1	40	45,000008	5	975	160,606577	10,606602	-10,606602	-0,183972	0,647351	2,969603

Figure 17 : Résultats des calculs des indices

La représentation graphique constitue une étape essentielle pour visualiser les résultats issus de la mise en place, du calcul et de la classification des transects (figure 18). Après le calcul des indices, l'outil DSAS effectue automatiquement la classification des transects, en distinguant les différents types d'évolution observés le long du littoral étudié. Cette visualisation permet d'apprécier, à la fois, l'évolution du trait de côte entre deux dates successives à l'aide de l'indice EPR (*End Point Rate*) et l'évolution globale sur l'ensemble de la période considérée grâce à l'indice LRR (*Linear Regression Rate-of-change*). Elle constitue ainsi un support essentiel pour interpréter spatialement les dynamiques côtières et identifier les zones sujettes à l'érosion ou à l'accrétion.

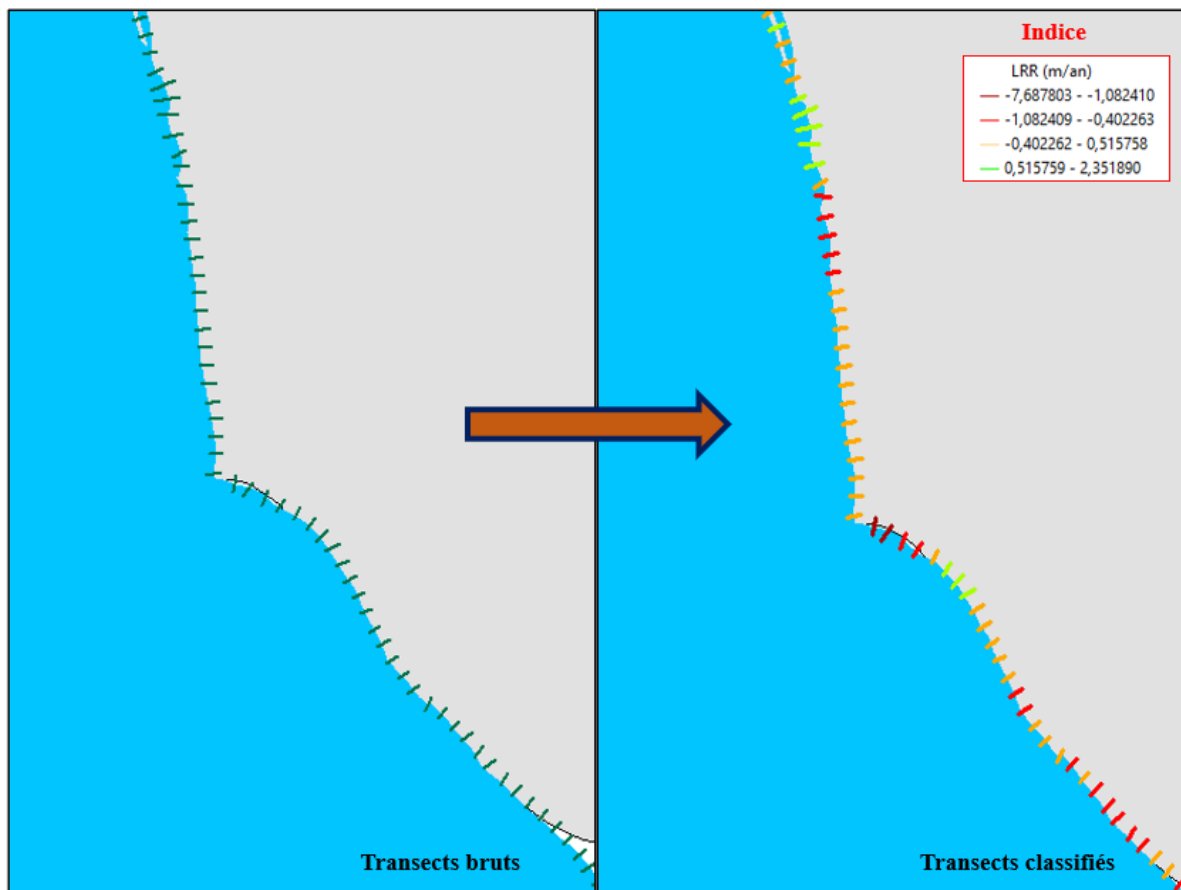


Figure 18 : Représentation graphique des transects

2.2.3.3.3. Limites de la méthodologie

Les études antérieures ont montré que les résultats des analyses diachroniques de l'évolution du trait de côte sont souvent affectés par diverses sources d'erreurs (Crowell *et al.*, 1991 ; Moore, 2000 ; Robin, 2002 ; Faye, 2010 ; Juigner, 2012 ; Moussaid *et al.*, 2015 ; Esmail *et al.*, 2019 ; Thior, 2021). Il est donc essentiel de prendre en compte ces incertitudes, car la fiabilité des conclusions repose largement sur la connaissance et l'intégration des marges d'erreur associées (Juigner, 2012).

L'incorporation de ces erreurs dans l'analyse des données diachroniques permet d'améliorer la précision et la cohérence de l'interprétation des tendances évolutives du littoral. Parmi les sources d'erreurs les plus fréquentes en cinématique côtière, on distingue principalement les erreurs techniques liées aux instruments et aux méthodes de traitement, ainsi que les erreurs de positionnement, incluant notamment les variations de marée, qui peuvent affecter la précision de la délimitation du trait de côte (Faye, 2010 ; Thior, 2020). La prise en compte de ces facteurs est donc indispensable pour garantir une estimation fiable des taux d'érosion ou d'accrétion et pour contextualiser les résultats obtenus dans le cadre d'études de dynamique littorale.

2.2.3.3.3.1. Erreurs techniques

Les erreurs techniques sont principalement associées aux caractéristiques des images géospatiales utilisées. Dans le cadre de cette étude, seules des images satellites ont été exploitées. Toutefois, la superposition des images constitue une difficulté majeure en raison des disparités de résolution spatiale. L'image de 1973 présente une résolution de 60 m, alors que les images de 1987, 2002, 2013 et 2024 disposent d'une résolution uniforme de 30 m.

Pour harmoniser ces données, l'image de 1973 a été géoréférencée en utilisant l'image de 2024 comme référence, ce qui a permis de ramener sa résolution effective à 30 m. Il convient cependant de souligner qu'avec une résolution de 30 m, tout objet terrestre de dimensions inférieures à ce seuil reste indétectable sur les images Landsat. C'est dans ce contexte méthodologique que la limite « terre-mer » a été choisie comme ligne de référence, car elle demeure clairement identifiable sur l'ensemble des images sélectionnées et permet une analyse diachronique fiable de l'évolution du trait de côte.

2.2.3.3.3.2. Les erreurs de positionnement

Une ligne de référence, matérialisée par la limite entre le domaine maritime et le domaine terrestre, est extraite automatiquement sur chacune des images sélectionnées afin de suivre l'évolution du trait de côte. Cependant, les marges d'erreur inhérentes aux caractéristiques des images utilisées peuvent influencer l'estimation des changements côtiers. La superposition d'images satellites présentant des résolutions spatiales hétérogènes constitue également un facteur susceptible d'affecter la fiabilité des résultats.

Pour pallier ces limitations, une correction géométrique est indispensable afin de stabiliser la dynamique des images à haute résolution (HRV). Cette opération permet d'harmoniser les acquisitions issues de différents capteurs et de simuler l'enregistrement de plusieurs images par un même capteur, facilitant ainsi leur comparaison diachronique (Trépanier *et al.*, 2010). Néanmoins, sur une image Landsat présentant une résolution spatiale de 30 m, tout objet terrestre dont la dimension est inférieure à ce seuil reste indétectable (Thior, 2020). Cette contrainte justifie en partie le choix de la limite « terre-mer » comme ligne de référence, puisqu'elle demeure clairement identifiable sur l'ensemble des images utilisées.

2.2.3.3.3.3. Interprétation des erreurs liées à l'usage de l'indice NDWI

L'analyse des résultats issus de l'indice NDWI nécessite une prise en compte systématique des différentes sources d'incertitude afin d'évaluer la qualité et la fiabilité des résultats obtenus. L'interprétation de ces erreurs peut s'appuyer sur plusieurs critères scientifiques, notamment :

✓ **Erreur de classification :**

Le NDWI repose sur une classification binaire distinguant l'eau de la terre émergée. Cette approche peut générer des erreurs de classification, particulièrement dans les zones de transition telles que les estuaires ou les mangroves, pouvant conduire à une sous-estimation ou à une surestimation des surfaces aquatiques. Pour quantifier ces erreurs, des indicateurs tels que la précision globale et le coefficient Kappa sont utilisés, complétés par les taux d'erreur de commission et d'omission, obtenus par comparaison avec des données de terrain ou des cartes de référence.

✓ **Sensibilité aux conditions atmosphériques :**

L'indice NDWI est sensible aux conditions atmosphériques lors de l'acquisition des images satellites, notamment la couverture nuageuse, la brume ou l'humidité, qui peuvent modifier la réflectance des surfaces. Cette variabilité introduit une incertitude dans la délimitation des surfaces d'eau. Il est donc crucial d'utiliser des images acquises dans des conditions atmosphériques optimales et, lorsque possible, d'appliquer des corrections radiométriques afin de réduire ces biais.

✓ **Influence des structures anthropiques :**

Les infrastructures humaines (bâtiments, routes, digues, etc.) peuvent perturber les caractéristiques spectrales des pixels et induire une surestimation des surfaces d'eau. L'évaluation de cette source d'erreur peut se faire par comparaison avec des données de référence, telles que des cartes d'occupation du sol ou des inventaires d'infrastructures. Des techniques de correction, comme l'application de filtres spatiaux ou l'utilisation de classifications supervisées, permettent également de distinguer plus efficacement les surfaces d'eau des structures anthropiques.

✓ **Variation de la résolution spatiale :**

La résolution spatiale des images satellites influence la précision de la détection des surfaces aquatiques. Les images à haute résolution (< 30 m) offrent une meilleure discrimination des détails mais peuvent introduire des erreurs locales liées aux variations spectrales fines. À l'inverse, les images à résolution plus faible (> 30 m) peuvent omettre de petits plans d'eau ou des zones complexes, réduisant la précision dans certains contextes. L'évaluation de cette source d'incertitude nécessite d'adapter la résolution spatiale à l'échelle des objets étudiés et aux caractéristiques hydrodynamiques et morphologiques du littoral considéré.

2.2.3.3.4. Estimation et intégration des erreurs

Les données géospatiales mobilisées pour le suivi de l'évolution historique du trait de côte proviennent d'images satellitaires acquises par différents capteurs de la série Landsat, notamment MSS, TM, ETM+ et OLI/TIRS. À l'exception du capteur MSS, dont la résolution spatiale native est de 60 m, l'ensemble des autres capteurs utilisés présente une résolution spatiale de 30 m.

Le recours à l'imagerie satellitaire pour l'ensemble des dates analysées s'explique par la nécessité de couvrir une vaste emprise spatiale, s'étendant de Saly Portudal au delta du Saloum, ce que permet efficacement ce type de données. Le choix des années d'observation répond par ailleurs à l'objectif d'établir une relation entre l'évolution du trait de côte et la dynamique démographique, en s'appuyant sur les périodes correspondant aux recensements généraux de la population réalisés au Sénégal. L'année 2024 a ainsi été retenue, car elle succède immédiatement au dernier recensement national de 2023 et permet de caractériser la position la plus récente du trait de côte.

La littérature scientifique, corroborée par les observations et témoignages des populations riveraines, souligne le caractère fortement dynamique de ce littoral, justifiant pleinement l'utilisation d'images satellitaires pour l'analyse spatio-temporelle de son évolution. Toutefois, l'exploitation de ces données induit plusieurs sources d'erreur, notamment celles liées à la résolution spatiale relativement modeste des capteurs utilisés (60 m pour l'année 1973 et 30 m pour les années 1987, 2002, 2013 et 2024).

Afin de réduire ces biais et d'assurer l'homogénéité des données, une correction géométrique a été appliquée à l'image de 1973, permettant de ramener sa résolution spatiale à 30 m, en cohérence avec les autres images de la série temporelle. Après cette harmonisation, l'incertitude liée à la taille des pixels est considérée uniforme pour l'ensemble des images et estimée à ± 15 m, correspondant à la moitié de la résolution spatiale des capteurs Landsat utilisés. Cette opération de rééchantillonnage a néanmoins introduit une erreur d'ortho-rectification, quantifiée par l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error* - RMS).

Outre l'erreur liée à la résolution spatiale des pixels, deux autres sources majeures d'incertitude ont été identifiées. La première concerne l'erreur de géoréférencement, évaluée à partir du RMS généré automatiquement par le logiciel lors de la correction géométrique, et dont la valeur s'élève à 0,27. La seconde est liée aux oscillations du niveau marin (marnage), dont l'effet sur la position apparente du trait de côte dépend étroitement des caractéristiques

morphodynamiques du littoral de la Petite-Côte. Cette erreur a été estimée à partir du rapport entre l'amplitude du marnage et la pente du rivage. À titre d'exemple, dans le secteur de Saly Portudal, la pente moyenne du littoral est de 9,23 % pour une amplitude de marée de 1,58 m.

L'ensemble de ces sources d'erreur est pris en compte et intégré à toutes les étapes du traitement des données géospatiales. Leur combinaison permet d'estimer l'Erreur de Position Globale du Trait de Côte (EPGT), qui traduit l'incertitude totale affectant la détection et l'analyse de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte.

Afin de garantir une interprétation rigoureuse et fiable des résultats, les différentes erreurs identifiées ont été calculées pour chaque année d'observation, sur la base de trois indicateurs distincts.

Voici les équations qui permettent de calculer les incertitudes :

$$E_{pt} = \sqrt{E_p^2 + E_g^2 + E_o^2}$$

Et

$$E_{\alpha} = \frac{\sqrt{E_{pt1}^2 + E_{pt2}^2}}{\text{Période}(t)}$$

E_{pt} : Erreur de position globale du trait de côte

E_g : Erreur de Géoréférencement (RMS)

E_o : Erreur de l'oscillation de marée

E_p : Erreur de pixel

E_{α} : Erreur globale en moyenne en m/an

Par exemple pour la période 1973-1987, on a :

- Pour l'image de 1973
 - Erreur de géoréférencement = 0,27
 - Erreur de pixel = 15
 - Erreur de l'oscillation de la marée = 0,17
- Pour l'image de 1987
 - Erreur de pixel = 15
 - Erreur de l'oscillation de la marée = 0,17

Pour calculer l'erreur de la période 1973-1987, on :

$\text{Ept } 1973 = \sqrt{0,27^2 + 15^2 + 0,17^2}$ $= 15,008$	Et	$\text{Ept } 1987 = \sqrt{15^2 + 0,17^2} = 15,001$
Ept = 15,002		Ept = 15,001

Alors

$$\alpha = \frac{\sqrt{15,008^2 + 15,001^2}}{14} = \frac{21,21}{14} = \pm 1,51 \text{ m/an}$$

2.3. Technique de traitement du suivi de l'évolution de l'occupation des sols

2.3.1. Choix de la méthode

La littérature scientifique fait état d'une grande diversité de méthodes de classification des images satellitaires, développées en fonction des objectifs d'analyse et des domaines d'application (Fernandez-Delgado *et al.*, 2014). Chaque algorithme de classification présente des performances variables, avec des avantages et des limites propres, étroitement dépendants des caractéristiques intrinsèques des données d'entrée, de leur qualité et de leur structure statistique (Caruana et Niculescu-Mizil, 2006).

Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur une approche de classification supervisée. Comme toute méthode de classification, celle-ci présente à la fois des atouts et certaines contraintes. La classification supervisée repose sur l'utilisation de données d'apprentissage préalablement étiquetées, à partir desquelles l'algorithme apprend les signatures spectrales caractéristiques de chaque classe afin de prédire l'appartenance des pixels de l'image à ces classes. Cette approche implique que les classes thématiques soient définies a priori, en cohérence avec les objectifs de l'étude et la nature des données analysées.

Les données d'entraînement, également appelées échantillons de référence ou données de terrain, correspondent à des ensembles de pixels dont l'appartenance à une classe donnée est connue et validée. Elles sont généralement représentées sous forme de couches vectorielles polygonales, chaque polygone correspondant à une classe spécifique d'occupation ou d'utilisation du sol. Afin d'assurer la précision et la fiabilité de la classification, ces polygones doivent être suffisamment étendus et spatialement bien répartis sur l'ensemble de l'image, de manière à intégrer l'hétérogénéité spectrale propre à chaque classe. Il est en outre indispensable qu'ils prennent en compte les différentes variations tonales et radiométriques observées au sein

d'une même catégorie, afin d'améliorer la représentativité des classes dans le processus d'apprentissage.

À partir de ces données d'entraînement, l'algorithme de classification est ensuite appliqué à l'ensemble de l'image, en attribuant à chaque pixel la classe la plus probable en fonction de ses caractéristiques spectrales. L'un des principaux avantages de la classification supervisée réside dans la possibilité de contrôler à la fois le nombre et la nature des classes thématiques, offrant ainsi une meilleure maîtrise des résultats produits. Cette capacité à orienter et à structurer le processus de classification en fonction des objectifs scientifiques de l'étude constitue l'argument principal justifiant le recours à cette méthode.

2.3.2. Définition des classes, choix de la composition colorée et digitalisation des polygones de terrain d'entraînement

La définition des terrains d'entraînement constitue une étape déterminante du processus de classification supervisée. Elle repose sur trois prérequis fondamentaux : les objectifs scientifiques de l'étude, une connaissance préalable du terrain et une analyse visuelle approfondie des images satellitaires. Dans le cadre de ce travail, l'objectif principal est d'analyser la dynamique spatio-temporelle de l'occupation des sols sur le littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum. À cette fin, sept classes thématiques d'occupation du sol ont été retenues : sols nus/zones de culture, bâti, plans d'eau, végétation, mangrove, tanne humide et tanne sec.

Une fois les classes définies, le choix d'une composition spectrale adaptée s'avère indispensable afin d'optimiser leur discrimination visuelle et spectrale sur les images satellitaires. Pour les images acquises par les satellites Landsat 5 (1987), Landsat 7 (2002) et Landsat 8 (2013 et 2024), une composition en fausses couleurs a été privilégiée, combinant les bandes moyen infrarouge (MIR1), proche infrarouge (PIR) et rouge. Cette combinaison spectrale permet une meilleure séparation des classes d'occupation du sol, en particulier entre les surfaces végétalisées, les zones humides et les surfaces minérales ou artificialisées.

Concernant l'image de 1973, acquise par Landsat 1, une composition colorée en infrarouge a été utilisée, fondée sur l'association des bandes proche infrarouge (PIR), rouge et verte. Ce choix méthodologique s'explique par l'absence de la bande moyen-infrarouge sur ce capteur, ce qui a nécessité le recours à une combinaison spectrale alternative permettant néanmoins une discrimination satisfaisante des différentes classes d'occupation du sol identifiées.



Figure 19 : Composition colorée 754 (image 2024).

Après la réalisation des compositions colorées, les polygones correspondant aux terrains d'entraînement ont été numérisés à l'aide de l'outil *Overlay* du logiciel ENVI 4.5. Cette opération a permis la création des *Regions Of Interest (ROI)*, qui matérialisent les zones d'apprentissage utilisées dans le processus de classification, via l'interface « *ROI Tool* ».

Pour chaque classe d'occupation du sol, plusieurs polygones d'entraînement ont été délimités, en s'appuyant sur les contrastes chromatiques et les signatures spectrales caractéristiques observées sur les images. Cette multiplicité de polygones vise à intégrer l'hétérogénéité intraclasse et à améliorer la représentativité statistique des échantillons. Une fois les ROI définies, la classification supervisée a été réalisée en utilisant l'algorithme de la Vraisemblance Maximale (Maximum Likelihood).

L'algorithme de la Vraisemblance Maximale repose sur une approche probabiliste et statistique, qui estime, pour chaque pixel, la probabilité d'appartenance à une classe donnée à partir des distributions spectrales des pixels d'entraînement. Il suppose que les valeurs spectrales associées à chaque classe suivent une distribution normale (gaussienne). Ainsi, plus les valeurs spectrales d'un pixel sont proches de la moyenne d'une classe, plus la probabilité de son assignation à cette classe est élevée. Cette méthode est largement utilisée en télédétection en

raison de sa capacité à produire des classifications précises lorsque les classes sont spectrales distinctes et que les données d'apprentissage sont de bonne qualité. Néanmoins, ses performances peuvent être affectées par une forte variabilité spectrale intra-classe ou par une représentativité insuffisante des échantillons d'entraînement.

La classification supervisée réalisée à l'aide d'ENVI Classic a produit des résultats particulièrement satisfaisants, comme en témoignent les indicateurs d'évaluation de la qualité. Le coefficient Kappa atteint une valeur élevée de 0,9937, traduisant une concordance quasi parfaite entre la classification obtenue et les données de référence. Ce niveau de précision atteste de la fiabilité du modèle de classification et de la pertinence des signatures spectrales retenues pour discriminer les différentes classes d'occupation du sol de la zone d'étude.

Par ailleurs, l'analyse de l'indice de séparabilité entre les classes met en évidence une très bonne discrimination spectrale. Les valeurs de cet indice, comprises entre environ 1,88 et 2,0, indiquent une séparation nette des classes dans l'espace spectral, condition essentielle à une classification fiable. À titre d'exemple, la séparation entre les classes « Eau » et « Bâti » présente un indice maximal de 2,0, tout comme celle observée entre « Mangrove » et « Sols nus/Zones de culture ». Ces résultats confirment la capacité des signatures spectrales utilisées à distinguer de manière claire et cohérente les différentes unités spatiales et types de couverture du sol.

Ainsi, la combinaison d'un coefficient Kappa proche de l'unité et de forts indices de séparabilité atteste de l'excellente qualité de la classification supervisée réalisée. Elle valide la méthodologie adoptée et renforce la fiabilité des analyses spatiales et des interprétations qui en découlent pour l'étude de la dynamique territoriale du littoral de la Petite-Côte jusqu'au delta du Saloum.

```

Pair Separation (least to most):
Bati [Blue] 142 points and Zones de culture /sols nus [Maroon] 586 points - 1.89808577
Eau [Red] 10330 points and Tanne humide [Cyan] 364 points - 1.97917035
Tanne sec /sols salés [Magenta] 193 points and Zones de culture /sols nus [Maroon] 586 points - 1.98760348
Bati [Blue] 142 points and Tanne sec /sols salés [Magenta] 193 points - 1.99422870
Mangrove [Green] 1059 points and Végétation [Yellow] 292 points - 1.99725146
Mangrove [Green] 1059 points and Tanne humide [Cyan] 364 points - 1.99849175
Bati [Blue] 142 points and Tanne humide [Cyan] 364 points - 1.99905505
Bati [Blue] 142 points and Végétation [Yellow] 292 points - 1.99940204
Eau [Red] 10330 points and Mangrove [Green] 1059 points - 1.99992967
Végétation [Yellow] 292 points and Tanne humide [Cyan] 364 points - 1.99995966
Tanne humide [Cyan] 364 points and Tanne sec /sols salés [Magenta] 193 points - 1.99997309
Végétation [Yellow] 292 points and Zones de culture /sols nus [Maroon] 586 points - 1.99999170
Tanne humide [Cyan] 364 points and Zones de culture /sols nus [Maroon] 586 points - 1.99999938
Mangrove [Green] 1059 points and Bati [Blue] 142 points - 1.99999999
Végétation [Yellow] 292 points and Tanne sec /sols salés [Magenta] 193 points - 2.00000000
Eau [Red] 10330 points and Bati [Blue] 142 points - 2.00000000
Mangrove [Green] 1059 points and Zones de culture /sols nus [Maroon] 586 points - 2.00000000
Eau [Red] 10330 points and Zones de culture /sols nus [Maroon] 586 points - 2.00000000
Eau [Red] 10330 points and Végétation [Yellow] 292 points - 2.00000000
Mangrove [Green] 1059 points and Tanne sec /sols salés [Magenta] 193 points - 2.00000000
Eau [Red] 10330 points and Tanne sec /sols salés [Magenta] 193 points - 2.00000000

```

Figure 20 : Indice de séparabilité

```

Confusion Matrix: D:\CC 754 edc. CS
Overall Accuracy = (12937/12966) 99.7763%
Kappa Coefficient = 0.9937

```

Figure 21 : Coefficient Kappa

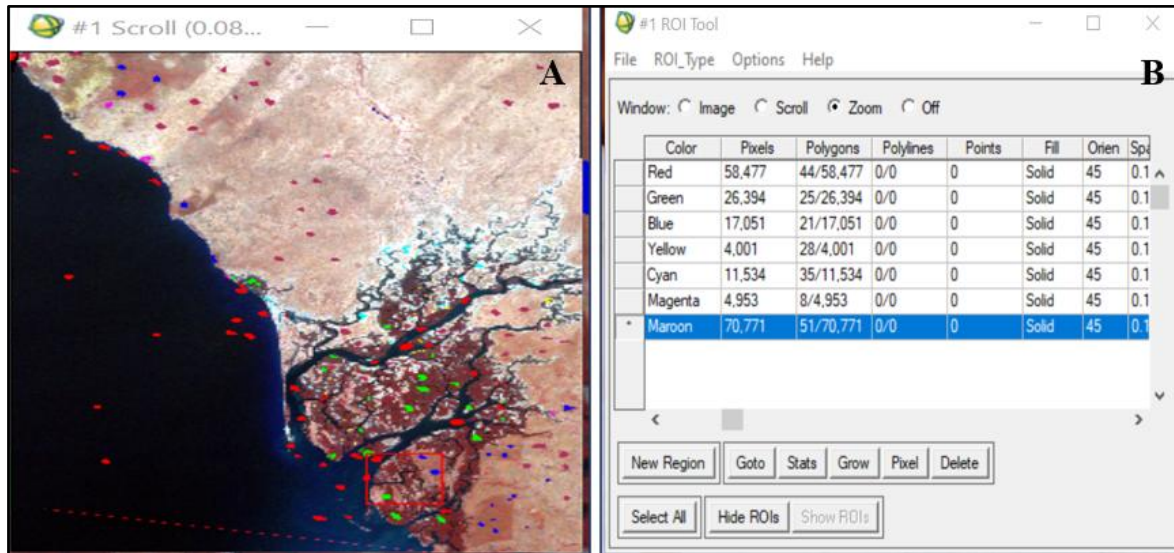


Figure 22 : Terrain d'entraînement (A) ; Tableau des ROIs (B) : image 1973.

À l'issue de la phase de classification, l'image résultante a été vectorisée, puis exportée au format *Shapefile* vers l'environnement ArcGIS, où les opérations de structuration des données et de mise en page cartographique ont été réalisées.

Conclusion chapitre II

En définitive, ce chapitre a permis de présenter une chaîne méthodologique intégrée et cohérente dédiée à l'analyse de la dynamique spatio-temporelle du trait de côte entre Saly Portudal et le delta du Saloum. Deux catégories complémentaires de données ont été mobilisées : d'une part, des données de terrain issues d'observations directes, d'enquêtes et de guides d'entretien, et, d'autre part, des données géospatiales constituées de séries d'images satellitaires Landsat couvrant la période 1973-2024, associées à des couches vectorielles thématiques.

Après les étapes de prétraitement des images (mosaïquage, correction géométrique et géoréférencement), suivies de l'extraction de l'emprise de la zone d'étude, la limite terre-mer a été retenue comme référence du trait de côte. Cette dernière a été extraite à partir de l'indice NDWI, combiné à un seuillage optimisé et à une phase de vectorisation. L'analyse de la cinématique du trait de côte a ensuite été réalisée à l'aide de l'extension DSAS 5.1, intégrée dans une *géodatabase*, en définissant une ligne de base positionnée côté terrestre et des transects

perpendiculaires espacés de 50 m. Les variations spatio-temporelles ont été quantifiées à partir des indicateurs EPR (*End Point Rate*), pour l'analyse inter-dates, et LRR (*Linear Regression Rate-of-change*), pour l'estimation des tendances globales d'évolution.

Par ailleurs, une classification supervisée de l'occupation du sol, fondée sur l'algorithme de la Vraisemblance Maximale, a été réalisée afin de fournir un cadre spatial et thématique d'interprétation des dynamiques côtières observées. Les différentes sources d'incertitude, liées à la résolution spatiale et à la taille des pixels, au géoréférencement, aux oscillations de marée et aux limites intrinsèques de l'indice NDWI, ont été identifiées, quantifiées et intégrées à l'ensemble du processus analytique. Leur propagation a conduit à l'estimation d'une erreur annuelle moyenne ($E\alpha$), garantissant une évaluation rigoureuse de la fiabilité des résultats obtenus.

La démarche méthodologique adoptée se distingue par sa reproductibilité, par la triangulation systématique entre données de terrain, télédétection et systèmes d'information géographique, ainsi que par l'encadrement formel des incertitudes. Elle constitue ainsi le socle scientifique des chapitres consacrés à la présentation des résultats, à la cartographie des tendances d'évolution du littoral et à la discussion des implications pour la gestion durable des zones côtières.

Conclusion de la première partie

Cette première partie a permis d'établir les fondements théoriques, conceptuels et opérationnels de l'étude. La revue de la littérature met en évidence que l'érosion côtière, phénomène d'ampleur mondiale, résulte de l'interaction complexe entre des forçages naturels, notamment l'action des houles, des marées, de la dérive littorale, les déséquilibres du budget sédimentaire et l'élévation du niveau moyen de la mer, et des pressions anthropiques croissantes telles que la littoralisation, les extractions de matériaux, la construction d'ouvrages côtiers et l'artificialisation des rivages. Sur le littoral sénégalais, et plus particulièrement entre la Petite-Côte et le delta du Saloum, cette combinaison de facteurs se traduit par une vulnérabilité élevée des espaces côtiers, des impacts significatifs sur les écosystèmes et les activités socio-économiques, ainsi que par une efficacité globalement contrastée des politiques et des interventions d'aménagement mises en œuvre, comme l'ont souligné les travaux antérieurs.

Le cadrage conceptuel a ensuite permis de préciser et de structurer les principales notions mobilisées dans l'analyse (littoral, dynamique côtière, vulnérabilité, trait de côte, variabilité climatique, résilience et adaptation) afin de lever toute ambiguïté terminologique et de fonder

une approche intégrée des interactions entre processus physiques, dynamiques sociales et modes de gouvernance. La présentation de la zone d'étude a mis en exergue le rôle déterminant des facteurs géologiques et géomorphologiques (présence de substrats meubles, cordons littoraux, faibles altitudes et bas-reliefs), des régimes climatiques et hydrodynamiques, ainsi que l'importance des usages et des activités humaines (tourisme, pêche, agriculture, commerce) dans la structuration des aléas et des risques côtiers.

Sur le plan méthodologique, l'approche retenue repose sur la combinaison de données de terrain (issues d'enquêtes par questionnaires, d'entretiens semi-directifs et d'observations directes), d'analyses sédimentaires et de techniques de télédétection multi-dates mobilisant les images Landsat (MSS, TM, ETM+ et OLI/TIRS). L'extraction du trait de côte à partir de l'indice NDWI, l'analyse des évolutions spatio-temporelles à l'aide de l'outil DSAS (indices EPR et LRR), ainsi que la prise en compte explicite des principales sources d'incertitude (résolution spatiale, géoréférencement et état de marée) contribuent à garantir la solidité et la fiabilité des résultats attendus.

En définitive, cette partie fournit le cadre conceptuel, spatial et méthodologique indispensable pour aborder, dans les sections suivantes, l'analyse des rythmes et des gradients spatio-temporels du recul et de la progradation du trait de côte sur la période 1973-2024, l'identification des facteurs explicatifs à l'échelle locale, ainsi que la discussion des implications en matière de gestion intégrée du littoral et d'adaptation des socio-écosystèmes côtiers.

Deuxième partie : Caractéristiques morphodynamiques, cinématique du trait de côte et projections

Cette deuxième partie a pour objectif, dans un premier temps, d'identifier et de caractériser les principaux facteurs naturels et anthropiques qui structurent la dynamique actuelle du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum. L'analyse s'appuie sur une approche croisée mobilisant à la fois des données empiriques issues du terrain, des observations cartographiques et des connaissances scientifiques relatives aux processus littoraux. Il s'agit de mettre en évidence les mécanismes à l'origine des mutations du trait de côte, en contextualisant leur influence dans le cadre spécifique de cette région côtière soumise à de multiples pressions environnementales et socio-économiques.

Dans un second temps, l'étude s'intéresse à l'évolution spatio-temporelle du trait de côte, à travers une analyse diachronique fondée sur l'exploitation d'images satellitaires et de données géoréférencées. Cette démarche permet de reconstituer la cinématique littorale au cours de différentes périodes de référence, afin d'identifier les principales tendances évolutives, les rythmes de recul ou d'avancée du trait de côte, ainsi que les zones les plus vulnérables. L'ensemble de ces résultats sera interprété à la lumière des dynamiques environnementales et des actions anthropiques identifiées précédemment, dans une perspective intégrée de compréhension des transformations littorales.

Enfin, une démarche prospective sera entreprise à travers une modélisation intégrant de manière croisée les facteurs naturels (dynamique climatique, hydro-sédimentaire, géomorphologie côtière) et les pressions anthropiques (urbanisation, exploitation des ressources, aménagements côtiers). Cette approche s'appuiera également sur l'étude diachronique de l'évolution du trait de côte et de projeter les positions futures du trait de côte, dans une logique de prévision spatiale, afin d'anticiper les dynamiques susceptibles d'affecter les zones littorales de la Petite-Côte au delta du Saloum.

Chapitre III : Caractéristiques morphodynamiques et granulométriques

Ce chapitre se propose d'analyser de manière systématique les principaux déterminants de la dynamique littorale observée sur la Petite-Côte au delta du Saloum. L'évolution morphodynamique de ce linéaire côtier résulte de l'interaction complexe entre un ensemble de facteurs relevant de deux grandes catégories analytiques : d'une part, les processus naturels gouvernés par les dynamiques géophysiques et climatiques ; d'autre part, les pressions anthropiques associées aux usages du littoral et aux aménagements humains. Si cette distinction conceptuelle est nécessaire pour structurer l'analyse, elle ne saurait occulter la forte interdépendance entre ces deux dimensions, lesquelles interagissent et se renforcent mutuellement dans le temps et dans l'espace.

Les facteurs naturels intègrent principalement les dynamiques hydrodynamiques (houle, courants, marées et dérive littorale), les composantes climatiques (régimes de précipitations, variations thermiques et élévation du niveau moyen de la mer), ainsi que les caractéristiques géomorphologiques du littoral (nature des formations côtières, topographie, pente et type de substrat). En parallèle, les facteurs anthropiques recouvrent l'ensemble des pratiques d'exploitation et d'occupation du littoral, notamment l'extraction de matériaux sédimentaires, la pêche, l'urbanisation côtière, la mise en place d'infrastructures et, plus largement, les politiques d'aménagement et de gestion du territoire. L'objectif de ce chapitre est de caractériser ces différents paramètres, d'analyser leurs modes d'action respectifs et d'appréhender leurs effets cumulés dans le cadre des dynamiques socio-environnementales locales. Cette lecture croisée constitue un préalable indispensable à la compréhension des mécanismes à l'origine des transformations littorales et à l'élaboration de stratégies de gestion intégrée et durable des espaces côtiers.

1. Caractéristiques morphodynamiques

L'analyse des dynamiques littorales observées sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, met en évidence une prédominance apparente des facteurs naturels dans les processus d'évolution du trait de côte. Les enquêtes réalisées en 2025 auprès des populations riveraines mettent ainsi en évidence, dans la perception locale des causes de l'érosion côtière, une légère prédominance des facteurs naturels (53,59 %) par rapport aux facteurs anthropiques (46,41 %). Cette répartition traduit le fait que les communautés littorales appréhendent majoritairement la dynamique du trait de côte comme un phénomène essentiellement gouverné

par des processus naturels, notamment l'action des vagues, la dynamique des houles, l'érosion éolienne, le ruissellement continental ou encore les variations du niveau marin.

Cette représentation, fondée sur l'expérience empirique des populations vivant au contact direct du littoral, rejoint en partie les conclusions de la littérature scientifique, qui identifie les processus géophysiques et climatiques comme des moteurs structurants de l'évolution morphodynamique des littoraux (Paskoff, 2001 ; Badji et al., 2025). Les interactions entre les forçages hydrodynamiques, les conditions climatiques et les caractéristiques géomorphologiques contribuent en effet à façonner la morphologie littorale et à expliquer les variations spatiales et temporelles du trait de côte observées sur la Petite-Côte et dans le delta du Saloum.

Toutefois, la part significative attribuée aux facteurs anthropiques, représentant près de 46 % des réponses, souligne également la prise de conscience croissante des communautés littorales quant à l'influence des activités humaines sur l'évolution de leur environnement côtier. L'urbanisation rapide et souvent peu maîtrisée du front de mer, les extractions de matériaux sédimentaires, les aménagements portuaires et routiers, ainsi que la dégradation progressive des formations dunaires et de la couverture végétale constituent autant de pressions anthropiques susceptibles d'accentuer la vulnérabilité d'un système côtier déjà soumis à de fortes contraintes naturelles.

Ainsi, l'érosion côtière observée sur le littoral sénégalais apparaît comme le résultat d'une interaction étroite entre des processus naturels dominants et des pressions anthropiques croissantes. Cette dynamique combinée contribue à inscrire la Petite-Côte et le delta du Saloum dans une trajectoire de fragilisation progressive de leurs socio-écosystèmes côtiers. Dans ce contexte, l'articulation entre savoirs locaux et analyses scientifiques apparaît essentielle pour mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre et pour orienter l'élaboration de stratégies de gestion intégrée du littoral, capables de concilier la préservation des écosystèmes côtiers et les besoins socio-économiques des populations riveraines.

1.1. Facteurs naturels

La dynamique du trait de côte s'inscrit fondamentalement dans un processus naturel, résultant de l'action combinée de multiples agents physico-naturels. Dans le contexte du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, cette dynamique est principalement contrôlée par des facteurs climatiques, tels que le réchauffement global, les régimes pluviométriques et

les systèmes de vents, hydrodynamiques (incluant la houle, les courants marins et les marées), ainsi que géomorphologiques, notamment la nature des formations sédimentaires, la configuration topographique du littoral et la bathymétrie proche du rivage. L'interaction de ces composantes s'opère selon des mécanismes complexes et non linéaires, générant des effets différenciés sur la stabilité des rivages et conditionnant leur évolution à différentes échelles temporelles, depuis les dynamiques saisonnières d'érosion et de redistribution sédimentaire jusqu'aux tendances de long terme marquées par le recul structurel du trait de côte et la transformation progressive des paysages littoraux.

L'analyse des données issues des enquêtes de terrain met en évidence une convergence significative entre les savoirs locaux et les résultats des études scientifiques. Une majorité des populations riveraines identifie en effet les facteurs naturels comme les principaux moteurs des mutations observées du littoral (Fig. 23). Cette perception, loin d'être marginale, s'appuie sur une connaissance empirique du milieu, construite à partir d'une observation prolongée et répétée des phénomènes côtiers. Elle confirme l'hypothèse selon laquelle les transformations du linéaire côtier sont largement appréhendées comme l'expression d'un système environnemental dynamique, régi par des forces naturelles en grande partie indépendantes des capacités de contrôle immédiat des sociétés humaines.

La reconnaissance, par les acteurs locaux, du rôle central des mécanismes naturels confère une légitimité accrue à l'adoption d'une approche intégrée des enjeux littoraux. Celle-ci repose sur l'articulation des connaissances endogènes et des analyses scientifiques, condition essentielle pour une compréhension plus fine et plus contextualisée des dynamiques côtières en cours, et pour l'élaboration de stratégies de gestion adaptées aux spécificités environnementales et socio-territoriales du littoral sénégalais, de la Petite-Côte aux îles du Saloum.

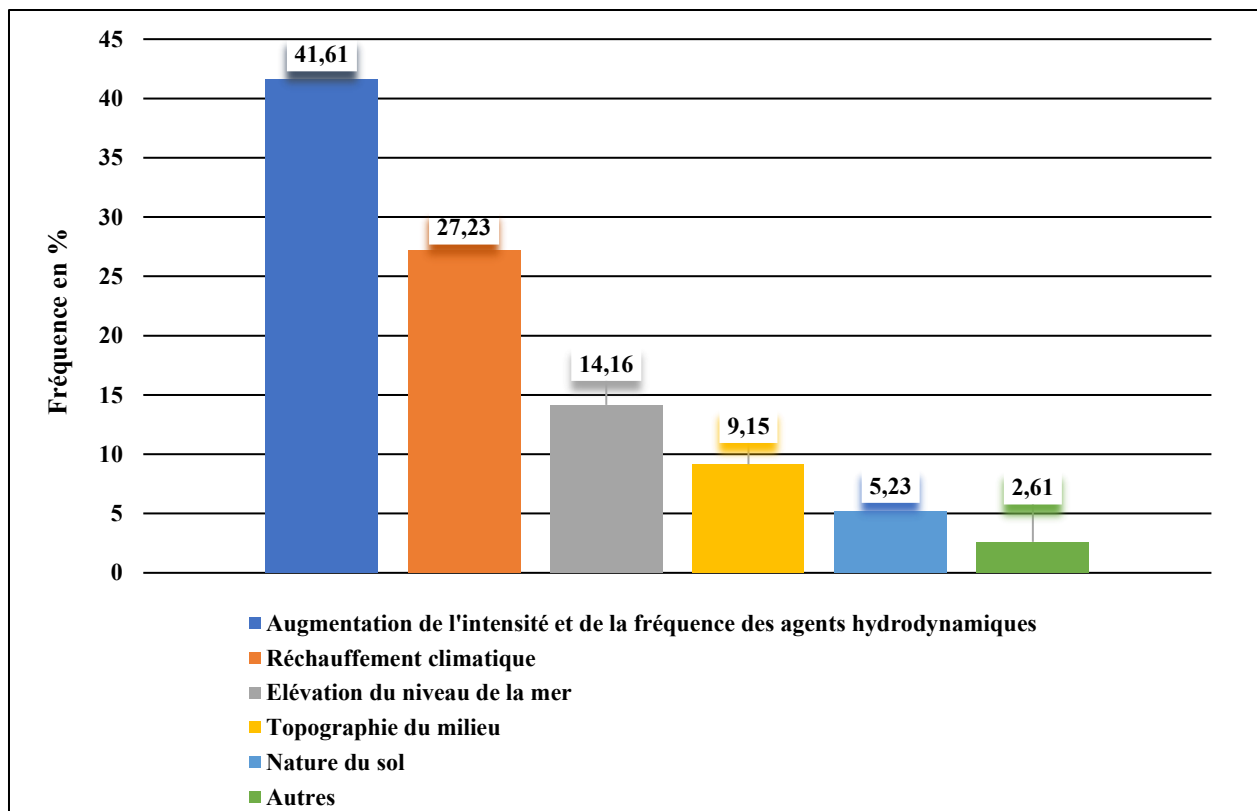


Figure 23 : Facteurs naturels de la dynamique du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, selon la population (données enquêtes 2025)

L'analyse des données issues des questionnaires met en évidence une hiérarchisation nette des facteurs naturels perçus comme moteurs de l'érosion côtière sur la zone d'étude. L'augmentation de l'intensité et de la fréquence des agents hydrodynamiques (vagues, houle et courants marins) est identifiée comme le facteur principal par 41,61 % des répondants, reflétant une conscience marquée des communautés locales quant à la force érosive des dynamiques marines. Cette perception s'aligne avec les observations scientifiques, qui soulignent le rôle central des variations des houles et de la réduction des apports sédimentaires dans l'évolution morpho-sédimentaire des plages, comme l'illustre le littoral de Rufisque, reculant à un rythme moyen de 1,30 m/an depuis 1937 (Niang-Diop, 1995).

Le réchauffement climatique, mentionné par 27,23 % des enquêtés, est également intégré dans les représentations locales, traduisant l'intériorisation progressive des discours globaux sur le climat dans les zones côtières vulnérables. Cette perception concorde avec les observations de l'Agence nationale de l'aviation civile et de la météorologie (ANACIM, 2023), qui classe le Sénégal parmi les pays africains les plus exposés à l'érosion côtière, en raison notamment de l'élévation du niveau moyen de la mer imputable au changement climatique.

Dans le même temps, la géomorphologie locale, qu'il s'agisse de la topographie (9,15 %) ou de la nature des formations sédimentaires (5,23 %), demeure moins fréquemment citée par les populations, bien qu'elle constitue un facteur scientifiquement reconnu influençant la résilience ou la vulnérabilité du littoral. L'élévation du niveau de la mer, mentionnée par 14,16 % des répondants, illustre une prise de conscience progressive des processus lents mais irréversibles liés aux dérèglements climatiques globaux. Ce différentiel de perception met en évidence une hiérarchie dans la visibilité des phénomènes : plus un facteur est observable à court terme (par exemple les fortes vagues ou les tempêtes), plus il est intégré dans les représentations locales.

Comme le soulignent Badji *et al.* (2025), la dynamique actuelle du littoral sénégalais résulte de la conjonction de facteurs naturels et anthropiques, dont les interactions complexes rendent l'érosion littorale difficile à anticiper et à gouverner. Dans ce contexte, l'analyse des perceptions locales constitue un levier stratégique pour l'élaboration de politiques d'adaptation et de gestion intégrée du littoral, capables de concilier exigences écologiques et expériences vécues par les communautés riveraines.

1.1.1. Facteurs climatiques

Les facteurs climatiques jouent un rôle central dans la compréhension des dynamiques littorales, notamment par l'intermédiaire des vents dominants et des épisodes cycloniques, qui exercent une influence directe et souvent marquée sur les zones côtières. Ces phénomènes, caractérisés par leur intensité et leur fréquence, contribuent à la mobilisation significative des sédiments littoraux, induisant des transformations morphologiques parfois rapides et profondes. Ils favorisent des processus d'érosion accélérée, perturbent l'équilibre des flux sédimentaires et peuvent, selon la configuration géomorphologique locale, générer des phénomènes ponctuels de progradation du trait de côte.

Par ailleurs, les variations saisonnières et interannuelles des régimes climatiques conditionnent le rythme et l'ampleur des reculs et avancées du littoral, complexifiant la gestion et la préservation des zones côtières, particulièrement dans les contextes tropicaux où la variabilité climatique tend à s'accroître. Au-delà des implications des vents et des tempêtes, d'autres paramètres climatiques, tels que la pluviométrie et la température, exercent également une influence indirecte mais déterminante sur les processus hydro-sédimentaires et les équilibres morphodynamiques de ces milieux sensibles.

1.1.1.1. Influence des régimes de vent sur la dynamique littorale de la Petite-Côte au delta du Saloum

Les vents constituent un facteur majeur de la dynamique littorale, agissant comme un agent physique déterminant de la morphologie côtière. Ils génèrent des houles, tant locales que lointaines, qui modulent les processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments sur les côtes meubles. Ces interactions influencent directement la stabilité des plages et des dunes, déterminant la distribution spatiale des sédiments et la configuration morphologique du littoral (French et Burningham, 2013). Sur les côtes dépourvues de végétation, la dynamique éolienne favorise le transport sédimentaire vers l'intérieur des terres, contribuant à l'ensablement de l'arrière-littoral et à une instabilité marquée des formations dunaires (Delgado-Fernandez *et al.*, 2013).

La compréhension de ces processus est essentielle pour la gestion durable des zones côtières, notamment dans le contexte du changement climatique, qui modifie les régimes de vent et intensifie la fréquence et l'intensité des tempêtes. Les variations saisonnières et interannuelles des régimes éoliens entraînent des modifications significatives de la morphologie côtière, impactant la résilience des écosystèmes littoraux et des infrastructures humaines (French et Burningham, 2013). Ainsi, l'intégration des dynamiques éoliennes dans les modèles de gestion côtière est indispensable pour anticiper les implications futures et développer des stratégies d'adaptation efficaces.

Les vents interviennent principalement à travers trois processus : l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments. Cette action est particulièrement significative sur les côtes meubles, où elle modifie la distribution des sédiments et façonne les formations dunaires (Ellis *et al.*, 2015). Sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, deux régimes de vent dominants structurent la dynamique littorale : l'alizé maritime et la mousson. L'alizé maritime, soufflant du nord-est vers le sud-ouest, est généré par l'anticyclone des Açores et prédomine durant la saison sèche (novembre à mai). Il contribue à la stabilisation thermique et influence le transport sédimentaire le long du littoral (Samou *et al.*, 2023). La mousson, soufflant du sud-ouest vers le nord-est, résulte de l'action conjointe de la dépression saharienne et de l'anticyclone de Sainte-Hélène. Elle prédomine durant la saison humide (juin à octobre), apportant des masses d'air chaud et humide qui modifient les régimes de houle et accentuent la dynamique côtière (Clicours, 2024).

L'intensité de l'action éolienne sur la morphologie littorale dépend de la vitesse et de la direction du vent, mais également de la topographie locale et de la couverture végétale. Les

variations saisonnières et interannuelles des régimes de vent peuvent entraîner des changements substantiels de la morphologie côtière, affectant la résilience des écosystèmes et des infrastructures humaines (Ellis *et al.*, 2015). Sur la Petite-Côte, la saison sèche se caractérise par des vents modérés et des houles de faible amplitude, induisant une érosion limitée (Samou *et al.*, 2023 ; Sadio *et al.*, 2017). À l'inverse, la saison des pluies (hivernage) est associée à un renforcement significatif des vents, générant des houles plus puissantes et accentuant l'érosion côtière (Cissé *et al.*, 2023).

La végétation littorale joue un rôle modulateur essentiel dans ces processus. Dans le département de Mbour, la couverture végétale est clairsemée, exposant les plages aux forces érosives du vent et de la houle (Cissé *et al.*, 2024). À l'inverse, dans le delta du Saloum, les mangroves et les herbiers marins contribuent à stabiliser les sédiments, réduisant l'impact de l'érosion éolienne et renforçant la résilience côtière (Alongi, 2008 ; McIvor *et al.*, 2012). Cette interaction complexe entre variables climatiques, morphologie et couverture végétale souligne l'importance d'intégrer les facteurs abiotiques et biotiques dans l'étude des processus d'érosion sur les littoraux tropicaux sénégalais (Nicholls *et al.*, 2007).

L'analyse des données de vent pour la période 1981-2022 à Mbour et dans le delta du Saloum (Figures 24 et 25) révèle une nette prédominance des vents d'ouest. Sur l'année, sept mois (avril à octobre) sont dominés par des vents provenant des secteurs Nord-Ouest, Ouest et Ouest-Sud-Ouest, accentuant la fréquence des houles perpendiculaires au littoral et intensifiant les phénomènes érosifs. Cette influence est particulièrement marquée durant la saison hivernale (juillet à octobre), période au cours de laquelle la persistance des vents d'ouest renforce les mécanismes hydrodynamiques responsables du transport sédimentaire et de l'érosion accélérée du trait de côte (Ranasinghe *et al.*, 2013).

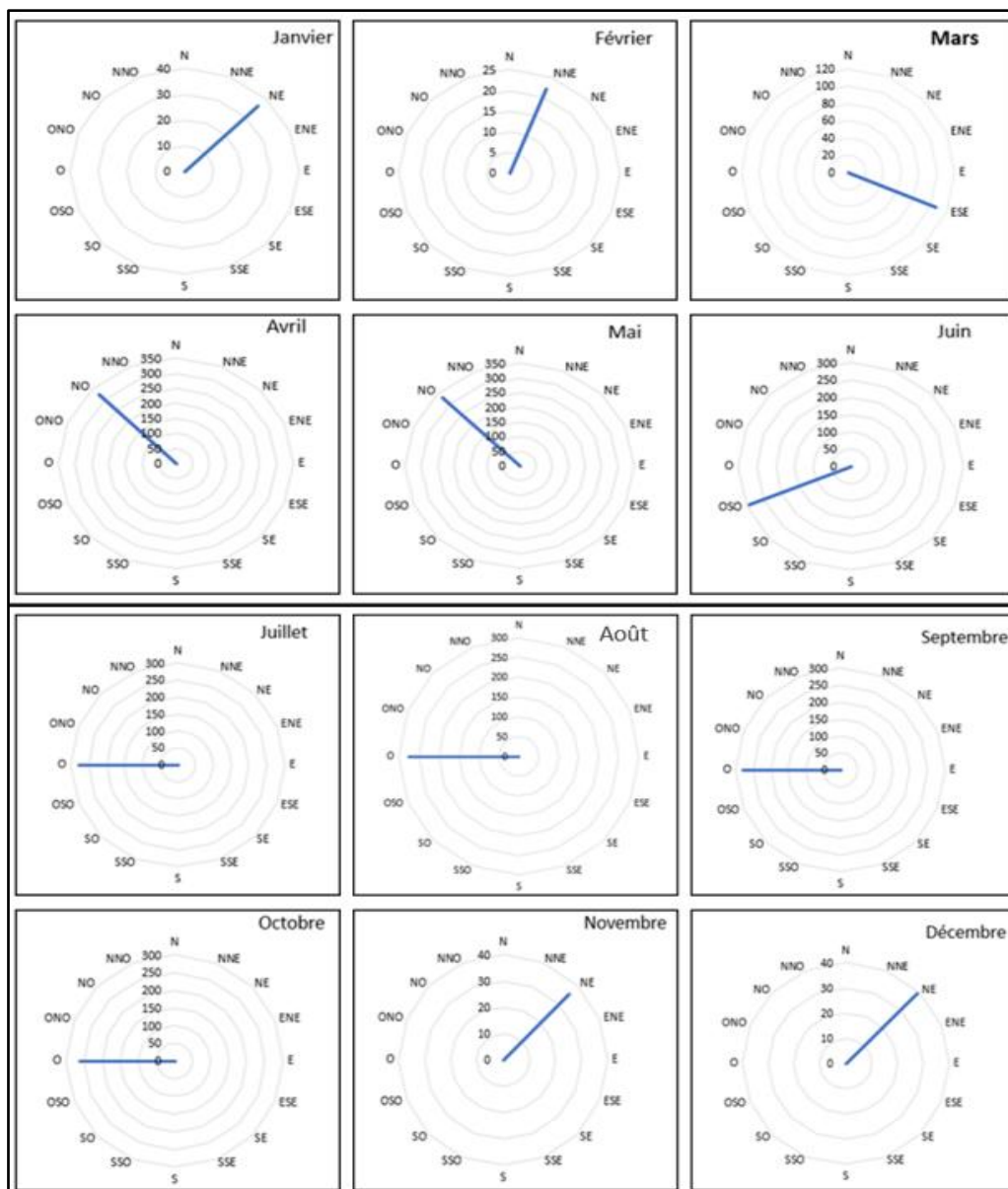


Figure 24 : Fréquence en moyenne de la direction des vents à Mbour (données climat NASA 1981-2022).

L'analyse des roses des vents mensuelles pour le littoral de Mbour révèle une variabilité saisonnière marquée dans les directions dominantes des vents. De janvier à mars, les vents soufflent principalement depuis le secteur nord-est (NE), reflétant l'influence des alizés continentaux prédominants pendant la saison sèche. D'avril à juin, on observe un basculement vers des vents majoritairement orientés ouest et sud-ouest (O-SO), correspondant à l'établissement progressif de la mousson africaine. La période de juillet à septembre est caractérisée par la persistance des vents d'ouest (O), tandis qu'en octobre à décembre, les vents reprennent progressivement leur orientation nord-est, marquant la fin du cycle annuel.

Cette dynamique venteuse joue un rôle déterminant dans l'évolution du trait de côte sur la Petite-Côte. Les vents d'orientation nord-est génèrent une houle oblique favorisant un transport sédimentaire longitudinal dirigé vers le sud-ouest, contribuant à l'érosion des plages exposées et à l'accumulation de sédiments dans les secteurs abrités. En revanche, la dominance des vents d'ouest pendant la saison des pluies induit une houle frontale plus énergétique, générant un ressac intense qui accentue l'érosion du littoral. L'alternance saisonnière des directions de vent conditionne ainsi la redistribution des sédiments et la morphologie côtière, pouvant entraîner un recul significatif du trait de côte dans les zones les plus vulnérables.

Les implications pour la gestion côtière sont importantes. L'évolution morphologique du littoral de Mbour dépend étroitement de cette dynamique venteuse, justifiant une surveillance renforcée et la mise en œuvre de mesures d'atténuation adaptées. L'installation de structures de protection côtière, telles que les épis ou les brise-lames, doit être planifiée en fonction des variations saisonnières des régimes de vent afin d'optimiser leur efficacité. Par ailleurs, la planification des activités urbaines et touristiques dans ces secteurs doit intégrer le risque d'érosion aggravée par la houle induite par les changements de direction des vents, garantissant ainsi une approche préventive et durable de la gestion du littoral.

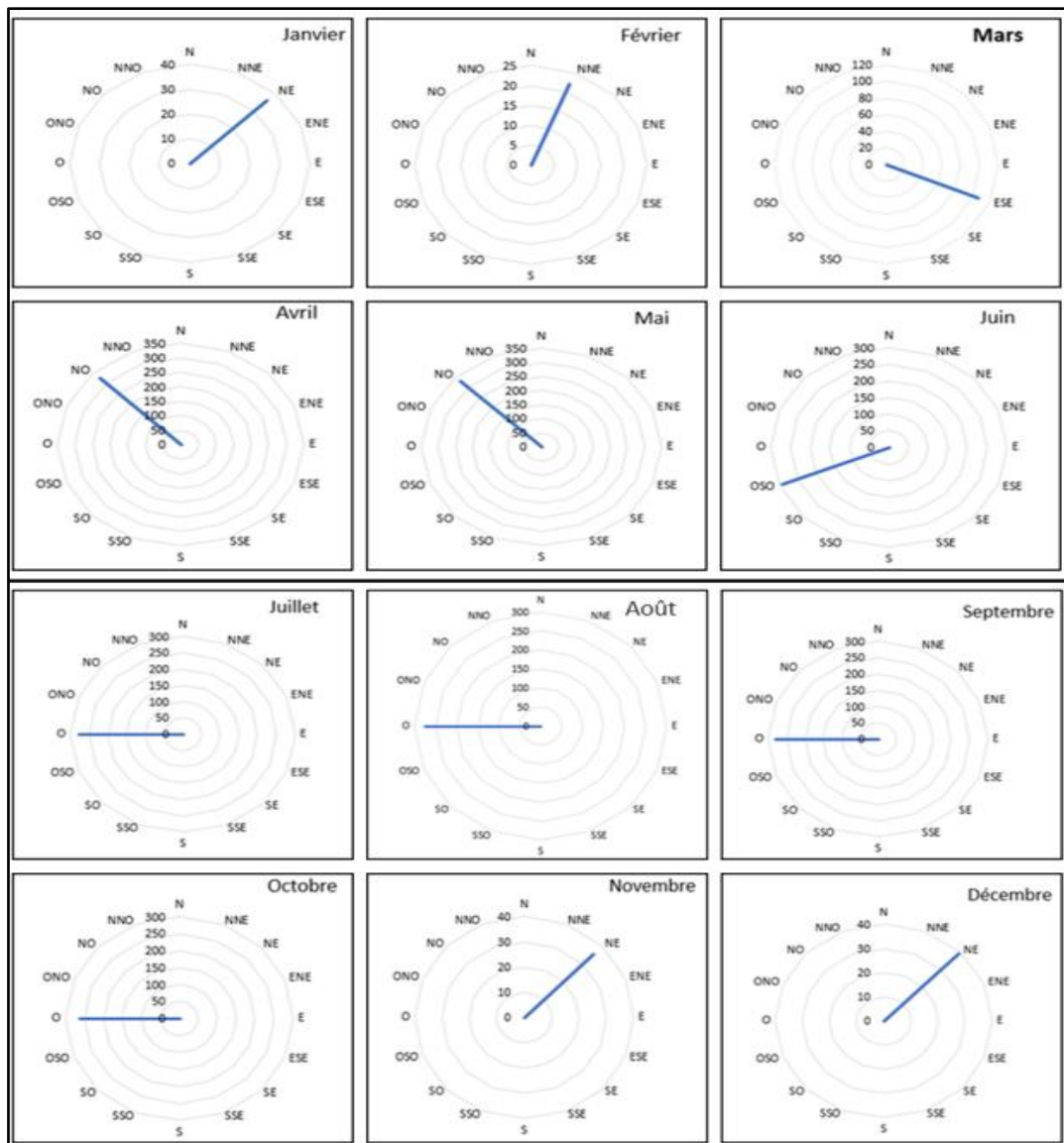


Figure 25 : Fréquence en moyenne de la direction des vents au delta du Saloum (données climat NASA 1981-2022).

L'analyse des roses des vents mensuelles pour le delta du Saloum met en évidence une variabilité saisonnière significative, influençant directement la morphodynamique du littoral. De janvier à mars, les vents dominants proviennent du secteur nord-est (NE), reflétant l'influence des alizés continentaux prévalant durant la saison sèche. Entre avril et juin, une transition s'opère avec une augmentation des vents d'ouest et de sud-ouest (O-SO), coïncidant avec le début de la saison des pluies. La période de juillet à septembre est caractérisée par des vents majoritairement d'ouest (O), favorisant le transport sédimentaire et modifiant la morphologie côtière. D'octobre à décembre, les vents reprennent progressivement leur orientation nord-est, bouclant ainsi le cycle annuel.

Cette dynamique éolienne exerce un rôle clé dans l'évolution du trait de côte. Les vents du nord-est génèrent une houle oblique favorisant un transport sédimentaire longitudinal vers le sud-ouest, entraînant une érosion notable sur les rivages exposés et une accumulation de sédiments dans les zones abritées. En revanche, la prédominance des vents d'ouest durant la saison des pluies engendre une houle frontale plus énergétique, accentuant l'érosion des secteurs vulnérables du delta, en particulier les plages sableuses et les marges de mangroves. Cette alternance saisonnière des directions et intensités de vent conditionne la redistribution des sédiments et peut provoquer un recul progressif du trait de côte, affectant la morphologie des écosystèmes littoraux sensibles.

Les implications pour la gestion côtière sont considérables. L'érosion et l'accrétion des sédiments étant étroitement liées aux régimes éoliens saisonniers, une surveillance continue est indispensable pour anticiper les implications des dynamiques naturelles et du changement climatique. L'aménagement des structures de protection côtière, telles que les épis ou les brise-lames, doit être conçu en fonction de cette variabilité saisonnière afin de limiter l'érosion. Par ailleurs, la conservation et la restauration des mangroves, qui jouent un rôle crucial dans la stabilisation des sédiments et l'amortissement des implications hydrodynamiques, constituent une priorité pour renforcer la résilience du littoral.

Concernant les intensités du vent dans le secteur de Mbour, les vitesses observées sur la période 1981-2022 varient entre 2,83 et 5,56 m/s (Fig. 26). Les vitesses moyennes maximales sont enregistrées de janvier à avril (5,08 à 5,56 m/s), correspondant à la saison sèche. Dans ce contexte, le sable sec, plus susceptible au transport éolien, favorise la mobilité sédimentaire et contribue à l'érosion et au remodelage des plages de la région.

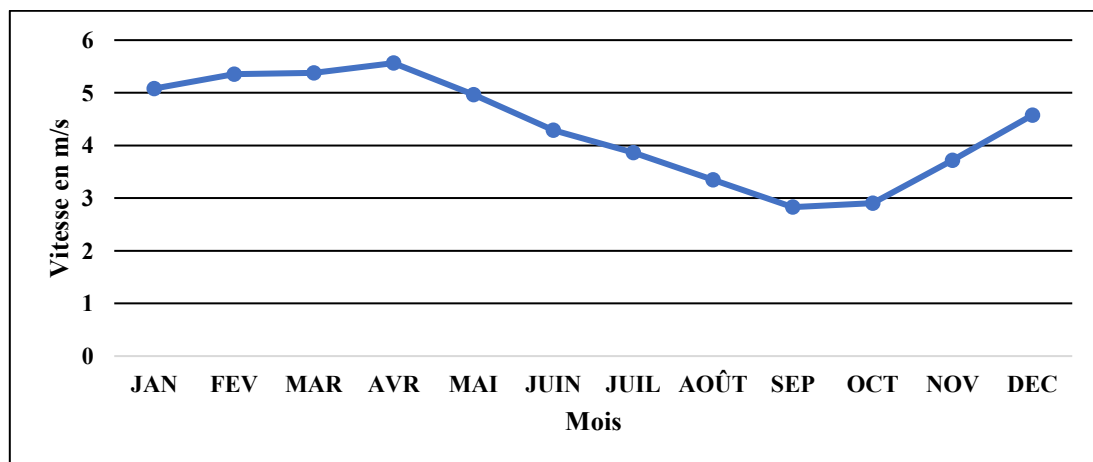


Figure 26 : Variations de la vitesse moyenne des vents à Mbour de 1981 à 2022 (données climat NASA 1981-2022).

L'analyse des données de vent sur le littoral de Mbour révèle une variabilité saisonnière prononcée des vitesses éoliennes. La période allant de janvier à avril est caractérisée par des vitesses élevées, comprises entre 5 et 6 m/s, avec un pic observé en avril. Cette tendance correspond à l'influence des alizés continentaux, dominants durant la saison sèche, qui génèrent un transport éolien significatif des sédiments côtiers. À partir de mai, les vitesses diminuent progressivement pour atteindre un minimum entre août et septembre, autour de 3 m/s, coïncidant avec la saison des pluies où les vents sont atténués et perturbés par la mousson. À partir d'octobre, une reprise progressive des régimes de vents dominants marque le retour de la saison sèche.

Cette variabilité influence directement la dynamique du trait de côte de Mbour. Pendant les mois de forte intensité éolienne (janvier-avril), l'action combinée des vents et des courants côtiers intensifie le transport des sédiments le long du littoral, favorisant l'érosion des plages exposées et des zones vulnérables. La diminution des vitesses de vent en saison des pluies entraîne un relâchement de cette dynamique, permettant l'accumulation sédimentaire dans les zones protégées. Cependant, cette période de faible énergie éolienne peut coïncider avec une réduction des apports sédimentaires, augmentant la vulnérabilité des sections côtières face aux houles saisonnières.

Dans le delta du Saloum, les vitesses des vents varient entre 3,13 et 4,97 m/s, avec des maxima enregistrés également entre janvier et avril. Ces valeurs restent toutefois inférieures à celles observées à Mbour (4,88-4,97 m/s). Malgré cette différence, des vents de 4 à 5 m/s sont théoriquement suffisants pour générer un transport éolien des sédiments, notamment dans les zones dépourvues de végétation, comme sur le littoral de Mbour. En revanche, l'effet des vents sur la mobilité sédimentaire est moins marqué dans le delta du Saloum, où la couverture végétale, notamment les mangroves et la végétation herbacée, joue un rôle stabilisateur en limitant la redistribution des sables et en atténuant l'érosion côtière.

La compréhension de cette relation entre vitesse des vents, dynamique sédimentaire et évolution du trait de côte est essentielle pour une gestion intégrée du littoral. Elle justifie la mise en œuvre de mesures d'atténuation, telles que la protection des dunes, la restauration des mangroves et la surveillance continue des régimes de vent et de leur impact morphologique. Ces actions permettent d'anticiper les zones à risque et d'optimiser les stratégies de gestion durable du littoral face aux variations saisonnières et aux effets potentiels du changement climatique.

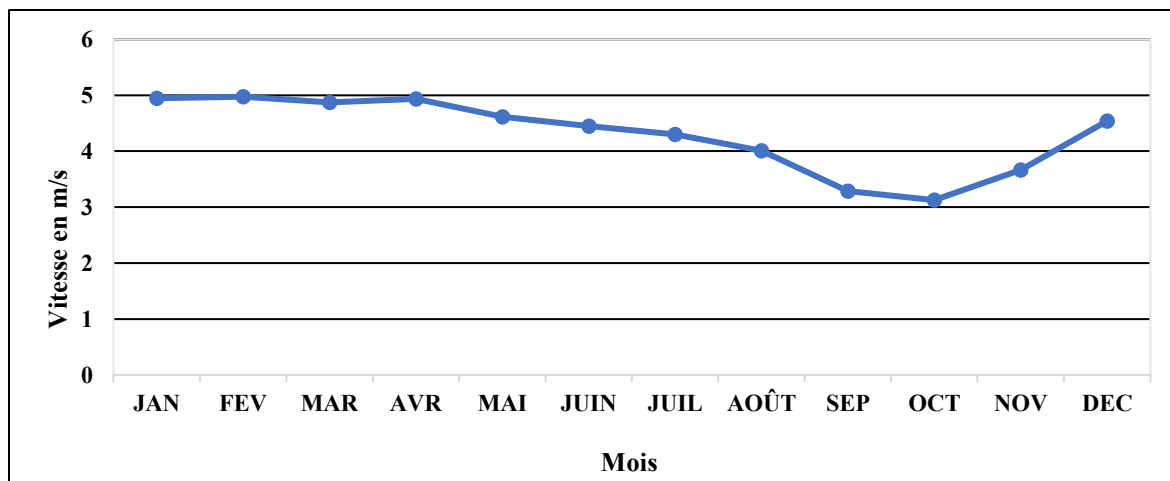


Figure 27 : Variations de la vitesse moyenne des vents au delta du Saloum de 1981 à 2022 (données climat NASA 1981-2022).

Le graphique 27 illustre la variabilité saisonnière de la vitesse des vents dans le delta du Saloum, mettant en évidence une tendance annuelle bien marquée. Les vitesses les plus élevées sont observées entre janvier et avril, avec des moyennes proches de 5 m/s, correspondant à l'influence des alizés de secteur nord-est dominants durant la saison sèche. Ces vents soutenus génèrent une agitation accrue des vagues et intensifient les processus de transport sédimentaire sur le littoral. À partir de mai, l'affaiblissement des alizés et l'instauration des vents de mousson entraînent une diminution progressive des vitesses, avec un minimum atteint entre septembre et octobre. Cette réduction modifie l'énergie des vagues et, par conséquent, la morphodynamique côtière.

La variabilité saisonnière des vents exerce un impact direct sur l'évolution morphologique du trait de côte. Pendant la période de vents intenses (janvier-avril), l'augmentation de l'énergie des vagues favorise le transport longitudinal et transversal des sédiments, entraînant une érosion significative sur les plages sableuses et les cordons dunaires exposés. Ces zones présentent une mobilité sédimentaire élevée, avec formation ponctuelle de dépôts éoliens et redistribution des sables littoraux. À l'inverse, entre août et octobre, la réduction de l'énergie éolienne et la baisse de la houle océanique engendrent une accalmie hydrodynamique, propice à la sédimentation. Les matériaux transportés par les courants marins se déposent alors localement, entraînant un léger avancement du trait de côte dans certaines zones protégées.

Cependant, cette alternance saisonnière érosion-sédimentation ne compense pas la tendance générale au recul du littoral, fortement influencée par l'élévation du niveau de la mer et les pressions anthropiques. La baisse temporaire de la vitesse des vents n'assure qu'une

stabilisation partielle du trait de côte, tandis que les périodes de forte énergie éolienne accentuent la régression côtière.

Enfin, l'influence des vents varie selon la couverture végétale et la morphologie du littoral. L'action éolienne est particulièrement prépondérante sur la côte de Mbour, dépourvue de végétation, où les sédiments sont directement exposés à l'érosion. En revanche, dans le delta du Saloum, la présence de mangroves et d'autres formations végétales stabilise les sédiments et modère l'impact des vents sur la dynamique littorale, soulignant le rôle crucial des écosystèmes dans la résilience côtière.

1.1.1.1.1. Alizés

Les alizés constituent les vents dominants des basses latitudes tropicales. Dans l'hémisphère Nord, englobant la zone d'étude, ces vents soufflent initialement du Nord vers l'équateur et sont progressivement déviés vers l'Ouest par l'effet de Coriolis, leur conférant une direction dominante de Nord-Nord-Ouest (NNO). Ils sont particulièrement actifs durant la saison sèche, période où l'anticyclone des Açores atteint son intensité maximale, tandis que l'anticyclone de Sainte-Hélène est généralement affaibli (Sagna, 2005). Selon Leroux (1983), ces vents se caractérisent par une vitesse modérée et régulière, d'environ 20 km/h, bien que cette vitesse tende à diminuer du secteur Est vers l'Ouest. Delourme (1956) montre que l'alizé de direction méridienne dominante, circulant sur le flanc oriental de l'anticyclone des Açores, peut parcourir 700 à 1200 km en 24 heures dans l'Atlantique Nord, tandis que sur le flanc équatorial, la distance parcourue est réduite à 500-600 km sur la même période.

Deux types d'alizés sont distingués : maritimes et continentaux. Les alizés maritimes circulent au-dessus des océans et sont influencés par l'humidité océanique, ce qui leur confère un caractère humide. Leur structure verticale limite la formation de nuages, favorisant un climat relativement stable et sec à la surface, à l'exception de cas exceptionnels (Sagna, 2005). Dans les régions arides, ces alizés jouent un rôle significatif dans l'érosion littorale, notamment par le remaniement des sédiments des dunes côtières (Niang, 2017).

Les alizés continentaux au Sénégal comprennent les alizés « maritimes continentalisés » et l'Harmattan. Les premiers sont des vents maritimes ayant subi l'influence du continent, perdant ainsi leur humidité et devenant plus chauds et secs (Dufresne, 1991). L'Harmattan, quant à lui, provient directement de l'anticyclone saharien ou du Maghreb et se caractérise par un vent chaud, sec et poussiéreux (Leroux, 1983). Soufflant principalement de direction Nord-Nord-Est, l'Harmattan est actif durant la saison sèche, entre décembre et avril (Sagna, 2005). Bien

que sa direction limite son impact direct sur la dynamique côtière, il contribue au transport des sédiments secs, en particulier dans les zones littorales peu ou non végétalisées, renforçant les processus d'érosion et de redistribution sédimentaire (Niang, 2017).

Ainsi, la connaissance des caractéristiques spatio-temporelles des alizés est essentielle pour comprendre la morphodynamique des littoraux sénégalais et planifier des mesures de gestion et de protection adaptées.

1.1.1.1.2. Mousson

L'intervention de la mousson sur le territoire sénégalais correspond principalement à la saison des pluies. Ce vent intervient de manière prépondérante durant la période estivale, de juin à octobre, et joue un rôle majeur dans les processus hydrosédimentaires des zones côtières (Diarra, 2011). L'effet de la mousson sur la dynamique littorale s'exerce essentiellement par le ruissellement des eaux pluviales, qui agit comme un vecteur secondaire de transport sédimentaire, en complément des processus hydrodynamiques marins.

Par ailleurs, la mousson exerce également un rôle modulateur sur les transports éoliens. L'humidification des sédiments par les précipitations augmente leur masse volumique et leur cohésion, réduisant ainsi leur susceptibilité au transport par le vent et limitant temporairement l'érosion éolienne des plages et dunes côtières (Diallo et Sagna, 2008). Cette interaction complexe entre précipitations, ruissellement et transport éolien souligne l'importance d'intégrer les effets saisonniers de la mousson dans l'analyse des dynamiques sédimentaires et des processus morphodynamiques des littoraux tropicaux.

1.1.1.2. Tempêtes

Les tempêtes affectant le littoral sénégalais, de la Petite-Côte aux îles du Saloum se manifestent principalement entre décembre et janvier, et plus rarement en février, et sont généralement induites par l'action de houles intenses provenant du Nord (Diarra, 1999). Ces événements extrêmes exercent une influence notable sur les littoraux meubles en provoquant des phénomènes d'érosion localisée, tels que l'entaille ou la rupture des flèches littorales, et peuvent occasionnellement conduire à la formation de nouvelles embouchures (Sall, 1982 ; Diaw *et al.*, 1990). L'action combinée des ondes de tempête et de l'élévation ponctuelle du niveau de la mer amplifie le transport sédimentaire et accentue les dommages sur les infrastructures côtières (Thior, 2020). Les implications morphologiques incluent le recul du trait de côte, la submersion temporaire des zones basses, la destruction partielle des dunes et de la végétation littorale, ainsi que l'inondation des arrière-plages.

Ces effets sont particulièrement visibles dans le delta du Saloum. En février 1987, une houle de forte amplitude (2,5 à 3,5 m) combinée à une marée de vives eaux a provoqué l'ouverture de la brèche de Sangomar (Diaw, 1997). Cette ouverture résulte non seulement de l'action des houles, mais également de l'interaction complexe entre facteurs sédimentologiques, géomorphologiques et hydro-climatologiques (Diaw, 2003). Depuis sa formation, la brèche a continué de s'élargir sous l'influence des agents hydrodynamiques, avec une vitesse estimée à 214 m/an entre 1987 et 2010, puis à 145 m/an entre 1990 et 2010 (Dieye *et al.*, 2013). Cette dynamique a entraîné des modifications significatives de la morphologie locale, notamment le recul du trait de côte et de la Pointe de Djiffer, la formation d'accumulations sableuses et de crochons, ainsi que des implications notables sur les activités socio-économiques de la région (Thomas et Diaw, 1997 ; Diarra, 1999).

Ainsi, les tempêtes constituent un facteur majeur de l'érosion côtière sur la Petite-Côte sénégalaise, agissant à la fois sur la morphologie du littoral et sur la vulnérabilité des systèmes socio-écologiques associés. Leur étude est essentielle pour la planification de mesures d'atténuation et de gestion intégrée des zones côtières exposées aux événements extrêmes.

1.1.1.3. Pluviométrie

La pluviométrie constitue un facteur majeur modulant la dynamique littorale, principalement par son influence sur les apports en eau douce et en sédiments des cours d'eau déversant leurs flux dans les zones côtières. Les variations des précipitations, qu'elles soient saisonnières ou interannuelles, affectent directement le volume et la composition des flux hydro-sédimentaires, contribuant ainsi à l'équilibre morphodynamique du littoral. Un régime pluviométrique irrégulier peut entraîner des implications contrastées : une diminution des apports sédimentaires compromet la maintenance des plages et des estuaires, favorisant l'érosion côtière, tandis qu'une augmentation significative des charges sédimentaires peut conduire à un engraissement localisé du trait de côte (Niang-Diop, 1995).

Ainsi, la pluviométrie joue un rôle déterminant dans les processus simultanés de construction et de déconstruction du littoral, ce qui en fait un paramètre indispensable dans toute analyse intégrée de la dynamique côtière. Les figures 28, 29 et 30, représentant les indices standardisés de précipitations pour la période 1981-2024 dans les départements de Mbour, Fatick et Foundiougne, mettent en évidence cette variabilité et permettent d'appréhender les corrélations potentielles entre fluctuations pluviométriques et réponses morphodynamiques du littoral.

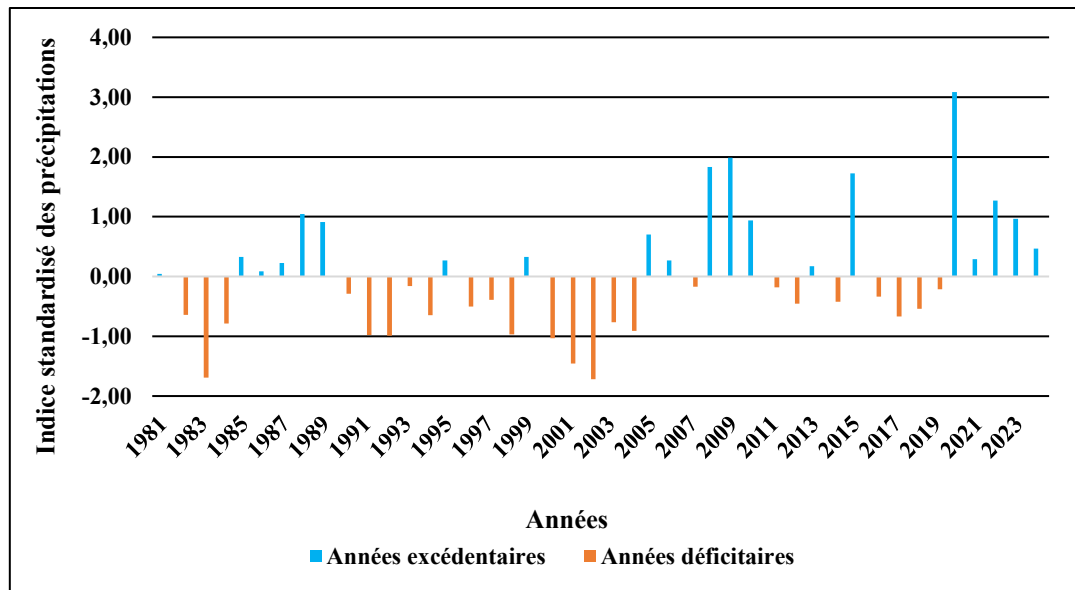


Figure 28 : Évolution des indices de la pluviométrie sur le littoral de la Petite-Côte sénégalaise, Mbour. (Données Nasa).

L'analyse de l'évolution de l'indice standardisé des précipitations (SPI) dans le département de Mbour sur la période 1981-2024 révèle une variabilité interannuelle significative, alternant entre phases excédentaires et déficitaires. La période 1981-2004 se distingue par la prédominance d'années déficitaires, souvent caractérisées par des SPI inférieurs à -1, traduisant une sécheresse structurelle s'inscrivant dans le contexte plus large de la crise climatique sahélienne. Cette succession prolongée de déficits pluviométriques a conduit à une diminution progressive des écoulements de surface et, par conséquent, à une réduction notable des apports sédimentaires vers le littoral. La fragilisation des écosystèmes côtiers, notamment la perte partielle de végétation dunaire et la dégradation des formations de mangroves, a amplifié les processus d'érosion marine et accéléré le recul du trait de côte dans cette zone.

À partir de 2005, une inversion partielle de la tendance est observée, avec l'apparition sporadique d'années excédentaires, atteignant des valeurs maximales en 2010 et 2020. Toutefois, cette reprise pluviométrique reste irrégulière et discontinue, limitant ses effets durables sur la résilience des milieux littoraux. Bien que certaines années humides favorisent temporairement la régénération de la végétation et le rechargement des nappes phréatiques, elles ne permettent pas de restaurer de manière pérenne les équilibres écologiques altérés par les décennies de sécheresse. Par ailleurs, l'occurrence de précipitations intenses sur de courtes périodes entraîne un ruissellement violent, accentuant l'érosion hydrique et contribuant à la dégradation des sols en l'absence de couverture végétale continue.

La figure 29 illustre l'évolution des précipitations à Palmarin, dans le département de Fatick, et met en évidence les mêmes tendances de variabilité interannuelle et de phases excédentaires et déficitaires, renforçant l'importance de la pluviométrie comme facteur clé de la dynamique littorale dans la région.

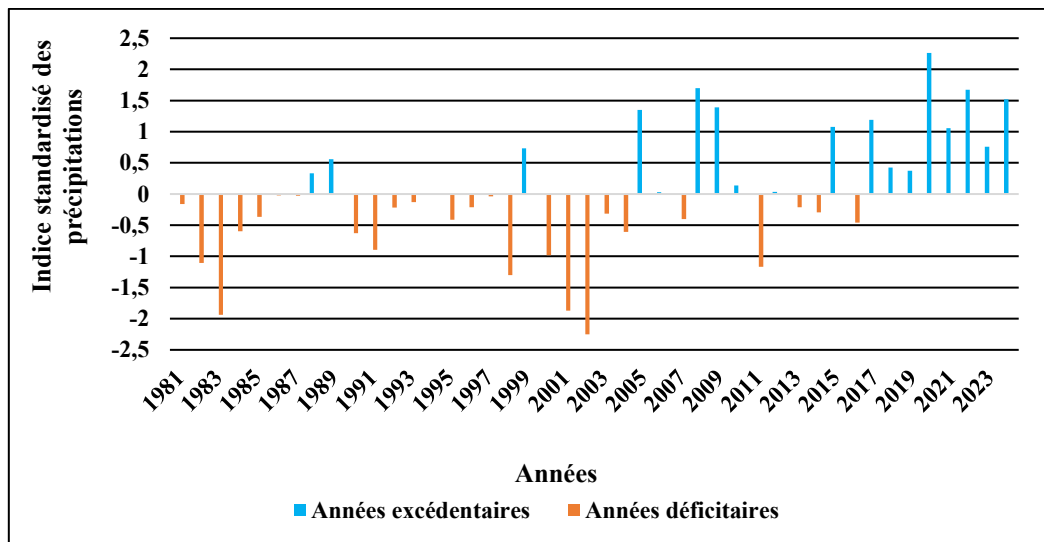


Figure 29 : Évolution des indices de la pluviométrie sur le littoral de la Petite-Côte sénégalaise, Palmarin (Données Nasa).

L'analyse de l'évolution de la pluviométrie à Palmarin sur la période 1981-2024 révèle une alternance marquée entre longues phases déficitaires et reprises humides sporadiques, illustrant la forte sensibilité climatique du delta du Saloum. La période 1981-2005 est caractérisée par une prédominance d'indices SPI négatifs, souvent inférieurs à -1, avec des minima particulièrement marqués en 1984, 1998 et 2003, traduisant des épisodes de sécheresse prolongée. Ces déficits pluviométriques ont eu des implications directes sur les flux hydro-sédimentaires et le fonctionnement hydrodynamique des chenaux secondaires du delta. L'assèchement progressif de ces bras, associé à une intrusion saline accrue liée à la baisse des apports en eau douce, a entraîné une salinisation importante des sols et une régression des écosystèmes halophiles et de mangroves, contribuant à l'accroissement de la vulnérabilité littorale.

À partir de 2006, le régime pluviométrique montre une amélioration relative, avec l'apparition d'années excédentaires, notamment entre 2008 et 2023. Ces périodes humides se traduisent par des indices SPI supérieurs à 1, en particulier en 2010, 2020 et 2021, correspondant à des épisodes pluvieux intenses et concentrés. Cependant, ces excédents restent ponctuels et souvent limités à des périodes courtes, générant un ruissellement rapide et une infiltration limitée. Bien

que ces épisodes favorisent partiellement la recharge des nappes superficielles et le maintien des marais côtiers, ils ne suffisent pas à contrer la dynamique érosive des flèches sableuses et des cordons littoraux, continuellement soumis aux actions combinées des houles et des marées.

Ainsi, la pluviométrie à Palmarin illustre la relation étroite entre variabilité climatique et stabilité morphodynamique du littoral. Les phases sèches prolongées accentuent l'aridification des sols et la rétraction des vasières, tandis que les phases humides brèves, bien qu'intenses, n'apportent qu'un répit limité face à la montée du niveau marin et à la fragilité du système deltaïque. La figure 30 présente l'évolution des précipitations à Toubacouta, au sud du delta du Saloum, dans le département de Foundiougne, soulignant les tendances similaires dans la variabilité pluviométrique régionale.

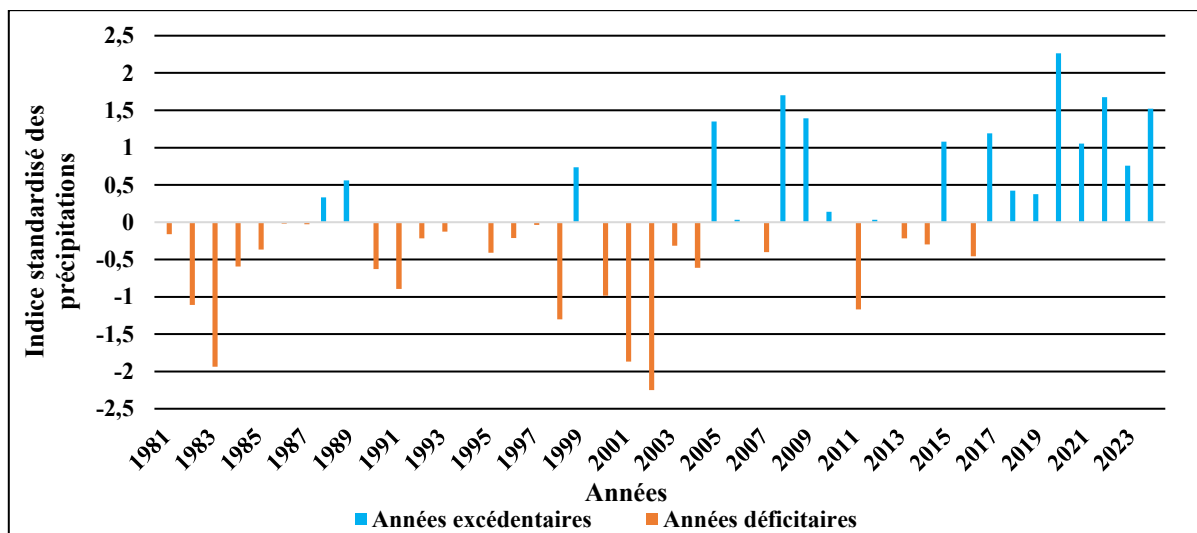


Figure 30 : Évolution des indices la pluviométrie sur le littoral de la Petite-Côte sénégalaise, Toubacouta (Données Nasa).

Entre 1981 et 2005, l'analyse de l'indice standardisé des précipitations (SPI) à Toubacouta met en évidence une prédominance marquée d'années déficitaires, révélant une phase prolongée de stress hydrique. Ces déficits, souvent inférieurs à -1, atteignent des minima accentués en 1984, 1998, 2003 et 2005, caractérisant des sécheresses structurelles persistantes. Cette situation a perturbé le fonctionnement hydrologique des bolongs, en réduisant de manière significative les apports en eau douce et en sédiments fins dans les plaines inondables. La combinaison d'une baisse de l'humidité des sols, d'une élévation du niveau marin et d'une salinisation accrue a entraîné une dégradation accélérée des palétuviers et une rétraction des zones humides, compromettant l'équilibre géo-écologique du littoral sud du delta du Saloum.

À partir de 2006, le régime pluviométrique connaît un redressement progressif, marqué par une augmentation de la fréquence des années excédentaires, notamment en 2008, 2010, 2020 et 2021, avec des indices SPI supérieurs à 1. Ces excédents ont permis une amélioration ponctuelle de la recharge des nappes superficielles et une reprise partielle de l'activité biologique dans les zones humides. Néanmoins, ces conditions humides restent éphémères et spatialement hétérogènes. L'intensité élevée de certaines précipitations, concentrées sur de courts épisodes orageux, engendre un ruissellement rapide plutôt qu'une infiltration significative, limitant l'effet restaurateur sur les sols et accentuant localement l'érosion hydrique des berges et des versants instables.

Cette variabilité interannuelle, alternant entre périodes sèches prolongées et épisodes humides ponctuels, influence directement la résilience morphodynamique du littoral de Toubacouta. Les sécheresses prolongées réduisent les apports sédimentaires et compromettent la couverture végétale, rendant les berges particulièrement vulnérables aux marées et aux submersions marines. À l'inverse, les épisodes humides récents, bien qu'ils favorisent une régénération locale des mangroves, ne suffisent pas à inverser les tendances à la salinisation ni à limiter l'emprise croissante des eaux marines dans les zones basses. Ce régime pluviométrique erratique constitue ainsi un facteur structurant de l'évolution du littoral sud du Saloum et doit être pris en compte dans les stratégies de gestion intégrée du delta.

Enfin, cette dynamique pluviométrique instable interagit avec les pressions anthropiques, amplifiant les vulnérabilités existantes. La réduction des apports sédimentaires combinée à la densification des occupations humaines en zones côtières limite la capacité d'adaptation naturelle des écosystèmes. La salinisation accrue des sols, liée à l'infiltration réduite des eaux douces en période sèche, affecte également la productivité agricole des plaines littorales. Ainsi, la variabilité pluviométrique observée à Mbour, Palmarin et au sud du delta du Saloum constitue un facteur déterminant pour la compréhension des transformations géomorphologiques et écologiques du littoral, modulant directement les équilibres entre érosion, accumulation sédimentaire et stabilité du trait de côte.

1.1.1.4 Températures

Dans la zone côtière s'étendant de la Petite-Côte au delta du Saloum, la température constitue un facteur clé influençant la dynamique littorale, en modulant à la fois les processus d'altération des sédiments et la stabilité des sols. Les variations thermiques agissent également sur le fonctionnement des écosystèmes côtiers, notamment les formations végétales littorales et les habitats marins, qui jouent un rôle protecteur pour le trait de côte. L'augmentation progressive

des températures moyennes observée dans cette région au cours des dernières décennies est susceptible d'accentuer les phénomènes d'érosion par un affaiblissement des structures naturelles et une perturbation des cycles biologiques. Ces effets, conjugués à d'autres facteurs climatiques tels que les régimes de vents, les précipitations et l'élévation du niveau de la mer, contribuent à fragiliser l'équilibre morphodynamique de ce littoral tropical. Ces observations sont en accord avec les conclusions de Church et White (2011), qui soulignent les impacts globaux du réchauffement climatique sur les zones côtières, dont la zone d'étude ne fait pas exception.

Les figures 31, 32 et 33, présentant les indices standardisés des températures pour la période 1981-2024 dans les départements de Mbour, Fatick et Foundiougne, illustrent la variabilité thermique régionale et permettent d'examiner les relations entre ces fluctuations de température et la dynamique du littoral.

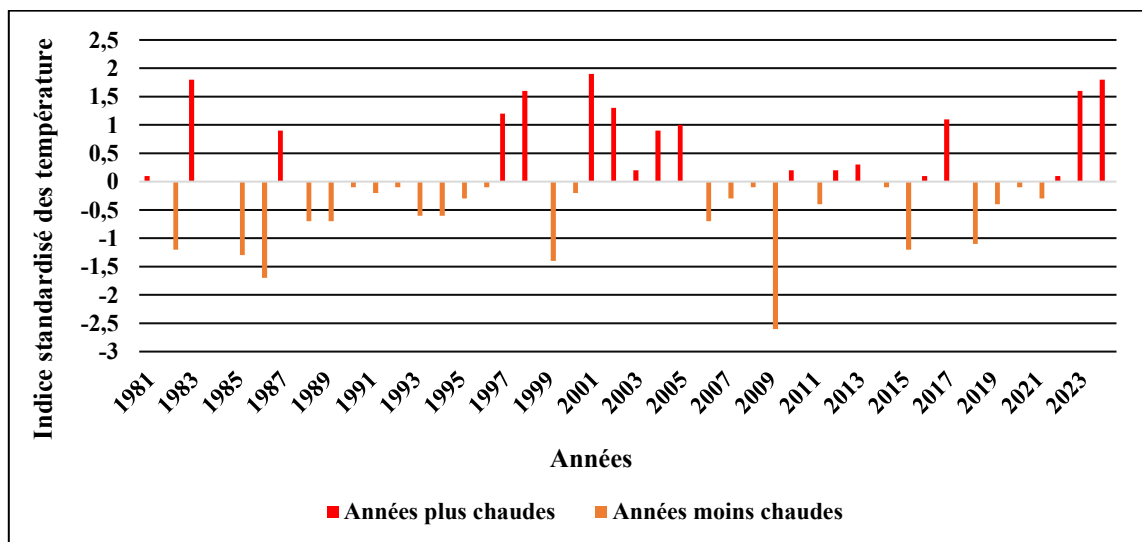


Figure 31 : Évolution des indices des températures moyennes sur le littoral de la Petite-Côte dans le département de Mbour, 1981 à 2022. (Données Nasa).

L'évolution thermique enregistrée à Mbour entre 1981 et 2024 révèle une tendance générale au réchauffement, caractérisée par une fréquence croissante d'années présentant des températures supérieures à la moyenne, notamment à partir de 1997. Cette dynamique se manifeste par des pics de l'indice standardisé des températures (IST) atteignant ou dépassant 1,5, observés en 1982, 2002, 2004 et particulièrement en 2023. À l'inverse, les années plus fraîches, telles que 1984, 2010 ou 2014, apparaissent de manière plus dispersée et avec des amplitudes moindres. Cette élévation thermique structurelle s'inscrit dans le contexte régional sahélo-soudanien de

réchauffement climatique, où l'augmentation des températures constitue un facteur aggravant des pressions exercées sur le littoral.

La hausse des températures influence de manière indirecte mais significative la régression du trait de côte sur la Petite-Côte. Elle accroît l'évaporation et réduit l'humidité des sols côtiers, diminuant leur cohésion et augmentant la mobilité des matériaux sableux sous l'action du vent, ce qui intensifie les processus d'érosion éolienne et hydrodynamique. Par ailleurs, l'élévation des températures superficielles de la mer (TSM) perturbe la dynamique sédimentaire marine en modifiant les courants côtiers et en favorisant la formation de houles énergétiques, contribuant au recul progressif du rivage, en particulier dans les zones fortement anthropisées telles que Saly et Mbour.

Le réchauffement thermique affecte également la couverture végétale littorale, élément clé de la stabilisation des sédiments. L'augmentation des températures, combinée aux pressions anthropiques, entraîne un dépérissement accéléré des espèces fixatrices, telles que les filaos et les graminées halophiles. La réduction de cette végétation protectrice diminue l'aptitude naturelle du linéaire côtier à dissiper l'énergie des vagues, favorisant ainsi le creusement des profils littoraux et l'érosion des plages nues.

Ainsi, la dynamique thermique apparaît comme un facteur aggravant majeur, interagissant de manière synergique avec les processus morpho-sédimentaires et les transformations socio-spatiales du littoral de Mbour. La figure 32 illustre l'évolution des températures sur le littoral de Palmarin pour la période 1981-2024, mettant en évidence les variations interannuelles et leurs implications potentielles sur la stabilité côtière.

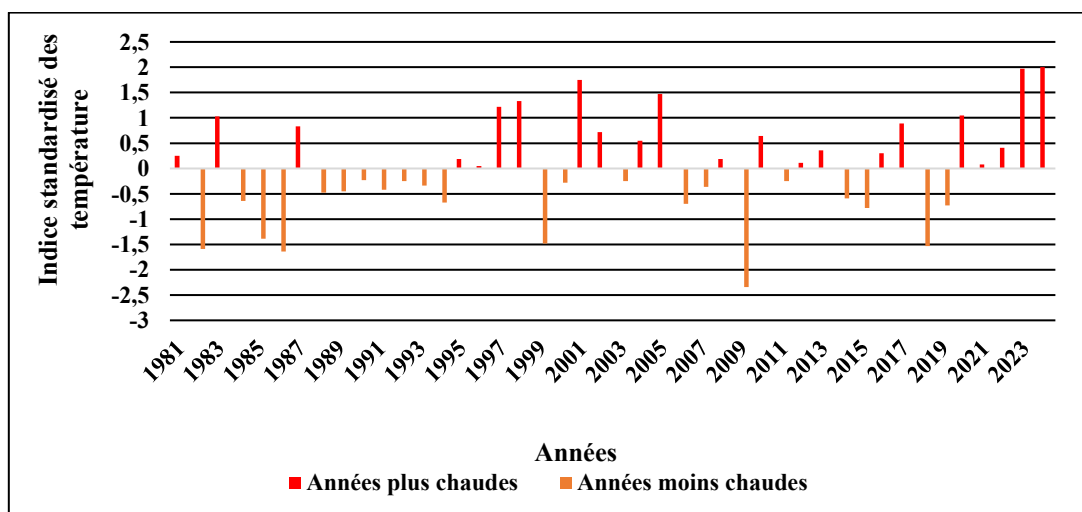


Figure 32 : Évolution des indices des températures moyennes sur le littoral de la Petite-Côte (Palmarin), 1981 à 2022. (Données Nasa).

L'évolution thermique observée à Palmarin révèle une alternance marquée entre phases fraîches relativement fréquentes sur la période 1981-2010 et une tendance à la hausse des températures à partir de 2015. Des pics significatifs de l'indice standardisé des températures (IST) sont enregistrés en 1998, 2003, 2005, 2022 et 2023, avec des valeurs dépassant fréquemment +1,5 au cours des dernières années. Cette transition vers un régime thermique plus élevé traduit une intensification du stress thermique sur un littoral déjà soumis à une forte vulnérabilité écosystémique.

L'augmentation des températures accentue les processus d'aridification du cordon littoral sablo-sableux de Palmarin, caractérisé par une faible recharge hydrique et une végétation fixatrice fragile. La hausse de l'évapotranspiration et la dessiccation accrue des sols compromettent la cohésion des dépôts sableux, favorisant la dislocation des structures dunaires et une mobilité sédimentaire accrue. Dans ce contexte, le trait de côte, historiquement instable en raison de la nature meuble de ses dépôts, devient particulièrement réactif aux sollicitations marines, notamment lors des épisodes de houles de sud-ouest et de marées dynamiques.

Par ailleurs, le réchauffement thermique influence indirectement la résilience du littoral en fragilisant les écosystèmes protecteurs, notamment les herbiers marins et les franges de mangroves relictuelles. À Palmarin, où la stabilisation naturelle des sédiments repose sur l'interaction entre la couverture végétale et l'équilibre salinité/température, les hausses thermiques perturbent ces systèmes, accentuant ainsi l'érosion côtière. Les effets sont particulièrement visibles dans les secteurs à marais salés, où les berges subissent un recul accentué en raison de la combinaison des contraintes climatiques et de pressions anthropiques croissantes.

La figure 33 illustre l'évolution des températures à Toubacouta, au sud du delta du Saloum, dans le département de Foundiougne, mettant en évidence la variabilité interannuelle et les tendances récentes à l'intensification thermique et à leur impact potentiel sur la dynamique morphodynamique du littoral.

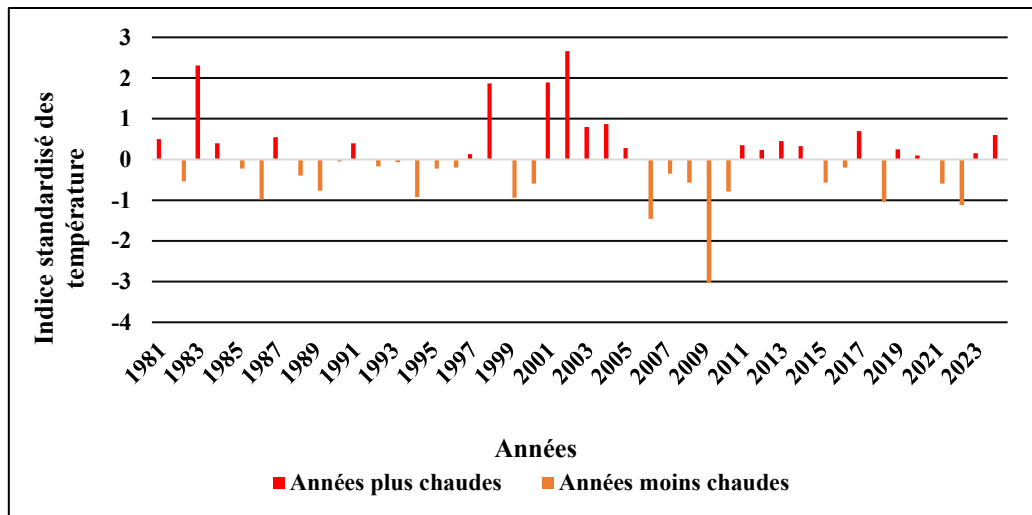


Figure 33 : Évolution des indices des températures sur le littoral de la Petite-Côte sénégalaise, Toubacouta (Données Nasa).

L'analyse de l'évolution thermique à Toubacouta met en évidence une forte variabilité interannuelle. Les indices standardisés de température (IST) révèlent des phases de surchauffe significative au début des années 1980 (1983 : +2,2) et au début des années 2000 (2001-2004 : +1,5 à +2,5), contrastant avec des anomalies froides ponctuelles, particulièrement en 2010 (IST = -3,5), constituant un événement climatique exceptionnel sur l'ensemble de la période étudiée. Depuis 2015, la tendance thermique se stabilise autour de valeurs légèrement positives ou proches de la normale, traduisant une stabilisation relative, mais dans un contexte global plus chaud que celui des décennies précédentes.

Ce réchauffement progressif exerce une influence directe sur la dynamique morphodynamique du littoral estuarien et deltaïque du Saloum. Dans un environnement dominé par des vasières, des bolongs et des mangroves sensibles aux variations thermiques et à l'équilibre hydrosalin, l'élévation des températures accroît l'évaporation et modifie la salinité des eaux, contribuant à la régression des peuplements de palétuviers. La perte de ces tampons naturels accentue la vulnérabilité du trait de côte face à l'action érosive des courants de marée et à la déstabilisation des berges.

Par ailleurs, les hausses thermiques récurrentes réduisent la résilience biologique des écosystèmes littoraux, affectant notamment la reproduction des espèces halieutiques, la densité végétale et les processus de sédimentation. À Toubacouta, ces effets se traduisent par une fragilisation des fronts de mangroves et des zones intertidales, où la couverture végétale insuffisante perturbe l'équilibre sédimentaire. Ainsi, la hausse des températures, bien que localement hétérogène, constitue un facteur aggravant de la dynamique morphodynamique du

littoral méridional du Saloum, en interaction avec les pressions anthropiques et les changements globaux.

L'analyse comparative des IST pour Mbour, Palmarin et Toubacouta sur la période 1981-2024 révèle une tendance générale au réchauffement, caractérisée par une fréquence accrue des années chaudes, surtout après les années 2000. Cette élévation thermique, modulée localement, agit comme un facteur transversal de déstabilisation du littoral : à Mbour, elle accentue l'érosion des plages sableuses peu végétalisées ; à Palmarin, elle fragilise les écosystèmes dunaires et mangroviens déjà affectés par la faible recharge hydrique ; et à Toubacouta, elle exacerbe les déséquilibres hydrosalins, favorisant la régression des mangroves et des vasières.

Ainsi, l'évolution thermique apparaît comme un déterminant majeur de la dynamique négative du trait de côte sur l'ensemble du littoral étudié, opérant en synergie avec d'autres facteurs climatiques (vents, houles, précipitations) et anthropiques (urbanisation, exploitation des ressources), et soulignant la nécessité d'intégrer cette dimension dans les stratégies de gestion côtière durable.

1.1.2. Facteurs hydrodynamiques et morphologiques

Le littoral de la Petite-Côte sénégalaise au delta du Saloum est fortement conditionné par l'action des agents hydrodynamiques, qui constituent des facteurs déterminants de sa dynamique morphologique. Parmi ces agents, on distingue les houles, les vagues, les vents, la marée, les courants de marée ainsi que la dérive littorale. Chacun de ces processus contribue de manière significative à la redistribution des sédiments et à l'évolution du trait de côte en modulant l'énergie des vagues, l'intensité et la direction des courants côtiers, ainsi que les variations du niveau de l'eau. L'interaction complexe entre ces phénomènes contrôle les processus d'érosion et d'accrétion, influençant directement la stabilité des plages, des dunes et des formations littorales adjacentes.

1.1.2.1. Houles

La compréhension de la dynamique des houles constitue un élément central pour l'analyse de l'évolution morphodynamique des estrans, en particulier en fonction de l'orientation dominante des houles et de leurs interactions avec les vents et les courants côtiers (Robin, 1984). Les houles sont des agents hydrodynamiques majeurs responsables de processus tels que l'érosion, l'engraissement et le transport sédimentaire. En générant des vagues, elles induisent l'usure des falaises et des microfalaises, modulant ainsi la morphologie des estrans et la cinématique des dépôts sédimentaires (Thior, 2020). Lors des épisodes de tempêtes intenses, les houles jouent

un rôle prépondérant dans l'extraction rapide de sédiments depuis les plages exposées, tandis que, dans certaines conditions, elles peuvent favoriser le transport et l'accumulation de sédiments vers le large, processus qualifié d'engraissement.

La variabilité des régimes de houle peut engendrer des situations morphodynamiques contrastées sur un même secteur côtier, alternant entre érosion et progradation des plages. Selon le rapport national sur l'état de l'environnement marin et côtier du Sénégal (2002), trois types de houles dominantes caractérisent le littoral sénégalais :

- ✓ La houle nord-ouest (320°-20° E), issue de l'Atlantique Nord, présente de manière quasi continue tout au long de l'année ;
- ✓ La houle sud-ouest (180°-230° E), prédominante durant l'hivernage, associée aux systèmes météorologiques tropicaux africains ;
- ✓ La houle exceptionnelle d'ouest (260°-270° E), d'origine cyclonique, générée par des tempêtes extratropicales ou tropicales provenant de la mer des Caraïbes, qui se manifeste principalement entre novembre et décembre.

Le tableau 8 synthétise les principales caractéristiques de ces houles, incluant leur direction, leur période d'occurrence et leur énergie, fournissant ainsi une base pour l'analyse quantitative des implications morphodynamiques sur la côte sénégalaise.

Tableau 4: Caractéristiques en eau profonde des houles longues au large des côtes sénégalaises

Types de houles	Période moyenne (s)	Hauteur moyenne (m)	Longueur d'onde moyenne (m)	Puissance avant déferlement (kw.m-1)
NW (N320° à 20° E)	6,3	1,67	62	18
SW (N180° à 230° E)	5,7	1,49	51	11
W (N260° à 270° E)	6,8	1,8	73	22,7

Source : Nardari (1993). In Niang-Diop.

L'analyse du tableau 4 met en évidence que, sur le littoral sénégalais, les houles Nord-Ouest provenant de l'Atlantique Nord et les houles d'Ouest d'origine caraïbe constituent les événements houliers les plus énergétiques, présentant des périodes supérieures à 6 s et des hauteurs significatives dépassant 1,5 m. Toutefois, l'ensemble des houles observées sur cette côte demeure relativement court, avec des hauteurs moyennes inférieures à 2 m et des cambrures faibles, comprises entre 0,025 et 0,029. Ces caractéristiques indiquent que les houles sénégalaises, bien que régulières et directionnellement dominantes, restent de faible amplitude

verticale, influençant ainsi de manière modérée mais continue les processus de transport sédimentaire et de morphodynamique côtière.

Sur cette base, il est possible de procéder à une caractérisation détaillée des différents types de houles affectant la dynamique littorale sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, comme présenté dans la figure 34.

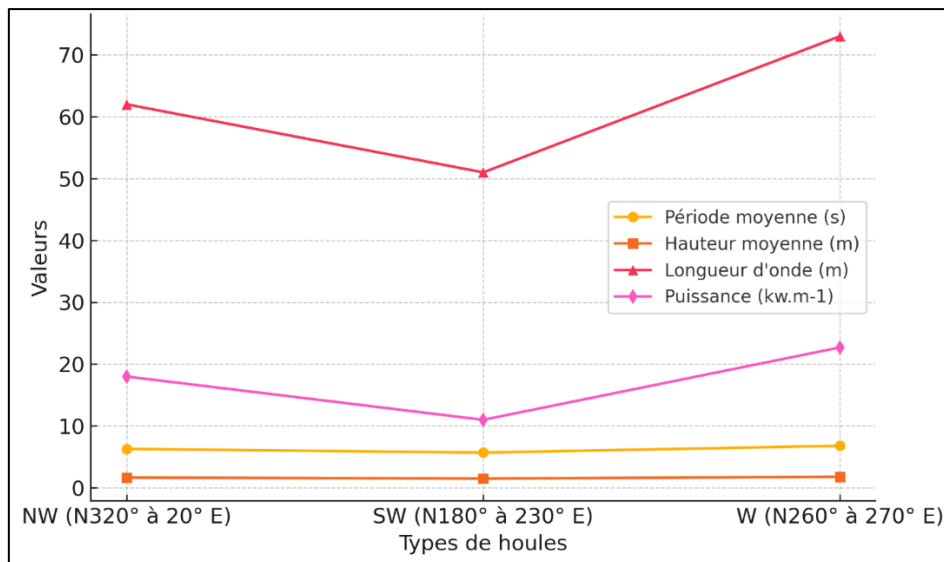


Figure 34 : Variations des houles sur la Petite-Côte sénégalaise

La dynamique côtière de la Petite-Côte aux îles du Saloum est fortement modulée par les caractéristiques des houles dominantes, à savoir les houles Nord-Ouest (NW), Sud-Ouest (SW) et d'Ouest (W), qui conditionnent les processus d'érosion et d'accrétion sédimentaire. Les houles W et NW se distinguent par leur énergie élevée, avec des hauteurs respectives de 1,8 m et 1,67 m, et des puissances estimées à 22,7 kW·m⁻¹ et 18 kW·m⁻¹. Ces houles induisent une dissipation énergétique importante à l'approche du rivage, accentuant le recul du trait de côte, particulièrement dans les zones fortement anthropisées et touristiques telles que Saly-Portudal. En comparaison, les houles SW, moins énergétiques (≈ 11 kW·m⁻¹), exercent un rôle plus modéré, limitant l'érosion tout en favorisant l'alimentation sédimentaire des plages.

L'influence des houles sur la morphodynamique côtière dépend également de leur longueur d'onde et de leur période. Les houles longues (73 m pour W, 62 m pour NW) pénètrent plus profondément, facilitant la mise en suspension et le transport des sédiments. Cette dynamique contribue à la dérive littorale orientée sud-est, redistribuant les sédiments et modifiant la morphologie des plages. Elle explique les contrastes observés entre secteurs d'érosion sévère,

comme Saly-Portudal, et zones d'accrétion, notamment dans le delta du Saloum, où les houles SW favorisent la formation de bancs sableux et de flèches littorales.

- ✓ Houles Nord-Ouest (NW) : Provenant de l'Atlantique Nord, ces houles subissent une réfraction progressive à l'approche du littoral sénégalais. Elles se présentent sous forme de trains de longues vagues, généralement comprises entre 190 et 300 m, avec des périodes oscillantes entre 11 et 15 s (Sadio, 2017). Présentes tout au long de l'année, elles sont caractérisées par une faible cambrure et influencent la dérive littorale sur l'ensemble du littoral sénégalais. Leur interaction avec des promontoires majeurs tels que la Pointe des Almadies, le Cap Manuel et la Pointe de Bel Air entraîne des phénomènes de diffraction et de rotation autour de la Presqu'île du Cap-Vert (Riffault, 1980). À l'approche de la Petite-Côte, ces houles se déferlent avec un angle d'incidence oblique Nord-Sud, favorisant la formation de flèches littorales et de cordons sableux orientés vers le sud (Sall, 1982 ; Thior, 2020). Ces processus sédimentaires sont particulièrement visibles dans les lagunes de Somone, Mbaling, Mbodiène et Fadiouth, ainsi que sur les flèches de Djiffer et de Sangomar.
- ✓ Houles Sud-Ouest (SW) : Provenant de l'Atlantique Sud, elles affectent principalement la côte sud du Sénégal pendant l'hivernage, de juillet à septembre, et entraînent une redistribution importante des sédiments dans cette portion du littoral. Leur influence septentrionale est limitée à la Petite-Côte en raison des effets de diffraction liés à la Presqu'île du Cap-Vert (Niang-Diop, 1995). Bien que moins énergétiques, ces houles contribuent à l'orientation des dunes sableuses et à la transition sédimentaire locale, expliquant en partie la dynamique littorale alternante caractérisée par des cycles d'érosion et de progradation.
- ✓ Houles d'Ouest (W) : Ces houles exceptionnelles, générées par des cyclones d'origine caraïbe, se manifestent généralement entre octobre et décembre. Elles sont responsables de phénomènes extrêmes, tels que les ruptures de cordons littoraux observées le long de la Langue de Barbarie (Louise, 1918 ; Debaud, 1950 ; Niang-Diop, 1995). Notamment, ces houles ont contribué à l'ouverture de la Pointe de Sangomar en 1987, un événement majeur marquant la réorganisation morphologique du littoral. Bien que relativement rares, ces houles d'Ouest ont un impact significatif sur l'évolution du trait de côte, en exacerbant l'érosion et en provoquant des perturbations soudaines des formations sédimentaires établies.

Ainsi, la morphodynamique, de la Petite-Côte sénégalaise au delta du Saloum, résulte de l'interaction complexe entre la direction, l'énergie, la longueur d'onde et la fréquence des houles dominantes, modulée par la topographie côtière et les processus de diffraction et de déferlement. Cette combinaison de facteurs explique la variabilité spatiale observée entre secteurs d'érosion intense et zones d'accrétion, et souligne l'importance de la caractérisation détaillée des houles pour toute approche de gestion intégrée du littoral.

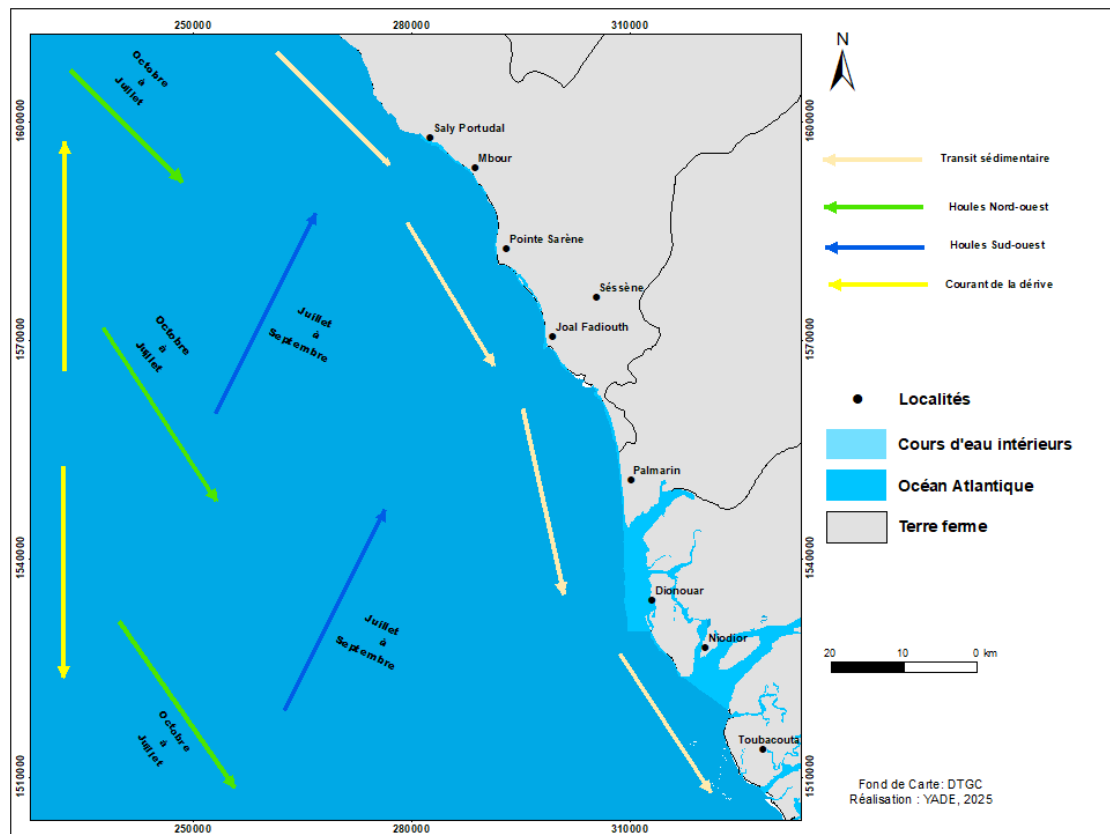


Figure 35 : Directions des houles habituellement observées sur le littoral sénégalais, de la Petite-côte au delta du Saloum.

Il ressort clairement que les houles constituent un facteur majeur de la dynamique littorale sur la Petite-Côte sénégalaise. Selon Adjoussi (2001), elles sont les principaux vecteurs du transport sédimentaire dans les secteurs dépourvus de protections naturelles ou artificielles. Les travaux de Sall (1982) ont montré que la dérive littorale suit généralement une orientation sud-est, principalement induite par les houles Nord-Ouest, avec des volumes de sédiments dérivés variant de $72\,000\text{ m}^3\cdot\text{an}^{-1}$ au nord de Mbour à $258\,000\text{ m}^3\cdot\text{an}^{-1}$ au sud. Parallèlement, Barusseau (1980, 1985b) a estimé que le flux sédimentaire le long de la Petite-Côte oscille entre $10\,000$ et $25\,000\text{ m}^3\cdot\text{an}^{-1}$ selon les conditions locales et la configuration morphologique.

Les vents constituent un facteur indirect mais déterminant dans la régulation du transit sédimentaire, en générant les houles qui entraînent la mobilisation des matériaux. Ruë (2005) souligne qu'une fréquence accrue de vents supérieurs à $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ influence significativement la dynamique côtière des littoraux ouest-africains. L'augmentation récente de ces vents forts a réduit les périodes de calme hydrodynamique, limitant le dépôt sédimentaire et perturbant les processus d'engraissement des fronts côtiers dans les zones sableuses et vaseuses, ce qui affecte directement l'équilibre de la ligne de rivage.

En définitive, l'analyse des houles confirme leur rôle structurant dans l'évolution morphodynamique du littoral sénégalais. Les houles NW et W, en raison de leur énergie et de leur fréquence, favorisent l'érosion et la mobilisation des sédiments, tandis que les houles SW, moins énergétiques, contribuent à la stabilisation et à l'accrétion dans certaines portions du littoral. La compréhension fine de ces interactions houle-vent-sédiment est donc indispensable pour orienter les stratégies d'aménagement et de protection côtière, en particulier face aux pressions climatiques et anthropiques croissantes.

1.1.2.2. Vagues

Les vagues constituent des oscillations de la surface de la mer caractérisées par leur longueur d'onde, leur amplitude, leur période et leur vitesse de propagation. Leur formation résulte du transfert d'énergie entre le vent et l'interface air-mer, de sorte que leurs caractéristiques dépendent directement de celles des vents générateurs (Paskoff, 2000 ; Thomas, 2006). La propagation des vagues s'effectue selon la direction du vent, et elles induisent des processus d'usure et de redistribution des sédiments, en particulier sur les cordons sableux meubles. L'énergie cinétique d'une vague est proportionnelle au carré de sa hauteur, ce qui détermine sa capacité érosive : plus la vague est haute et plus le vent est soutenu, plus l'impact sur le littoral est significatif. À l'approche de la côte, la dissipation progressive de l'énergie entraîne le phénomène de déferlement. L'efficacité de l'action des vagues se limite généralement à la zone intertidale, comprise entre le niveau de marée et environ 30 m au-delà du rivage, avec un effet marginal jusqu'à 100 m (Van *et al.*, 2012). Sur des profils de plage à pente douce, comme ceux de la Petite-Côte sénégalaise, l'impact direct des vagues sur l'érosion est relativement modéré. Néanmoins, leur retrait après déferlement entraîne le transport de sédiments vers le large, phénomène observé notamment sur les plages sableuses meubles (Guilcher, 1954). L'ampleur de ce transfert sédimentaire dépend de l'intensité des vagues, de la configuration topographique, du profil de la plage et de l'orientation du trait de côte.

Les plages sableuses subissent les modifications morphologiques les plus importantes lors d'événements de vagues exceptionnelles et énergétiques, capables de mobiliser massivement les sédiments. Sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, les houles Nord-Ouest et Sud-Ouest contribuent principalement à l'érosion des plages et au transport des sédiments déposés au pied des cordons sableux. Sur les falaises rocheuses, l'action des vagues n'est significative que lorsqu'elles transportent des matériaux abrasifs, tels que des débris et des sédiments, entraînant une érosion mécanique du pied des falaises et des surfaces exposées de l'estran.

En outre, les côtes sénégalaises sont soumises à des vagues d'origine locale, générées par les vents locaux et souvent superposées aux houles lointaines mentionnées précédemment. Ces vagues, également appelées « mers de vent », présentent des caractéristiques intimement liées aux paramètres des vents qui les produisent. Elles se distinguent par des hauteurs modérées, comprises entre 0,65 et 1,35 m, avec des maxima observés durant la saison des alizés de Nord-Est. Leur période oscille entre 3 et 5 s, dépassant 4 s uniquement lorsque la vitesse du vent excède $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Nardari, 1993 ; figure 36). Ces vagues locales jouent un rôle complémentaire dans la redistribution des sédiments, modulant l'effet des houles dominantes sur la morphodynamique côtière.

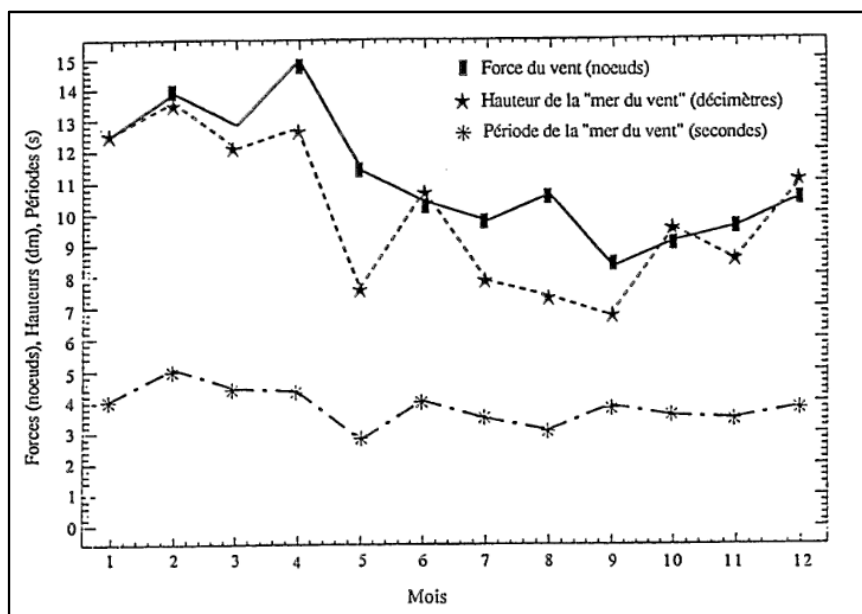


Figure 36 : Caractéristiques des vagues au large des côtes du Sénégal (source : Nardari, 1993).

L'efficacité érosive des vagues sur le littoral dépend fortement de la topographie des pentes côtières. En effet, des pentes douces dissipent progressivement l'énergie des vagues, réduisant ainsi leur capacité à provoquer une érosion significative (Barusseau, 1980 ; Thior, 2020). Le littoral de la Petite-Côte sénégalaise aux îles du Saloum se caractérise par des pentes relativement faibles, comprises entre 2 et 8 m (cf. carte 6). Cette configuration morphologique atténue l'impact direct des vagues sur la dynamique littorale, conférant au trait de côte une résistance accrue aux processus érosifs comparativement aux zones à pentes plus abruptes.

1.1.2.3. Marées

Les phénomènes de marée correspondent aux mouvements horizontaux des masses d'eau océaniques et se composent de deux éléments principaux : d'une part, la variation périodique du niveau de la mer en chaque point de la surface terrestre, désignée comme la marée proprement dite et constituant la manifestation la plus visible du phénomène ; d'autre part, le déplacement horizontal de la masse d'eau à la surface de la mer, générant les courants de marée directement liés à cette oscillation (Elie, 2006). Ces mouvements sont provoqués par l'attraction gravitationnelle combinée de la lune et du soleil, entraînant une oscillation régulière du niveau marin.

Sur les côtes sénégalaises, le cycle de marée est semi-diurne, avec deux hautes mers et deux basses mers par période de 24 h 50 min (Faye, 2010 ; Sadio, 2017). Le marnage, défini comme l'amplitude entre la haute et la basse mer, est relativement faible sur la Petite-Côte, ce qui caractérise ce littoral comme microtidal. Le marnage atteint son maximum lorsque le soleil et la lune sont alignés (vives-eaux) et diminue lorsque ces astres sont en quadrature (mortes-eaux) (Niang, 2009). Sur la Petite-Côte, la marée basse est d'environ 70 cm et la haute mer de 180 cm, tandis qu'à la Pointe de Sangomar, les amplitudes maximales et minimales sont respectivement de 120 cm et 80 cm. Ces valeurs peuvent cependant être modulées par la pression atmosphérique : une pression élevée réduit le marnage, alors qu'une pression faible l'amplifie, notamment lors du passage de systèmes dépressionnaires (Turmine, 2000).

La faiblesse du marnage limite le développement de l'estran et influence directement la morphodynamique du littoral. La vitesse des courants de marée est maximale lors des basses mers, favorisant le transport des matières en suspension vers les embouchures et contribuant significativement au transport sédimentaire sur les côtes meubles telles que la Petite-Côte. En conséquence, la marée constitue un facteur majeur de redistribution des sédiments et d'érosion côtière. Cette influence est particulièrement accentuée pendant la période hivernale, lorsque les

hautes mers combinées à la dynamique des houles renforcent l'érosion et modifient de manière notable le profil des plages.

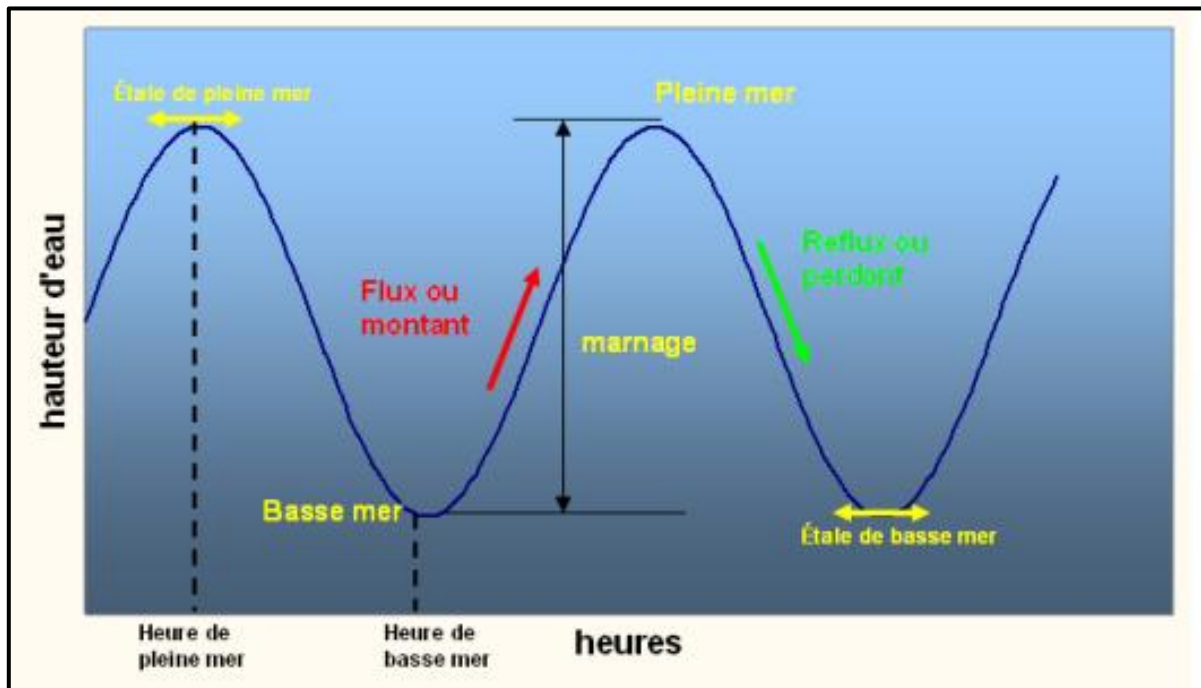


Figure 37 : Évolution journalière de la marée de type semi-diurne (source : Elie, 2006)

Au cours d'un cycle journalier, le niveau de la mer oscille selon des phases distinctes résultant des interactions gravitationnelles et des forces de Coriolis. Ces phases sont les suivantes :

- ✓ phase de flux (montée de marée) : il s'agit de la période pendant laquelle le niveau de la mer s'élève progressivement sur environ six heures pour atteindre son maximum, appelé pleine mer ;
- ✓ étale de pleine mer : après l'atteinte de la pleine mer, le niveau de l'eau reste relativement stable pendant plusieurs minutes, marquant une courte période de repos hydraulique ;
- ✓ phase de reflux (descente de marée) : cette phase correspond à l'abaissement progressif du niveau de la mer, sur une durée similaire à celle du flux (environ six heures), jusqu'aux basses mers, soit les minima du cycle ;
- ✓ étale de basse mer : après l'atteinte du niveau minimal, la mer conserve ce niveau pendant plusieurs minutes avant de débiter un nouveau cycle de flux.

Une marée présentant deux pleines mers et deux basses mers par cycle, avec des amplitudes quasi identiques, est classée comme marée semi-diurne. D'autres types de marées existent,

notamment les marées diurnes et mixtes, caractérisées par des variations différentes du nombre et de l'amplitude des pleines et basses mers.

1.1.2.4. Dérive littorale

La dérive littorale correspond au déplacement longitudinal des sédiments le long du littoral, résultant de l'incidence oblique des houles par rapport à la ligne de rivage. Sur la Petite-Côte sénégalaise, les études de Riffault (1980) montrent que les houles en provenance du Nord-Ouest, après leur contournement de la presqu'île du Cap-Vert, atteignent le littoral avec un angle oblique qui induit un transport sédimentaire majoritairement orienté du Nord vers le Sud. À l'inverse, durant la saison hivernale, les houles Sud-Ouest génèrent une dérive littorale inverse, orientée du Sud vers le Nord. Cette dynamique Nord-Sud est particulièrement manifeste dans la formation de flèches littorales allongées, dont les plus développées sont associées à la pointe de Sangomar.

L'efficacité de la dérive littorale dépend directement des caractéristiques des houles, notamment de leur cambrure. Masse (1968) indique qu'une cambrure supérieure à 0,03 favorise le transport des sédiments vers le large, tandis qu'une cambrure inférieure à 0,025 tend à concentrer les sédiments vers la plage. Sur la Petite-Côte, Barousseau (1984) a quantifié la capacité de transport de la dérive littorale, observant que les volumes sédimentaires déplacés varient selon la direction : 30 000 à 70 000 m³/an vers le sud et 20 000 à 45 000 m³/an vers le nord.

Ainsi, la dérive littorale constitue un processus clé de redistribution sédimentaire, influençant directement la morphologie des plages et la dynamique de formation des cordons sableux le long de la Petite-Côte au delta du Saloum.

1.1.2.5. Courants

Les courants de marée correspondent aux déplacements horizontaux des masses d'eau induits par les variations du niveau marin au cours du cycle tidal. Leur intensité et leur orientation dépendent du marnage, de la géométrie côtière (baies, caps, passes, estuaires) ainsi que de la rugosité du fond (Dronkers, 2016 ; Masselink, Hughes et Knight, 2014). Dans un contexte microtidal tel que celui de la Petite-Côte sénégalaise, ces courants restent généralement faibles sur les plages ouvertes et deviennent significatifs principalement à proximité des embouchures, des passes et des chenaux.

Sur cette côte, les observations indiquent des vitesses maximales typiques inférieures à 0,15 m•s⁻¹, ce qui limite leur contribution directe au transport sédimentaire le long des plages,

comparativement à l'effet dominant des courants longitudinaux induits par l'incidence oblique des houles (Domain, 1976 ; Rebert, 1983, cités par Niang, 2003 ; Komar, 1998 ; Samou *et al.*, 2023). Ainsi, la dynamique littorale est principalement gouvernée par le régime des vagues et par la dérive sédimentaire associée.

Au-delà de la marée, la circulation régionale saisonnière module les échanges d'eau et le bilan énergétique sur le plateau continental. En saison sèche (novembre-mai), les alizés favorisent l'upwelling dans le système des Canaries et engendrent des flux côtiers orientés vers le sud le long du littoral mauritanien et sénégalais (Mittelstaedt, 1991 ; Ndoye *et al.*, 2014). En saison humide (mousson, juin-septembre), la combinaison des vents, de la thermocline et des ondes côtières/piégées modifie la circulation de plateau, pouvant provoquer des inversions ou un affaiblissement des courants côtiers (Kounta *et al.*, 2018). Ces réorganisations hydrodynamiques influencent la hauteur, la direction et la période des vagues incidentes, et se répercutent directement sur la dérive littorale, conditionnant l'érosion et l'accumulation à l'échelle des cellules sédimentaires (Samou *et al.*, 2023).

La littérature historique distingue classiquement un « courant du Nord », dominant sous alizés, et un « contre-courant du Sud », actif durant la mousson (Domain, 1976 ; Rebert, 1983, cités par Niang, 2003). Les études récentes précisent que la circulation de plateau résulte de la combinaison de plusieurs forçages (vents locaux, ondes côtières, structure de densité) et présente des variabilités spatiales et saisonnières marquées (Ndoye *et al.*, 2014 ; Kounta *et al.*, 2018).

Pour une gestion morphodynamique efficace, il est recommandé d'intégrer aux diagnostics locaux des mesures directes (ADCP, suivis hydrométéorologiques) et des simulations *hindcasts/nowcasts* de vagues et de courants. Cette approche permet de quantifier la dérive littorale effective, d'identifier ses saisons dominantes et de mieux anticiper leurs implications sur la dynamique sédimentaire et l'érosion côtière.

1.1.2.6. L'élévation du niveau marin, une conséquence du réchauffement climatique

L'élévation du niveau de la mer constitue un facteur déterminant dans l'intensification de l'érosion côtière. Ce phénomène résulte principalement du réchauffement climatique, lui-même induit par l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre d'origine anthropique. L'élévation du niveau marin est amplifiée par la dilatation thermique des océans et par la fusion des glaciers et des calottes polaires, consécutives à l'augmentation continue des températures

mondiales. Ces processus accentuent la submersion des zones littorales, aggravant les pressions exercées sur les côtes déjà fragilisées par l'urbanisation et l'exploitation des sols (GIEC, 2019). Les enregistrements marégraphiques effectués à Dakar indiquent une élévation moyenne du niveau de la mer de 1,44 mm/an depuis les années 1960 (Elouard *et al.*, 1967). Cette élévation, bien que modeste à première vue, contribue de manière significative à l'érosion progressive des côtes sénégalaises, notamment dans les secteurs bas et sableux. Dénis *et al.* (1995) ont montré que le réchauffement des océans influence également les phénomènes d'expansion thermique de l'eau, accentuant ainsi l'intensité de l'érosion côtière.

Même des variations relativement faibles du niveau marin peuvent entraîner des implications substantielles sur la stabilité des côtes basses, comme l'ont démontré les évaluations de l'ACCC/UNESCO (2015). Ces études identifient plusieurs zones particulièrement vulnérables en Afrique, notamment la côte est-africaine (Kenya-Mozambique), la côte de la mer Rouge et la côte ouest-africaine, incluant le Sénégal. La vulnérabilité de ces régions résulte de leur faible altitude, de la configuration de leurs littoraux et de l'exposition aux effets combinés du réchauffement climatique et de l'activité humaine.

Le réchauffement climatique modifie également d'autres paramètres hydrodynamiques majeurs : la hauteur et la période des vagues, la fréquence et l'intensité des tempêtes, ainsi que l'occurrence des événements extrêmes tels que les vagues de chaleur marines (Garcia *et al.*, 2008). Ces modifications accentuent la dynamique érosive des littoraux, augmentant la susceptibilité des plages, dunes et mangroves à la dégradation. La figure 38 illustre l'évolution de l'élévation globale du niveau de la mer, soulignant les tendances préoccupantes pour les décennies à venir et la nécessité d'intégrer cette contrainte dans les stratégies de gestion côtière.

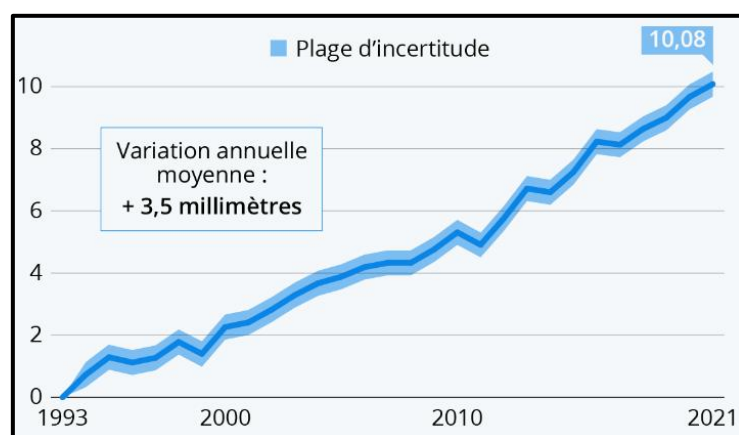


Figure 38 : Evolution de l'élévation du niveau global de la mer entre 1993 et 2021 (NASA, 2022).

L'analyse de la figure 38 met en évidence une tendance globalement continue à l'élévation du niveau moyen de la mer. Cette évolution est principalement attribuable à la fonte des calottes glaciaires polaires et des glaciers de montagne, ainsi qu'à l'expansion thermique des eaux océaniques, processus directement liés à l'augmentation des températures globales induite par le réchauffement climatique. De nombreuses études, fondées sur divers modèles climatiques et sur des scénarios d'évolution futurs, indiquent par ailleurs que les changements globaux entraînent une modification de l'intensité et de la fréquence de l'activité cyclonique à l'échelle planétaire, contribuant ainsi à l'accélération de l'élévation du niveau marin (Costa, 2000 ; Emanuel, 2017).

Les observations montrent que le rythme de l'élévation du niveau marin s'est nettement intensifié au cours des dernières décennies. Avant l'an 2000, l'élévation était estimée à environ 50 mm sur une période de 50 ans, tandis qu'au début du XXI^e siècle, elle a atteint près de 17 mm par décennie, pour dépasser récemment 35 mm par décennie (Thior, 2020). Les rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007) soulignent que la hausse continue des températures mondiales s'accompagne d'une réduction significative de la couverture neigeuse dans les deux hémisphères, particulièrement marquée dans l'hémisphère Nord depuis les années 1950. Cette évolution s'est traduite par la perte de plus de 4 millions de km² de surfaces enneigées au cours de la période considérée.

La figure 39 illustre l'évolution conjointe des températures, du niveau de la mer et de l'étendue de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord entre 1850 et 2000, mettant clairement en évidence les interactions et les relations étroites entre ces variables climatiques.

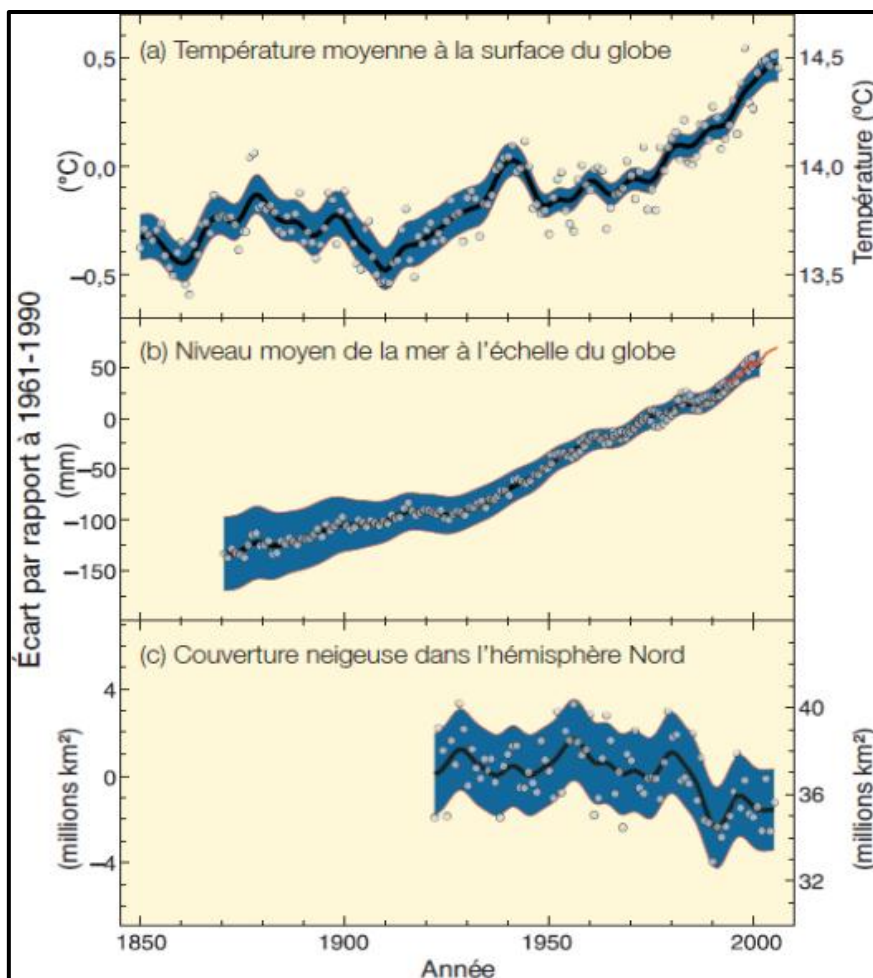


Figure 39 : Evolution des changements globaux : température, niveau marin et couverture neigeuse (source : GIEC, 2007).

Les projections relatives à l'élévation du niveau moyen de la mer suscitent de vives préoccupations en raison des impacts potentiellement majeurs qu'elles impliquent pour les zones côtières, en particulier les régions de faible altitude. Selon le troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les scénarios projetés à l'horizon 2100 indiquent une élévation comprise entre 9 et 88 cm, tandis qu'à l'échéance 2050, l'augmentation attendue varierait entre 5 et 32 cm. Ces valeurs correspondent à des taux moyens d'élévation estimés entre 0,9 et 8,8 mm/an, pour une élévation moyenne globale proche de 48 cm.

Les rapports plus récents du GIEC, notamment le cinquième rapport d'évaluation publié en 2013, indiquent des projections encore plus élevées, avec une augmentation du niveau moyen de la mer pouvant atteindre environ 98 cm d'ici la fin du XXI^e siècle (figure 40). Ces estimations reposent sur une amélioration des modèles climatiques intégrant de manière plus explicite la dynamique des calottes glaciaires.

L'élévation du niveau marin résulte principalement de deux mécanismes physiques majeurs. Le premier est la dilatation thermique des océans, liée au réchauffement progressif des masses d'eau. Le second correspond à l'apport croissant d'eau douce issu de la fonte des glaces continentales, incluant les glaciers de montagne et les calottes glaciaires, dont les taux de perte de masse se sont significativement accélérés au cours des dernières décennies.

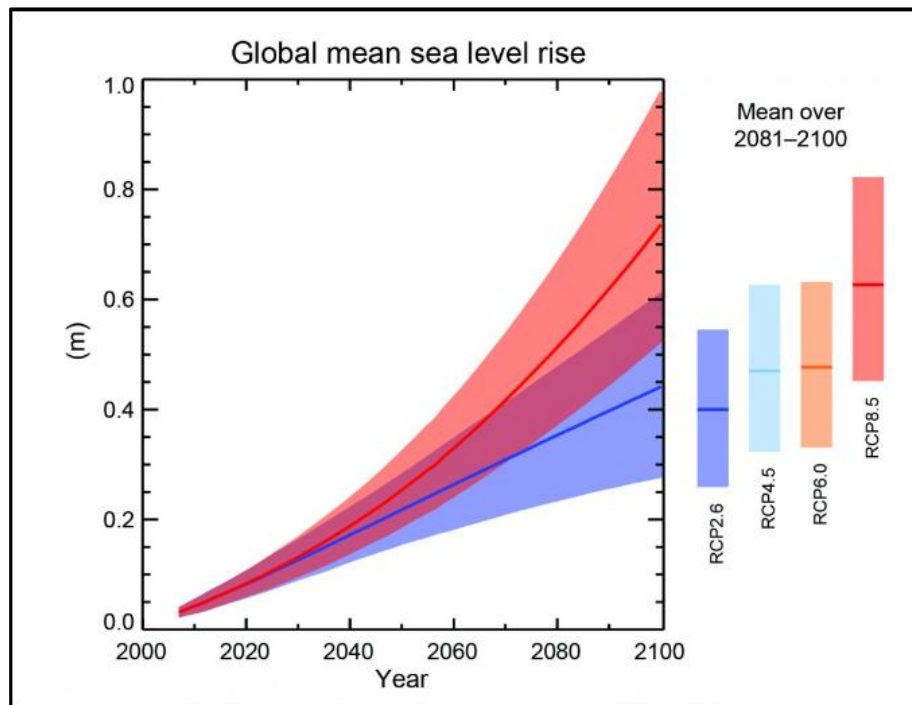


Figure 39 : Projection de l'élévation du niveau moyen mondial de la mer au cours du 21^e siècle (Source : IPCC, 2013).

L'analyse de la figure met en évidence des projections particulièrement préoccupantes concernant l'élévation du niveau moyen mondial de la mer. Selon le scénario RCP8.5, correspondant à l'hypothèse d'émissions de gaz à effet de serre la plus pessimiste, l'élévation du niveau marin pourrait atteindre jusqu'à 0,98 m à l'horizon 2100. La réalisation d'un tel scénario aurait des implications socio-environnementales majeures, dans la mesure où une proportion significative de la population mondiale est concentrée dans les zones littorales. Les implications seraient particulièrement sévères dans les régions côtières de faible altitude, notamment le long des littoraux ouest-africains.

Les projections régionales indiquent que les côtes de l'Afrique de l'Ouest figurent parmi les plus vulnérables à l'élévation du niveau marin. Selon Dada *et al.* (2019), une augmentation du niveau de la mer de l'ordre de 2 cm/an suffirait à entraîner la submersion ou la disparition progressive de plusieurs villes côtières, telles que Saint-Louis, Mbour et certaines zones des

îles du Saloum. Ces auteurs identifient la Gambie, le Ghana et le Nigeria comme étant parmi les pays les plus exposés aux effets combinés de la submersion marine, de l'érosion côtière et de la forte densité de population littorale.

Sur les côtes sénégalaises, Dennis *et al.* (1995) estiment qu'une élévation du niveau marin de 1 m d'ici la fin du XXI^e siècle pourrait provoquer une perte comprise entre 55 et 86 km² de plages, principalement en raison de l'intensification des processus d'érosion côtière. En outre, environ 6 000 km² de zones basses, majoritairement constituées de milieux estuariens caractérisés par une bathymétrie variable le long des chenaux et du littoral ouvert, seraient susceptibles d'être inondés.

Ces projections sont corroborées par le rapport de la Direction de l'Environnement et des Établissements Classés (DEEC, 2019), élaboré dans le cadre du volet adaptation de la Contribution Déterminée au niveau National (CDN). Les simulations climatiques présentées dans ce rapport indiquent une augmentation généralisée de la température moyenne à l'échelle nationale, comprise entre +0,5 °C dans les régions du Centre-Ouest et +1,7 °C dans le Nord-Ouest du Sénégal à l'horizon 2035, renforçant ainsi les risques associés à l'élévation du niveau marin et aux dynamiques côtières.

1.1.2.7. Caractéristiques bathymétriques de la Petite-Côte au delta du Saloum

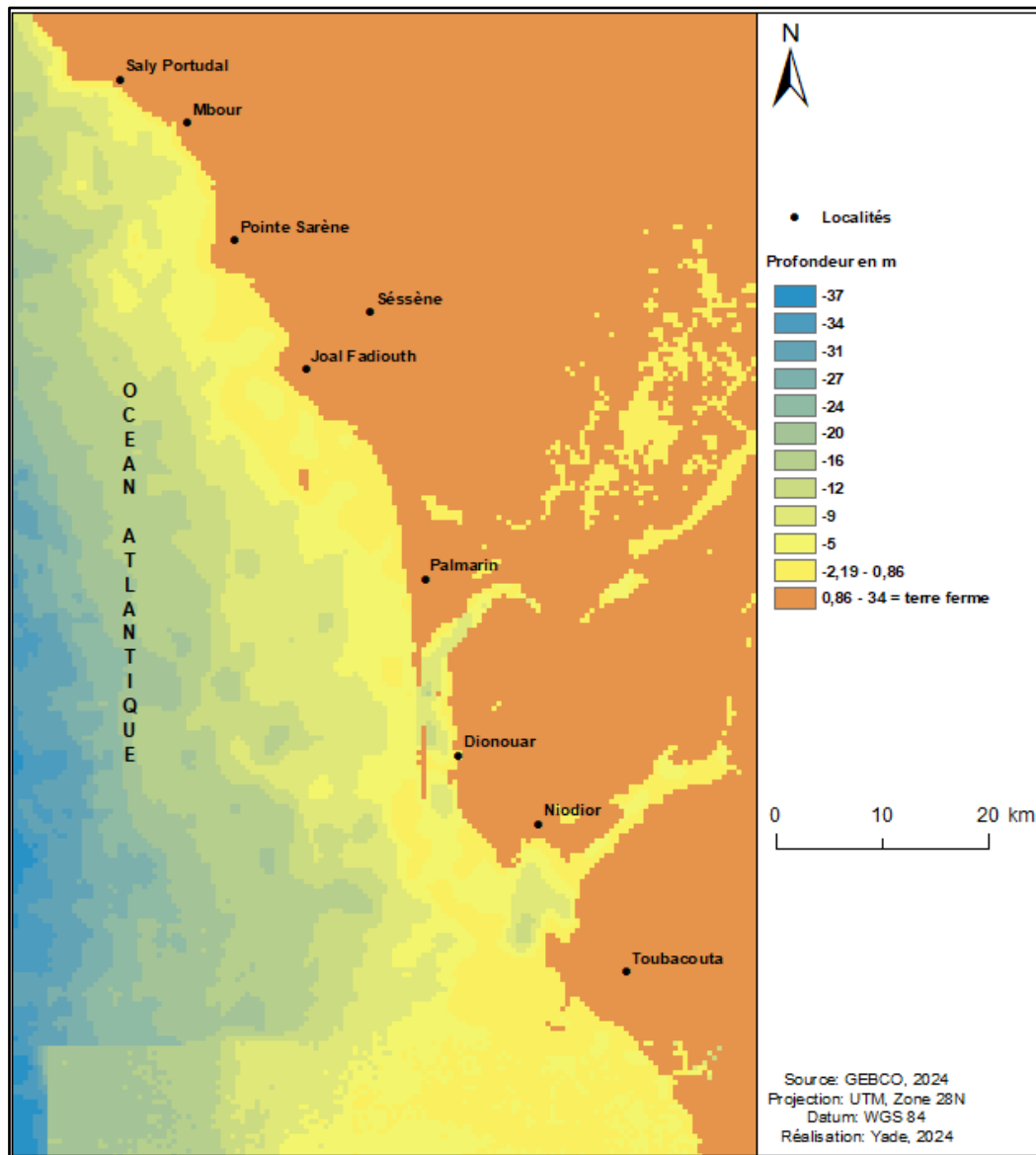
L'analyse bathymétrique constitue un outil essentiel pour la caractérisation du relief sous-marin et de la distribution spatiale des profondeurs le long de la Petite-Côte aux îles du Saloum. La carte 5 met en évidence une variabilité marquée des profondeurs selon les secteurs étudiés, traduisant une topographie sous-marine hétérogène et des gradients bathymétriques contrastés.

Dans le département de Mbour, les fonds marins se caractérisent par des pentes faibles à modérées. À Saly-Portudal, les profondeurs augmentent de 2,19 à 5 m sur une distance inférieure à un kilomètre, tandis qu'à Mbour cette même variation s'effectue sur une distance supérieure à 2 km, indiquant une pente bathymétrique plus douce. Plus au sud, au niveau de Pointe Sarène et de Joal-Fadiouth, les gradients bathymétriques s'étendent respectivement sur des distances comprises entre 4 et 6 km, traduisant une zone de transition plus progressive entre le proche rivage et le plateau continental interne.

Dans les secteurs méridionaux et estuariens de la zone d'étude, notamment à Palmarin, Dionewar, Niodior et Toubacouta, les profondeurs comprises entre 2,19 et 5 m s'étendent sur environ 3 km, révélant une morphologie sous-marine relativement peu inclinée. Les

profondeurs maximales observées atteignent environ -37 m à une distance d'environ 50 km au large de Toubacouta, correspondant à la bordure externe du plateau continental.

Cette configuration bathymétrique, marquée par de faibles pentes dans les zones littorales, constitue un facteur de vulnérabilité accrue face aux processus hydrodynamiques et morphosédimentaires, notamment dans un contexte d'élévation du niveau marin et d'intensification de l'érosion côtière.



Carte 5 : Bathymétrie du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum

La bathymétrie de la Petite-Côte au delta du Saloum constitue un facteur déterminant dans le contrôle de la dynamique sédimentaire et dans la modulation de l'intensité des processus d'érosion côtière. Cette région, caractérisée par des formations littorales à dominante sableuse, est soumise à l'action d'une houle incidente majoritairement issue du secteur sud-ouest,

combinée à une dérive littorale orientée globalement du nord vers le sud. Les fonds marins y présentent des pentes faibles à modérées, typiques d'un plateau continental interne large et faiblement incliné.

Cette configuration morpho-bathymétrique favorise le développement de barres sableuses sous-marines discontinues, localisées à faible distance du rivage. Ces structures jouent un rôle fonctionnel essentiel en tant que zones tampons hydrodynamiques, en dissipant partiellement l'énergie des vagues incidentes avant leur déferlement sur le trait de côte. Toutefois, dans les secteurs où la pente bathymétrique devient plus abrupte, notamment à Mbour et à Pointe Sarène, la transformation de la houle est limitée, ce qui permet aux vagues de conserver une énergie élevée jusqu'au rivage et accentue ainsi les processus d'érosion côtière.

À l'inverse, les zones caractérisées par des pentes douces, telles que Joal-Fadiouth et Palmarin, favorisent une dissipation progressive de l'énergie hydrodynamique, contribuant à une stabilité relative, bien que souvent temporaire, des plages. Dans les secteurs estuariens et insulaires de Dionewar et de Niodior, la présence combinée de chenaux de marée, de bancs sableux et de barres sous-marines engendre des régimes de courants complexes, qui jouent un rôle majeur dans la redistribution spatiale des sédiments.

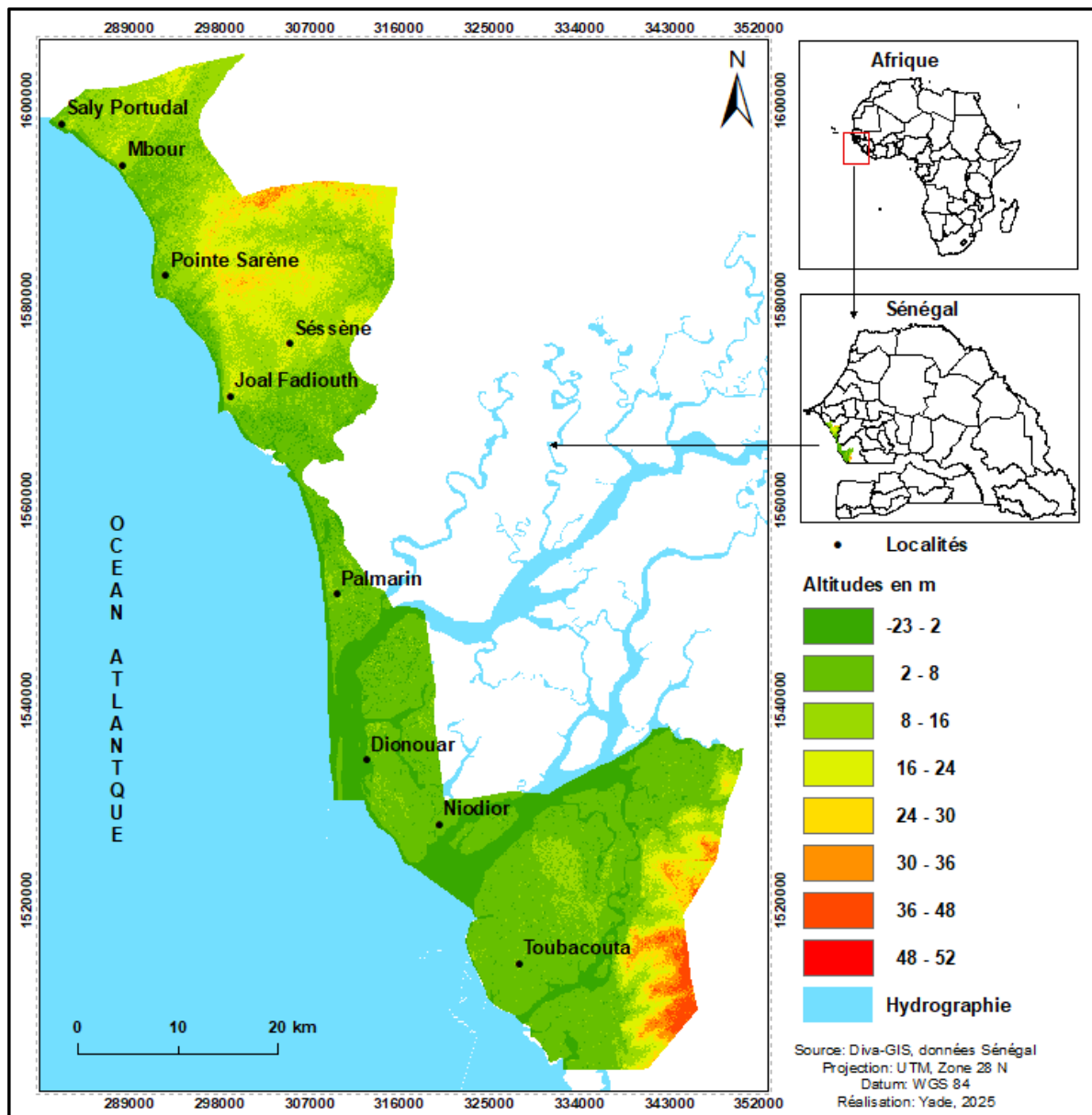
L'irrégularité de cette bathymétrie, conjuguée à la dérive littorale dominante et à l'orientation de la houle incidente, explique la coexistence de cellules sédimentaires aux comportements contrastés le long du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum, avec une alternance de secteurs en érosion active et de zones en accrétion, parfois séparées de quelques kilomètres seulement.

1.1.2.8. Topographie

La Petite-Côte sénégalaise et le delta du Saloum se caractérisent par une topographie globalement basse, comme l'illustre la carte 6. Celle-ci présente une classification altimétrique de la zone d'étude en huit classes, établie à partir de l'analyse planimétrique et altimétrique du territoire. Les secteurs littoraux, en particulier les plages, affichent une altitude moyenne de l'ordre de 2 m au-dessus du niveau moyen de la mer, tandis que les plateaux continentaux adjacents atteignent localement des altitudes maximales d'environ 52 m.

Cette faible élévation topographique, combinée à des pentes très faibles sur les plages, constitue un facteur de vulnérabilité majeur face aux processus d'érosion côtière. En effet, les faibles gradients topographiques limitent la capacité d'amortissement naturel des forçages hydrodynamiques, favorisant ainsi une action plus directe et plus efficace des houles, des

vagues, des courants marins et des vents sur le trait de côte. Il en résulte une intensification des processus de remaniement sédimentaire et une dégradation progressive des milieux littoraux, particulièrement marquée dans un contexte d'élévation du niveau marin et de variabilité climatique accrue.



Carte 6 : Modèle Numérique de Terrain de la Petite-Côte au delta du Saloum

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la Petite-Côte sénégalaise au delta du Saloum met en évidence une topographie globalement basse, avec des altitudes comprises entre -23 et 52 m. La majorité des secteurs côtiers, notamment autour de Saly, Mbour et Joal-Fadiouth, se situent à des altitudes variantes entre 2 et 16 m, ce qui les rend particulièrement vulnérables aux

processus d'érosion côtière et de submersion marine. Cette vulnérabilité est accentuée par l'élévation progressive du niveau de la mer, estimée en moyenne à environ 3 mm/an en Afrique de l'Ouest, sous l'effet du changement climatique (IPCC, 2022).

La dynamique côtière de la région est également fortement conditionnée par l'action d'une houle énergétique, principalement issue du secteur nord-ouest, générant une dérive littorale orientée globalement du nord vers le sud. Ce régime hydrodynamique favorise une érosion différentielle des plages, ainsi que la mobilisation et la migration des bancs sableux le long du littoral. Dans ce contexte, les formations dunaires et les cordons sableux observés notamment à Joal-Fadiouth et à Pointe Sarène constituent des barrières naturelles jouant un rôle protecteur face à l'érosion marine. Toutefois, ces structures sont de plus en plus fragilisées par les pressions anthropiques, en particulier l'extraction de sable et l'urbanisation rapide, ce qui contribue à la déstabilisation du système littoral et à l'accélération des processus érosifs.

L'analyse du MNT met également en évidence l'importance des zones marécageuses et estuariennes, notamment dans les secteurs de Palmarin, Dionewar et Niodior, où les altitudes varient entre -23 et 2 m. Ces espaces, dominés par des mangroves et des vasières intertidales, jouent un rôle fondamental dans la stabilisation du trait de côte en favorisant la rétention sédimentaire et en dissipant l'énergie des vagues. Cependant, la dégradation progressive de ces écosystèmes, liée aux activités anthropiques telles que l'exploitation du bois, les aménagements agricoles et la saliculture, réduit leur capacité de protection naturelle, favorisant ainsi l'intrusion marine et l'extension des zones inondables.

La dynamique sédimentaire de ces milieux estuariens est par ailleurs contrôlée par les échanges hydrographiques entre l'océan, les bolongs (chenaux maritimes) et les apports fluviaux, lesquels influencent le bilan sédimentaire et la distribution spatiale des dépôts. L'augmentation de la fréquence des événements extrêmes, tels que les tempêtes et les marées de vives-eaux exceptionnelles, renforce encore les risques de submersion marine dans ces zones de basse altitude, menaçant à la fois les écosystèmes côtiers et les infrastructures humaines.

D'un point de vue évolutif, l'interprétation du MNT permet d'anticiper les transformations futures du trait de côte sous l'effet conjugué du changement climatique et des pressions anthropiques. Les secteurs de faible altitude et à pente douce vers l'océan, en particulier entre Saly et Joal-Fadiouth, apparaissent comme les plus exposés au recul du trait de côte, un phénomène susceptible de s'intensifier avec l'élévation du niveau marin et l'augmentation de l'énergie des tempêtes. À l'inverse, les zones plus élevées, telles que Toubacouta, où les altitudes varient entre 36 et 52 m, sont moins directement affectées par l'érosion marine, bien

qu'elles puissent subir des impacts indirects liés aux modifications du régime hydro-sédimentaire et à l'altération des bassins versants.

Les profils topographiques extraits du Modèle Numérique de Terrain confirment la faiblesse générale du relief des plages, caractérisé par des pentes inférieures à 2° sur l'ensemble de la zone étudiée, ainsi qu'une irrégularité morphologique marquée. Les trois profils réalisés dans le département de Mbour (P1 à Saly-Portudal, P2 à Mbour et P3 à Pointe Sarène) illustrent cette hétérogénéité du relief côtier (figure 41). Les profils P1 et P2 révèlent un relief plus accidenté, résultant de leur position de transition entre des plateaux légèrement surélevés et des dépressions topographiques, tandis que le profil P3 se distingue par un versant relativement régulier, traduisant une morphologie plus homogène.

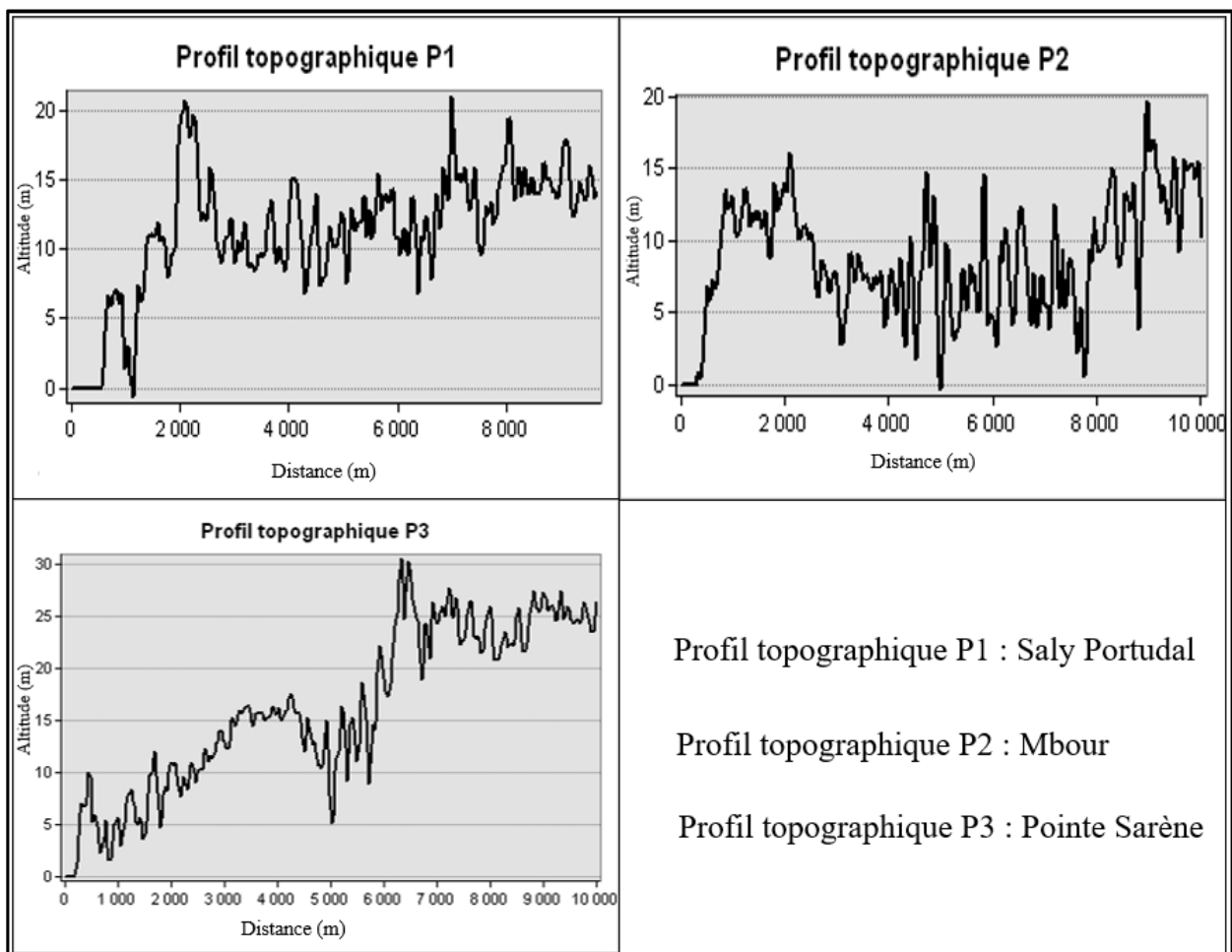


Figure 40 : Profils topographiques de la zone de Mbour

Le profil topographique P1, établi au niveau de Saly-Portudal, met en évidence des variations altitudinales marquées, avec des valeurs comprises entre 0 et 20 m. Cette morphologie irrégulière traduit une forte instabilité du littoral, largement conditionnée par l'intensité des

aménagements anthropiques, notamment les digues, les enrochements et autres ouvrages de protection côtière.

Bien que ces structures visent à limiter l'impact de l'érosion sur les infrastructures, elles perturbent les transferts sédimentaires naturels et peuvent accentuer localement les processus érosifs. En tant que pôle touristique majeur, Saly est soumise à une pression anthropique élevée, qui se traduit par une artificialisation progressive du littoral et une diminution des apports sédimentaires naturels. Cette situation favorise le recul du trait de côte et accroît la vulnérabilité des zones de basse altitude, directement exposées aux houles dominantes. En l'absence de stratégies de gestion intégrée, cette dynamique érosive est susceptible de s'intensifier sous l'effet de l'élévation du niveau marin et de la fréquence accrue des événements extrêmes liés au changement climatique.

Le profil topographique P2, situé à Mbour, se caractérise par une instabilité morphologique prononcée, avec des altitudes variantes entre 0 et 15 m sur l'ensemble du transect. Ce relief irrégulier reflète une alternance spatiale et temporelle de phases d'érosion et d'accrétion, contrôlées par la dynamique hydro-sédimentaire locale. Ces fluctuations sont typiques des littoraux soumis à des interactions complexes entre la houle, les courants côtiers, les marées et les interventions anthropiques. À Mbour, les activités d'extraction de sable, l'urbanisation rapide et les aménagements portuaires modifient significativement la distribution des sédiments, induisant une morphologie côtière fragmentée et une vulnérabilité accrue à la submersion marine. L'irrégularité du profil met ainsi en évidence des secteurs d'érosion active, justifiant la mise en place d'un suivi morphodynamique renforcé afin d'anticiper d'éventuelles évolutions rapides du trait de côte.

Le profil topographique P3, réalisé à Pointe Sarène, présente une évolution altitudinale plus progressive, atteignant environ 30 m. Cette configuration témoigne de la prédominance des processus d'accrétion, caractérisés par le dépôt de sédiments et le développement de formations dunaires. Cette dynamique est généralement associée à des conditions hydrodynamiques relativement favorables, notamment une redistribution plus équilibrée des sédiments par les courants littoraux. Néanmoins, cette tendance à l'accrétion demeure potentiellement transitoire et pourrait être remise en cause par des modifications du régime climatique ou par des pressions anthropiques croissantes. Une gestion préventive et anticipative apparaît donc indispensable afin de préserver cet équilibre morphosédimentaire et d'éviter une transition vers des phases érosives durables.

Dans le département de Fatick, les profils topographiques ont été établis dans le secteur de Palmarin, caractérisé par un relief globalement bas, avec des altitudes maximales avoisinant 14 m pour l'ensemble des transects analysés (figure 42). Les profils P4 (nord de Palmarin), P5 (Palmarin) et P6 (sud de Palmarin) révèlent des variations altitudinales notables, traduisant des dynamiques morphologiques et sédimentaires contrastées. Celles-ci sont étroitement liées à l'action combinée de l'érosion côtière, des processus hydrodynamiques estuariens et des échanges sédimentaires avec les zones intertidales adjacentes, soulignant la forte sensibilité de ce secteur aux changements environnementaux et climatiques.

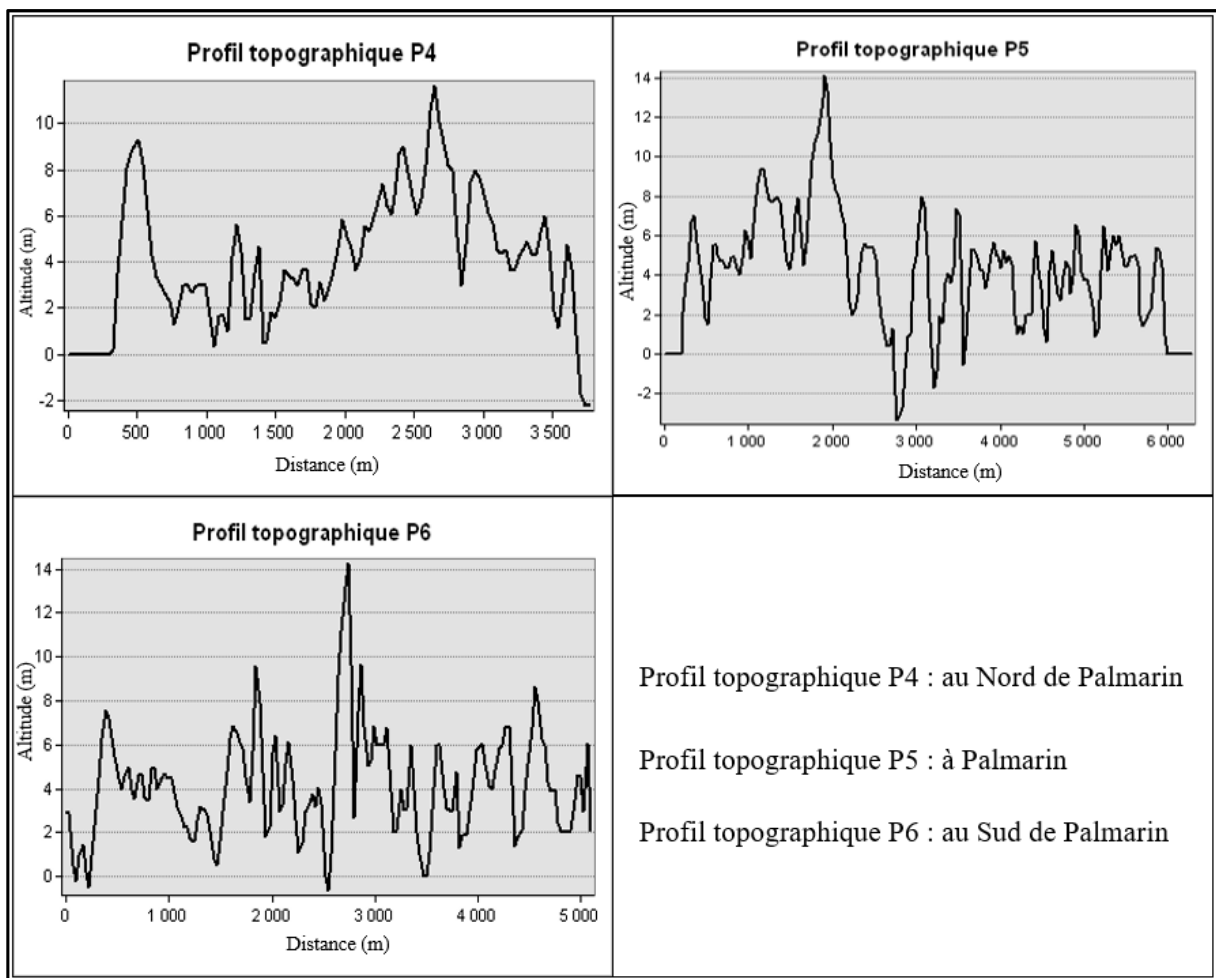


Figure 41 : Profils topographiques de la zone de Fatick.

Le profil topographique P4 se caractérise par une morphologie relativement accidentée, marquée par une alternance de crêtes et de dépressions, traduisant une dynamique morphosédimentaire active dominée par des processus alternés d'érosion et de dépôt. Cette configuration résulte de l'action conjointe de la houle incidente et des courants littoraux, qui contrôlent la redistribution des sédiments le long du rivage. L'extrémité du profil P4 présente

une rupture altitudinale nette, interprétée comme un front d'érosion ou une discontinuité du cordon littoral, typique des secteurs soumis à une forte récession du trait de côte.

Le profil topographique P5, situé dans le secteur de Palmarin, révèle une topographie plus complexe, caractérisée par des variations altitudinales prononcées. Cette hétérogénéité morphologique témoigne d'une instabilité du milieu côtier, étroitement liée à l'influence des chenaux de marée et aux processus de submersion marine récurrents. La présence de reliefs positifs localisés traduit l'existence de formations dunaires ou de levées sableuses, associées à des contextes de dépôt favorisés par les apports sédimentaires des courants côtiers et par les processus de transport éolien. Toutefois, les oscillations fréquentes de l'altitude mettent également en évidence un contexte érosif significatif, amplifié par l'élévation du niveau de la mer et par les perturbations anthropiques affectant les équilibres sédimentaires.

Le profil topographique P6, situé au sud de Palmarin, présente une variabilité altimétrique marquée, matérialisée par une succession de crêtes et de dépressions, indiquant une érosion active associée à des dépôts instables. Les pics topographiques observés peuvent être interprétés comme des formations dunaires résiduelles, tandis que les secteurs de basse altitude correspondent à des zones fréquemment soumises aux intrusions marines. Cette organisation morphologique traduit une forte fragilité du système côtier et un recul progressif du trait de côte, sous l'effet combiné des forçages hydrodynamiques et du changement climatique en cours. Ces résultats sont cohérents avec les tendances documentées sur d'autres littoraux sénégalais, où l'intensification des pressions anthropiques et des processus naturels accélère la transformation des paysages côtiers.

La partie méridionale de la zone d'étude, correspondant au delta du Saloum, se distingue par un relief globalement plus bas et moins accidenté, avec des altitudes maximales n'excédant pas 9 m. Cet espace est essentiellement structuré par un réseau d'îles, de chenaux et de zones de mangrove, caractérisées par une topographie très basse. Les profils topographiques P7, P8 et P9, représentatifs de ces milieux, présentent des caractéristiques morphologiques similaires (figure 43), reflétant des environnements dominés par des processus estuariens, une faible énergie topographique et une forte sensibilité aux phénomènes de submersion marine et de variations du niveau de la mer.

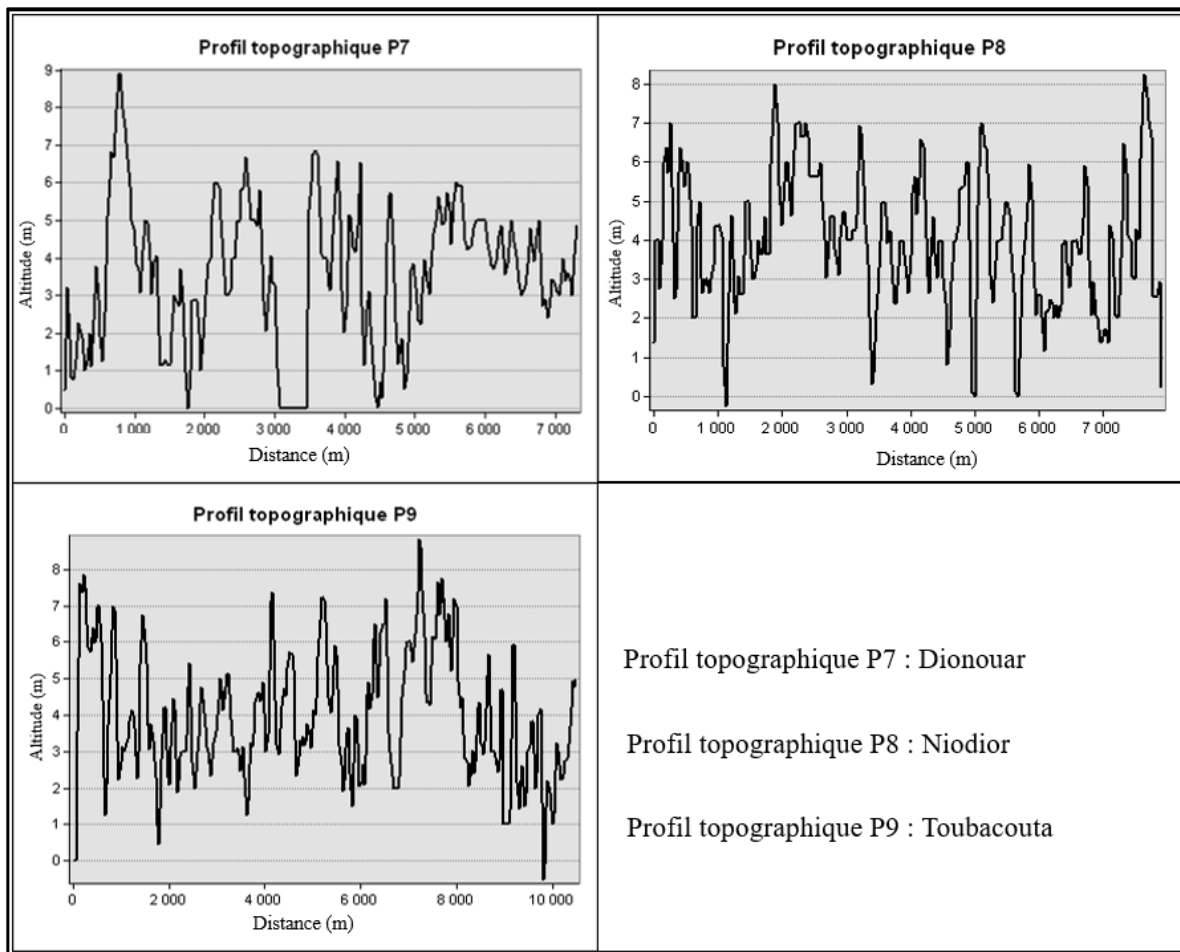


Figure 42 : Profils topographiques de la zone de Foundiougne

Le profil topographique P7, établi au niveau de l'île de Dionewar, se caractérise par une alternance marquée de reliefs positifs et de dépressions profondes, traduisant une morphologie fortement instable. Cette irrégularité topographique est représentative d'un secteur soumis à une dynamique érosive intense, amplifiée par la forte vulnérabilité des formations sédimentaires meubles. En tant qu'île située au sein du delta du Saloum, Dionewar est directement exposée aux forçages marins, notamment à l'action combinée des vagues et des marées, qui entretiennent un recul continu du trait de côte. Les ruptures altitudinales abruptes observées le long du profil peuvent être interprétées comme les manifestations d'une érosion régressive, liée à l'attaque des vagues sur des substrats peu consolidés, entraînant des instabilités locales et des effondrements ponctuels des berges. Par ailleurs, l'évolution rapide du trait de côte dans ce secteur est renforcée par la réduction des apports sédimentaires fluviaux, consécutive à la régulation des cours d'eau en amont et à l'intensification des usages des sols dans les bassins versants adjacents.

Le profil topographique P8, situé sur l'île de Niodior, révèle une topographie fortement fragmentée, caractérisée par des variations altitudinales fréquentes et prononcées, indiquant une érosion active et une instabilité morphologique élevée. Cette configuration résulte de l'exposition de l'île aux houles océaniques et aux régimes de marée, qui favorisent la remobilisation continue des sédiments côtiers. L'alternance entre reliefs surélevés et dépressions marquées témoigne d'une succession de phases d'accrétion temporaire et d'érosion différenciée, typique des environnements littoraux soumis à une forte variabilité hydrodynamique. À ces facteurs naturels s'ajoutent les pressions anthropiques, notamment l'urbanisation croissante et l'exploitation des ressources naturelles, qui contribuent à la dégradation des formations végétales protectrices, en particulier les mangroves, accentuant ainsi la vulnérabilité et l'instabilité du trait de côte.

Le profil topographique P9, localisé à Toubacouta, présente une morphologie globalement plus homogène, avec des variations altitudinales moins abruptes et une continuité topographique plus marquée sur de longues distances. Cette configuration témoigne d'un équilibre relatif entre les processus d'érosion et de sédimentation. Les secteurs de plus forte altitude, relativement stables, peuvent être associés à la présence d'une couverture végétale dense et à des formations sédimentaires plus consolidées, conférant une meilleure résistance à l'érosion. Néanmoins, certaines ruptures altitudinales localisées témoignent de zones de fragilité, étroitement liées à la présence de chenaux de marée et aux crues périodiques caractéristiques des milieux estuariens du delta du Saloum. L'évolution du trait de côte dans ce secteur demeure fortement influencée par l'élévation du niveau marin et par la variabilité hydrologique saisonnière, rendant ces espaces particulièrement sensibles aux effets du changement climatique à long terme.

De manière générale, la dynamique du littoral de la Petite-Côte sénégalaise résulte de l'interaction complexe entre les caractéristiques géomorphologiques, les forçages hydrodynamiques et les effets de la variabilité et du changement climatique, qui constituent les principaux facteurs naturels de l'évolution côtière. Ces processus sont toutefois amplifiés par les activités anthropiques, dont l'intensification perturbe les équilibres morphosédimentaires et accroît la vulnérabilité des systèmes littoraux.

1.2. Facteurs anthropiques

À l'instar de nombreux littoraux caractérisés par des dynamiques morphosédimentaires complexes, la Petite-Côte sénégalaise, s'étendant de Saly-Portudal jusqu'au delta du Saloum,

subit des mutations significatives sous l'effet d'une pression anthropique croissante. Cette frange littorale se distingue par une forte littoralisation, définie comme la concentration des populations, des infrastructures et des activités économiques dans la zone côtière (Paskoff, 2004). Cette densification spatiale, associée à une intensification des activités socio-économiques, perturbe profondément le fonctionnement naturel des systèmes côtiers et compromet l'équilibre écologique des milieux littoraux.

Parmi les principaux facteurs anthropiques responsables des déséquilibres morphodynamiques figurent l'occupation non planifiée du domaine public maritime, l'extraction incontrôlée du sable à des fins de construction, la multiplication d'ouvrages côtiers, notamment perpendiculaires au rivage (épis et digues), ainsi que la modification des régimes naturels de transport sédimentaire par l'artificialisation ou la fermeture de chenaux d'écoulement (Giardino *et al.*, 2018). Ces interventions altèrent les processus naturels de recharge sédimentaire et perturbent la circulation littorale, aggravant ainsi les phénomènes d'érosion côtière.

Ces pressions locales sont par ailleurs accentuées par des facteurs globaux, en particulier l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique, qui constitue une menace majeure pour les zones côtières basses d'Afrique de l'Ouest (Nicholls et Cazenave, 2010). Cette élévation, directement liée à la dilatation thermique des océans et à la fonte des glaces continentales, augmente les risques d'inondation, de salinisation des sols et d'érosion accrue, renforçant la vulnérabilité des systèmes côtiers.

Dans ce contexte, une analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol, réalisée à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG), apparaît indispensable pour quantifier l'expansion des zones d'habitat et évaluer l'impact des activités humaines sur l'équilibre des écosystèmes littoraux. Cette approche permet de cartographier les zones les plus exposées à l'anthropisation et de suivre l'évolution des pressions sur le littoral au fil du temps.

Parallèlement, l'étude de la perception sociale et environnementale des populations riveraines constitue un outil heuristique essentiel pour comprendre les dynamiques côtières. Sur la Petite-Côte sénégalaise, de Saly-Portudal à Toubacouta, en passant par Joal, Palmarin et Niodior, les enquêtes auprès des communautés locales révèlent que les facteurs anthropiques sont largement perçus comme les principaux déterminants de l'érosion côtière. Le graphique ci-après illustre, en pourcentages, les causes identifiées par les riverains comme contribuant à la déstabilisation actuelle des systèmes côtiers.

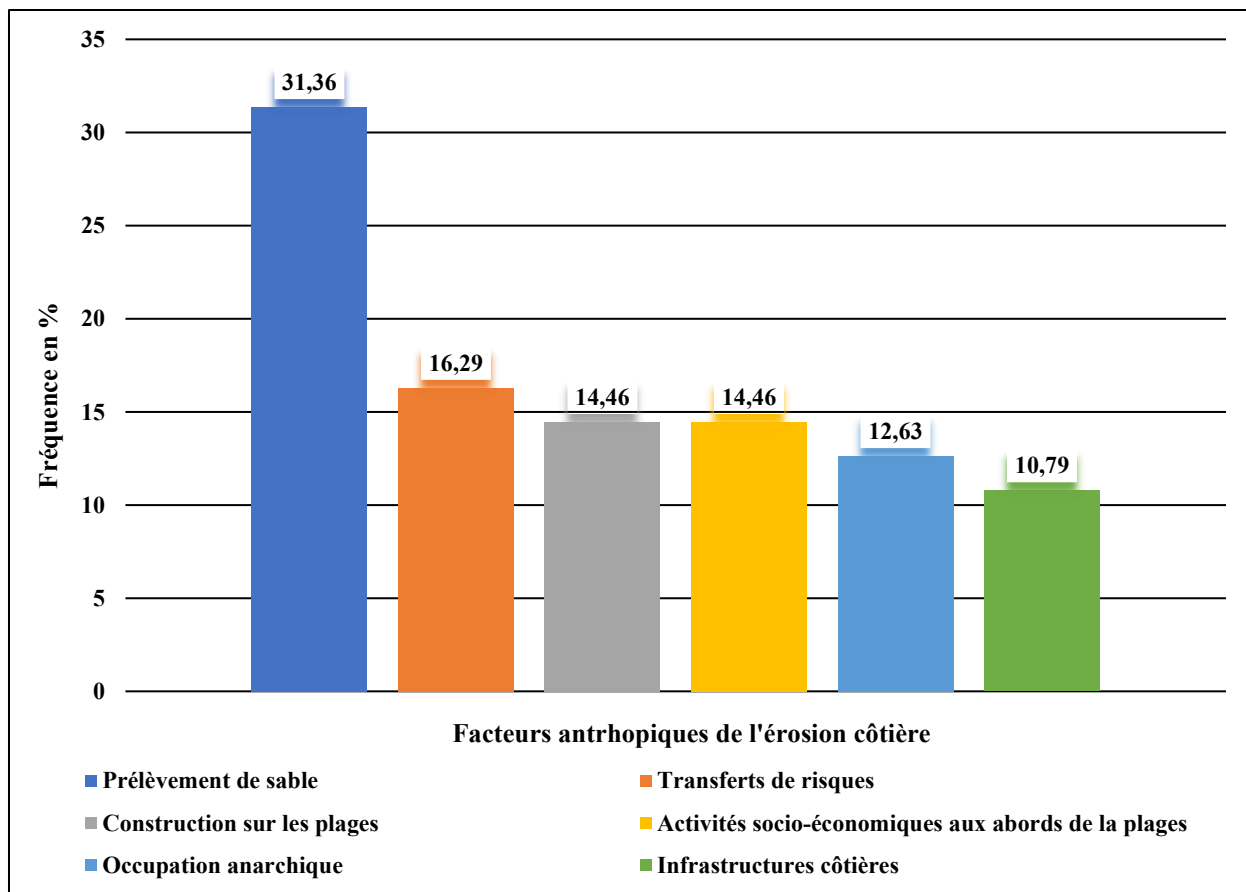


Figure 43 : Les facteurs anthropiques qui influencent la dynamique du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum selon la population (données d'enquêtes, 2025).

1.2.1 Littoralisation de la Petite-Côte sénégalaise

L'anthropisation croissante du littoral de la Petite-Côte sénégalaise se traduit par une intensification de la pression foncière, alimentée par une urbanisation littorale souvent désorganisée. Cette dynamique se manifeste notamment par une occupation non réglementée du domaine public maritime, avec des constructions érigées sans respect des normes relatives au recul du trait de côte et au zonage de vulnérabilité (Paskoff, 2004 ; Diop *et al.*, 2018).

Parmi les formes les plus problématiques de cette urbanisation, les infrastructures perpendiculaires à la ligne de rivage, telles que digues, épis ou jetées, perturbent le transit sédimentaire littoral. Si elles sont conçues pour protéger les infrastructures, ces structures artificialisent le littoral et modifient la direction et l'intensité de la dérive littorale, entraînant une accumulation de sédiments en amont et un déficit en aval. Ce processus engendre une érosion différentielle des plages et compromet la résilience physique des côtes, en particulier dans les secteurs urbanisés (Paskoff, 1993).

La forte littoralisation observée sur la Petite-Côte résulte de l'attrait économique et résidentiel des zones côtières, où se concentrent activités touristiques, pêche et commerce. Cette dynamique se traduit par une croissance rapide des surfaces bâties, clairement identifiable à travers les cartes d'occupation du sol et les données de télédétection (cf. carte 7). L'artificialisation du littoral réduit la capacité naturelle des écosystèmes côtiers à absorber les forçages marins, notamment les vagues de retour et l'élévation du niveau marin, accentuant ainsi la vulnérabilité du trait de côte (Luijendijk *et al.*, 2018).

Dans ce contexte, une approche intégrée combinant l'analyse de l'occupation du sol, la télédétection et l'étude des dynamiques d'aménagement urbain apparaît indispensable pour évaluer les interactions entre pressions anthropiques et évolution du trait de côte, et pour proposer des mesures adaptées de gestion et de protection des littoraux.

1.2.1.1. Croissance continue de la population côtière

La dynamique de littoralisation observée sur la Petite-Côte sénégalaise s'inscrit dans un phénomène global de concentration humaine et d'activités économiques dans les zones côtières, directement corrélé à la croissance démographique rapide. Les données disponibles indiquent une augmentation continue et significative de la population dans les communes littorales entre 2002 et 2023, traduisant une attractivité soutenue de ces espaces pour l'habitat et les activités économiques. Cette pression démographique génère une demande accrue en logements, infrastructures touristiques, équipements et services, exerçant une pression foncière intense sur les espaces côtiers et perturbant les équilibres écologiques locaux.

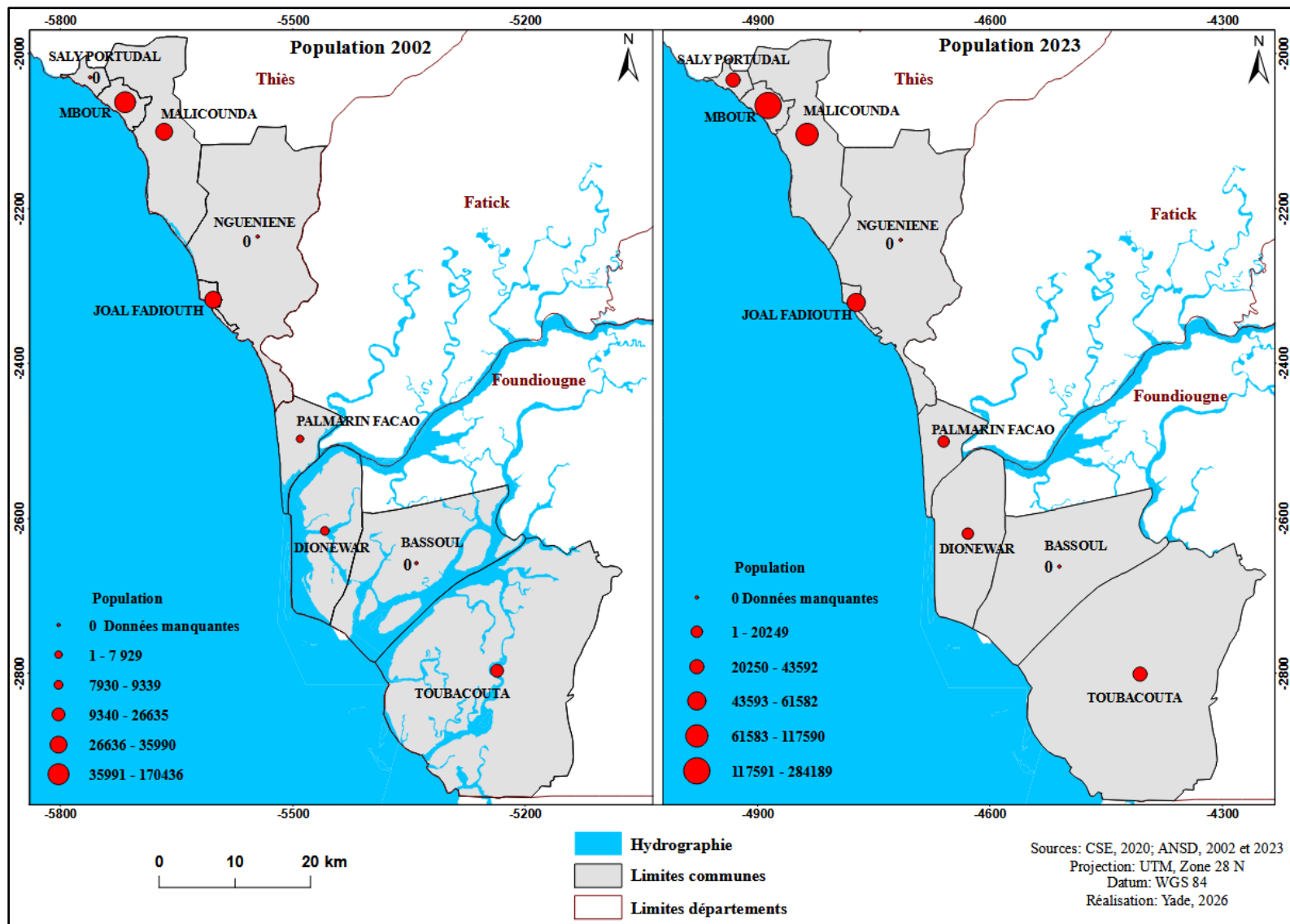
La croissance de la population agit comme un catalyseur de la transformation des usages du sol, favorisant une urbanisation accélérée et souvent désordonnée du front littoral (Neumann *et al.*, 2015). Les milieux naturels précédemment occupés par les dunes, mangroves, plages et tannes sont progressivement convertis en zones bâties, ce qui altère les fonctions écologiques fondamentales des écosystèmes côtiers, notamment la régulation hydro-sédimentaire, la protection contre les aléas climatiques et le maintien de la biodiversité (UNEP, 2006 ; Diop *et al.*, 2014).

Par ailleurs, cette urbanisation croissante engendre des conflits d'usage du littoral, liés à la concurrence entre activités traditionnelles (pêche, agriculture, exploitation des ressources naturelles) et usages modernes (tourisme, immobilier résidentiel et commercial). Cette situation favorise la surexploitation des côtes et une artificialisation accrue du littoral, amplifiant leur

vulnérabilité face aux processus d'érosion, à la salinisation des sols et aux risques de submersion marine (Paskoff, 1998 ; WACA, 2019).

Ainsi, la croissance démographique, conjuguée à une urbanisation mal planifiée, constitue l'un des principaux facteurs de déséquilibre des écosystèmes côtiers de la Petite-Côte au delta du Saloum. Elle souligne l'urgence de développer des politiques d'aménagement intégrées et durables, capables de concilier dynamiques humaines et préservation des milieux naturels.

La carte ci-après illustre l'évolution différenciée mais globalement ascendante de la population dans les principales communes littorales de la Petite-Côte aux îles du Saloum entre 2002 et 2023. Bien que cette croissance soit hétérogène selon les localités, elle témoigne d'une tendance lourde à la littoralisation, contribuant directement à la reconfiguration spatiale et fonctionnelle du littoral.



Carte 7: Évolution de la population des communes de la zone d'étude entre 2002 et 2023

L'analyse de carte de l'évolution de la population montre qu'entre 2002 et 2023, les communes de la Petite-Côte aux îles du Saloum ont connu des évolutions démographiques différenciées, marquées par une tendance générale à la hausse. La carte comparative met en évidence cette dynamique par des cercles proportionnels à la population dans chaque commune.

La commune de Mbour, principal pôle urbain de la zone, enregistre la plus forte croissance, avec sa population passant de 170 436 habitants en 2002 à 284 189 en 2023. Cette progression s'explique par l'attractivité économique de la ville, portée par le commerce, le tourisme et les flux migratoires internes. L'extension rapide du tissu urbain vers la frange littorale entraîne une occupation non réglementée du domaine maritime et accentue les risques liés à l'érosion côtière (Paskoff, 1998).

Malicounda, intégrée à la dynamique périurbaine de Mbour, connaît également une augmentation significative, passant de 35 990 habitants en 2002 à 117 590 en 2023. Cette évolution traduit une mutation des usages des espaces littoraux et périurbains, qui se traduisent par une artificialisation croissante du territoire et des aménagements perturbant le transit sédimentaire naturel (Paskoff, 1993 ; Anthony *et al.*, 2015).

Pour Saly Portudal, les données de 2002 sont absentes, car la commune n'était pas encore créée à cette date. Néanmoins, le cercle proportionnel pour 2023 montre une population de 41 811 habitants, reflétant la forte attractivité touristique et résidentielle de la station. Cette croissance, concentrée sur le littoral, accentue la pression sur les plages, lagunes et mangroves, augmentant la vulnérabilité côtière (WACA/World Bank, 2019).

Les communes de Joal-Fadiouth, Palmarin-Facao, Dionewar et Toubacouta affichent une croissance plus modérée mais notable. Historiquement organisées autour de l'agriculture et de la pêche, ces localités connaissent aujourd'hui une mutation progressive de l'occupation du littoral, sous l'effet de la croissance démographique, du tourisme et des aménagements souvent mal planifiés. La pression anthropique croissante compromet la stabilité des systèmes côtiers traditionnels et la résilience des écosystèmes, en particulier les mangroves (Diop, 1990 ; FAO, 2007).

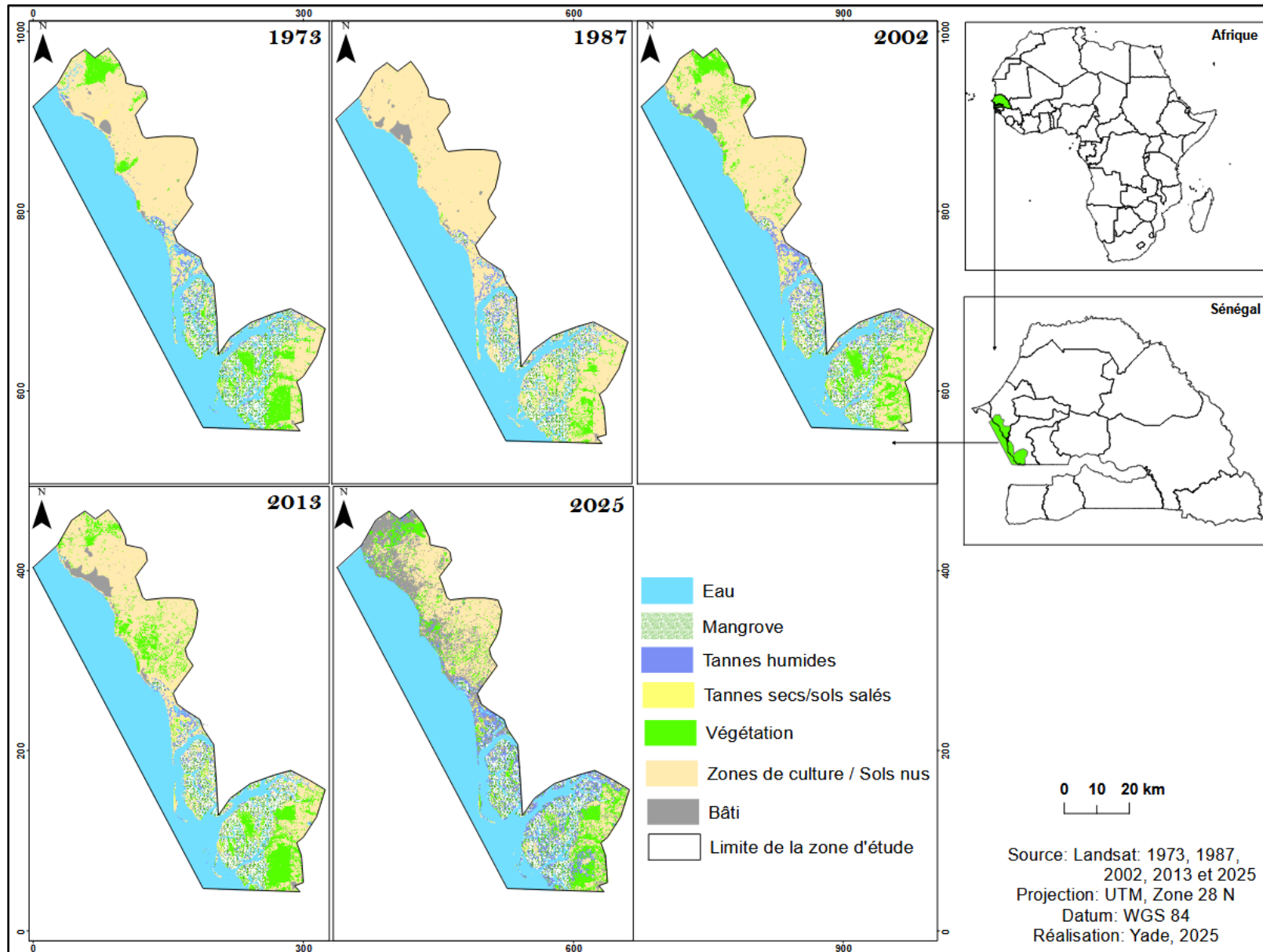
En conclusion, la carte révèle une concentration des populations sur le littoral, traduisant un processus de littoralisation accentué par l'urbanisation et le tourisme. Bien que vecteur de développement économique, ce phénomène contribue à la fragilisation des écosystèmes et à l'augmentation des risques d'érosion côtière, renforçant l'importance d'une planification intégrée du territoire.

1.2.1.2. Évolution du bâti sur la frange littorale de la zone d'étude

Le littoral sénégalais, en particulier la zone comprise entre la Petite-Côte et le delta du Saloum, est caractérisé par une dynamique d'urbanisation rapide, traduisant une pression anthropique croissante sur un espace littoral fragile. Cette expansion spatiale des surfaces bâties est étroitement corrélée à l'augmentation démographique de la bande côtière, qui entraîne une demande accrue en logements, infrastructures de base et équipements liés aux activités socio-économiques, notamment les hôtels, campements touristiques, quais de pêche et marchés littoraux.

Cette urbanisation accélérée, souvent non planifiée, conduit à une artificialisation progressive des zones côtières, perturbant les équilibres morphodynamiques et renforçant la vulnérabilité du littoral face aux processus d'érosion marine. L'extension du bâti à proximité immédiate du trait de côte limite les marges de mobilité naturelle du littoral et favorise la rigidification des interfaces terre-mer, réduisant la capacité du système côtier à absorber les forçages hydrodynamiques et les variations sédimentaires.

La carte 8 illustre de manière diachronique, sur la période 1973-2025, l'évolution de l'occupation du sol sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, mettant en évidence des mutations spatiales significatives et la transformation progressive des milieux naturels en espaces artificialisés au cours des cinq dernières décennies.



Carte 8 : Évolution de l'occupation des sols sur la Petite-Côte au delta du Saloum de 1973 à 2025

L'analyse diachronique de l'occupation du sol sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, entre 1973 et 2025, révèle une dynamique d'urbanisation soutenue, particulièrement marquée dans la partie nord de la zone d'étude, correspondant aux communes de Saly-Portudal, Mbour et leurs environs. Cette urbanisation, initialement concentrée, s'est progressivement étalée de manière diffuse et linéaire le long de la frange littorale. Au cours de cette période, on observe une intensification significative de l'occupation anthropique de l'espace, traduite par l'expansion des surfaces bâties au détriment des milieux naturels tels que la végétation, les zones agricoles et les sols nus. Cette artificialisation croissante, souvent non planifiée, constitue un facteur majeur de perturbation de l'équilibre morphodynamique du littoral.

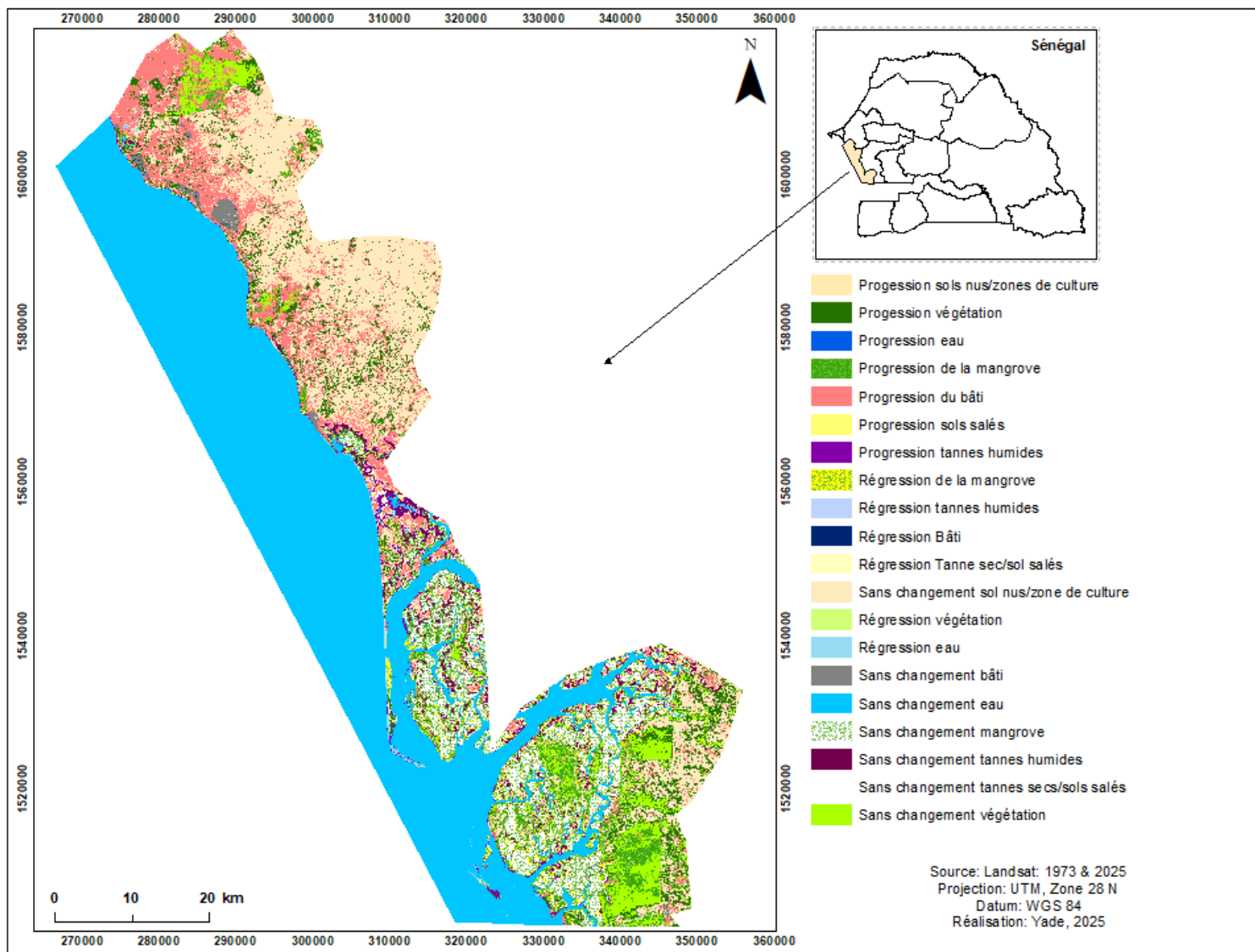
Parallèlement, la carte diachronique met en évidence une régression progressive des zones sableuses et des plages, particulièrement entre 2002 et 2025. Cette perte d'espace littoral résulte de la combinaison de plusieurs facteurs : l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des houles et tempêtes, ainsi que l'occupation physique des marges côtières par des infrastructures rigides. L'empiètement du bâti sur la plage entrave le transit sédimentaire naturel, concentre l'énergie des vagues et amplifie les processus d'érosion, entraînant un recul du trait de côte particulièrement marqué dans les zones urbanisées. Cette situation traduit une pression anthropique excédant les capacités naturelles de résilience du milieu.

La dynamique végétale littorale a également subi une régression notable. La couverture végétale, relativement étendue dans les années 1970 et 1980, a été progressivement réduite par l'extension urbaine et la conversion des espaces naturels en zones agricoles ou sols nus. La disparition de cette végétation, qui joue un rôle crucial dans la stabilisation des cordons littoraux et la filtration biologique, accentue l'érosion et fragilise les écosystèmes côtiers, notamment les mangroves et les tannes humides, qui constituent des zones tampons essentielles entre la mer et l'arrière-pays. Cette régression végétale entraîne également une perte significative de services écosystémiques, en termes de régulation hydro-sédimentaire et de biodiversité.

En synthèse, l'évolution de l'occupation du sol met en évidence une intensification des pressions anthropiques sur le littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum, avec des implications directes sur la dynamique du trait de côte. La croissance rapide et non maîtrisée du bâti, combinée à la régression des plages et à la disparition progressive de la végétation littorale, déséquilibre les processus naturels du linéaire côtier. Ce déséquilibre augmente la vulnérabilité

des zones urbanisées face aux aléas marins, tout en compromettant les fonctions écologiques et les potentialités socio-économiques du littoral.

La carte des changements d'occupation du sol entre 1973 et 2025 illustre de manière synthétique cette expansion continue du bâti et la transformation progressive des milieux naturels.



Carte 9 : Changements d'occupation des sols sur la période 1973-2025

La carte diachronique des changements d'occupation du sol sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, pour la période 1973-2025, révèle une dynamique territoriale caractérisée par une forte expansion des surfaces bâties. Cette croissance urbaine est particulièrement marquée dans la partie nord de la zone d'étude, notamment autour de la station balnéaire de Saly Portudal, de la ville de Mbour et de leurs périphéries.

Ce phénomène résulte de la combinaison de plusieurs facteurs : la pression démographique croissante, le développement touristique, l'extension des infrastructures hôtelières et résidentielles, ainsi que l'urbanisation spontanée. L'expansion du bâti se fait majoritairement au détriment des zones agricoles, des sols nus et des espaces végétalisés (figure 45), traduisant une artificialisation progressive du front littoral. Cette transformation contribue à un déséquilibre écologique du littoral, en modifiant les processus morphodynamiques naturels et en augmentant la vulnérabilité du système côtier face aux aléas marins.

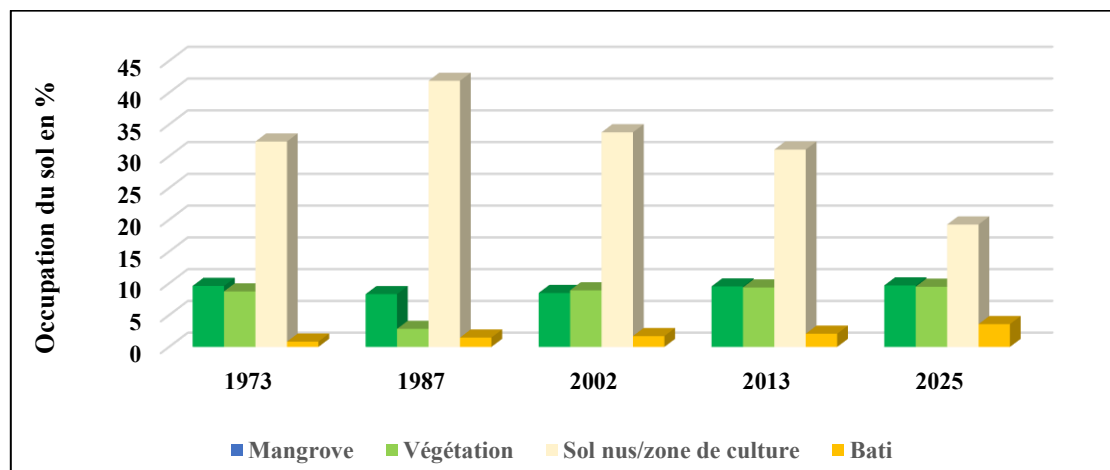


Figure 44: Évolution de l'occupation des sols du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum sur la période 1973-2025 (source : Image Landsat)

L'analyse de la figure ci-dessus, illustrant l'évolution de l'occupation du sol sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, pour la période 1973-2025, met en évidence une dynamique caractérisée par une croissance continue du bâti. La part relative du bâti passe d'environ 1 % en 1973 à près de 5 % en 2025. Bien que modeste en valeur absolue, cette augmentation traduit une urbanisation progressive du littoral, reflétant la littoralisation des activités économiques et démographiques et la pression foncière croissante pour les infrastructures touristiques, résidentielles et commerciales. Cette dynamique est particulièrement accentuée dans les zones de forte attractivité, telles que Saly et Mbour, où la densité humaine sur le littoral est en constante augmentation.

Cette expansion du bâti s'effectue essentiellement au détriment des sols nus et des zones cultivées, dont la proportion diminue sensiblement à partir de 2002, passant de plus de 40 % à moins de 30 % en 2025. La conversion de ces espaces ouverts et agricoles en zones artificialisées traduit une transformation profonde des paysages littoraux, perturbant les équilibres écologiques préexistants. En remplaçant les zones tampons naturelles et les terres cultivées par des infrastructures, cette artificialisation renforce la vulnérabilité du littoral face à l'érosion marine et aux risques liés à la submersion. Elle contribue également à la fragmentation des écosystèmes et à la diminution de la résilience du socio-écosystème côtier.

Ainsi, la figure corrobore les tendances observées dans les analyses cartographiques précédentes et souligne l'urgence de mettre en œuvre une gestion intégrée, rationnelle et durable de l'espace littoral afin de concilier développement économique et préservation des fonctions écologiques.

1.2.2. Extraction du sable marin

L'extraction de sable représente un enjeu majeur de dégradation sur les plages de la Petite-Côte aux îles du Saloum. Lors des prospections de terrain, des excavations sableuses récentes ont été observées, accompagnées de traces de pneumatiques attestant l'utilisation de moyens mécaniques pour le prélèvement. La photographie présentée ci-dessous illustre ces interventions anthropiques, dont les marques sur les cordons dunaires témoignent de la fréquence et de l'intensité de cette activité. Ces pratiques contribuent à la fragilisation du littoral, en perturbant les équilibres sédimentaires et en accentuant l'érosion côtière.

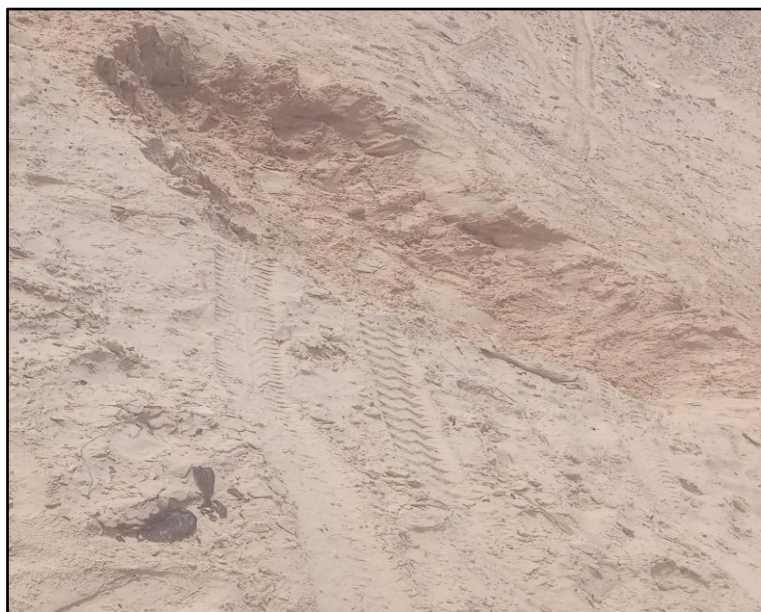


Photo 1: Traces de prélèvement de sable marin à Béttenty

Le prélèvement de sable, généralement destiné à la construction ou à l'aménagement, constitue une pression directe sur le système morpho-sédimentaire littoral, déjà fragilisé par l'érosion marine, les effets du changement climatique et l'urbanisation rapide. La Petite-Côte sénégalaise figure parmi les zones les plus exposées au recul du trait de côte, en partie en raison de l'exploitation non réglementée du sable littoral.

L'extraction de sable sur les plages et les cordons dunaires perturbe l'équilibre naturel de la dynamique sédimentaire. Les dunes jouent un rôle tampon essentiel entre la mer et l'arrière-pays : elles dissipent l'énergie des vagues et constituent des réservoirs de sédiments pouvant être réinjectés dans le système en cas de tempêtes. La destruction de ces formations par prélèvement compromet la résilience naturelle du littoral face aux aléas climatiques et accentue l'érosion côtière. Selon le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), l'exploitation du sable est l'une des activités extractives ayant le plus fort impact environnemental, bien que sa régulation reste souvent limitée dans les politiques publiques.

Les entretiens menés sur le terrain auprès des populations locales mettent en évidence un compromis difficile entre besoins économiques immédiats et conscience des implications environnementales. Les exploitants informels, majoritairement issus des communautés côtières, invoquent l'absence d'alternatives économiques viables et la demande soutenue en matériaux de construction. Ces constats soulignent l'importance de la gouvernance environnementale et de la justice spatiale, deux axes conceptuels centraux dans la géographie critique du développement.

Du point de vue scientifique, ces observations soulignent les limites des mécanismes de régulation existants et plaident pour une co-construction des stratégies de protection du littoral avec les communautés locales. La réduction durable du prélèvement illégal de sable ne peut être envisagée sans l'intégration de solutions alternatives, conciliant viabilité économique et préservation écologique.

1.2.3. Constructions sur les plages

La concentration croissante des populations humaines le long des littoraux s'explique largement par la disponibilité des ressources naturelles et économiques qu'ils offrent. Sur la Petite-Côte sénégalaise, cette attractivité se traduit par un phénomène de littoralisation marqué, souvent non encadré par des politiques d'aménagement efficaces. Cette dynamique favorise une occupation rapide et informelle des plages, motivée par l'accès aux services écosystémiques du littoral, notamment la pêche, l'agriculture, le tourisme, les activités artisanales et l'habitat.

La multiplication des constructions sur la bande littorale, qu'il s'agisse d'habitations, d'infrastructures touristiques ou d'établissements commerciaux ; s'accompagne systématiquement de la destruction des écosystèmes côtiers protecteurs, en particulier la végétation (filaos, herbacées halophiles) et les cordons dunaires. Ces éléments jouent un rôle crucial dans la stabilisation naturelle des plages : la végétation limite l'érosion éolienne et hydrique, tandis que les dunes constituent à la fois des réservoirs sédimentaires et des barrières naturelles contre l'énergie des vagues.

La suppression ou l'artificialisation de ces structures fragilise l'équilibre morphodynamique du littoral. Comme le souligne Paskoff (1998), les différents compartiments d'une plage (estran, haut de plage et dunes) forment un système interdépendant. Toute intervention anthropique perturbant l'un de ces compartiments, et notamment la réduction de l'estran par l'implantation de constructions, compromet la capacité naturelle de dissipation de l'énergie des vagues et expose les plages à une érosion accélérée.

Les enquêtes de terrain menées indiquent que 14,46 % des répondants considèrent les constructions sur les plages comme l'un des principaux facteurs de perturbation de la dynamique côtière. Ce résultat corrobore l'idée selon laquelle l'artificialisation du trait de côte constitue un facteur majeur d'instabilité environnementale et souligne la nécessité d'une régulation stricte et adaptée de l'usage des zones littorales.



Photo 2: Une centrale solaire construite sur la plage de Bétenty (Image Google earth, 2025)

1.2.4. Les ouvrages de protection et leurs réponses paradoxales à l'érosion côtière

La concentration croissante des populations le long du littoral s'accompagne d'une implantation progressive d'infrastructures majeures, dont plusieurs sont orientées perpendiculairement au flux sédimentaire naturel, perturbant ainsi les mécanismes d'alimentation et de redistribution des sédiments côtiers. Parmi ces aménagements, les ports de pêche, à l'instar de celui de Mbour construit en 1993, ont été identifiés par des acteurs locaux, notamment le directeur d'un hôtel à Saly et le directeur de la SAPCO, comme l'un des principaux facteurs ayant contribué à l'accélération de l'érosion côtière à Saly et Mbour dans les années 2000.

Outre les équipements portuaires, d'autres infrastructures, telles que des ouvrages publics (ex. l'ancienne Case des Tout-Petits de Saly Coulang), des digues, des épis et divers dispositifs de protection côtière, ont été implantés pour sécuriser les zones habitées ou valoriser les espaces urbains et touristiques. Cependant, ces ouvrages influent de manière inattendue sur le littoral en modifiant la dynamique hydro-sédimentaire, engendrant une déstructuration du fonctionnement morphodynamique naturel. Ils accentuent les déséquilibres entre zones en engraissement et zones en déficit sédimentaire, entraînant une érosion accrue dans les secteurs non protégés.

Le littoral ouest-africain, y compris celui du Sénégal, est caractérisé par un transit sédimentaire latéral orienté du nord vers le sud, sous l'effet combiné des courants côtiers et des houles dominantes (Giardino *et al.*, 2018 ; Anthony, 2015). Dans ce contexte, les ouvrages perpendiculaires au rivage constituent des barrières physiques qui interrompent la continuité du transport sédimentaire. Ils induisent une accumulation des sédiments en amont (nord) et un déficit en aval (sud), générant ainsi des zones d'érosion sévère.

De la Petite-Côte aux îles du Saloum, ces perturbations sont particulièrement perceptibles à Saly Portudal, Mbour, Pointe Sarène, Joal-Fadiouth et Djiffer, où la construction de ports ou d'ouvrages de protection a coïncidé avec une accélération des processus d'érosion côtière. L'installation du port de pêche de Saly et la mise en place de structures défensives récentes, bien qu'ayant permis de protéger certaines infrastructures, ont également contribué à la déstabilisation de la dynamique sédimentaire à l'échelle régionale, en entravant le transit sédimentaire qui se fait du nord au sud sur le littoral sénégalais.

Ainsi, les interventions humaines sur le littoral, en rompant la continuité des flux sédimentaires, constituent des facteurs déclencheurs ou aggravants de l'érosion, particulièrement dans un contexte de forte pression foncière et d'urbanisation non planifiée. Cette situation souligne la

nécessité d'une approche intégrée de gestion côtière, prenant en compte la continuité sédimentaire et les interactions entre aménagements anthropiques et processus naturels.



Planche photographique 1 : Ouvrages de protection sur la Petite-Côte sénégalaise (A : Saly Portudal ; B : Pointe Sarène ; C : Djiffer ; D : Bétenty)

1.2.5. Dégradation des écosystèmes de mangrove, protecteur naturel contre l'érosion côtière

La mangrove constitue un rempart naturel crucial dans la protection contre l'érosion côtière, en jouant notamment le rôle de zone tampon entre les milieux marins et continentaux. Sur la côte de Joal-Fadiouth ainsi que dans les îles du delta du Saloum, notamment Bétenty, Dionewar et Niodior, les écosystèmes de mangrove sont particulièrement développés et contribuent de manière significative à la stabilité du littoral. La structure racinaire dense des palétuviers permet de fixer les sédiments meubles caractéristiques de cette frange littorale et de limiter l'action érosive des vagues, des houles et des vents (Alongi, 2008).

Ces formations végétales atténuent l'énergie des agents hydrodynamiques, favorisent la sédimentation et réduisent l'intrusion saline, contribuant ainsi à une diminution notable de la vulnérabilité des côtes. Leur rôle protecteur est d'autant plus stratégique que la Petite-Côte

sénégalaise est soumise à des dynamiques érosives renforcées par les pressions anthropiques, notamment l'urbanisation, le prélèvement de sable et la construction d'infrastructures littorales. Cependant, malgré leurs fonctions écologiques et géomorphologiques déterminantes, les mangroves de cette région connaissent une dégradation continue, principalement imputable aux activités humaines. La coupe abusive de bois, à des fins de chauffage ou de construction, ainsi que la collecte non durable de ressources halieutiques telles que les huîtres, constituent des pressions majeures sur cet écosystème (Diop, 1993 ; FAO, 2021). Ces pratiques, souvent motivées par la précarité socio-économique des populations locales, compromettent la résilience naturelle du littoral et accélèrent les déséquilibres morphodynamiques.

Ainsi, la conservation et la gestion durable des mangroves apparaissent comme des impératifs à la fois écologiques et géomorphologiques, constituant une stratégie essentielle de lutte contre l'érosion côtière de la Petite-Côte aux îles du Saloum.

1.2.6. Interventions humaines sur le régime hydrologique et le transfert de risques

L'intervention humaine sur le régime hydro-sédimentaire constitue un facteur déterminant de perturbation des équilibres morphodynamiques littoraux. Sur la Petite-Côte sénégalaise, de nombreuses actions anthropiques ont modifié les flux sédimentaires, contribuant à l'altération de la dynamique côtière. Parmi les exemples les plus significatifs, on peut citer la fermeture artificielle de la lagune de Somone, laquelle a interrompu les échanges hydriques et sédimentaires entre le système lagunaire et le milieu marin, perturbant ainsi le fonctionnement naturel de cette zone de transition. De même, la fermeture et le remblaiement du cours d'eau de Golf, à des fins de construction, ont été identifiés par des acteurs locaux, notamment le directeur de la SAPCO, comme ayant contribué de manière significative à l'accélération de l'érosion côtière dans la commune de Mbour. Ces interventions, en obstruant le drainage naturel et en perturbant la dynamique hydro-sédimentaire, ont fragilisé la stabilité du littoral, déjà soumis à de fortes pressions naturelles et anthropiques.

Par ailleurs, les opérations de dragage intensif menées sur la plage de Saly Portudal, destinées à nourrir artificiellement les plages et à limiter le recul du trait de côte, bien que motivées par des objectifs touristiques et économiques, induisent des déséquilibres dans le bilan sédimentaire régional. Ces interventions modifient les profils de plage et peuvent entraîner un transfert de l'érosion vers des zones adjacentes, accentuant la vulnérabilité des segments côtiers non protégés.

L'extraction de sable marin au large de la Pointe Sarène, utilisée pour le remblaiement des plages de Saly Portudal, soulève également d'importantes préoccupations. Cette pratique altère les réserves naturelles de sédiments et perturbe les courants côtiers responsables du transport latéral du sable, compromettant l'apport sédimentaire aux secteurs voisins. Les enquêtes de terrain révèlent un fort sentiment d'injustice parmi les populations locales, qui perçoivent cette opération comme une forme de transfert inéquitable des ressources : les sédiments sont extraits de zones résidentielles pour consolider les plages touristiques de Saly Portudal. Cette situation illustre les tensions entre priorités économiques et sécurité des communautés littorales, mettant en évidence les limites de la gouvernance côtière locale.

Ces interventions, bien que motivées par des finalités diverses, partagent un impact commun sur les dynamiques littorales, contribuant à l'accélération de l'érosion ou à l'engraissement localisé, et entraînant une reconfiguration progressive mais significative de la morphologie de la Petite-Côte. Le phénomène de transfert de risque, fréquemment observé sur les littoraux non protégés, se manifeste de manière nette sur ce littoral : les zones situées en aval des aménagements subissent une intensification de l'érosion. Ainsi, les secteurs au sud de Saly Portudal, exposés aux mêmes conditions océaniques, connaissent une aggravation du recul du trait de côte consécutive aux dispositifs de protection installés sur les plages touristiques. Ce constat a été corroboré par les enquêtes menées auprès des habitants des quartiers de Golf et Teffess à Mbour.

Une logique similaire est observable à Bétenty, dans le delta du Saloum, où les segments littoraux dépourvus de protections présentent une érosion accentuée, tandis que les zones habitées bénéficiant d'un mur de protection connaissent un ralentissement notable de la régression côtière. Ces observations illustrent la complexité des interactions entre aménagements anthropiques et dynamiques littorales : les mesures de protection localisées peuvent paradoxalement amplifier la vulnérabilité des zones adjacentes, soulignant les limites des approches fragmentaires en gestion côtière (Michel *et al.*, 2016).

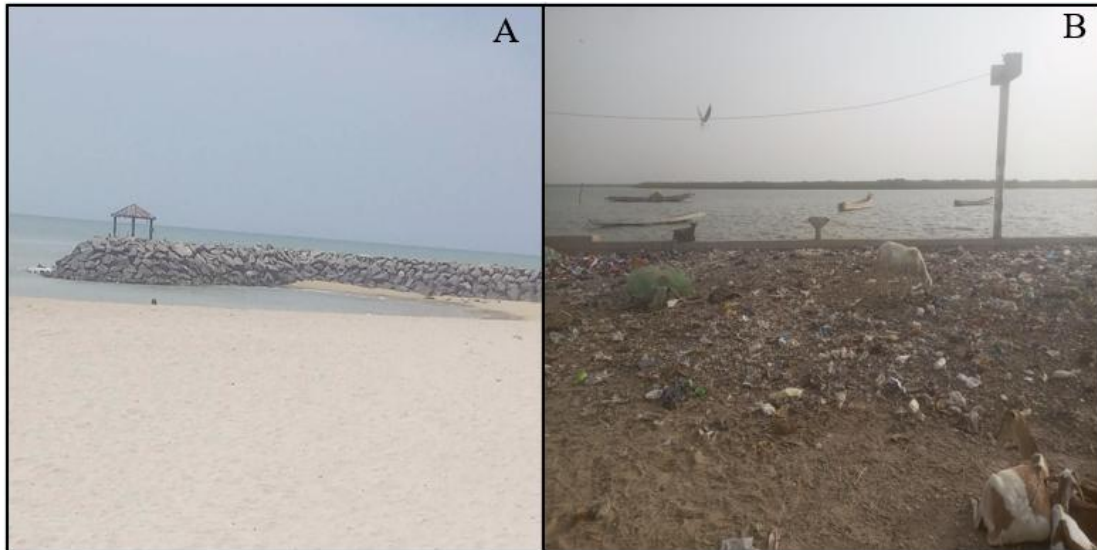


Planche photographique 2: Infrastructures de protection occasionnant le transfert de risque
(A : Saly Portudal ; B : Bétenty) (Yade, Avril 2025)

1.2.7. Exploitation du pétrole, une nouvelle forme de dégradation de la côte sénégalaise

L'exploitation pétrolière, récemment introduite au large des côtes sénégalaises, constitue une nouvelle source de pression anthropique sur les systèmes littoraux, avec des implications potentielles en termes de dégradation environnementale. Dans le contexte spécifique des îles du Saloum, le gisement offshore de Sangomar est perçu par les populations locales comme un facteur susceptible d'accroître l'érosion côtière.

Les enquêtes de terrain ont permis de recueillir les perceptions des habitants concernant l'évolution du trait de côte. À Dionewar, plusieurs riverains ont rapporté une accélération apparente du recul côtier coïncidant avec le début des opérations d'exploitation pétrolière. Ces observations soulèvent des interrogations quant aux effets indirects des infrastructures offshore, tels que les forages, les flux maritimes induits et les dragages associés, sur la dynamique sédimentaire et la stabilité des berges.

Bien que les relations de causalité directe entre l'exploitation pétrolière et l'accélération de l'érosion nécessitent des investigations scientifiques approfondies, ces témoignages reflètent une inquiétude croissante des communautés locales quant aux implications potentielles de cette activité extractive sur les milieux côtiers fragiles du delta du Saloum. Ils mettent en évidence la nécessité de mettre en œuvre un suivi environnemental rigoureux et continu, intégrant la surveillance des flux sédimentaires, l'évolution morphologique du trait de côte et les risques associés aux infrastructures offshore.



Photo 3: Plateforme offshore de Sangomar (ADS services, juin 2024)

La photographie présentée illustre la plateforme offshore de Sangomar, symbole de l'entrée récente du Sénégal dans l'exploitation pétrolière en mer. Implantée au large du delta du Saloum, cette infrastructure lourde s'inscrit dans un environnement marin sensible, caractérisé par des écosystèmes fragiles et une biodiversité élevée, tout en étant étroitement exploité par les communautés locales. Son déploiement marque un tournant dans l'organisation de l'espace maritime national, mais soulève des interrogations importantes concernant ses implications écologiques et socio-économiques sur les zones côtières adjacentes, notamment les îles du Saloum.

Sur le plan environnemental, les enquêtes menées en avril 2025 auprès des populations de Dionewar, Niodior et Béttenty révèlent que 82,4 % des répondants perçoivent une intensification de l'érosion côtière depuis le début des activités pétrolières (figure 46). Bien que cette perception nécessite une validation scientifique, elle témoigne de l'association établie par les habitants entre cette accélération et des modifications du régime hydrodynamique induites par la circulation des navires, les dragages sous-marins et les effets indirects sur le transport sédimentaire littoral. Ces observations sont corroborées par des altérations visibles des berges et l'apparition de nouvelles zones de vulnérabilité morphologique.

Du point de vue socio-économique, l'implantation de la plateforme affecte le secteur de la pêche artisanale, pilier de l'économie insulaire. Les pêcheurs rapportent une réduction de l'accès à certaines zones traditionnellement exploitées, parfois interdites en raison des périmètres de sécurité autour des installations offshore. Ils signalent également une diminution des rendements halieutiques, qu'ils attribuent au bruit, à la pollution lumineuse et aux

perturbations hydrodynamiques générées par les activités extractives. Ces contraintes renforcent un sentiment de marginalisation dans des territoires dont la résilience économique repose largement sur l'exploitation durable des ressources marines.

Ainsi, si l'exploitation pétrolière de Sangomar constitue une opportunité stratégique pour le développement économique national, elle génère localement des tensions entre activités industrielles et durabilité des écosystèmes littoraux. La photographie 3 qui montre la plateforme offshore de Sangomar illustre de manière synthétique ce double enjeu : elle symbolise à la fois le potentiel extractif du territoire maritime sénégalais et les défis associés à la cohabitation entre croissance industrielle et préservation de l'intégrité écologique et socio-économique du littoral.

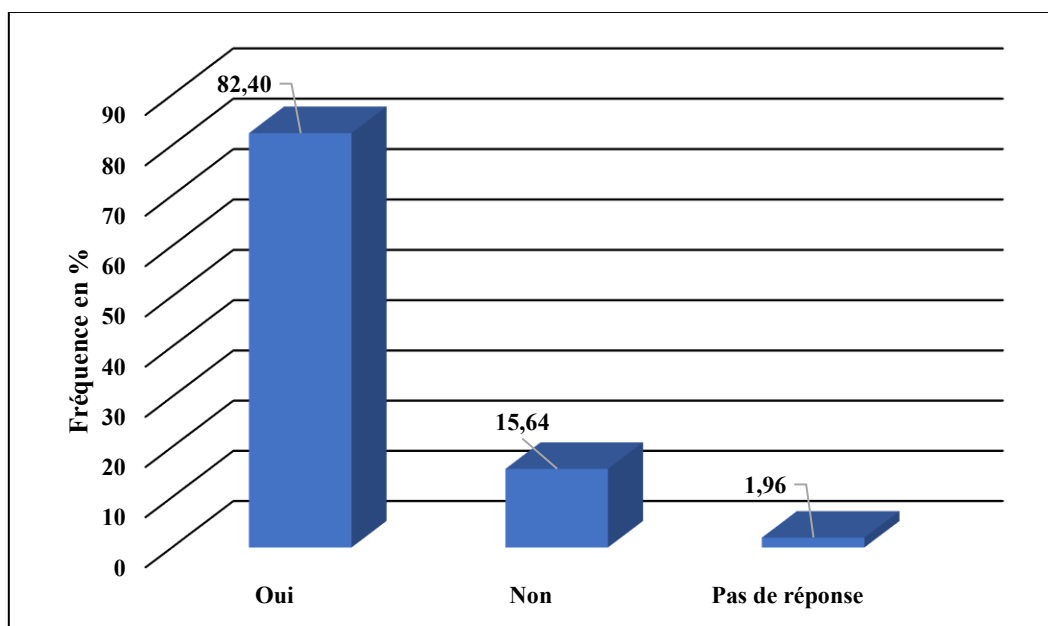


Figure 46 : Perception des populations des îles du Saloum sur l'impact négatif de l'exploitation du Pétrole de Sangomar (données d'enquêtes, Avril 2025)

La figure ci-dessus synthétise les résultats des enquêtes menées en avril 2025 auprès des populations résidant sur les îles du delta du Saloum, portant sur leur perception des impacts environnementaux et socio-économiques de l'exploitation pétrolière offshore de Sangomar. L'analyse des réponses révèle une opinion largement convergente : 82,40 % des répondants estiment que cette activité extractive génère des effets négatifs sur leur territoire.

Cette majorité indique un sentiment accru de vulnérabilité au sein des communautés littorales, qui associent ces effets à plusieurs transformations observées dans leur environnement immédiat. Parmi celles-ci figurent l'accélération de l'érosion côtière, la perturbation des activités de pêche artisanale, la modification des régimes de courants marins et la restriction

d'accès à certaines zones halieutiques. Ces perceptions sont renforcées par la forte dépendance économique des populations locales vis-à-vis des ressources naturelles et par l'interdépendance entre les activités humaines et le milieu marin.

En revanche, 15,64 % des enquêtés ne perçoivent pas d'impact direct, une observation pouvant s'expliquer par leur éloignement spatial par rapport aux sites de forage, un déficit d'informations techniques ou une temporalité limitée d'observation.

Ces résultats confirment que, pour la majorité des habitants, l'exploitation pétrolière offshore constitue un facteur de déséquilibre écologique et socio-territorial. Ils mettent également en évidence l'existence de représentations sociales fortes, révélatrices de la sensibilité des communautés locales aux transformations récentes de leur cadre de vie et de la perception des risques liés aux activités extractives.

2. Caractéristiques granulométriques, leur distribution spatiale de la Petite-Côte aux îles du Saloum et leurs implications sur la dynamique du trait de côte

Cette section présente l'analyse des caractéristiques granulométriques des sédiments littoraux de la Petite-Côte aux îles du Saloum, réalisée sur trois stations représentatives : Mbour, Djiffer et Bétenty. L'objectif est de caractériser la variabilité texturale des dépôts sédimentaires et d'évaluer ses implications sur la dynamique du trait de côte, notamment en termes de stabilité, d'érosion et d'accrétion.

Conformément aux travaux de Levêque (1973), l'analyse granulométrique repose sur l'interprétation des courbes cumulatives et des histogrammes générés à partir du tamisage, permettant de déterminer les paramètres statistiques essentiels décrivant la distribution des sédiments. Les courbes cumulatives sont établies à partir des pourcentages pondéraux cumulés des différentes classes granulométriques définies selon la série de tamis utilisée.

Dans le présent travail, la méthodologie adoptée suit la norme européenne NF EN 12620, qui fournit un cadre technique rigoureux pour la préparation des échantillons, le tamisage et le calcul des paramètres granulométriques. Cette approche standardisée assure la comparabilité des résultats entre les différents sites étudiés et garantit la fiabilité des interprétations portant sur la dynamique littorale.

2.1. Méthodes

La méthodologie utilisée dans cette étude s'appuie sur la norme européenne NF EN 12620+A1, intitulée « Granulats pour béton », qui définit de manière précise les procédures de caractérisation géométrique, physique et chimique des granulats. Bien que cette norme ait été initialement conçue pour les matériaux destinés au béton, elle constitue un référentiel technique fiable et reproductible pour l'analyse granulométrique des sédiments littoraux.

Cette norme s'inscrit dans un ensemble normatif cohérent, comprenant notamment la série EN 932, qui précise les méthodes d'échantillonnage, de tamisage et de détermination des principaux paramètres granulométriques (taille moyenne, tri, asymétrie, kurtosis). L'application rigoureuse de ces prescriptions garantit la qualité méthodologique des mesures et permet une comparabilité fiable des résultats entre les différentes stations étudiées le long de la Petite-Côte sénégalaise, tout en assurant la reproductibilité et la validité scientifique de l'analyse.

2.1.1. Prélèvement et préparation des échantillons

Au total, 36 échantillons de sédiments ont été collectés dans trois localités représentatives de la Petite-Côte sénégalaise aux îles du Saloum : Mbour (nord de la zone d'étude, département de Mbour), Djiffer (centre de la zone, département de Fatick) et Bétenty (sud de la zone, département de Foundiougne) (planche photographique 3). Dans chaque localité, deux sites distants d'environ 100 m ont été sélectionnés afin d'évaluer la variabilité granulométrique, l'homogénéité des dépôts et d'identifier d'éventuels liens génétiques entre les sédiments.

Au sein de chaque site, les prélèvements ont été effectués sur trois séquences morphologiques de la plage : plage immergée, estran et haute plage. Pour chaque séquence, deux horizons de prélèvement ont été définis afin de tenir compte des apports sédimentaires marins et éoliens : 0-20 cm pour la plage immergée et 0-70 cm pour l'estran et la haute plage. Chaque échantillon, d'une masse comprise entre 500 g et 1 kg, a été conditionné dans un sachet plastique scellé et étiqueté, comportant les informations essentielles : coordonnées GPS, date de prélèvement, site et localité.

Les échantillons ont été pré-séchés à l'air libre, puis séchés dans une étuve mécanique conformément aux prescriptions de la norme NF EN 12620, afin d'éliminer toute humidité résiduelle. Une fois séchés, les sédiments ont été homogénéisés et réduits à une masse représentative de 500 g par échantillon, en vue de leur analyse granulométrique par tamisage, permettant la détermination des paramètres caractéristiques de la distribution des grains.



Planche photographique 4: Localités de prélèvement (A) d'échantillons granulométriques (image google earth) ; B : Photo campagne de prélèvement à Djiffer (Avril 2025)

Tableau 5: Répartition des échantillons

Secteurs	Sites	Lieu de prélèvement	Horizon	Nombre d'échantillons par sites
Mbour	2	Plage immergée	0 cm	2
			20 cm	2
		Estran	0 cm	2
			70 cm	2
		Haute plage	0 cm	2
			70 cm	2
Djiffer	2	Plage immergée	0 cm	2
			20 cm	2
		Estran	0 cm	2
			70 cm	2
		Haute plage	0 cm	2
			70 cm	2
Béttenty	2	Plage immergée	0 cm	2
			20 cm	2
		Estran	0 cm	2
			70 cm	2
		Haute plage	0 cm	2
			70 cm	2
Total	6			36

2.1.2. Analyse granulométrique par méthode tamisage

L'analyse granulométrique a été effectuée à l'aide d'une colonne de tamis mécanique, conformément aux prescriptions de la norme européenne NF EN 12620. La série de tamis utilisée respectait l'ordre normalisé suivant : 0,063 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,5 mm, 1 mm,

2 mm et 4 mm. Chaque échantillon, préalablement réduit à une masse représentative de 500 g, a été soumis au tamisage à travers ces sept niveaux. Chaque échantillon a été soumis à une agitation mécanique pendant deux minutes, avec une amplitude de vibration réglée à 3 mm, une fréquence de vibration de 50/60 Hz, et des intervalles réguliers de cinq secondes, conformément aux normes du laboratoire, afin d'assurer une séparation optimale des fractions.

À l'issue du tamisage, la masse retenue sur chaque tamis a été soigneusement mesurée à l'aide d'une balance électronique de haute précision. Les fractions granulométriques obtenues ont été consignées sur une fiche granulométrique standardisée, puis converties en pourcentages pondéraux cumulés. Ces données ont ensuite été utilisées pour la construction de courbes granulométriques cumulatives, représentées en échelle semi-logarithmique et tracées à l'aide du logiciel Origin 2025b. Ces courbes ont permis de caractériser la distribution des tailles de grains et d'évaluer la variabilité texturale des sédiments selon les sites et les séquences morphologiques étudiées.



Planche photographique 5: Appareils utilisés pour l'analyse granulométrique au laboratoire du département de physique de l'UASZ

Après le tamisage, quatre paramètres principaux ont été déterminés afin d'analyser les résultats granulométriques : les diamètres caractéristiques (D_{10} , D_{30} et D_{60}), le coefficient d'uniformité (Cu), le coefficient de courbure (Cc), le module de finesse (MF).

3.1.3. Paramètres granulométriques calculés

Après tamisage, les courbes granulométriques cumulatives ont servi à déterminer les diamètres caractéristiques :

- D_{10} : diamètre effectif correspondant à 10 % de la fraction passée,
- D_{30} : à 30 %,
- D_{60} : à 60 %.

Ces valeurs ont permis le calcul des indices suivants :

- Coefficient d'uniformité (Cu) :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Il indique le degré de tri. Plus Cu est élevé, plus la granulométrie est variable.

- Coefficient de courbure (Cc) :

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Il renseigne sur la régularité de la distribution autour de la médiane

- Module de finesse (MF) :

$$MF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% (0.063 - 0.125 - 0.250 - 0.5 - 1 - 2 - 4 mm)}$$

Il évalue la finesse ou la grossièreté du sédiment. Un module de finesse faible indique un sable fin, un module de finesse élevé un sable grossier.

Tableau 6: Interprétation granulométrique selon la Norme européenne NF NE 12620

Indice	Plage de valeurs	Interprétation selon EN 12620
$Cu < 2$	Uniforme (bien trié)	Distribution homogène
$2 \leq Cu \leq 6$	Modérément trié	Variabilité moyenne
$Cu > 6$	Mal trié (bien gradué)	Forte hétérogénéité
$1 \leq Cc \leq 3$	Courbe régulière	Bonne graduation
$Cc < 1$ ou $Cc > 3$	Courbe irrégulière	Mal gradué
$MF < 2,3$	Sable fin	Texture fine
$2,3 \leq MF \leq 3,1$	Sable moyen	Granulométrie intermédiaire
$MF > 3,1$	Sable grossier	Texture grossière

Source : EN 12620+A1 :2008

3.2. Caractéristiques granulométriques des sédiments et leurs implications sur l'évolution du trait de côte

Les études de Lévêque (1973) et de Komar (1998) mettent en évidence le rôle central des sédiments dans la morphodynamique côtière, leurs caractéristiques contrôlant directement la mobilité des matériaux, la structuration des plages et l'évolution du trait de côte. L'analyse granulométrique constitue un outil clé pour déterminer la distribution des tailles de grains par tamisage, évaluer le tri sédimentaire, examiner la régularité des courbes granulométriques et apprécier la susceptibilité des sédiments au transport par les agents hydrodynamiques et éoliens.

Selon Masselink et Hughes (2003), ces paramètres granulométriques sont essentiels pour caractériser la variabilité spatiale et temporelle des systèmes côtiers, identifier les secteurs vulnérables à l'érosion et anticiper les évolutions morphologiques du littoral. Dans cette perspective, la présente section vise à caractériser les propriétés granulométriques des sédiments prélevés le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte aux îles du Saloum et à discuter de leurs implications sur la dynamique et la stabilité du trait de côte, en intégrant les processus de transport et d'accumulation sédimentaire propres à cette région.

3.2.1. Caractérisation granulométrique des sédiments et leurs implications sur l'évolution du trait de côte : étude du secteur de Mbour

Le secteur de Mbour se caractérise par une variabilité sédimentaire marquée, qui exerce une influence directe sur la morphodynamique côtière locale. Cette sous-section vise à décrire et analyser les propriétés granulométriques et sédimentologiques spécifiques à ce secteur, ainsi qu'à évaluer leurs implications sur la dynamique et l'évolution du trait de côte, en tenant compte des interactions entre les processus hydrodynamiques, l'apport sédimentaire et les modifications anthropiques.

3.2.1.1. Le site Nord

Cette sous-section est consacrée à la caractérisation des échantillons prélevés sur le site nord du secteur de Mbour.

- **Plage immergée**

Les sédiments de la plage immergée du secteur nord de Mbour présentent une granulométrie globalement homogène, dominée par des sables moyens.

À l'horizon superficiel (0 cm), les diamètres caractéristiques sont les suivants : $D_{10} = 0,157$ mm, $D_{30} = 0,229$ mm, $D_{60} = 0,323$ mm. Les coefficients de tri et de courbure, respectivement ($C_u =$

2,06) et ($C_c = 1,03$), indiquent un sable bien classé et relativement homogène. Le facteur de moyenne ($MF = 1,70$) correspond à une texture de sable moyen à tendance fine. Cette composition granulométrique confère aux particules une mobilité élevée sous l'effet des vagues et des courants de fond, favorisant un transport sédimentaire actif et une vulnérabilité accrue de la plage immergée à l'érosion.

À l'horizon profond (20 cm), les paramètres granulométriques ($D_{10} = 0,171$ mm, $D_{30} = 0,263$ mm, $D_{60} = 0,380$ mm, $C_u = 2,22$, $C_c = 1,06$ et $MF = 2,03$) révèlent une légère hétérogénéité et un enrichissement en sables moyens. Cette variation verticale illustre une ségrégation granulométrique, où les particules les plus grossières tendent à se déposer en profondeur sous l'effet du brassage hydrodynamique. Ces dépôts plus grossiers constituent un substrat plus stable, susceptible de dissiper partiellement l'énergie des vagues et de ralentir temporairement le recul du trait de côte.

- **Estran**

L'estran du secteur étudié présente une granulométrie bien triée, dominée par des sables moyens.

À l'horizon superficiel, les paramètres granulométriques sont les suivants : $D_{10} = 0,168$ mm, $D_{30} = 0,251$ mm, $D_{60} = 0,345$ mm avec un coefficient de tri ($C_u = 2,05$), un coefficient de courbure ($C_c = 1,09$) et un facteur de moyenne ($MF = 1,87$). Ces valeurs confirment l'homogénéité du matériau, caractéristique d'une zone soumise aux alternances de marées et d'action de la houle, favorisant un transport sédimentaire dynamique entre la plage immergée et la haute plage et accentuant la redistribution continue des sédiments.

À l'horizon profond (70 cm), on observe une augmentation des diamètres caractéristiques ($D_{10} = 0,210$ mm, $D_{30} = 0,304$ mm et $D_{60} = 0,386$ mm) accompagnée d'une diminution du coefficient de tri ($C_u = 1,84$) et d'un facteur de moyenne ($MF = 2,10$). Ces paramètres indiquent une dominance des sables moyens et un tri plus efficace, révélant l'action sélective de la dynamique de l'estran, qui tend à exporter les particules fines tout en conservant les fractions plus stables.

Ce processus de ségrégation granulométrique verticale contribue à une stabilisation relative de l'estran, mais entraîne simultanément un appauvrissement en particules fines, réduisant la disponibilité de sédiments meubles pour le réapprovisionnement naturel du trait de côte et accentuant la vulnérabilité du littoral à l'érosion.

- **Haute plage**

La haute plage se caractérise par une granulométrie homogène en surface mais hétérogène en profondeur.

À l'horizon superficiel (0 cm), les paramètres granulométriques sont les suivants : $D_{10} = 0,163$ mm, $D_{30} = 0,239$ mm et $D_{60} = 0,319$ mm avec un coefficient de tri ($C_u = 1,96$), un coefficient de courbure ($C_c = 1,10$) et un facteur de moyenne ($MF = 1,66$). Ces valeurs indiquent des sables fins à moyens bien triés, dont le faible module de finesse et le bon classement les rendent particulièrement sensibles aux processus éoliens et à la remobilisation par des houles exceptionnelles. Cette granulométrie contribue à une vulnérabilité accrue de la haute plage, exposée à la déflation et au recul rapide du trait de côte lors d'événements extrêmes.

À l'horizon profond (70 cm), les paramètres granulométriques ($D_{10} = 0,150$ mm, $D_{30} = 0,178$ mm, $D_{60} = 0,294$ mm, $C_u = 1,96$, $C_c = 0,72$, $MF = 1,44$) indiquent une granulométrie plus fine et une courbe granulométrique moins équilibrée. Cette variation traduit une stratification héritée de dépôts anciens, éoliens ou liés à des événements tempétueux passés. Ces couches profondes, composées de grains plus fins et moins cohésifs, représentent une faiblesse structurale de la haute plage : elles peuvent être rapidement mobilisées sous l'effet de houles soutenues, compromettant la stabilité du profil côtier et favorisant le recul du trait de côte.

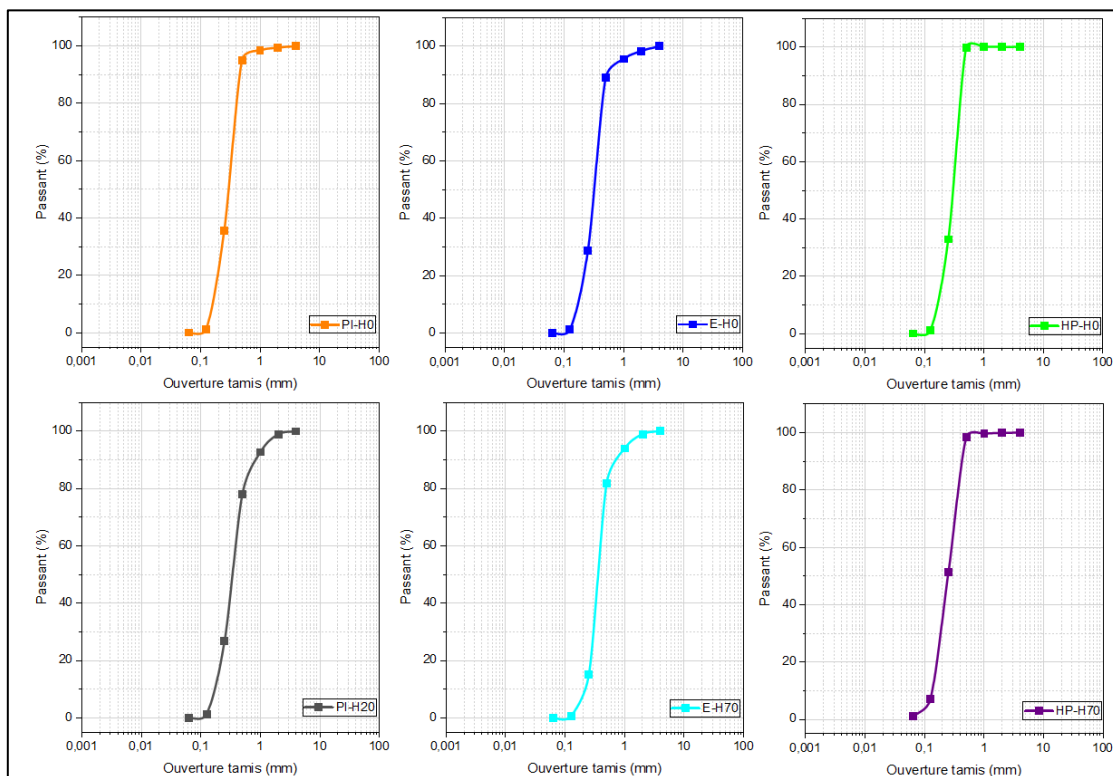


Figure 47 : Courbes granulométriques du site Nord du secteur de Mbour

PI-H0 = Plage Immergée-Horizon 0 cm

E-H70 = Estran-Horizon 70 cm

PI-H20 = Plage Immergée-Horizon 20 cm

HP-H0 = Estran -Horizon 0 cm

E-H0 = Estran -Horizon 0 cm

HP-H70 = Haute Plage-Horizon 70 cm

L'analyse granulométrique des sédiments du secteur nord de Mbour met en évidence un littoral dominé par des sables fins à moyens, globalement bien triés, mais dont la répartition verticale révèle une ségrégation progressive entre les horizons superficiels et profonds. Cette organisation traduit la mobilité élevée des dépôts de surface, continuellement remaniés par la houle, les marées et l'action du vent, ainsi que la stabilité relative des couches profondes, enrichies en sables plus grossiers.

Les sables fins de surface, caractérisés par une faible cohésion, sont facilement mobilisables, ce qui favorise une forte dynamique de transport sédimentaire et accentue la vulnérabilité du trait de côte. En parallèle, les couches profondes, composées de grains de sables moyens, témoignent de dépôts anciens résultant d'événements hydrodynamiques plus intenses, tels que des tempêtes ou des surcotes. Ces horizons profonds constituent un substrat ponctuellement stabilisateur, mais ne compensent pas la perte progressive des éléments meubles superficiels, contribuant ainsi à un déséquilibre morphodynamique du littoral.

Cette stratification verticale illustre un système côtier fortement énergisé, dominé par l'action combinée des houles de sud-ouest et du brassage des marées. L'interaction continue entre la plage immergée, l'estran et la haute plage crée un transfert constant de sédiments, générant un recul progressif mais régulier du rivage. Ainsi, la dynamique sédimentaire observée à Mbour reflète un équilibre instable, où la mobilité élevée des sables fins de surface et la relative stabilité des dépôts profonds contribuent conjointement à la fragilité et à l'instabilité du trait de côte.

2.2.1.2. Site Sud

Cette sous-section concerne la caractérisation des échantillons prélevés sur le site sud du secteur de Mbour.

- **Plage immergée**

Les sédiments de la plage immergée du site sud de Mbour présentent une granulométrie globalement homogène, dominée par des sables moyens.

À l'horizon superficiel (0 cm), les diamètres caractéristiques sont $D_{10} = 0,231$ mm, $D_{30} = 0,298$ mm et $D_{60} = 0,362$ mm, avec un coefficient d'uniformité (Cu) de 1,57 et un coefficient de courbure (Cc) de 1,06. Ces valeurs indiquent un sable bien trié et équilibré, correspondant à une

fraction majoritairement composée de sables moyens ($MF = 1,91$), modérément mobilisables par les agents hydrodynamiques.

À l'horizon 20 cm, les paramètres granulométriques montrent une légère évolution : $D_{10} = 0,168$ mm, $D_{30} = 0,263$ mm et $D_{60} = 0,368$ mm, avec $Cu = 2,19$ et $Cc = 1,12$. Cette distribution révèle une hétérogénéité verticale accrue, avec un léger enrichissement en sables fins à moyens ($MF = 1,95$). Cette stratification verticale traduit l'effet du brassage hydrodynamique, qui favorise la ségrégation des particules plus grossières en profondeur et maintient la dynamique sédimentaire active de la plage immergée.

- **Estran**

L'estran du site sud de Mbour est caractérisé par une prédominance de sables fins à moyens, présentant un bon tri granulométrique.

À l'horizon superficiel, les diamètres caractéristiques sont $D_{10} = 0,149$ mm, $D_{30} = 0,210$ mm et $D_{60} = 0,307$ mm, ce qui traduit une dominance des sables fins. Le coefficient d'uniformité ($Cu = 2,06$) et le coefficient de courbure ($Cc = 0,96$) indiquent un tri satisfaisant et une courbe granulométrique régulière. Le module de finesse ($MF = 1,56$) confirme la texture fine des sédiments, facilement mobilisable par les processus hydrodynamiques liés aux marées et à la houle.

À l'horizon profond (70 cm), la granulométrie demeure relativement constante, avec $D_{10} = 0,155$ mm, $D_{30} = 0,221$ mm et $D_{60} = 0,319$ mm. Le Cu (2,06) et le Cc (0,99) confirment la régularité des dépôts, tandis que le MF (1,66) indique un léger enrichissement en sables moyens, reflétant une sélection hydrodynamique progressive favorisant la conservation des grains plus stables. Cette organisation verticale traduit une mobilité réduite des sables profonds et une stabilité relative de l'estran, tout en maintenant la redistribution des particules superficielles par les dynamiques marines.

- **Haute plage**

La haute plage du site sud de Mbour présente une granulométrie fine en surface avec une évolution notable en profondeur.

À l'horizon superficiel (0 cm), les diamètres caractéristiques sont $D_{10} = 0,134$ mm, $D_{30} = 0,160$ mm et $D_{60} = 0,197$ mm. Le coefficient d'uniformité ($Cu = 1,47$) et le coefficient de courbure ($Cc = 0,97$) indiquent un tri satisfaisant et une courbe granulométrique régulière. Le module de finesse ($MF = 1,15$) souligne la prépondérance des sables fins, qui présentent une mobilité

élevée sous l'action des vents et des houles de tempête, conférant à la surface de la haute plage une vulnérabilité accrue à l'érosion.

À l'horizon profond (70 cm), les diamètres caractéristiques augmentent légèrement avec $D_{10} = 0,130$ mm, $D_{30} = 0,182$ mm et $D_{60} = 0,272$ mm. Le Cu (2,09) traduit une granulométrie légèrement moins homogène, tandis que le Cc (0,94) reste proche de l'équilibre. Le MF (1,41) révèle une texture sableuse fine à moyenne, indiquant une stabilité relative des dépôts profonds par rapport à la couche superficielle. Cette stratification verticale illustre une dynamique où la couche superficielle, fragile et facilement mobilisable, est continuellement remaniée par les processus hydrodynamiques et éoliens, tandis que la couche profonde offre un substrat plus stable, contribuant ponctuellement à la résilience morphodynamique de la haute plage.

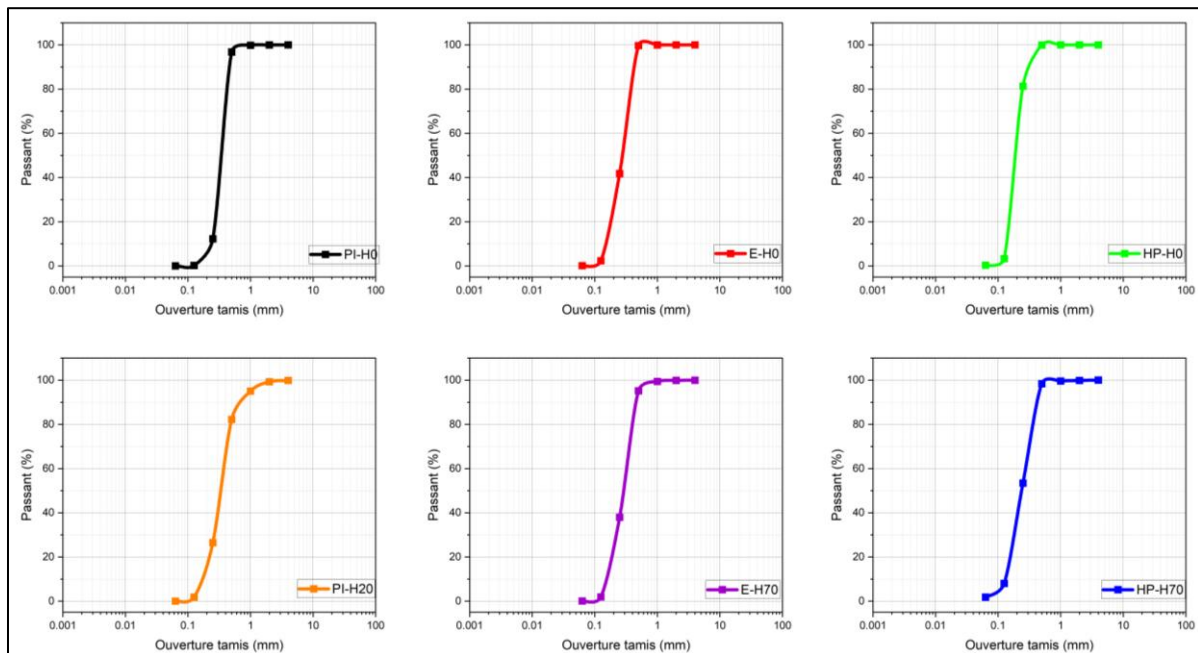


Figure 48 : Courbes granulométriques du site sud du secteur de Mbour

L'analyse granulométrique du site sud de Mbour révèle une organisation verticale et spatiale contrastée des sédiments, illustrant une dynamique morphodynamique complexe et différenciée selon les compartiments littoraux.

La plage immergée est caractérisée par des sables moyens bien triés, constituant un substrat relativement stable qui contribue à la dissipation partielle de l'énergie hydrodynamique des vagues et participe à la résilience temporaire du trait de côte. L'estran, dominé par des sables fins à moyens, présente une granulométrie homogène mais fortement mobile, traduisant sa sensibilité aux alternances de marée, aux houles et à la dérive littorale nord-sud. Cette zone agit

comme un corridor de transport sédimentaire, où les fines sont régulièrement exportées tandis que les grains plus grossiers s'accumulent localement.

La haute plage se distingue par une prépondérance de sables fins en surface, vulnérables aux processus éoliens et aux houles exceptionnelles, tandis que les dépôts profonds, légèrement plus grossiers, reflètent des épisodes de remaniement antérieurs associés à des conditions hydrodynamiques plus intenses. Cette stratification verticale met en évidence une fragilité des couches superficielles, facteur clé de la vulnérabilité du trait de côte dans ce secteur.

Dans l'ensemble, le site sud de Mbour illustre une cellule morphodynamique ouverte, caractérisée par une exportation continue des sédiments vers le large ou vers les zones aval, et par une alternance entre phases d'érosion active et de stabilisation temporaire. La combinaison de sédiments fins mobilisables et de couches profondes plus stables explique la tendance générale au recul du trait de côte observée le long de ce segment littoral.

2.2.2. Caractérisation granulométrique des sédiments et leurs implications sur l'évolution du trait de côte : étude du secteur de Djiffer

Le secteur de Djiffer, situé au centre de la zone d'étude, correspond à un segment littoral caractérisé par une dynamique morpho-sédimentaire intense. Sa position à l'interface entre l'océan Atlantique et le delta du Saloum favorise l'établissement de processus de dépôt et de remaniement sédimentaire complexes, régis à la fois par l'hydrodynamisme marin, les flux tidiaux et les apports allochtones provenant de l'arrière-pays.

L'analyse granulométrique des sédiments prélevés dans ce secteur permet de caractériser finement leur texture, leur degré de tri et la régularité des distributions granulométriques, fournissant des informations clés sur la mobilité des matériaux et la dynamique des dépôts. Ces paramètres granulométriques constituent des indicateurs essentiels pour évaluer la vulnérabilité du trait de côte de Djiffer face à l'érosion et pour comprendre les mécanismes contrôlant l'évolution morphologique du littoral, notamment la redistribution des sédiments entre plage immergée, estran et haute plage.

2.2.2.1. Site nord

Il s'agit ici d'analyser les échantillons prélevés dans le secteur nord de Djiffer, en montrant les caractéristiques des sédiments et leurs rôles dans la dynamique du trait de côte.

- **Plage immergée**

Les sédiments de la plage immergée du site nord de Djiffer présentent une granulométrie contrastée entre la surface et la profondeur.

À l'horizon superficiel, les diamètres caractéristiques ($D_{10} = 0,191$ mm, $D_{30} = 0,285$ mm et $D_{60} = 0,345$ mm) montrent une texture de sable fin à moyen. Le coefficient d'uniformité ($C_u = 1,81$) et le coefficient de courbure ($C_c = 1,23$) indiquent un tri relativement satisfaisant et une courbe régulière. La courbe granulométrique en surface révèle une distribution régulière des grains, avec un module de finesse ($MF = 1,80$) confirmant une texture sableuse fine à moyenne, compatible avec une mobilité élevée sous l'action combinée de la houle et des courants côtiers.

À l'horizon profond (20 cm), les diamètres caractéristiques augmentent sensiblement ($D_{10} = 0,251$ mm ; $D_{30} = 0,339$ mm ; $D_{60} = 0,584$ mm), traduisant un enrichissement en sables moyens à grossiers. Le coefficient d'uniformité ($C_u = 2,33$) indique un tri moins homogène, tandis que le coefficient de courbure ($C_c = 0,78$) révèle une distribution granulométrique irrégulière. Le $MF = 3,02$ confirme la prédominance des grains plus grossiers. Cette variation verticale illustre une stratification sédimentaire héritée de conditions hydrodynamiques plus intenses, où les dépôts profonds constituent une couche relativement stable, contrastant avec la surface fortement mobilisable.

- **Estran**

L'estran présente une stratification verticale des sédiments significative.

En surface, les diamètres caractéristiques ($D_{10} = 0,160$ mm ; $D_{30} = 0,231$ mm ; $D_{60} = 0,319$ mm) indiquent une granulométrie fine à moyenne. Les coefficients d'uniformité ($C_u = 1,99$) et de courbure ($C_c = 1,05$) traduisent un tri satisfaisant et une distribution granulométrique régulière, tandis que le module de finesse ($MF = 1,64$) confirme la dominance des sables fins à moyens. Ces caractéristiques sont typiques d'une zone littorale dynamique, soumise au brassage hydrodynamique induit par les marées et les vagues.

À 70 cm de profondeur, la granulométrie évolue vers des sables plus grossiers ($D_{10} = 0,217$ mm ; $D_{30} = 0,324$ mm ; $D_{60} = 0,506$ mm). Le $C_u = 2,33$ indique un tri légèrement moins homogène, tandis que le $C_c = 0,96$ témoigne d'une distribution encore globalement régulière. Le $MF = 2,77$ révèle une texture de sables moyens à grossiers, traduisant des conditions hydrodynamiques plus intenses lors de la mise en place de ces dépôts profonds. Cette stratification verticale met en évidence une zone d'estran où les couches superficielles sont

facilement mobilisables, tandis que les couches profondes jouent un rôle stabilisateur dans la dynamique sédimentaire côtière.

- **Haute plage**

La haute plage présente une granulométrie relativement homogène sur l'ensemble de sa colonne sédimentaire.

À l'horizon superficiel (0 cm), les diamètres caractéristiques ($D_{10} = 0,200$ mm ; $D_{30} = 0,293$ mm ; $D_{60} = 0,350$ mm) révèlent une texture sableuse moyenne. Les coefficients d'uniformité ($C_u = 1,75$) et de courbure ($C_c = 1,23$) indiquent un tri satisfaisant et une distribution granulométrique régulière, tandis que le module de finesse ($MF = 1,85$) confirme la prédominance des sables fins à moyens. Cette composition granulométrique rend les sédiments facilement mobilisables sous l'action des agents éoliens et des houles exceptionnelles, traduisant une sensibilité élevée de la haute plage aux processus érosifs.

À 70 cm de profondeur, les valeurs restent comparables ($D_{10} = 0,168$ mm ; $D_{30} = 0,259$ mm ; $D_{60} = 0,345$ mm), avec un $C_u = 2,05$ et un $C_c = 1,16$, tandis que le $MF = 1,87$ maintient les sables dans la catégorie fine à moyenne. Cette faible variabilité verticale reflète une homogénéité texturale et un remaniement sédimentaire récent, indiquant que la haute plage conserve une vulnérabilité importante face aux agents naturels tout en possédant une structure relativement stable dans sa profondeur.

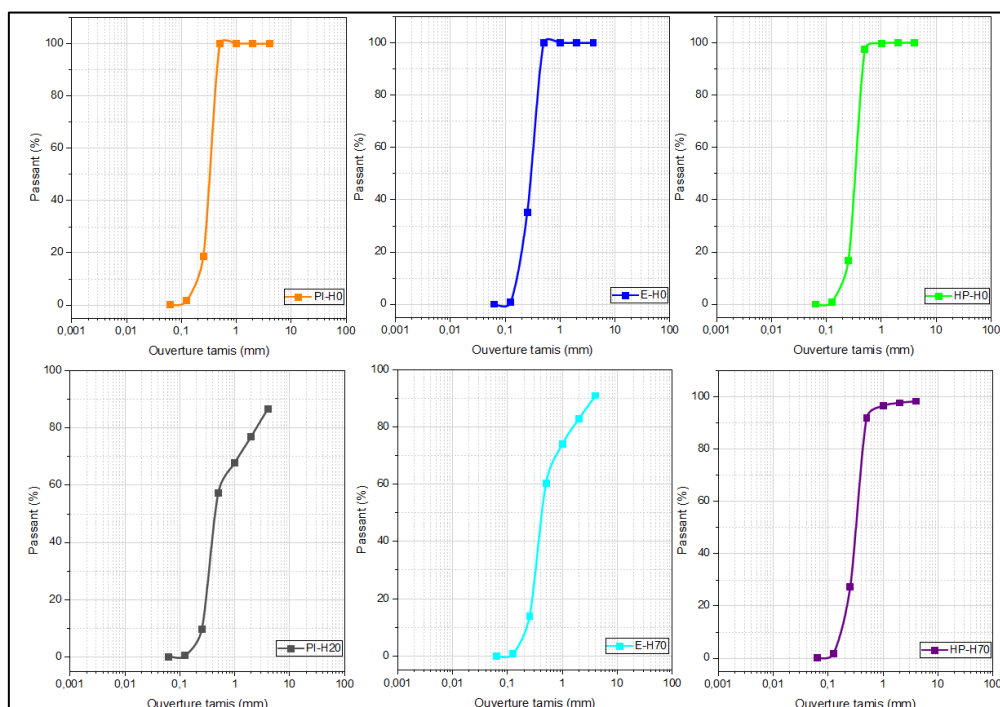


Figure 49 : Courbes granulométriques du site Nord du secteur de Djiffer

L'analyse granulométrique du site nord de Djiffer révèle une organisation verticale contrastée des sédiments. La plage immergée et l'estran sont dominés en surface par des sables fins à moyens, facilement mobilisables par la houle et les marées, tandis que les horizons profonds présentent un enrichissement en sables moyens à grossiers, témoignant de dépôts hérités de conditions hydrodynamiques plus énergétiques. Cette stratification verticale traduit un fonctionnement morphodynamique actif, où les couches superficielles subissent un remaniement quasi permanent et les couches profondes constituent un substrat plus stable.

La haute plage, en revanche, présente une homogénéité granulométrique verticale marquée, caractérisée par des sables fins à moyens sur toute la colonne, ce qui indique une sensibilité constante aux processus éoliens et aux événements maritimes exceptionnels. Cette homogénéité témoigne d'un remaniement récent et d'un rôle de zone de transit sédimentaire, contribuant à la redistribution des sédiments vers l'estran et la plage immergée.

Dans l'ensemble, la granulométrie du site nord de Djiffer met en évidence un profil côtier instable, dominé par la houle et les marées. Les couches superficielles, aisément mobilisables, accentuent l'érosion active, tandis que les dépôts profonds conservent la mémoire des épisodes hydrodynamiques plus intenses. Cette configuration illustre un équilibre morphodynamique fragile, où l'érosion côtière et le remaniement granulométrique s'inscrivent dans une dynamique de redistribution continue des sédiments, avec une vulnérabilité particulière de la haute plage aux apports éoliens et à la dérive littorale nord-sud.

2.2.2.2. Site sud

Il s'agit ici d'analyser les échantillons prélevés dans le secteur sud de Djiffer, afin de caractériser la granulométrie des sédiments et d'interpréter leur rôle dans la dynamique du trait de côte.

- **Plage immergée**

Les sédiments de la plage immergée du site sud présentent une stratification verticale marquée.

À l'horizon superficiel (0 cm), les diamètres caractéristiques sont $D_{10} = 0,146$ mm, $D_{30} = 0,185$ mm et $D_{60} = 0,259$ mm, révélant une granulométrie de sable fin. Le coefficient d'uniformité ($C_u = 1,77$) et le coefficient de courbure ($C_c = 0,91$) indiquent un tri modéré avec une distribution granulométrique relativement régulière. Le module de finesse ($MF = 1,43$) confirme la prépondérance de sables fins, aisément mobilisables par la houle et les courants de surface.

À l'horizon profond (20 cm), on observe un enrichissement marqué en grains moyens à grossiers, avec $D_{10} = 0,178$ mm, $D_{30} = 0,341$ mm et $D_{60} = 0,641$ mm. Le C_u de 3,60 traduit une hétérogénéité granulométrique significative, tandis que le C_c (1,02) révèle une distribution globalement régulière. Le MF de 3,00 confirme la dominance des sables moyens à grossiers, caractéristiques de dépôts hérités de conditions hydrodynamiques plus énergétiques, probablement associées à des épisodes de houle intense ou de tempêtes.

Cette stratification verticale illustre un système morphodynamique actif, où les couches superficielles sont facilement remaniées, contribuant à la mobilité sédimentaire et à la dynamique érosive du trait de côte, tandis que les horizons profonds constituent un substrat plus stable, mémoire des conditions hydrodynamiques passées.

- **Estran**

L'estran du site sud présente également une différenciation granulométrique verticale.

À l'horizon superficiel (0 cm), les diamètres caractéristiques sont $D_{10} = 0,179$ mm, $D_{30} = 0,276$ mm et $D_{60} = 0,345$ mm, indiquant une granulométrie de sable fin à moyen. Les coefficients d'uniformité et de courbure ($C_u = 1,93$; $C_c = 1,23$) traduisent un tri satisfaisant et une distribution granulométrique régulière. Le module de finesse (MF = 1,78) confirme la prépondérance des sables fins à moyens, typique d'une zone soumise à un brassage hydrodynamique constant, lié aux alternances de marée et à l'action des houles.

À 70 cm de profondeur, les diamètres augmentent ($D_{10} = 0,271$ mm, $D_{30} = 0,318$ mm et $D_{60} = 0,374$ mm), révélant un enrichissement en sables moyens. Le coefficient d'uniformité ($C_u = 1,38$) montre un tri légèrement plus homogène, tandis que le coefficient de courbure ($C_c = 1,00$) traduit une distribution granulométrique bien équilibrée. Le module de finesse (MF = 2,01) confirme la dominance des sables moyens, indiquant des conditions de dépôt plus stables et légèrement plus énergétiques que celles observées dans les horizons superficiels.

Cette stratification verticale illustre un fonctionnement morphodynamique de l'estran, où les couches superficielles restent facilement mobilisables par la marée et la houle, tandis que les horizons plus profonds constituent un substrat plus stable, contribuant à la régulation partielle de la dynamique sédimentaire locale.

- **Haute plage**

La haute plage du site sud présente une granulométrie globalement homogène.

À l'horizon superficiel (0 cm), les diamètres caractéristiques sont $D_{10} = 0,177$ mm, $D_{30} = 0,267$ mm et $D_{60} = 0,334$ mm, indiquant une prépondérance de sables fins à moyens. Les coefficients d'uniformité et de courbure ($C_u = 1,89$; $C_c = 1,21$) traduisent un tri satisfaisant et une distribution granulométrique régulière. Le module de finesse ($MF = 1,76$) confirme la texture sableuse fine à moyenne, facilement mobilisable par les agents éoliens et la houle, ce qui rend la surface de la haute plage sensible aux processus de déflation et d'érosion lors d'événements extrêmes.

À 70 cm de profondeur, les diamètres caractéristiques sont proches de ceux de surface ($D_{10} = 0,179$ mm, $D_{30} = 0,272$ mm et $D_{60} = 0,345$ mm), avec un $C_u = 1,93$ et un $C_c = 1,20$, illustrant une stabilité granulométrique verticale. Le MF de 1,80 confirme une homogénéité texturale et un remaniement récent, témoignant d'un substrat relativement stable sur la haute plage, mais sensible aux flux sédimentaires et aux épisodes de forte énergie marine.

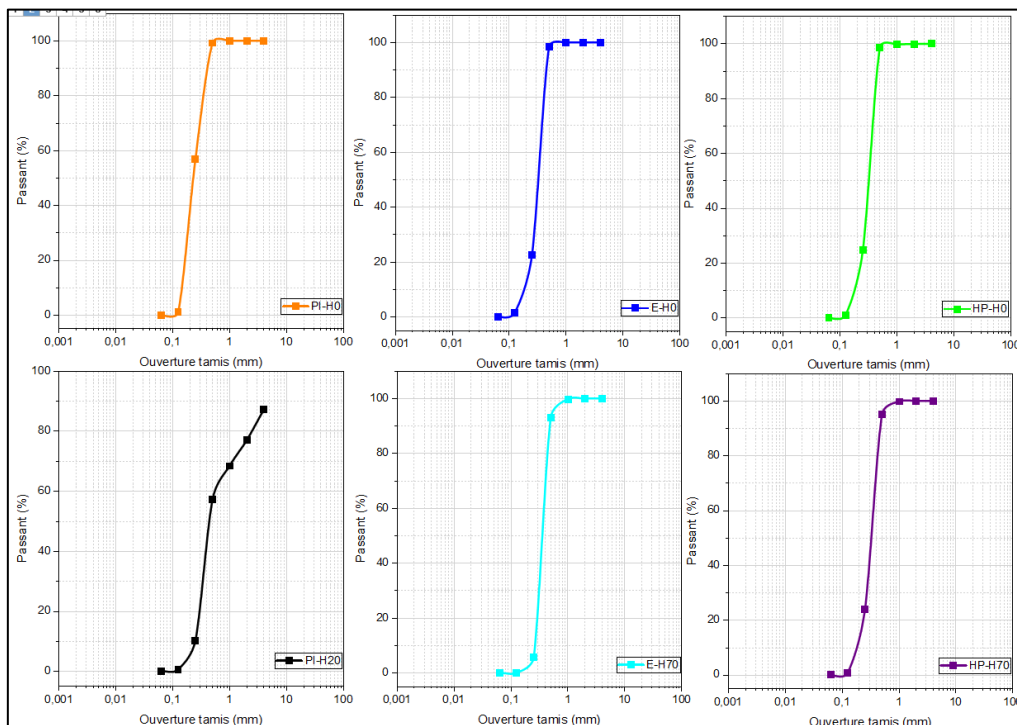


Figure 50 : Courbes granulométriques du site sud dans le secteur de Djiffer

L'analyse granulométrique du site sud de Djiffer révèle une stratification verticale et fonctionnelle des sédiments, reflétant les dynamiques morphodynamiques locales. En surface, la plage immergée et l'estran sont dominés par des sables fins à moyens, caractérisés par une mobilité élevée sous l'effet combiné de la houle et des marées. En profondeur, notamment au niveau de la plage immergée, les sédiments présentent un enrichissement en grains moyens à grossiers, traduisant des dépôts hérités de conditions hydrodynamiques plus énergétiques,

probablement associés à des épisodes de forte agitation marine ou de tempêtes exceptionnelles. L'estran constitue une zone de transition, avec un léger accroissement de la granulométrie en profondeur, tandis que la haute plage se distingue par une homogénéité verticale notable, indicative d'un remaniement récent et d'une sensibilité continue aux processus éoliens et aux houles exceptionnelles.

Cette organisation granulométrique traduit un environnement morphodynamique relativement équilibré, malgré une mobilité sédimentaire persistante. Les sables fins superficiels illustrent la prédominance des processus de remaniement actif, tandis que les horizons profonds plus grossiers servent de substrat stabilisateur, limitant localement l'érosion. Le site sud de Djiffer fonctionne ainsi comme une cellule de transit sédimentaire, où la dérive littorale nord-sud assure le transport des matériaux provenant du secteur nord, et où les couches plus grossières contribuent à dissiper partiellement l'énergie marine avant son transfert vers les îles du delta du Saloum. Cette structuration granulométrique met en évidence l'équilibre délicat entre mobilité superficielle et stabilité profonde, conditionnant la dynamique et la résilience du trait de côte dans ce secteur.

2.2.3. Caractérisation granulométrique des sédiments et leurs implications sur l'évolution du trait de côte : étude du secteur de Bétenty

L'analyse granulométrique des sédiments constitue un outil fondamental pour appréhender les dynamiques côtières et l'évolution du trait de côte. Dans cette section, l'attention est portée sur le secteur de Bétenty, où l'étude des caractéristiques granulométriques des dépôts sédimentaires permet d'identifier les facteurs contrôlant la stabilité et la morphodynamique littorale. La granulométrie, en déterminant la taille, la distribution et le tri des particules, influence directement la mobilité des sédiments, leur capacité de transport par les agents hydrodynamiques et la résistance du trait de côte aux processus d'érosion ou d'accrétion.

L'analyse couvre différents horizons verticaux ainsi que les principales sous-zones morphologiques (plage immergée, estran et haute plage) afin de mettre en évidence les relations entre les propriétés sédimentaires et les forces hydrodynamiques (houle, marées et vents). Cette approche granulométrique permet de caractériser la stratification sédimentaire, d'identifier les dépôts hérités de conditions énergétiques antérieures et d'évaluer les zones les plus sensibles à la mobilisation sédimentaire. Ainsi, l'étude fournit une compréhension fine des mécanismes de transformation du littoral à Bétenty et contribue à la modélisation des dynamiques morphologiques dans ce secteur de la Petite-Côte sénégalaise.

2.2.3.1. Site Nord

Cette section a pour objectif de caractériser les propriétés granulométriques et sédimentologiques des dépôts prélevés sur le site nord de Bétenty et d'évaluer leurs implications sur la dynamique morphodynamique et l'évolution du trait de côte.

- **Plage immergée**

Les sédiments de la plage immergée du site nord de Bétenty présentent une granulométrie principalement fine à moyenne, tant à l'horizon superficiel qu'en profondeur.

À l'horizon 0 cm, les diamètres caractéristiques sont $D_{10} = 0,141$ mm, $D_{30} = 0,177$ mm et $D_{60} = 0,251$ mm, correspondant à une texture comprise entre sable fin et sable moyen. Le coefficient d'uniformité ($C_u = 1,78$) et le coefficient de courbure ($C_c = 0,89$) traduisent un tri globalement satisfaisant, malgré une distribution des grains légèrement irrégulière. Le module de finesse ($MF = 1,38$) confirme la prédominance des sables fins, indiquant une mobilité modérée sous l'action des vagues et des courants.

À l'horizon 20 cm, les diamètres caractéristiques augmentent légèrement ($D_{10} = 0,139$ mm, $D_{30} = 0,182$ mm et $D_{60} = 0,267$ mm), révélant un enrichissement en grains plus grossiers. Le coefficient d'uniformité ($C_u = 1,92$) signale un tri légèrement plus hétérogène, tandis que le coefficient de courbure ($C_c = 0,89$) indique une distribution toujours légèrement irrégulière. Le module de finesse ($MF = 1,42$) traduit une granulométrie plus grossière, compatible avec des conditions hydrodynamiques plus énergétiques à cette profondeur.

Cette organisation verticale traduit un remaniement sélectif des sédiments, dans lequel les couches superficielles sont facilement mobilisées par les vagues, tandis que les horizons plus profonds témoignent de dépôts soumis à des conditions hydrodynamiques plus intenses.

- **Estran**

L'estran du site nord de Bétenty présente une stratification granulométrique verticale prononcée.

À l'horizon 0 cm, les diamètres caractéristiques sont $D_{10} = 0,136$ mm, $D_{30} = 0,157$ mm et $D_{60} = 0,185$ mm, révélant une granulométrie fine, dominée par des sables fins. Le coefficient d'uniformité ($C_u = 1,36$) et le coefficient de courbure ($C_c = 0,98$) indiquent un tri relativement irrégulier, bien que la distribution des grains reste globalement homogène. Le module de finesse ($MF = 1,05$) confirme la prédominance des sables fins, caractéristiques d'une zone exposée à un brassage hydrodynamique constant lié aux marées.

À l'horizon 70 cm, les valeurs augmentent ($D_{10} = 0,153$ mm, $D_{30} = 0,207$ mm et $D_{60} = 0,298$ mm), traduisant une granulométrie plus grossière. Le Cu (1,95) et le Cc (0,94) révèlent un tri plus hétérogène mais une courbe globalement régulière. Le MF (1,56) indique une dominance de sables fins à moyens, témoignant de conditions hydrodynamiques plus intenses lors de leur mise en place.

Cette évolution verticale illustre une dynamique sédimentaire sélective, où les grains fins de surface sont facilement mobilisables par les marées, tandis que les horizons plus profonds constituent des dépôts plus stables et hérités de conditions énergétiques plus fortes.

- **Haute plage**

La haute plage du site nord de Béttenty présente une homogénéité granulométrique verticale marquée.

À l'horizon 0 cm, les diamètres caractéristiques sont $D_{10} = 0,132$ mm, $D_{30} = 0,158$ mm et $D_{60} = 0,197$ mm, traduisant une texture sableuse fine à moyenne. Le coefficient d'uniformité ($Cu = 1,49$) et le coefficient de courbure ($Cc = 0,96$) indiquent un tri satisfaisant et une courbe granulométrique régulière. Le module de finesse ($MF = 1,14$) confirme la prédominance des sables fins à moyens, facilement mobilisables par les agents éoliens et les houles exceptionnelles.

À l'horizon 70 cm, les valeurs restent proches ($D_{10} = 0,136$ mm, $D_{30} = 0,160$ mm, $D_{60} = 0,203$ mm), avec un Cu de 1,49 et un Cc de 0,93. Le MF (1,19) confirme la même catégorie granulométrique, traduisant une faible variabilité verticale et une homogénéité texturale. Cette constance indique un remaniement sédimentaire relativement récent, témoignant d'une sensibilité continue de la haute plage aux processus éoliens et aux événements de houle exceptionnelle.

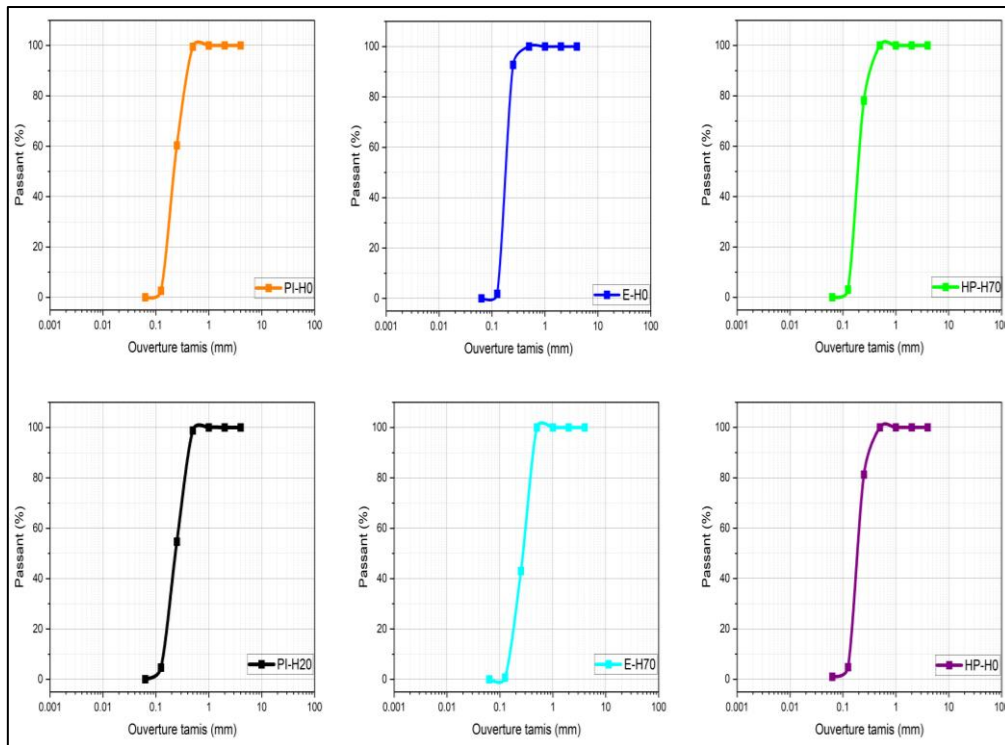


Figure 51 : Courbes granulométriques du site nord du secteur de Bétenty

L'analyse granulométrique des sédiments du site nord de Bétenty met en évidence une variabilité verticale nette, particulièrement marquée dans la plage immergée et l'estran. Les horizons superficiels sont dominés par des sables fins à moyens, indiquant une mobilité sédimentaire élevée sous l'action combinée des marées et des houles résiduelles de secteur sud-ouest. En revanche, les dépôts plus grossiers observés en profondeur, à 20 cm dans la plage immergée et à 70 cm dans l'estran, témoignent d'anciens dépôts formés sous des conditions hydrodynamiques plus énergétiques, probablement associés à des épisodes de tempêtes ou de forte agitation océanique.

La haute plage se distingue par une homogénéité granulométrique verticale plus marquée, révélant un environnement relativement stable et un remaniement sédimentaire récent. Cette différenciation verticale traduit un système morphodynamique contrasté, dans lequel les couches superficielles sont régulièrement réarrangées, tandis que les horizons profonds jouent un rôle de substrat plus stable.

Ainsi, le site nord de Bétenty fonctionne comme une zone de transit sédimentaire, assurant le transfert de matériaux depuis les secteurs exposés du large vers les zones plus protégées du delta interne. La granulométrie observée illustre l'importance des caractéristiques des

sédiments dans la dynamique du trait de côte, où la répartition des grains et la mobilité des dépôts influencent directement les processus d'érosion et de sédimentation.

En définitive, ce secteur reflète un environnement côtier à énergie modérée, dominé par le remaniement tidal et la dérive littorale interne, avec un équilibre fragile entre transport actif des sédiments en surface et stabilité relative des dépôts profonds.

2.2.3.2. Site sud

Cette section présente une analyse détaillée des propriétés granulométriques des échantillons prélevés dans le site sud de Bétenty et examine leur influence sur la dynamique du trait de côte.

- **Plage Immergée**

À l'horizon superficiel (0 cm), les sédiments présentent des diamètres caractéristiques $D_{10} = 0,200$ mm, $D_{30} = 0,285$ mm et $D_{60} = 0,350$ mm, correspondant à une texture de sable moyen à grossier. Le coefficient d'uniformité ($C_u = 1,75$) indique un tri satisfaisant, tandis que le coefficient de courbure ($C_c = 1,16$) met en évidence une légère irrégularité dans la répartition des grains. Le module de finesse ($MF = 1,83$) confirme la dominance des grains plus grossiers, aisément mobilisables par l'action des vagues et les courants de surface, ce qui traduit une dynamique sédimentaire élevée.

À l'horizon 20 cm, la granulométrie montre une réduction progressive de la taille des grains ($D_{10} = 0,146$ mm, $D_{30} = 0,179$ mm, $D_{60} = 0,246$ mm), reflétant une stratification verticale. Le C_u (1,68) reste compatible avec un tri correct, bien que légèrement moins homogène, tandis que le C_c (0,89) indique une distribution des grains plus irrégulière. Le MF (1,46) traduit une texture plus fine, plus sensible à la mobilisation par la houle, révélant ainsi que les couches profondes sont constituées de dépôts plus récents ou remaniés par des conditions hydrodynamiques moins intenses.

- **Estran**

À l'horizon superficiel (0 cm), les sédiments présentent des diamètres caractéristiques $D_{10} = 0,136$ mm, $D_{30} = 0,158$ mm et $D_{60} = 0,188$ mm, correspondant à une texture de sable fin. Le coefficient d'uniformité ($C_u = 1,38$) et le coefficient de courbure ($C_c = 0,98$) indiquent un tri relativement homogène, avec une dominance de grains fins facilement mobilisables par l'action des marées. Le module de finesse ($MF = 1,10$) confirme la prévalence de sables fins, adaptés à un environnement à hydrodynamisme modéré.

À l'horizon profond (70 cm), les diamètres caractéristiques augmentent légèrement ($D_{10} = 0,143$ mm, $D_{30} = 0,194$ mm, $D_{60} = 0,289$ mm), révélant une texture plus grossière. Le Cu (2,02) traduit un tri plus hétérogène, tandis que le Cc (0,91) indique une distribution des grains relativement régulière. Le MF (1,49) confirme la prédominance de sables fins, témoignant de conditions hydrodynamiques plus énergétiques lors de la mise en place de ces dépôts à cette profondeur.

- **Haute Plage**

À l'horizon superficiel (0 cm), les sédiments de la haute plage présentent des diamètres caractéristiques $D_{10} = 0,139$ mm, $D_{30} = 0,163$ mm et $D_{60} = 0,200$ mm, correspondant à une texture de sable moyen. Le coefficient d'uniformité (Cu = 1,44) et le coefficient de courbure (Cc = 0,96) indiquent un tri satisfaisant, tandis que le module de finesse (MF = 1,20) met en évidence la prédominance des sables fins à moyens, facilement mobilisables par l'action éolienne et la houle.

À l'horizon profond (70 cm), les diamètres caractéristiques diminuent légèrement ($D_{10} = 0,132$ mm, $D_{30} = 0,155$ mm, $D_{60} = 0,185$ mm), avec un Cu de 1,40 et un Cc de 0,98, traduisant un tri similaire et une distribution régulière des grains. Le MF (1,05) confirme une texture homogène, révélant un dépôt plus stable, moins soumis aux houles, mais toujours sensible aux processus éoliens.

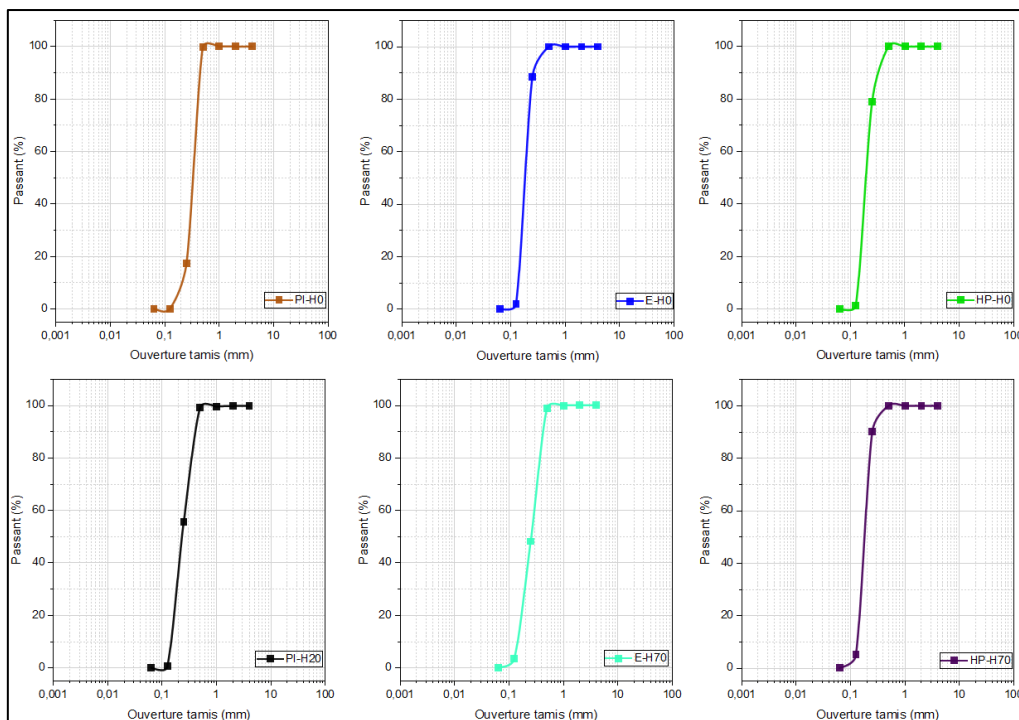


Figure 45 : Courbes granulométriques du site sud du secteur de Bétenty

L'analyse granulométrique des échantillons prélevés dans le secteur sud de Bétenty révèle une variabilité marquée selon la profondeur, particulièrement au niveau de la plage immergée et de l'estran. À l'inverse, la haute plage se distingue par une homogénéité granulométrique plus importante, traduisant un environnement relativement stable. Les sédiments plus grossiers observés en profondeur, à l'horizon 20 cm pour la plage immergée et à 70 cm pour l'estran, témoignent de dépôts hérités de conditions hydrodynamiques plus énergétiques. Ces caractéristiques soulignent que la mobilité des sédiments et la distribution granulométrique influencent directement la dynamique du trait de côte, en particulier dans les zones soumises à une énergie hydrodynamique élevée.

Dans ce secteur, la granulométrie traduit un régime sédimentaire globalement stable mais dynamique. La prédominance de sables moyens bien triés en surface indique un équilibre temporaire entre les processus d'érosion et de dépôt, tandis que les couches profondes plus grossières reflètent l'influence d'événements hydrodynamiques ponctuellement intenses, tels que les houles de tempête ou les flux tidaux concentrés. Ce profil granulométrique illustre un milieu de dissipation énergétique, où les apports sédimentaires provenant du nord sont progressivement redistribués vers les marges du delta.

La haute plage, homogène et bien triée, fonctionne comme une barrière sableuse protectrice, limitant temporairement l'érosion marine tout en restant sensible aux surcotes et à la montée du niveau de la mer. Ainsi, le secteur sud de Bétenty illustre un fonctionnement morphodynamique alternant phases d'accrétion et d'érosion, typique des îles deltaïques basses, où la stabilité apparente masque une variabilité sédimentaire saisonnière significative.

2.3. Discussion des résultats granulométriques

Cette section propose une discussion approfondie des résultats granulométriques obtenus sur les trois sites représentatifs de la Petite-Côte aux îles du Saloum (Mbour, Djiffer et Bétenty). Les données sont comparées aux travaux antérieurs réalisés au Sénégal et dans la sous-région, afin d'identifier les spécificités locales et les tendances régionales convergentes. L'analyse met également en évidence les implications morphodynamiques de la distribution granulométrique sur la stabilité et l'évolution du trait de côte, en considérant les interactions entre les caractéristiques sédimentaires, l'énergie hydrodynamique et les processus de remaniement éolien et marin.

❖ Mbour

Les analyses granulométriques réalisées sur le site de Mbour mettent en évidence une prédominance de sables fins à moyens en surface, caractérisés par un bon tri ($Cu \approx 2$; $Cc \approx 1$), traduisant un environnement fortement dynamique, dominé par l'action de la houle. En profondeur, on observe un enrichissement progressif en fractions plus grossières, matérialisé par l'augmentation des diamètres caractéristiques (D_{30} - D_{60}) et du module de finesse, reflétant des dépôts hérités d'épisodes hydrodynamiques plus énergétiques. Cette stratification verticale confère un armoring relatif du substrat, stabilisant partiellement la base des dépôts tout en restant insuffisante pour limiter l'exportation rapide des sables fins lors d'événements extrêmes.

Ces observations sont cohérentes avec les résultats de Youm *et al.* (2024) sur la lagune de Somone, à proximité immédiate de Mbour, qui décrivent un profil sédimentaire typique des environnements micro-tidaux à houle dominante : succession de sables fins à moyens bien triés en surface et de faciès plus grossiers en profondeur. Les auteurs soulignent que cette organisation granulométrique favorise une forte mobilité des dépôts superficiels, accroissant l'exposition aux aléas extrêmes, tout en assurant une stabilisation partielle des horizons basaux.

Par ailleurs, l'Étude d'impact environnemental et social (EIES) du projet de rechargement de Saly (Banque mondiale, 2020) fournit des données granulométriques complémentaires. Les sables mobilisés pour le rechargement de la Petite-Côte présentent une distribution centrée sur les classes fines à moyennes, sélectionnées pour résister à l'action des vagues tout en maintenant la fonctionnalité des plages. Cette cohérence entre les résultats de terrain et les matériaux utilisés pour la gestion côtière locale renforce la validité des observations à Mbour.

En conclusion, la granulométrie du site de Mbour, caractérisée par une couche superficielle mobile et un substrat plus stable en profondeur, reflète un régime textural représentatif des plages de la Petite-Côte sénégalaise. La dynamique morfo-sédimentaire y est marquée par une alternance saisonnière d'érosion et de reconstitution partielle, conformément aux observations et aux références régionales.

❖ Djiffer

Dans cette zone, les profils granulométriques montrent une dominance de sables fins à moyens en surface, bien triés, caractérisés par un coefficient d'uniformité (Cu) faible à modéré et un module de finesse (MF) d'environ 1,8. En profondeur, la granulométrie devient plus hétérogène, avec un Cu supérieur à 2,5 et un MF dépassant 2,7, traduisant la présence de fractions plus grossières et une variabilité texturale accrue. Cette stratification verticale reflète

une dynamique morpho-sédimentaire fortement influencée par la mobilité des passes et des chenaux, qui régulent le transit sédimentaire et les échanges entre le bassin et le littoral.

Les observations à Djiffer sont cohérentes avec les travaux de Sadio *et al.* (2022) dans le delta du Saloum, qui montrent que les structures granulométriques complexes des embouchures sont directement liées aux flux hydrodynamiques et aux variations de l'érosion et de l'accrétion le long du littoral. De manière comparative, Dabo (2006) décrit en Mauritanie des profils similaires, avec une variabilité granulométrique importante dans les zones d'embouchure, témoignant de l'influence combinée des marées, des houles et des apports continentaux.

Ces résultats confirment que le site de Djiffer se caractérise par une forte réactivité morphodynamique, où les couches superficielles sont rapidement remaniées et où les dépôts profonds reflètent des épisodes passés de forte énergie hydrodynamique. Le contraste vertical et la variabilité spatiale de la granulométrie traduisent un système littoral sensible, dont l'évolution du trait de côte répond de manière quasi immédiate aux forçages marins et tidaux.

❖ **Béttenty**

Les analyses granulométriques réalisées sur l'île de Béttenty mettent en évidence une prépondérance de sables fins à moyens bien triés en surface, traduisant une mobilité sédimentaire élevée et une faible variabilité verticale. L'estran présente un tri sélectif marqué, caractérisé par l'export des fines et une stabilisation relative des couches profondes, ce qui contribue à une certaine résistance basale mais reste insuffisant pour contrer l'impact des houles atlantiques. Ces observations soulignent la vulnérabilité morphodynamique de l'île, fortement dépendante des apports sédimentaires et de la protection offerte par les mangroves.

Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Thior (2020) sur le littoral casamançais, qui mettent en évidence la forte mobilité des plages sableuses exposées à un hydrodynamisme intense et à un déséquilibre sédimentaire permanent, ainsi qu'avec ceux de Boateng (2012) au Ghana, où les cordons insulaires présentent une sensibilité élevée aux tempêtes et à l'érosion côtière.

L'analyse comparative des trois sites étudiés (Mbour, Djiffer et Béttenty) révèle un schéma régional cohérent mais contrasté. La surface des plages est généralement dominée par des sables fins à moyens bien triés ($C_u \approx 2$; $C_c \approx 1$), tandis que les horizons profonds contiennent des fractions plus grossières. Cette organisation traduit une mobilité sédimentaire superficielle élevée, responsable d'une réactivité immédiate aux forçages hydrodynamiques, ainsi qu'un

effet partiel d'« armoring » en profondeur, insuffisant pour assurer une stabilisation durable des profils.

Cependant, cette homogénéité apparente masque un gradient granulométrique nord-sud, de la Petite-Côte ouverte vers le delta du Saloum. À Mbour, les sables sont globalement plus grossiers, hérités d'un environnement marin à houle dominante, avec des apports issus de la dérive littorale nord-sud et du remaniement côtier local. À Djiffer, la granulométrie devient plus hétérogène : la coexistence de sables fins et moyens traduit une zone de transition morpho-sédimentaire, soumise à la double influence des houles atlantiques et des flux tidaux du delta. Enfin, à Bétenty, la granulométrie est dominée par des sables fins bien triés, caractéristiques d'un milieu deltaïque à énergie plus dissipée, où les apports proviennent principalement du remaniement interne, des flux tidaux et des dépôts fins transportés par les chenaux du Saloum.

Ce gradient granulométrique grossier vers la fin, du nord vers le sud, illustre la transition entre un système côtier ouvert à forte énergie et un système deltaïque semi-fermé à dynamique sédimentaire complexe. Les différences dans l'origine et la nature des apports expliquent ainsi les contrastes de mobilité : à Mbour, la dynamique est dominée par la dérive littorale et les houles ; à Djiffer, elle résulte des interactions bassin-côte ; et à Bétenty, elle dépend principalement des apports tidaux et de la protection végétale offerte par les mangroves.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment l'existence d'un gradient morphodynamique régional conditionnant la distribution granulométrique, la stabilité des profils et la vulnérabilité différenciée des littoraux entre la Petite-Côte et le delta du Saloum. Ils s'inscrivent dans les tendances observées en Afrique de l'Ouest (Boateng, 2012 ; Sadio *et al.*, 2022), où les textures sableuses fines à moyennes, bien que fréquentes, constituent un facteur de fragilité accru pour les littoraux exposés à l'érosion.

Conclusion chapitre III

La dynamique du trait de côte sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, résulte d'une interaction complexe et continue entre facteurs naturels et anthropiques. Cette dynamique est d'abord conditionnée par l'exposition directe du littoral aux agents hydrodynamiques majeurs : houles océaniques, vagues, courants marins et dérive littorale, qui assurent une mobilité permanente des sédiments et une reconfiguration constante du rivage.

Ces processus sont modulés par des contraintes physiques et climatiques spécifiques. La nature meuble des sédiments littoraux, dominés par des sables fins à moyens, ainsi que la topographie basse du cordon côtier, favorisent la vulnérabilité du trait de côte face aux phénomènes

d'érosion et de submersion. Parallèlement, les conditions climatiques (vents persistants, tempêtes, variations saisonnières de température et de précipitations) intensifient et régulent la fréquence des dynamiques côtières.

À ces facteurs naturels s'ajoutent des déterminants anthropiques significatifs. Le prélèvement massif de sable à des fins de construction, l'implantation d'ouvrages perpendiculaires au rivage perturbant le transit sédimentaire, et le transfert de l'érosion vers des zones adjacentes induit par des structures de protection ponctuelles (épis, brise-lames, murs de soutènement) contribuent à amplifier la fragilité du littoral. De plus, la pression croissante des activités économiques (tourisme balnéaire, pêche, extraction de ressources) et la littoralisation accélérée entraînent une compétition foncière intense sur le domaine public maritime, renforçant la vulnérabilité écologique et sociale des zones côtières.

Une compréhension intégrée de la dynamique du trait de côte exige de considérer ces facteurs dans leur articulation spatiale et temporelle. Le suivi historique de la cinématique côtière permet ainsi d'appréhender la dynamique littorale de manière diachronique, d'évaluer ses implications sur l'équilibre géomorphologique et de mieux comprendre les conséquences sur les activités humaines et les écosystèmes associés.

Chapitre IV : Cinématique du trait de côte à partir de l'imagerie satellitaire

Ce chapitre IV examine la cinématique du trait de côte à partir de l'exploitation d'images satellitaires. Comme le souligne Pennober (1999). L'interprétation cartographique de la dynamique littorale permet d'analyser la morphologie et l'évolution des formes côtières sans nécessairement identifier immédiatement leurs causes. Dans le cadre de cette étude, l'objectif est de reconstituer l'évolution spatiale et temporelle du trait de côte le long du littoral de la Petite-Côte sénégalaise jusqu'aux îles du Saloum, sur la période 1973-2024.

Pour quantifier ces évolutions, deux indices méthodologiquement fiables ont été mobilisés : le taux d'évolution ponctuel (*End Point Rate*, EPR) et la régression linéaire (*Linear Regression Rate-of-Change*, LRR). L'EPR a été utilisé pour évaluer les variations du trait de côte entre deux périodes successives : 1973-1987, 1987-2002, 2002-2013 et 2013-2024. Cette approche permet de mesurer les rythmes de changement à court et moyen terme, en mettant en évidence les zones de recul, de stabilité ou d'avancée du littoral. Le LRR, quant à lui, a permis de calculer une tendance moyenne à long terme sur l'ensemble de la période 1973-2024, en intégrant toutes les positions du trait de côte disponibles. Cette méthode fournit une vision synthétique et fiable de l'évolution diachronique des profils côtiers.

Les résultats issus de cette analyse mettent en évidence trois dynamiques littorales principales : des secteurs en recul (érosion), des secteurs relativement stables et des secteurs en progression (accrétion). Cette classification spatiale offre une lecture géographique fine des mutations du littoral et constitue un cadre méthodologique pour discuter les déterminants naturels et anthropiques à l'origine de ces transformations.

1. Évolution du trait de côte de 1973 à 1987

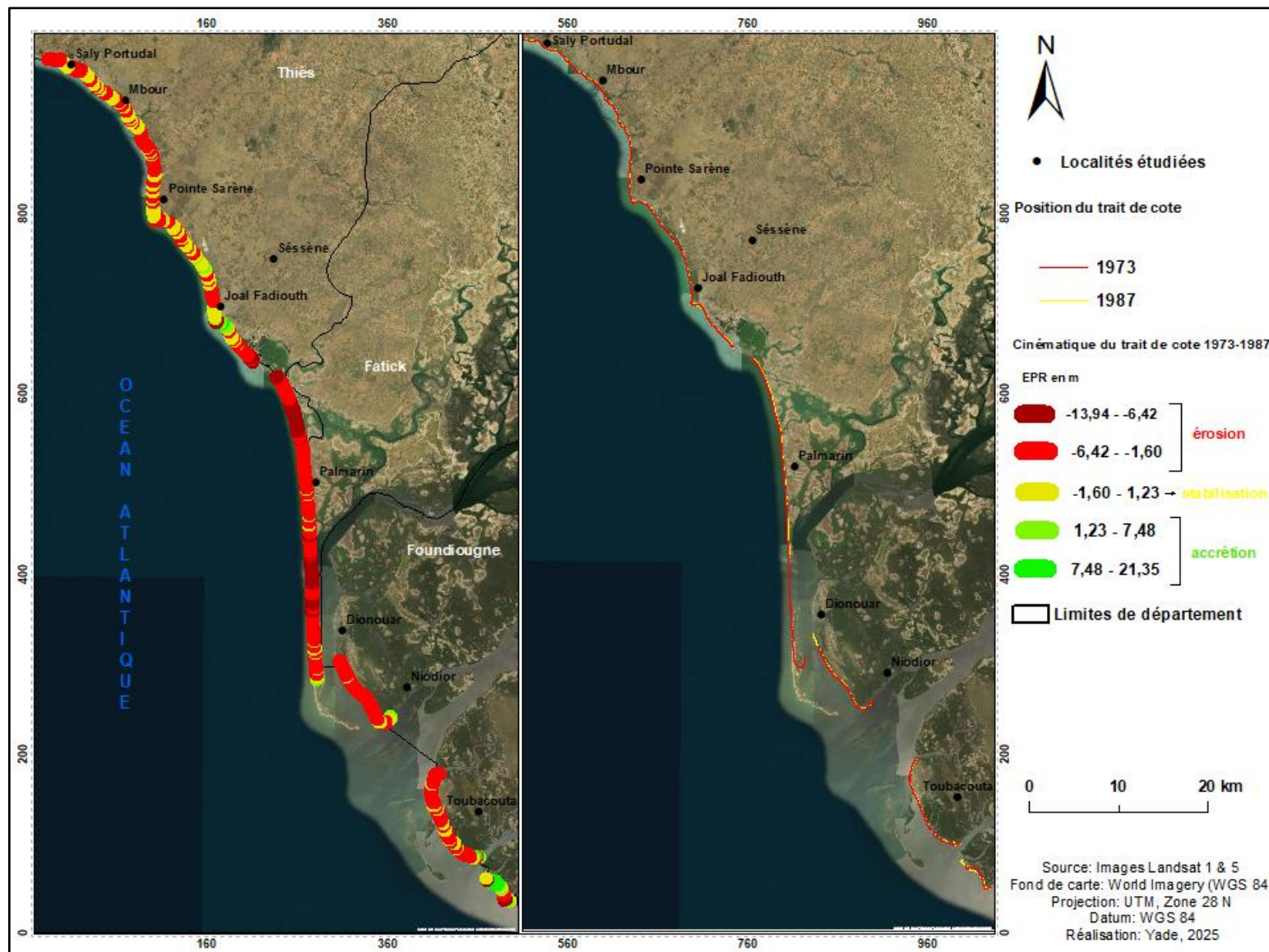
La période 1973-1987 correspond à une phase majeure de transformation du linéaire côtier sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, dominée par une dynamique globalement érosive. Néanmoins, l'analyse spatiale révèle une alternance de segments en régression, en stabilité et en accrétion (Carte 10).

Sur un total de 1 592 transects analysés, 1 446 transects ($\approx 90,8\%$) présentent un recul du trait de côte, confirmant une situation d'érosion généralisée. Les secteurs les plus affectés incluent Mbour, Joal-Fadiouth, Palmarin, Toubacouta, Dionewar et Niodior, avec des valeurs de recul comprises entre -6,42 m/an et -13,94 m/an, classées dans la catégorie d'érosion sévère, et une

marge d'erreur estimée à $\pm 1,51$ m/an. Cette récession accentuée peut être attribuée à l'absence d'infrastructures de protection littorale à cette époque, ainsi qu'à une pression anthropique croissante sur des milieux déjà vulnérables.

Les segments en stabilisation et en accrétion, bien que minoritaires (146 transects, soit 9,2 %), se localisent principalement dans des zones moins exposées à la houle, notamment près des estuaires et des formations de mangrove. L'accrétion, limitée durant cette période, concerne principalement les embouchures des bras de mer et les zones de mangroves denses, notamment au sud du delta du Saloum et autour de Joal-Fadiouth, avec une valeur maximale enregistrée de +21,35 m/an. Le cumul des avancées s'élève à 551,88 m, contre 5 032,08 m de recul cumulé, confirmant la prépondérance des processus érosifs.

La valeur moyenne de l'EPR pour cette période est de -3,48 m/an, ce qui constitue un indicateur relativement élevé et souligne la vulnérabilité aiguë du littoral. Ce constat corrobore les observations de Paskoff (1998), qui signalaient déjà la fragilité du linéaire côtier sénégalais en l'absence de politiques de gestion intégrée. Les pressions anthropiques combinées aux facteurs naturels (élévation du niveau de la mer, tempêtes, régime de houle) ont contribué à amplifier la dynamique érosive et à accentuer la récession côtière.



Carte 10 : Évolution du trait de côte de la Petite-Côte sénégalaise au delta du Saloum de 1973 à 1987

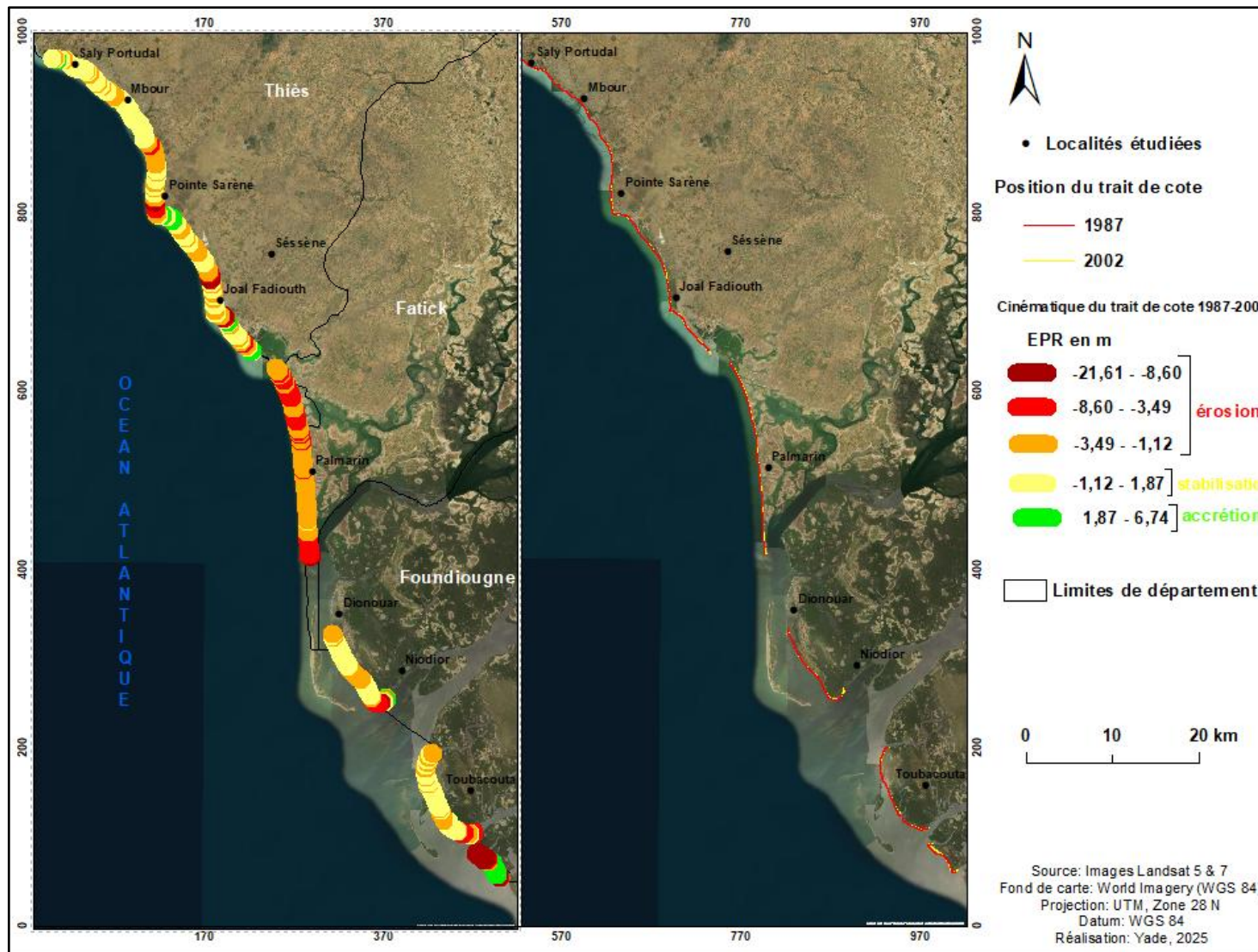
Les analyses statistiques soulignent l'ampleur significative de l'érosion affectant le littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum entre 1973 et 1987, période caractérisée par l'absence quasi totale d'infrastructures de protection. Ces résultats mettent en évidence la vulnérabilité naturelle du trait de côte et renforcent la nécessité de mettre en œuvre une gestion intégrée et durable du littoral, combinant la préservation des zones tampons naturelles (mangroves, dunes côtières, cordons sableux) et une régulation stricte de l'occupation et de l'usage du domaine côtier, afin de réduire les pressions anthropiques et d'atténuer les risques érosifs.

2. Évolution du trait de côte de 1987 à 2002

La période 1987-2002 s'inscrit globalement dans une dynamique régressive du linéaire côtier, bien que le taux moyen d'érosion enregistre une légère diminution par rapport à la période précédente (carte 11). Le recul moyen du trait de côte est estimé à -2,70 m/an, contre -3,48 m/an pour l'intervalle 1973-1987. Cette atténuation apparente du taux d'érosion ne doit toutefois pas occulter l'existence de contrastes spatiaux marqués, clairement mis en évidence par la distribution cartographique des taux de variation du trait de côte.

Les pertes les plus significatives, comprises entre -21,61 et -8,60 m/an, avec une incertitude estimée à $\pm 1,41$ m/an, sont principalement localisées au niveau de la Pointe Sarène, du secteur de Joal-Fadiouth, de Palmarin, de Niodior, ainsi qu'à proximité de la bordure méridionale de Toubacouta. Dans ces secteurs, l'intensité des courants côtiers et la dynamique sédimentaire locale contribuent à l'amplification des processus érosifs, traduisant une vulnérabilité structurelle et persistante du littoral. Au total, 1 077 transects présentent une évolution érosive, soit environ 63,5 % de l'ensemble des transects analysés, correspondant à un recul cumulé de 2 907,90 m.

À l'inverse, les secteurs en accrétion témoignent d'une stabilisation relative du trait de côte. Un total de 234 transects, représentant 13,8 % du linéaire étudié, affiche des gains sédimentaires cumulés de 458,64 m. Ces dynamiques positives se concentrent principalement dans des zones partiellement protégées, notamment par la présence de formations de mangrove, telles que le sud de la Pointe Sarène et les plages internes du delta, en particulier entre les bras du Saloum et à l'est de Toubacouta. Ces secteurs semblent bénéficier d'une accalmie temporaire, liée à des conditions hydrodynamiques favorables et à des phénomènes ponctuels d'accumulation sédimentaire.



Carte 11 : Évolution du trait de côte de la Petite-Côte au delta du Saloum de 1987 à 2002

Au cours de la période 1987-2002, le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, demeure caractérisée par une dynamique érosive dominante, bien que le taux moyen de recul du trait de côte enregistre une légère atténuation par rapport à la période 1973-1987 (-2,70 m/an contre -3,48 m/an). Cette phase est marquée par une érosion diffuse mais continue, affectant la majorité des transects analysés, en particulier dans les secteurs de Palmarin, Dionewar et Toubacouta.

Les phénomènes de stabilisation et d'accrétion, bien que localement observés, restent spatialement limités et quantitativement insuffisants pour infléchir la tendance générale à la régression du linéaire côtier. Cette configuration traduit une vulnérabilité structurelle accrue du littoral, déjà soumise à des contraintes liées aux dynamiques sédimentaires naturelles, et progressivement exacerbée par l'émergence d'interventions anthropiques localisées, telles que les aménagements côtiers, les constructions et les activités d'exploitation des ressources.

3. Évolution du trait de côte de 2002 à 2013

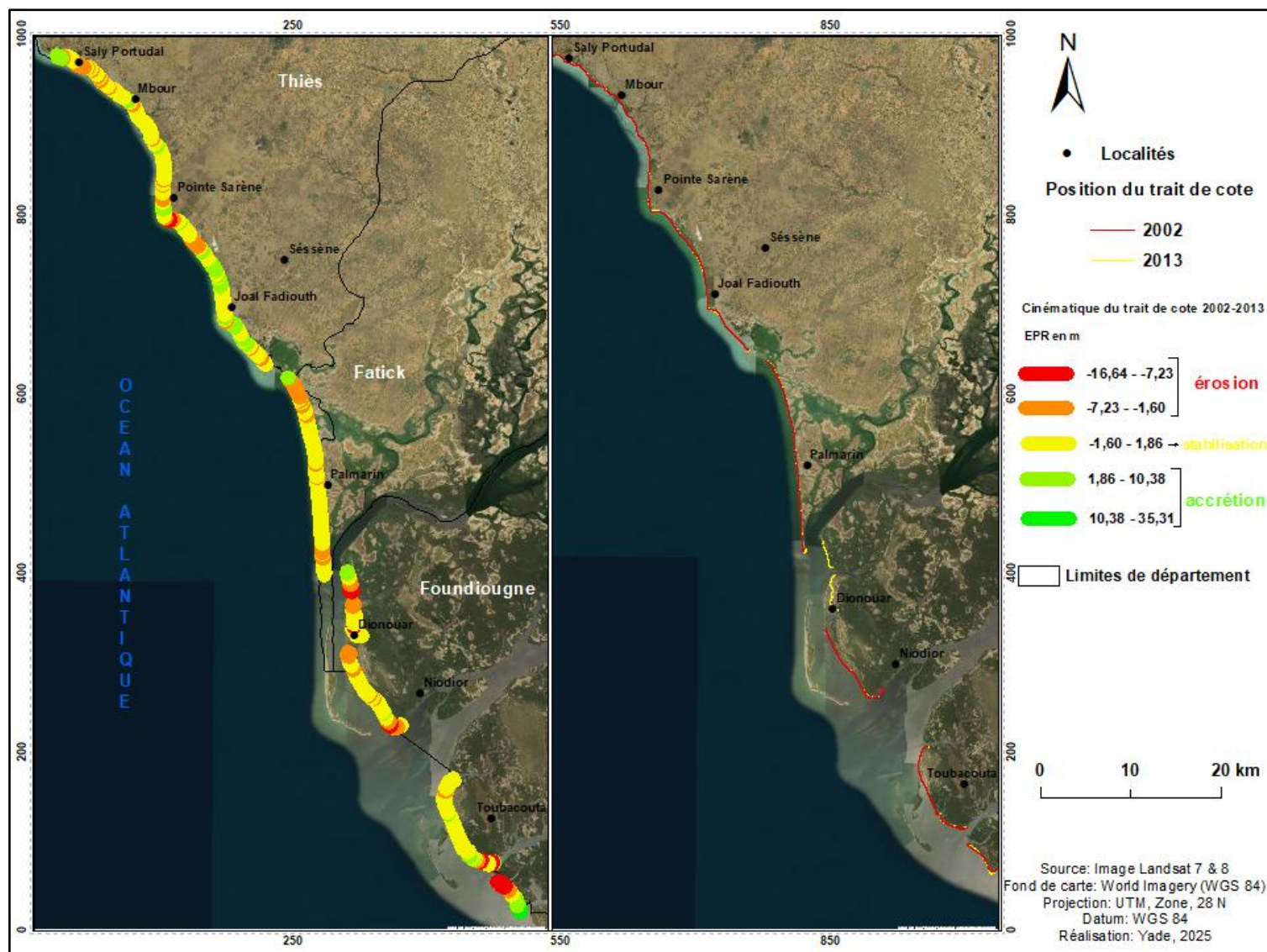
La période 2002-2013 correspond à une phase de transition majeure dans l'évolution morphodynamique du littoral sénégalais, de la Petite-Côte aux îles du Saloum. Bien que la tendance générale demeure dominée par des processus érosifs, une intensification des dynamiques d'accrétion est observée sur plusieurs secteurs du linéaire côtier. Les taux de variation négatifs, compris entre -16,64 et -1,60 m/an, restent toutefois significatifs, bien qu'ils s'inscrivent majoritairement dans la marge d'incertitude estimée à $\pm 1,92$ m/an. Ces dynamiques érosives persistent notamment dans les secteurs de Saly Portudal, de Mbour, de la Pointe Sarène, de Palmarin, de Dionewar et au sud de Toubacouta.

L'analyse statistique des transects confirme cette évolution contrastée. Sur les 1 679 transects étudiés, 846 présentent une dynamique érosive, soit environ 50,4 % du total, avec un taux moyen de recul du trait de côte estimé à -2,28 m/an, en légère diminution par rapport à la période précédente. Malgré cette atténuation relative, l'érosion demeure concentrée dans des zones caractérisées par une forte instabilité naturelle et/ou soumises à des pressions anthropiques croissantes, telles que les extractions de sable et les effets indirects des ouvrages côtiers implantés sur ou à proximité des plages.

La singularité de cette période réside dans l'augmentation nette de l'accrétion, qui concerne 489 transects, soit environ 29 % du linéaire analysé, pour un gain sédimentaire cumulé de 1 198,05 m. Ces avancées du trait de côte sont particulièrement marquées au sud de Toubacouta (secteur de Djinack Bara), au nord de Saly Portudal, au nord de Dionewar, ainsi que

ponctuellement à Joal-Fadiouth, notamment dans des secteurs où la mangrove et les cordons sableux assurent un rôle tampon efficace face aux forçages hydrodynamiques. Cette évolution positive peut être attribuée à des processus naturels de ré-engraissement sédimentaire, mais également à des effets différés de certains aménagements de protection situés en amont du système côtier.

Enfin, la stabilisation du trait de côte concerne une portion plus étendue du littoral par rapport aux périodes antérieures, traduisant une régulation locale accrue des dynamiques morpho-sédimentaires. Cette stabilisation résulte vraisemblablement de l'interaction de plusieurs facteurs, notamment les rétroactions morphodynamiques, le développement de la végétation littorale et l'atténuation locale des forçages hydrodynamiques.



Carte 12 : Évolution du trait de côte de la Petite-Côte au delta du Saloum de 2002 à 2013

La période 2002-2013 se caractérise par une bipolarisation marquée des dynamiques littorales, traduite par la coexistence de processus érosifs persistants dans certains secteurs et de dynamiques d'accrétion plus intenses et spatialement plus étendues que lors des périodes antérieures. Cette évolution progressive témoigne à la fois de la résilience intrinsèque de certains environnements côtiers, en particulier les secteurs dominés par la mangrove et les zones d'accumulation sédimentaire, et des effets différenciés des interventions anthropiques sur l'évolution du trait de côte.

Néanmoins, malgré l'émergence de dynamiques localement favorables, la vulnérabilité globale du littoral demeure élevée, notamment dans les secteurs densément anthropisés ou insuffisamment protégés, où l'exposition aux forçages hydrodynamiques et aux pressions humaines continue d'amplifier les risques d'érosion et de dégradation côtière.

4. Évolution du trait de côte de 2013 à 2024

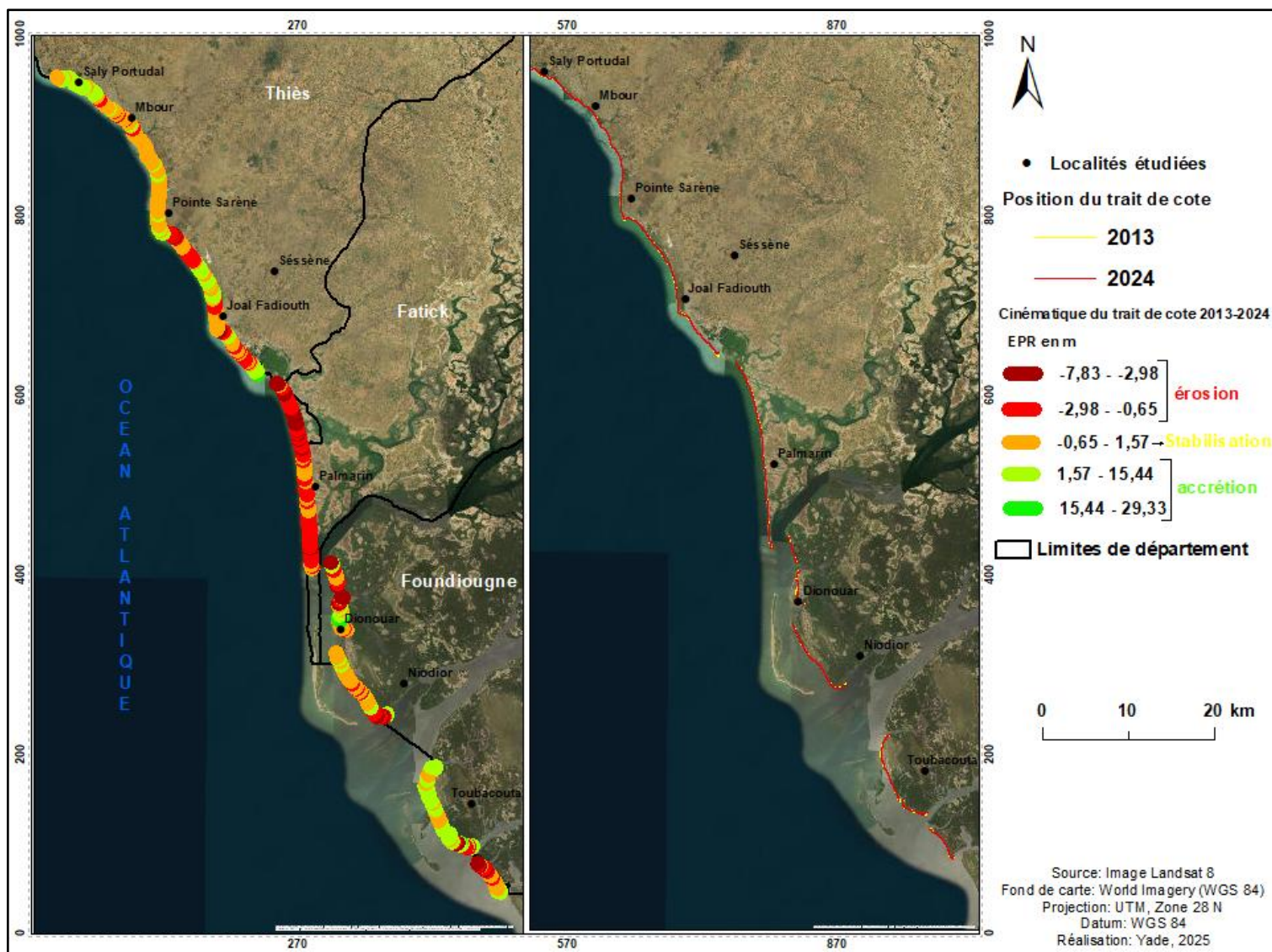
Entre 2013 et 2024, l'évolution du trait de côte de la Petite-Côte au delta du Saloum demeure caractérisée par une dynamique spatiale fortement hétérogène, marquée par une alternance contrastée entre secteurs en recul et zones en progradation. Le taux moyen annuel de variation du trait de côte est estimé à $-1,89$ m/an, avec une incertitude comparable à celle de la période précédente ($\pm 1,92$ m/an), ce qui confirme un ralentissement progressif du rythme d'érosion à l'échelle du linéaire étudié.

Les segments présentant des vitesses de recul comprises entre $-7,83$ et $-0,65$ m/an restent néanmoins largement représentés, en particulier dans les secteurs de Mbour, au sud de la Pointe Sarène, à Joal-Fadiouth, à Palmarin, à Dionewar, à Niodior, ainsi qu'au sud de Toubacouta (secteur de Djinack Bara). Ces zones témoignent d'une érosion persistante, résultant de la combinaison de forçages naturels, notamment l'action de la houle, les régimes de marée et la nature meuble des formations sédimentaires, et de pressions anthropiques croissantes, telles que l'urbanisation côtière, la pression foncière, les constructions et les perturbations du transit sédimentaire. Au total, 666 transects présentent une dynamique régressive, correspondant à environ 46,6 % des transects analysés, pour un recul cumulé de 1 258,74 m.

Parallèlement, une augmentation significative des secteurs en accrétion est observée, notamment autour de Toubacouta, dans certaines portions de Dionewar, au nord et au sud de Joal-Fadiouth, et plus particulièrement dans la commune de Saly Portudal. Dans ce dernier secteur, les dynamiques de progradation sont fortement influencées par les opérations de rechargement artificiel des plages mises en œuvre dans le cadre du projet de récupération du

littoral, avec des taux d'avancée atteignant localement +29,33 m/an. Cette tendance positive concerne 756 transects, soit environ 53 % du linéaire mesuré, pour un gain sédimentaire cumulé de 2 086,56 m, traduisant une inversion notable de la dynamique dominante par rapport aux décennies précédentes.

Enfin, les segments caractérisés par une relative stabilité du trait de côte, bien que plus marginaux, correspondent principalement à des zones de transition morphodynamique, généralement situées à la périphérie des secteurs soumis à des évolutions plus marquées. Ces portions du littoral démontre un processus de réajustement progressif des dynamiques côtières, résultant de l'effet différencié des ouvrages de protection, du rechargement des plage de Saly portudal récents et de la résilience naturelle de milieux encore partiellement préservés.



Carte 13 : Évolution du trait de côte de la Petite-Côte au delta du Saloum de 2013 à 2024

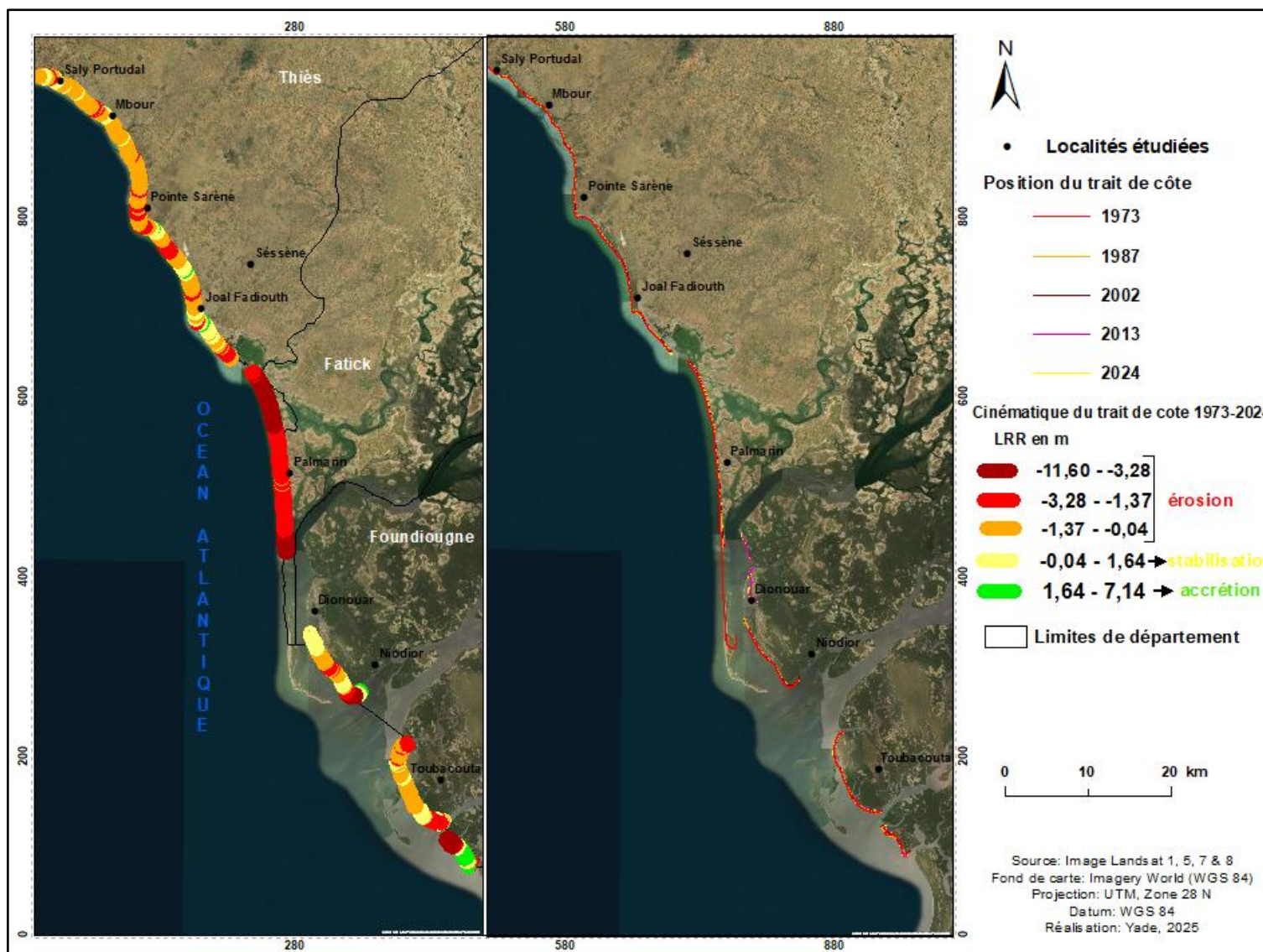
Au cours de la période 2013-2024, le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, a présenté une dynamique relativement plus équilibrée que lors des périodes précédentes, avec une proportion de secteurs en accrétion désormais supérieure à celle des secteurs en érosion. Ce basculement de tendance résulte de l'interaction de plusieurs facteurs, notamment : l'effet localisé des ouvrages de protection côtière, le rechargement de sédiments à la plage de Saly Portudal, le renforcement des milieux végétalisés (mangroves, herbiers marins) et les modifications du régime sédimentaire régional.

Malgré cette évolution positive, la vulnérabilité du littoral demeure élevée dans plusieurs secteurs stratégiques, soulignant la nécessité d'une approche de gestion différenciée du trait de côte, basée sur une connaissance fine et localisée des dynamiques morpho-sédimentaires.

5. Synthèse de l'évolution du trait de côte de 1973 à 2024

L'analyse cinématique du trait de côte sur l'ensemble de la période 1973-2024 met en évidence une tendance générale à la régression du littoral sur le linéaire étudié, s'étendant de la Petite-Côte jusqu'au delta du Saloum (cf. carte 14). Cette dynamique érosive, bien que prédominante à l'échelle régionale, présente toutefois une forte hétérogénéité spatiale. Certains secteurs montrent des évolutions contrastées, avec des portions de littoral en progradation, principalement dans des zones protégées ou caractérisées par une dynamique sédimentaire favorable, telles que les formations de mangrove ou les secteurs soumis à l'influence fluviale.

Cette lecture globale ne doit pas occulter la complexité des dynamiques locales, où coexistent des processus de recul, de stabilité et d'avancée du trait de côte, modulés par les contextes géomorphologiques, les conditions hydrodynamiques et les interventions anthropiques. Il convient également de noter que l'ensemble des résultats présentés est associé à une incertitude estimée à $\pm 0,58$ m/an, reflétant les limites méthodologiques inhérentes aux techniques de détection et de traitement des traits de côte à partir d'images satellitaires multi-temporelles.



Carte 14 : Synthèse de l'évolution du trait de côte de la Petite-Côte au delta du Saloum de 1973 à 2024

L'analyse de la carte d'évolution du trait de côte sur l'ensemble de la période 1973-2024 (cf. carte 14) révèle une tendance générale à la régression du littoral, avec un taux moyen de recul estimé à -1,69 m/an selon la méthode de régression linéaire (LRR). Cependant, cette moyenne globale masque une forte variabilité spatio-temporelle, traduisant des dynamiques différenciées selon les secteurs. Les vitesses de recul varient en effet entre -11,60 m/an et -0,04 m/an, soulignant l'hétérogénéité de la vulnérabilité du linéaire côtier.

Les secteurs les plus fortement impactés par l'érosion se localisent au nord et au sud de Palmarin, ainsi que dans plusieurs portions du delta du Saloum, notamment à Djiffer, Niodior, Bétenty et au nord de Djinack Bara. Des reculs significatifs sont également enregistrés au nord de Mbour et à la Pointe Sarène, avec des taux pouvant atteindre -11,06 m/an. D'autres segments littoraux, bien que soumis à une régression, présentent des vitesses d'érosion plus modérées, comprises entre -3,28 m/an et -0,04 m/an.

Sur l'ensemble de la période étudiée, 1158 transects présentent une évolution régressive, correspondant à une perte cumulée de 1957,02 m. Ces résultats confirment l'ampleur et la persistance du phénomène d'érosion le long de la Petite-Côte, attribuable à l'interaction de facteurs géomorphologiques, hydro-climatiques et anthropiques.

À l'inverse, les secteurs en accrétion sont moins étendus et spatialement plus localisés. Ils concernent essentiellement les zones à forte densité de mangrove, qui agissent comme un tampon naturel, favorisant la rétention sédimentaire et l'atténuation de l'énergie des houles. Les dynamiques progradantes sont principalement observées au sud de Toubacouta (notamment au sud de Djinack Bara) et, ponctuellement, sur certaines portions du littoral telles que le sud de Joal-Fadiouth, la Pointe Sarène et le sud de Niodior. L'accrétion moyenne y est estimée à +1 m/an, avec 294 transects concernés, représentant un gain cumulé de 294 m sur l'ensemble de la période.

Tableau 7: Synthèse de l'évolution moyenne du trait de côte du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, de 1973 à 2024

Périodes Variables	Moyenne en m/an			Nombre de transects		Total érosion par période en m	Total accrétion par période en m	Indices calculés
	Érosion	Stabilisation	Accrétion	En érosion	En progradation			
1973-1987 (ERP)	-3,48	.....	3,78	1446	146	5032,08	551,88	EPR
1987-2002(ERP)	-2,70	.....	1,96	1077	234	2907,90	458,64	
2002-2013(ERP)	-2,28	.....	2,45	846	489	1928,88	1198,05	
2013-2023(ERP)	-1,89	.....	2,76	666	756	1258,74	2086,56	
Evolution globale 1973-2024 en LLR	-1,69	.....	1,00	1158	294	1957,02	294	LRR

L'analyse diachronique de l'évolution du trait de côte sur la période 1973-2024 met en évidence une tendance générale à la régression du littoral, bien que les intensités de recul varient sensiblement selon les sous-périodes considérées. Ces résultats traduisent une dynamique spatio-temporelle contrastée du trait de côte, reflétant à la fois l'importance des aléas naturels, tels que l'action des houles, les submersions marines et les déficits sédimentaires, et la diversité des réponses territoriales mises en œuvre par les communautés locales et les autorités en matière de gestion et de protection du littoral.

6. Discussion des résultats de la cinématique du trait de côte

L'évolution diachronique du trait de côte sur la période 1973-2024 met en évidence un recul moyen global estimé à -1,69 m/an, avec une dynamique temporelle hétérogène. La phase initiale, entre 1973 et 1987, est caractérisée par une érosion particulièrement intense (-3,48 m/an), suivie d'une atténuation relative au cours des périodes suivantes (-2,70 m/an puis -2,28 m/an) et d'un ralentissement plus marqué durant 2013-2024 (-1,89 m/an). Cette trajectoire traduit une dynamique littorale contrastée, où coexistent des tronçons fortement régressifs et des poches locales en accrétion.

Ces résultats s'inscrivent dans les grandes tendances internationales. Luijendijk *et al.* (2018), à partir d'une analyse globale d'images satellitaires, ont montré que près de 24 % des plages sableuses mondiales reculent à des taux supérieurs à -0,5 m/an. Les valeurs observées sur la Petite-Côte et le Saloum, qui atteignent localement -3,5 m/an, classent ce littoral parmi les zones à forte vulnérabilité. À l'échelle régionale, Boateng (2012) et Mensah et Appeaning Addo (2011) rapportent, au Ghana, des taux moyens de recul compris entre $-1,6 \pm 0,4$ m/an et $-2,0 \pm 0,44$ m/an selon les secteurs, comparables à ceux mesurés sur la Petite-Côte et le delta du Saloum durant les décennies 1970-1980. Au Bénin et au Togo, certains tronçons atteignent des reculs extrêmes de -5 m/an (Nourdi *et al.*, 2021), illustrant la possibilité de crises morphodynamiques localisées, cohérentes avec les pics d'érosion identifiés dans la présente étude.

À l'échelle nationale, les analyses menées sur la façade nord de Dakar par Pouye *et al.* (2022) ont montré un recul moyen de -0,44 m/an, inférieur aux valeurs enregistrées sur la Petite-Côte et le Saloum. Cette divergence met en évidence l'influence des contextes morphologiques et hydrodynamiques : les cordons sableux exposés aux houles atlantiques présentent une sensibilité accrue par rapport aux falaises rocheuses ou aux baies plus protégées. Par ailleurs, les travaux de Sadio *et al.* (2022) sur l'embouchure du Saloum soulignent le rôle déterminant

de la mobilité des passes et chenaux dans l’alternance érosion/accrétion locale, en accord avec l’augmentation récente des transects en progradation dans ce secteur.

Sur le plan méthodologique, l’utilisation de DSAS (*End Point Rate, Linear Regression Rate-of-change*) reste conforme aux standards internationaux pour l’analyse des séries multi-décennales (Jonah *et al.*, 2016). Néanmoins, les incertitudes liées à la qualité des images, à la densité temporelle et à l’alignement des traits de côte doivent être intégrées, en particulier pour interpréter les fluctuations inter-décennales. La comparaison de ces limites avec les données de la littérature montre que la trajectoire observée pour 1973-2024 est cohérente avec les tendances globales et régionales.

En définitive, la confrontation des résultats obtenus avec ceux rapportés dans la littérature scientifique internationale (Luijendijk *et al.*, 2018), régionale (Boateng, 2012 ; Mensah et Appeaning Addo, 2011 ; Nourdi *et al.*, 2021) et nationale (Sadio *et al.*, 2022 ; études sur Dakar) met en évidence une convergence forte : le littoral sénégalais connaît un recul significatif, supérieur aux moyennes mondiales et comparable aux zones les plus vulnérables du Golfe de Guinée. Ces constats renforcent la validité scientifique de l’analyse et soulignent l’urgence de mettre en œuvre une gestion intégrée et différenciée des espaces côtiers.

Tableau 8: Comparaison des taux d’évolution du trait de côte des années 1970 à aujourd’hui

Zone / Étude	Période	Taux observés (m/an)	Commentaires
De la Petite-Côte au delta du Saloum (Cette thèse, 1973-2024)	1973-2024	Moyenne -1,69 ; pics -3,48	Recul marqué avec atténuation récente et poches d’accrétion
Luijendijk <i>et al.</i> (2018, Monde)	1984-2016	24 % des plages > -0,5	Référence mondiale, confirme la vulnérabilité
Boateng (2012, Ghana)	1986-2007	-1,6 ± 0,4	Comparable aux taux moyens Petite-Côte
Mensah et Appeaning Addo (2011, Keta, Ghana)	1970s-2005	-2,0 ± 0,44	Proche de la phase 1973-1987 (-3,48 m/an)
Nourdi <i>et al.</i> (2021, Bénin-Togo)	1980-2015	Jusqu’à -5,0	Cas extrêmes supérieurs aux moyennes locales
Pouye <i>et al.</i> (2022, Dakar)	1990-2020	-0,44 (côte nord Dakar)	Valeur confirmée par SCIRP (2022), moins exposée que Petite-Côte
Sadio <i>et al.</i> (2022, Delta du Saloum)	1979-2019	Variable : érosion et accrétion selon passes	Met en évidence la mobilité des chenaux

Conclusion du chapitre IV

L'analyse diachronique de la cinématique du trait de côte, de Saly Portudal jusqu'au delta du Saloum, sur la période 1973-2024, met en évidence une dynamique littorale contrastée, caractérisée par l'alternance de phases d'érosion marquée, de périodes de stabilisation ponctuelle et d'épisodes d'accrétion localisée.

À l'échelle globale, la tendance demeure régressive, comme l'indique le taux moyen calculé par régression linéaire (LRR), estimé à $-1,69$ m/an sur l'ensemble de la période. Ce recul structural du littoral résulte de l'interaction de facteurs naturels (houles, élévation du niveau marin, nature meuble des sédiments) et de pressions anthropiques telles que l'urbanisation côtière, la perturbation du transit sédimentaire et des aménagements non intégrés.

L'analyse par sous-périodes révèle une diminution progressive de l'intensité moyenne de l'érosion, passant de $-3,48$ m/an entre 1973 et 1987 à $-1,89$ m/an entre 2013 et 2024. Cette réduction ne traduit toutefois pas une amélioration uniforme du littoral, mais plutôt une redistribution spatiale des dynamiques, avec l'émergence plus marquée de zones en accrétion à partir des années 2000. Ces secteurs correspondent à des zones protégées ou à forte résilience écologique, notamment les mangroves, les plages abritées et les zones bénéficiant de dépôts sédimentaires naturels, comme à Saly Portudal et Djiffer, mais également dans des secteurs protégés par des infrastructures de défense ou des formations végétales telles que Bétenty, Joal-Fadiouth et autres.

L'augmentation progressive de la progradation, passant de 146 transects en 1973-1987 à 756 transects en 2013-2024, avec un gain cumulé maximal de $2\,086,56$ m, traduit à la fois l'effet différencié des interventions anthropiques, telles que les ouvrages de protection et le rechargement artificiel des plages (notamment le projet de rechargement à Saly), et l'importance des dynamiques naturelles locales, parfois sous-estimées dans les projets d'aménagement.

Néanmoins, cette évolution positive ne doit pas occulter les poches de vulnérabilité persistantes, notamment autour de Mbour, Joal-Fadiouth, Pointe Sarène, Palmarin, Niodior, Dionewar et au sud de Toubacouta, où l'érosion reste active malgré les variations globales. Ces secteurs soulignent la nécessité d'une gestion intégrée et différenciée du littoral, fondée sur des diagnostics morphodynamiques précis et tenant compte des interactions complexes entre milieux naturels, pratiques humaines et infrastructures de protection.

Chapitre V : Projections futures de l'évolution du trait de côte (2055, 2085 et 2100)

La modélisation prédictive de l'évolution future du trait de côte constitue un enjeu à la fois scientifique et sociétal majeur pour les littoraux sénégalais, fortement exposés à la variabilité climatique et aux pressions anthropiques. Les secteurs de la Petite-Côte et du delta du Saloum présentent des dynamiques côtières complexes, caractérisées par l'alternance d'érosion, d'accrétion et de modifications rapides des environnements littoraux (Dièye *et al.*, 2013 ; Sadio *et al.*, 2017). La compréhension et l'anticipation de ces phénomènes sont essentielles pour la planification des infrastructures, la gestion des risques et la préservation des écosystèmes côtiers (MEPN, 2019 ; Dème *et al.*, 2024).

Pour répondre à ces enjeux, un modèle prédictif hybride, combinant DSAS, la règle de Bruun, les projections climatiques du GIEC (AR6) et les données hydrodynamiques (houles), a été développé. La composante statistique repose sur le *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), permettant d'estimer les tendances historiques du trait de côte via le calcul de l'indice *Linear Regression Rate-of-change* (LRR) (Thieler *et al.*, 2009 ; Crowell *et al.*, 1997). Ces tendances sont ensuite intégrées à la règle de Bruun (1962, 1988), qui établit la relation entre l'élévation du niveau marin et le recul du rivage (Bruun, 1962 ; Cooper et Pilkey, 2004).

Les projections climatiques ont été élaborées à partir des scénarios AR6 du GIEC (SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-8.5), reconnus comme la référence mondiale en matière de changement climatique (IPCC, 2021). Les conditions hydrodynamiques régionales ont été prises en compte à l'aide de la formule de Hallermeier (1981), permettant d'estimer la profondeur de fermeture en fonction de la hauteur significative et de la période des vagues (Dean et Dalrymple, 2002). L'intégration de la variabilité des houles contribue à réduire les marges d'incertitude des projections.

Enfin, les particularités locales et les infrastructures côtières existantes ont été intégrées afin d'assurer la pertinence contextuelle du modèle. Il s'agit notamment des dynamiques de la flèche de Sangomar dans le delta du Saloum (Ndour *et al.*, 2018) et des trajectoires d'érosion observées en Casamance (Niang-Diop *et al.*, 2020).

Ce chapitre présente les résultats obtenus à partir de cette approche intégrée et discute la portée, les limites et les incertitudes des projections pour les horizons 2055, 2075 et 2100, en vue de fournir un cadre scientifique pertinent pour la planification et la gestion des littoraux sénégalais.

1. La modélisation de l'évolution future du trait de côte

Cette méthodologie décrit de manière systématique l'ensemble du processus mis en œuvre pour analyser et projeter la dynamique du trait de côte le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte jusqu'au sud du delta du Saloum. Elle repose sur une approche intégrée, combinant des données multisectorielles, des outils géomatiques et statistiques, des modèles et formules mathématiques, ainsi que des paramètres physiques et socio-anthropiques. Cette démarche est conçue pour assurer une reproductibilité scientifique complète et permettre une interprétation rigoureuse des dynamiques côtières passées, présentes et futures.

1.1. Acquisition et préparation des données

L'analyse s'appuie sur une base de données diversifiée et consolidée, intégrant des sources multisectorielles afin de caractériser la dynamique du trait de côte sur la période 1973-2024. Les images satellitaires Landsat MSS, TM, ETM+ et OLI (USGS/NASA, 1973-2024) ont été utilisées pour reconstituer l'évolution diachronique du rivage. Ces séries sont complétées par des données climatiques (températures, précipitations et vents) provenant d'ERA5 (ECMWF) et des bases USGS/NASA (1980-2024), ainsi que par des données océanographiques issues d'ERA5, de la NOAA et du modèle WaveWatch III (Tolman, 2009).

Les modèles topographiques et bathymétriques mobilisés comprennent le SRTM 30 m (NASA/USGS, 2000) et le modèle GEBCO. La composante sédimentologique a été caractérisée à l'aide d'analyses granulométriques réalisées en 2025, conformément à la norme NF EN 12620. L'occupation du sol a été cartographiée par classification supervisée des images satellites (Lillesand *et al.*, 2015), tandis que des enquêtes socio-économiques et l'inventaire des ouvrages de protection côtière (digues, épis, enrochements) viennent compléter le corpus de données.

L'ensemble des informations a été harmonisé et reprojeté dans le système de coordonnées UTM zone 28N (EPSG :32628), garantissant la cohérence spatiale et facilitant les analyses multi-décennales intégrées.

1.2. Extraction du trait de côte et analyse diachronique

Pour rappel, les traits de côte pour les années 1973, 1987, 2002, 2013 et 2024 ont été extraits à partir de l'indice NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (McFeeters, 1996), permettant de discriminer les zones terrestres et aquatiques avec précision. L'analyse diachronique a été réalisée à l'aide de l'extension DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) pour ArcGIS (Thieler *et al.*, 2009), fournissant un ensemble d'indicateurs statistiques pour quantifier les changements

du trait de côte. Parmi ces indicateurs, deux mesures principales ont été utilisées : l'*End Point Rate* (EPR), qui calcule le taux de variation entre deux dates extrêmes, et le *Linear Regression Rate-of-change* (LRR), qui estime la tendance linéaire du recul ou de l'accrétion sur l'ensemble de la période étudiée.

-EPR (*End Point Rate*)

$$\text{Formule: } EPR = D / \Delta t$$

L'EPR mesure la vitesse moyenne de déplacement du rivage entre deux dates. En rapportant la distance (D) au temps (Δt), il permet de quantifier un rythme d'érosion ou d'accrétion. Cet indicateur est simple mais utile pour comparer des périodes distinctes,

où

- D : distance entre deux traits de côte (m)
- Δt : intervalle de temps entre les deux dates (années)

L'EPR traduit la vitesse moyenne de déplacement du rivage entre deux dates.

-LRR (*Linear Regression Rate*)

$$\text{Formule: } LRR = \frac{\sum ((t_i - \bar{t}) (y_i - \bar{y}))}{\sum ((t_i - \bar{t})^2)}$$

Le LRR s'appuie sur une régression linéaire qui relie la position du trait de côte aux années. Il fournit une tendance générale, atténuant l'influence des anomalies ponctuelles. Cet indicateur est plus pertinent que l'EPR pour caractériser l'évolution à long terme.

- t_i : année de mesure du trait de côte i
- \bar{t} : moyenne des années
- y_i : position du trait de côte (distance à la baseline)
- \bar{y} : moyenne des positions
- n : nombre total de traits de côte

Le LRR permet d'estimer une tendance moyenne sur toute la période étudiée, en réduisant l'effet des anomalies locales (Crowell *et al.*, 1997).

1.3. Modélisation prospective

La projection des positions futures du trait de côte repose sur un modèle hybride intégrant plusieurs composantes.

a. Projection linéaire basée sur le prolongement de la tendance estimée par le LRR.

b. Règle de Bruun (1962, 1988) :

$$\text{Formule : } \Delta X = (S \times L) / (h^* + B)$$

Cette équation exprime la règle de Bruun. Elle montre que le recul du rivage (ΔX) est proportionnel à l'élévation du niveau marin (S) et à la largeur active du profil côtier (L), et inversement lié à la profondeur de fermeture (h^*) et à la hauteur de dune (B). Elle illustre le transfert sédimentaire induit par la montée des eaux.

- ΔX : recul horizontal du trait de côte (m)

- S : élévation du niveau marin (m)

- L : largeur de la zone active du profil côtier (m)

- h^* : profondeur de fermeture (m)

- B : hauteur de la dune ou berme (m)

Cette relation met en évidence le lien entre l'élévation du niveau marin et la transgression horizontale du rivage.

La profondeur de fermeture (h^*) a été estimée à partir de la formule de Hallermeier (1981) :

$$\text{Formule: } h^* = 2.28 \cdot H_s - 68.5 \cdot (H_s^2 / (g \cdot T_p^2))$$

La formule de Hallermeier calcule la profondeur de fermeture (h^*), qui correspond à la limite au-delà de laquelle les vagues n'induisent plus de transport sédimentaire significatif. Cette valeur est cruciale pour appliquer correctement la règle de Bruun.

- h^* : profondeur de fermeture (m)

- H_s : hauteur significative des vagues (m)

- T_p : période de pic des vagues (s)

- g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)

Cette équation délimite la profondeur maximale affectée par le transport sédimentaire.

c. Impact des tempêtes : simulation simplifiée via XBeach (Roelvink *et al.*, 2009).

d. Scénarios climatiques AR6 : SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 (IPCC, 2021).

1.4. Intégration des paramètres physiques et anthropiques

Le modèle intègre les variables climatiques (séries de précipitations et températures issues d'ERA5), les caractéristiques de la houle (hauteur significative H_s , période T_p , direction θ), ainsi que les données topographiques et bathymétriques (profils issus du MNT et de GEBCO).

La composante granulométrique est décrite par des indices normalisés :

$$\text{Formule : } C_u = D_{60} / D_{10}$$

Le coefficient d'uniformité (C_u) renseigne sur la dispersion granulométrique. Un C_u faible indique un sédiment bien trié, tandis qu'un C_u élevé traduit une plage de tailles plus larges.

$$\text{Formule : } C_c = (D_{30}^2) / (D_{10} \times D_{60})$$

Le coefficient de courbure (C_c) décrit la forme de la courbe granulométrique. Combiné à C_u , il permet d'évaluer la qualité du tri sédimentaire et d'anticiper la mobilité des matériaux.

MF : module de finesse, indicateur global du tri sédimentaire

Le module de finesse (MF) synthétise la tendance globale de la granulométrie. Il aide à interpréter la stabilité et la mobilité potentielle des dépôts littoraux.

Ces paramètres caractérisent la mobilité et la stabilité des sédiments (NF EN 12620, 2002).

Enfin, les ouvrages de protection côtière (digues, épis, enrochements) sont intégrés au modèle en tant que facteurs d'atténuation ou de transfert de risque, pour tenir compte des effets anthropiques dans la dynamique littorale.

1.5. Incertitudes et marges d'erreur

Les incertitudes concernent globalement trois éléments :

-Erreur standard (SE) :

$$SE = \sqrt{[\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-2)]}$$

L'erreur standard (SE) évalue la dispersion moyenne des écarts entre les positions observées et estimées. Elle permet de juger de la précision de la régression appliquée au trait de côte.

- y_i : position observée du trait de côte

- \hat{y}_i : position estimée par la régression

- n : nombre de points de mesure

-Intervalle de confiance à 95 % (IC95) :

$$IC95 = LRR \pm t_{0.975, (n-2)} \times SE$$

L'intervalle de confiance à 95 % définit la fourchette dans laquelle la tendance du trait de côte est estimée avec une probabilité élevée. Il renforce la crédibilité des projections.

- $t_{0.975, (n-2)}$: valeur de Student au seuil de 95 %

Cette formulation permet de quantifier l'incertitude statistique autour de la tendance moyenne (Crowell et al., 1997 ; Cooper et Pilkey, 2004).

-Propagation des erreurs :

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{LRR} + \sigma^2_{Bruun} + \sigma^2_{houle}$$

La propagation des erreurs additionne les variances issues des composantes du modèle (tendance LRR, règle de Bruun et houle). Cette approche fournit une incertitude globale réaliste pour les projections futures.

- σ^2_{LRR} : variance associée à l'ajustement statistique du LRR

- σ^2_{Bruun} : variance associée à l'application de la règle de Bruun

- σ^2_{houle} : variance liée à la variabilité hydrodynamique (houles, tempêtes)

L'intégration de ces composantes permet d'obtenir une variance globale (σ^2_{total}), à partir de laquelle sont estimées les marges d'incertitude et les intervalles de confiance des projections.

Exemple illustratif -Transect 8

À titre d'illustration, le transect n° 8, situé dans le secteur de Mbour, a été utilisé pour appliquer concrètement les équations d'incertitude.

- Marge d'erreur sur la tendance historique (LRR)

Les paramètres retenus pour ce transect sont : $SE = 0,82$ m/an, $n = 3$ (ddl = 1), $t_{0.975,1} = 12,7062$, et une tendance linéaire $LRR = -0,07$ m/an. L'intervalle de confiance à 95 % se calcule selon la formule suivante :

$$IC95(LRR) = LRR \pm t_{0.975, (n-2)} \times SE$$

En substituant les valeurs : $ME_{95} = 12,7062 \times 0,82 = 10,41 \text{ m/an}$

$$IC_{95} = -0,07 \pm 10,41 \Rightarrow [-10,48 ; 10,34] \text{ m/an}$$

La variance de la pente est : $\sigma^2_{LRR} = SE^2 = 0,82^2 = 0,6724 \text{ (m}^2/\text{an}^2)$.

Ainsi, la tendance observée (-0,07 m/an) s'accompagne d'une marge d'erreur importante ($\pm 10,41 \text{ m/an}$), conséquence du faible nombre d'observations ($n=3$) et de la valeur élevée du t critique (12,706).

- Marge d'erreur sur la projection 2055 (ΔX)

Les projections issues du modèle pour 2055 donnent un recul du trait de côte de -9,50 m (SSP126), -17,73 m (SSP245) et -44,69 m (SSP585). La variance inter-scénarios, utilisée comme proxy d'incertitude de modèle, est de 338,77 m^2 . La variance totale se calcule ainsi :

$$\sigma^2_{total} \approx \sigma^2_{LRR} + Var(scen) = 0,6724 + 338,7673 = 339,4397 \text{ m}^2$$

L'écart-type total est donc : $\sigma_{total} = \sqrt{339,4397} \approx 18,42 \text{ m}$

La marge d'erreur à 95 % autour des projections est : $ME_{95} \approx 1,96 \times 18,42 = 36,1 \text{ m}$

En prenant la moyenne des trois scénarios ($\Delta \bar{X} = -23,97 \text{ m}$), l'intervalle de confiance devient : [-60,1 ; 12,1] m.

Au transect 8, la projection moyenne des reculs à l'horizon 2055 est de -23,97 m, avec une marge d'incertitude de $\pm 36,1 \text{ m}$ à 95 %. Cette bande de confiance illustre l'intervalle plausible des reculs, en intégrant à la fois l'incertitude liée à la tendance historique (σ^2_{LRR}) et celle issue de la variabilité des scénarios climatiques (proxy des incertitudes du modèle).

- Marge d'erreur globale 2055, 2075, 2100

La marge d'erreur globale a été estimée à l'échelle du transect selon l'équation suivante :

$$\sigma^2_{total} \approx \sigma^2_{LRR} + Var(\Delta \text{ Scénarios}) + \sigma^2_{houle}$$

où σ^2_{LRR} correspond à la variance associée à la tendance historique du trait de côte, $Var(\Delta \text{ Scénarios})$ représente la variance inter-scénarios issue des projections (SSP126, SSP245, SSP585), et σ^2_{houle} traduit l'incertitude liée à la variabilité hydrodynamique (hauteur significative et période des vagues) propagée dans la formule de Hallermeier (1981).

Les valeurs ainsi obtenues par transect ont ensuite été agrégées par année de projection (2055, 2075 et 2100) à l'aide de la médiane des σ_{total} . L'utilisation de la médiane, plutôt que de la

moyenne, permet de réduire l'influence des valeurs extrêmes et d'obtenir une mesure solide de l'incertitude globale. Cette démarche offre ainsi une estimation intégrée et plus réaliste, tenant compte à la fois de la tendance statistique, de la dispersion inter-scénarios et de la variabilité hydrodynamique observée.

❖ 2055

Transects utilisés : n = 1692

Écart-type global (médiane σ_{total}) = 25.63 m (IQR : 21.804 - 31.576 m)

Marge d'erreur 95 % (médiane) \approx 50.2 m

❖ 2075

Transects utilisés : n = 1692

Écart-type global (médiane σ_{total}) = 28.39 m (IQR : 24.985 - 33.851 m)

Marge d'erreur 95 % (médiane) \approx 55.6 m

❖ 2100

Transects utilisés : n = 1692

Écart-type global (médiane σ_{total}) = 33.41 m (IQR : 30.573 - 38.161 m)

Marge d'erreur 95 % (médiane) \approx 65.5 m

Tableau 9: Marges d'erreur globales

Années	Transects utilisés	Médiane σ_{total} (m)	Moyenne σ_{total} (m)	IQR σ_{total} (m)	Marge d'erreur 95 % (médiane)
2055	1692	25.63	30.23	21.80 - 31.58	\pm 50.2
2075	1692	28.39	32.88	24.99 - 33.85	\pm 55.6
2100	1692	33.41	37.66	30.57 - 38.16	\pm 65.5

Cette approche fournit une bande d'incertitude affinée, tenant compte de la variabilité hydrodynamique réelle mesurée dans la série de houles, en plus de la tendance et de la variance inter-scénarios.

1.6. Production cartographique et SIG

Les projections spatialisées du trait de côte pour les horizons 2055, 2075 et 2100 ont été réalisées en prolongeant les transects perpendiculaires à la ligne de référence (*baseline*)

jusqu'aux positions projetées du rivage. Les résultats ont été exportés dans des formats standards (*Shapefile et GeoPackage*) afin de permettre une exploitation et une analyse dans un système d'information géographique (SIG) tel qu'ArcGIS. Les cartes générées mettent en évidence les zones susceptibles de subir des reculs ou des avancées du trait de côte, tout en intégrant les infrastructures côtières existantes et les occupations du sol potentiellement exposées aux dynamiques projetées.

1.7. Limites et reproductibilité

Cette démarche comporte certaines limites inhérentes aux méthodes et hypothèses utilisées. Premièrement, l'hypothèse de linéarité du *Linear Regression Rate-of-change* (LRR) ne prend pas en compte les discontinuités locales ou les variations non linéaires du trait de côte.

Deuxièmement, la règle de Bruun, bien que largement utilisée dans les projections globales, présente une validité partielle et fait l'objet de critiques concernant sa capacité à modéliser correctement les réponses littorales complexes

Enfin, l'efficacité réelle des ouvrages de protection côtière reste incertaine, et leur impact sur les dynamiques locales peut varier selon le contexte morphodynamique et l'entretien des infrastructures.

La reproductibilité scientifique de l'étude est néanmoins assurée par l'utilisation de logiciels libres et standards (ArcGIS, Python avec GeoPandas et Scikit-learn), l'archivage des données sous formats ouverts (GeoTIFF, Shapefile, GeoPackage, XLSX), ainsi que la documentation exhaustive des scripts et du pipeline méthodologique. Cette approche permet de garantir la traçabilité, la vérifiabilité et la répliquabilité des analyses (Roelvink *et al.*, 2009 ; IPCC, 2021).

2. Résultats et discussions

L'analyse prospective réalisée à partir du modèle hybride DSAS-Bruun-AR6-Houles a permis de générer des projections cohérentes de l'évolution du trait de côte pour les horizons 2055, 2075 et 2100. Les résultats traduisent à la fois la continuité des tendances historiques et l'influence croissante des forçages climatiques et hydrodynamiques sur les dynamiques littorales. Leur interprétation nécessite une approche multiscalaire : à l'échelle des transects, pour appréhender les variations locales d'érosion et d'accrétion, et à l'échelle régionale, pour mettre en évidence les grandes trajectoires d'évolution du littoral.

Dans cette section, les résultats sont d'abord présentés de manière descriptive, puis discutés à la lumière des processus morpho-sédimentaires, des effets des infrastructures côtières et des

scénarios climatiques projetés par le GIEC (IPCC, 2021). La confrontation avec les études antérieures menées au Sénégal et en Afrique de l’Ouest (Dièye *et al.*, 2013 ; Ndour *et al.*, 2018 ; Niang-Diop *et al.*, 2020 ; Vousdoukas *et al.*, 2020) permet d’inscrire ces résultats dans un cadre scientifique éprouvé.

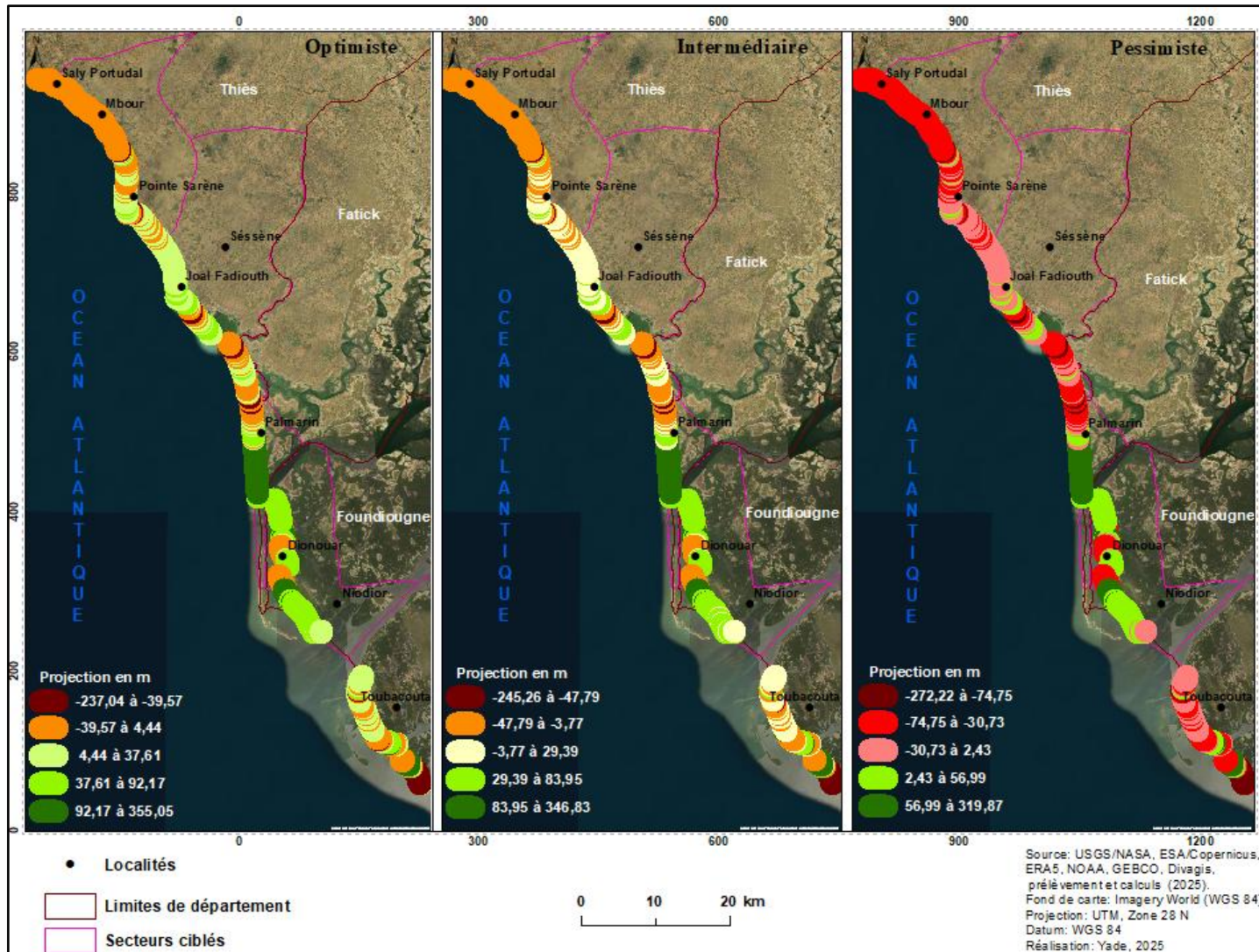
Enfin, les implications socio-économiques et environnementales des dynamiques projetées sont mises en évidence, afin de dégager des perspectives pour une gestion intégrée et durable du littoral sénégalais.

2.1. Projection de 2055

Les projections établies pour l’horizon 2055 constituent une étape intermédiaire essentielle dans l’évaluation de l’évolution future du trait de côte. Cet horizon temporel, relativement proche, offre une pertinence particulière pour l’anticipation des risques côtiers et pour la planification de mesures de gestion à court et moyen termes. Les résultats reflètent la poursuite des tendances historiques, tout en intégrant les effets d’une élévation modérée du niveau marin conformément aux scénarios climatiques du GIEC (AR6, SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-8.5) (IPCC, 2021).

À cette échéance, l’analyse révèle une variation significative de la position du trait de côte, avec des secteurs en recul marqué et d’autres relativement stables. Ces dynamiques résultent de l’interaction entre forçages naturels (houles, apports sédimentaires et morphologie côtière) et aménagements anthropiques existants. Cette étape de projection permet de quantifier les tendances d’évolution locales et d’évaluer les marges d’incertitude avant d’aborder les horizons plus lointains de 2075 et 2100.

Les cartes de projection pour 2055 (carte 15) mettent en évidence des dynamiques contrastées le long de la Petite-Côte et du delta du Saloum. L’évaluation est réalisée pour chacun des trois scénarios climatiques testés (optimiste, intermédiaire et pessimiste) afin d’appréhender la variabilité potentielle des réponses du trait de côte selon l’intensité des forçages climatiques.



Carte 15 : Projections de l'évolution du trait de côte de 2024 à 2055 de la Petite-Côte au delta du Saloum

Sous le scénario optimiste (SSP1-2.6), les projections pour 2055 indiquent une prédominance de reculs modérés, compris entre -3 et -40 m, concentrés principalement sur les fronts urbains de Saly Portudal, Mbour et Pointe Sarène. Certaines zones présentent une stabilité relative, voire une légère accrétion, notamment autour de Palmarin, Dionewar et Niodior, où les gains sédimentaires atteignent localement +30 à +350 m.

Le scénario intermédiaire (SSP2-4.5) traduit une intensification du recul, avec des valeurs comprises entre -48 et -245 m, affectant particulièrement le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum. Les secteurs en accrétion se réduisent, mais persistent au sud du delta du Saloum, notamment autour de Toubacouta et Foundiougne, avec des projections maximales atteignant +346 m.

Sous le scénario pessimiste (SSP5-8.5), la tendance régressive s'accroît fortement, avec des reculs supérieurs à -270 m au niveau de Saly, Mbour, Joal-Fadiouth et Palmarin, illustrant la vulnérabilité extrême des cordons sableux exposés aux houles atlantiques dominantes. Les zones d'accrétion deviennent marginales et se cantonnent à quelques cordons isolés autour de Béttenty et Toubacouta.

Il convient de noter que ces projections doivent être interprétées en tenant compte des marges d'incertitude : pour 2055, l'incertitude médiane est estimée à $\pm 50,2$ m. Ainsi, un recul projeté de -40 m peut, en réalité, se situer entre -90,2 m et +10 m, imposant une prudence particulière dans les secteurs où les dynamiques littorales sont contrastées.

L'analyse confirme la poursuite des tendances historiques observées sur la Petite-Côte et le delta du Saloum depuis les années 1970, amplifiées par l'élévation du niveau marin et la variabilité hydrodynamique. Les reculs importants observés dans le nord (Saly, Mbour, Pointe Sarène) traduisent la forte exposition aux houles atlantiques et la fragilité d'un littoral soumis à de fortes pressions anthropiques (urbanisation, infrastructures touristiques) perturbant les flux sédimentaires naturels (Ndour *et al.*, 2018).

À l'inverse, les secteurs de Palmarin et Dionewar, où l'on observe une accrétion relative, illustrent le rôle stabilisateur des apports sédimentaires du delta du Saloum et de la végétation côtière (mangroves, filaos), comme le soulignent Dièye *et al.* (2013). Toutefois, ces zones restent vulnérables et pourraient basculer vers l'érosion en fonction des forçages extrêmes et des incertitudes associées.

Les trajectoires projetées sous le scénario pessimiste sont cohérentes avec les scénarios du GIEC (AR6), où l'élévation accélérée du niveau marin accentue le recul du trait de côte (IPCC, 2021). Ces résultats corroborent également les observations de Niang-Diop *et al.* (2020), qui avaient identifié la forte vulnérabilité des cordons sableux aux aléas climatiques et aux tempêtes.

En termes d'implications, les secteurs les plus critiques en 2055 concernent les fronts urbains (Saly, Mbour, Joal), où le risque pour les infrastructures touristiques et résidentielles est particulièrement élevé. Dans le delta du Saloum, les villages insulaires tels que Bétenty et Dionouar apparaissent également exposés, avec un risque accru de submersion. Ces résultats soulignent la nécessité de stratégies de gestion différenciées : recours à des protections rigides pour les zones urbanisées et à des solutions douces (restauration des mangroves, replantation de filaos) dans les secteurs naturels.

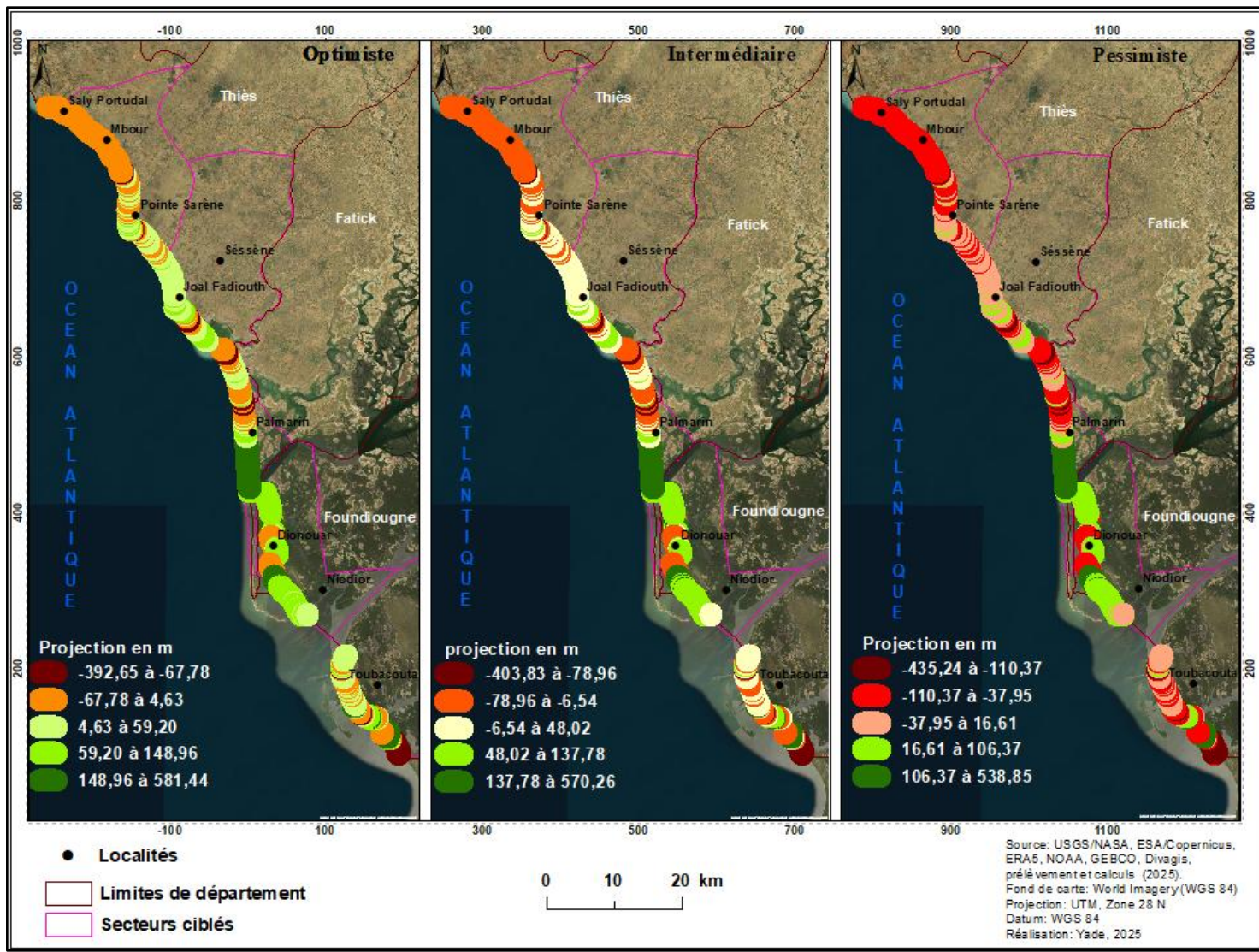
Enfin, l'intégration des marges d'incertitude rappelle que les projections doivent être interprétées comme des trajectoires plausibles plutôt que comme des prédictions absolues. Leur intérêt principal réside dans l'identification des zones vulnérables et des tendances dominantes, plus que dans la précision métrique de chaque recul projeté. Sur cette base, l'analyse se poursuit avec les projections pour l'année 2075.

2.2. Projection de 2075

L'horizon 2075 constitue un jalon intermédiaire essentiel pour l'évaluation à moyen terme de l'évolution du trait de côte, intégrant des dynamiques climatiques plus prononcées que celles projetées pour 2055. À cette échéance, l'élévation du niveau marin, combinée à l'intensification attendue des houles et des tempêtes, devrait amplifier les tendances régressives observées le long de la Petite-Côte et dans le delta du Saloum. Les scénarios climatiques du GIEC (AR6) prévoient en effet une accélération de la hausse du niveau des océans, particulièrement marquée dans le scénario SSP5-8.5, renforçant ainsi la vulnérabilité des côtes sableuses (IPCC, 2021).

Cet horizon intermédiaire revêt une importance particulière pour la planification territoriale et l'adaptation, car il coïncide avec un cycle de développement urbain et touristique croissant sur la Petite-Côte, ainsi qu'avec une pression accrue sur les ressources naturelles du delta du Saloum. Les projections pour 2075 permettent ainsi d'anticiper non seulement l'évolution morpho-sédimentaire du littoral, mais également les implications socio-économiques et environnementaux associés, en cohérence avec les observations régionales déjà rapportées au Sénégal et en Afrique de l'Ouest (Dièye *et al.*, 2013 ; Ndour *et al.*, 2018 ; Niang-Diop *et al.*, 2020).

La carte 16 présente la cartographie des projections du trait de côte selon les différents scénarios climatiques à l'horizon 2075, mettant en évidence les zones de recul et d'accrétion, ainsi que les secteurs les plus exposés aux risques de submersion et de dégradation côtière.



Carte 16 : Projections de l'évolution du trait de côte de 2024 à 2075 de la Petite-Côte au Delta du Saloum

L'analyse des projections du trait de côte à l'horizon 2075 révèle un renforcement marqué des tendances régressives observées pour 2055, avec des disparités spatiales significatives selon les scénarios climatiques.

Sous le scénario optimiste (SSP1-2.6), les reculs les plus prononcés concernent les fronts urbains de Saly Portudal, Mbour, Pointe Sarène et Joal-Fadiouth, avec des pertes atteignant jusqu'à -390 m. Néanmoins, certaines zones présentent une stabilité relative ou une accrétion modérée, notamment autour de Palmarin, Dionewar, Niodior et Toubacouta, avec des gains sédimentaires projetés compris entre +60 et +580 m.

Le scénario intermédiaire (SSP2-4.5) traduit une intensification du recul, particulièrement sur la Petite-Côte, avec des valeurs maximales de -400 m et une réduction notable des secteurs en accrétion. Les zones du delta du Saloum demeurent relativement résilientes, conservant des poches de progradation (+137 à +570 m), mais de manière plus fragmentée que dans le scénario optimiste.

Le scénario pessimiste (SSP5-8.5) met en évidence un recul généralisé et sévère, supérieur à -430 m, affectant fortement les fronts urbains (Saly, Mbour, Joal) ainsi que les zones naturelles vulnérables (Palmarin, Foundiougne). L'accrétion reste marginale, cantonnée à quelques cordons isolés autour de Bétenty et Toubacouta, sans compenser les pertes globales.

Il est essentiel de rappeler que ces projections sont soumises à une marge d'incertitude estimée à $\pm 55,6$ m pour 2075. Par conséquent, un recul projeté de -100 m pourrait effectivement varier entre -155,6 m et -44,4 m, ce qui impose une interprétation prudente et comparative des résultats, notamment dans les secteurs où les dynamiques littorales sont hétérogènes.

Les résultats confirment l'amplification des dynamiques érosives le long du littoral sénégalais. Sur la Petite-Côte, l'érosion sévère observée dans le scénario pessimiste reflète l'effet combiné de l'élévation du niveau marin, de la réduction des apports sédimentaires et de la pression anthropique croissante (urbanisation, infrastructures touristiques), perturbant le transit sédimentaire naturel (Ndour *et al.*, 2018).

À l'échelle régionale, les tendances projetées convergent avec les observations en Gambie et en Casamance, où des taux élevés de recul des cordons sableux ont été rapportés, illustrant une dynamique morphosédimentaire partagée à l'échelle ouest-africaine (Niang-Diop *et al.*, 2020). À l'échelle internationale, ces résultats sont cohérents avec les projections globales de Voudoukas *et al.* (2020), qui estiment que près de 50 % des plages sableuses mondiales pourraient reculer d'ici la fin du siècle. Les projections à l'horizon 2075 mettent ainsi en

évidence la spécificité des enjeux sénégalais, en particulier la concentration urbaine sur la Petite-Côte et la vulnérabilité des zones insulaires du delta du Saloum.

Sur le plan des potentielles implications, l'horizon 2075 apparaît particulièrement critique, en raison de la pression accrue liée au développement touristique, à l'urbanisation et aux changements socio-économiques. Les projections montrent que, sans mesures d'adaptation appropriées, des localités telles que Joal-Fadiouth, Bétenty et Dionouar pourraient subir un recul significatif de leur front littoral, avec des implications directes sur les habitats, les activités de pêche et la sécurité alimentaire.

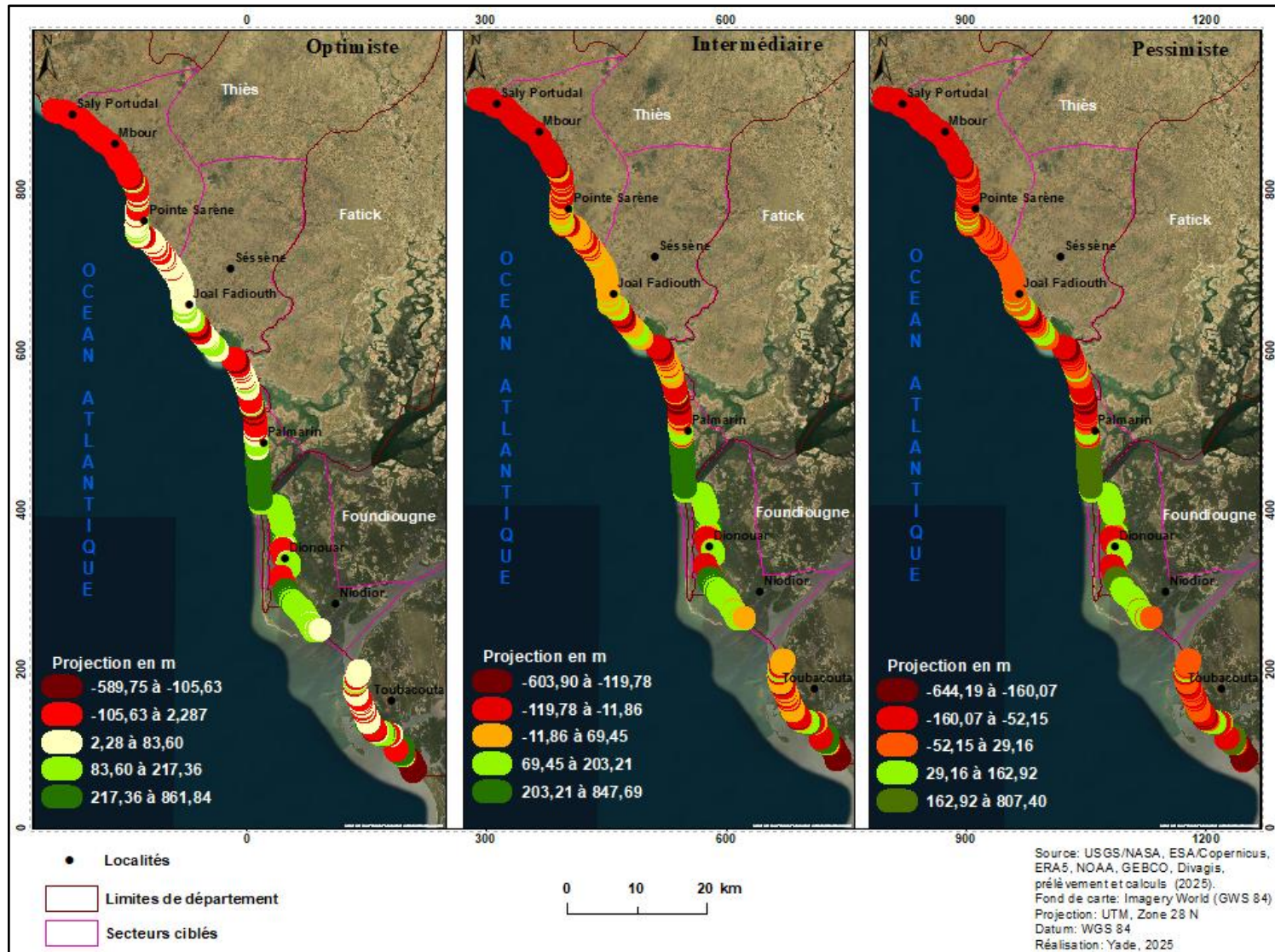
Enfin, l'intégration des marges d'incertitude souligne que l'amplitude exacte des reculs demeure variable, mais que la tendance générale, un recul généralisé du trait de côte, plus sévère au nord (Saly-Joal) et plus variable au sud (delta du Saloum), est cohérent. Cette approche probabiliste confirme que les projections doivent être utilisées comme des outils de planification et d'aide à la décision, plutôt que comme des prédictions absolues. Sur cette base, l'analyse se poursuit avec les projections à l'horizon 2100.

2.3. Projection de 2100

L'horizon 2100 constitue l'étape la plus lointaine et la plus incertaine des projections, mais également la plus critique pour l'évaluation de la vulnérabilité du littoral sénégalais face au changement climatique. À cette échéance, les scénarios climatiques du GIEC (AR6) prévoient une élévation significative du niveau marin, pouvant dépasser 1 m dans le scénario pessimiste SSP5-8.5 (IPCC, 2021). Cette élévation, associée à l'intensification des événements extrêmes (tempêtes, houles exceptionnelles) et à la pression anthropique croissante, devrait amplifier les tendances régressives déjà identifiées pour 2055 et 2075.

Les projections à l'horizon 2100 permettent de définir les trajectoires les plus probables de l'évolution du trait de côte, tout en tenant compte des marges d'incertitude inhérentes aux modèles et aux scénarios climatiques. Elles offrent ainsi une perspective prospective essentielle pour la planification à long terme, notamment en matière de relocalisation des activités humaines, de protection des infrastructures et de conservation des écosystèmes côtiers.

La carte 17 synthétise les résultats obtenus pour 2100, mettant en évidence les zones de recul et d'accrétion, ainsi que les secteurs les plus exposés aux risques de submersion et de dégradation côtière, et constitue un outil clé pour orienter des stratégies différenciées d'adaptation et de gestion intégrée du littoral sénégalais.



Carte 17 : Projections de l'évolution du trait de côte de 2024 à 2100 de la Petite-Côte au Delta du Saloum

Les projections à l'horizon 2100 indiquent une intensification significative des dynamiques érosives déjà observées pour 2055 et 2075.

Sous le scénario optimiste (SSP1-2.6), les reculs les plus importants sont localisés sur les secteurs urbanisés de Saly Portudal, Mbour, Pointe Sarène et Joal-Fadiouth, avec des pertes atteignant jusqu'à -590 m. Dans le delta du Saloum, certains secteurs ponctuels, tels que Dionewar, Niodior et Toubacouta, présentent encore des phénomènes d'accrétion, avec des gains pouvant dépasser +800 m, bien que ces zones apparaissent isolées et soumises à incertitude.

Le scénario intermédiaire (SSP2-4.5) traduit une intensification des reculs, atteignant -600 m sur la Petite-Côte. Les zones en progradation deviennent plus limitées, réduites à quelques îlots dans le delta du Saloum, avec des gains compris entre +200 et +570 m.

Dans le scénario pessimiste (SSP5-8.5), la régression devient quasi généralisée : les reculs dépassent -640 m dans plusieurs secteurs urbanisés et naturels, compromettant la continuité du littoral. Les rares zones d'accrétion se limitent à quelques cordons sableux résiduels autour de Toubacouta et Foundiougne.

Il convient de rappeler que ces projections comportent une incertitude médiane estimée à $\pm 60,5$ m pour 2100. Par conséquent, une valeur projetée de -200 m pourrait effectivement varier entre -260,5 m et -139,5 m, ce qui nécessite une interprétation prudente, en particulier à l'échelle locale.

À cette échéance, l'ensemble du littoral sénégalais présente une vulnérabilité généralisée. La Petite-Côte se révèle particulièrement critique : les fronts urbanisés de Saly, Mbour et Joal sont exposés à des reculs de plusieurs centaines de mètres. Ces résultats confirment les constats du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC, Sénégal, 2016), qui identifiait déjà ces zones comme prioritaires.

À l'échelle régionale, le delta du Saloum s'inscrit dans une dynamique ouest-africaine cohérente. Les travaux de Sané *et al.* (2017) sur la Gambie mettent en évidence une régression rapide des cordons sableux exposés aux houles atlantiques, comparable à celle projetée pour le littoral sénégalais. Ces parallèles confirment la cohérence régionale des processus érosifs, accentués par l'élévation du niveau marin.

À l'échelle globale, ces résultats sont conformes aux projections de Hinkel *et al.* (2014), selon lesquelles, sans mesures d'adaptation, plus de 200 millions de personnes pourraient être affectées par la montée du niveau de la mer d'ici 2100. Les reculs observés au Sénégal reflètent

ainsi une tendance mondiale, mettant en évidence la vulnérabilité spécifique des deltas et des cordons sableux (Nicholls et Cazenave, 2010).

Les implications sont multiples et concernent à la fois les activités humaines et les écosystèmes : perte de terres agricoles, dégradation des habitats naturels (mangroves, lagunes), submersion des infrastructures et risque accru pour la sécurité alimentaire. Dans le delta du Saloum, les villages insulaires tels que Bétenty et Dionewar sont directement exposés à des reculs pouvant dépasser 500 m, compromettant leur viabilité à long terme.

Conclusion chapitre V

Malgré les marges d'incertitude qui relativisent la précision des valeurs projetées, la tendance générale est incontestable : le littoral sénégalais est soumis à un recul généralisé et accéléré du trait de côte à l'horizon 2100. Ces résultats mettent en évidence l'urgence de stratégies d'adaptation à long terme, incluant la relocalisation planifiée des activités humaines, la conservation et la restauration d'écosystèmes tampons, ainsi que la mise en œuvre de politiques régionales coordonnées.

L'analyse prospective menée dans ce chapitre, fondée sur un modèle hybride intégrant les tendances historiques (DSAS/LRR), la règle de Bruun, les scénarios climatiques du GIEC (AR6) et les dynamiques hydrodynamiques régionales, permet de tracer des trajectoires cohérentes de l'évolution du trait de côte pour les horizons 2055, 2075 et 2100. Les résultats révèlent une intensification progressive des dynamiques érosives, particulièrement prononcée sur la Petite-Côte (Saly, Mbour, Joal) et sur certaines portions du delta du Saloum (Bétenty, Dionewar). Les marges d'incertitude associées aux projections ($\pm 50,2$ m en 2055, $\pm 55,6$ m en 2075 et $\pm 60,5$ m en 2100) confirment néanmoins la fiabilité des tendances observées : un recul généralisé et préoccupant du trait de côte, amplifié par la montée du niveau marin et la pression anthropique croissante.

Ces projections soulignent que, sans mesures d'adaptation appropriées, les implications sur les populations et les écosystèmes côtiers seront significatifs : disparition de plages, perte de terres agricoles, dégradation d'habitats naturels, submersion d'infrastructures stratégiques et augmentation des risques pour la sécurité alimentaire et l'économie littorale.

Si les chapitres précédents ont permis de caractériser la dynamique historique et d'anticiper l'évolution future du trait de côte, il devient désormais indispensable d'examiner les implications socio-économiques et environnementales associées. La troisième partie de cette étude sera consacrée à l'analyse des implications de l'érosion côtière sur les communautés

locales et les activités littorales, ainsi qu'à l'évaluation des stratégies d'adaptation mises en œuvre ou envisagées dans les politiques nationales et régionales. Cette approche permettra également de proposer des perspectives pour une gestion durable du littoral sénégalais, articulant solutions structurelles et non structurelles, à la fois à l'échelle locale et régionale, afin d'anticiper les enjeux majeurs du XXI^e siècle.

Conclusion de la deuxième partie

La deuxième partie de cette étude propose un diagnostic intégré du littoral allant de la Petite-Côte au delta du Saloum. Deux constats majeurs émergent : d'une part, l'évolution du trait de côte résulte d'une interaction étroite entre forçages naturels et pressions anthropiques ; d'autre part, les dynamiques côtières sont spatialement hétérogènes, avec des « points chauds » d'érosion concentrés à Saly, Mbour, Pointe Sarène, Djiffer et Dionewar, tandis que certaines zones restent relativement résilientes, notamment les secteurs de mangrove, mais demeurent fragiles.

Du côté des déterminants naturels, la variabilité climatique (vents, précipitations, températures) et les agents hydrodynamiques (houles dominantes de nord-ouest et d'ouest, houles de sud-ouest en saison humide, dérive littorale, marée microtidale) contrôlent le transit sédimentaire au sein des cellules côtières. La faible topographie du littoral et la bathymétrie peu profonde exposent les plages à une forte énergie de vague. Les caractéristiques granulométriques (sables fins à moyens, bien triés) indiquent une susceptibilité élevée à la mobilisation sédimentaire, ce qui explique la réactivité des profils lors des épisodes énergétiques et dans le contexte de l'élévation du niveau marin. Les enquêtes locales corroborent cette lecture : 53,6 % des répondants attribuent la dynamique côtière aux facteurs naturels, tandis que 46,4 % soulignent le rôle significatif des activités humaines.

Les pressions anthropiques contribuent à amplifier et à redistribuer spatialement l'érosion. Parmi celles-ci figurent l'urbanisation et la littoralisation rapides, l'empiètement sur le domaine public maritime, la construction d'ouvrages perpendiculaires perturbant la dérive littorale, la fermeture ou la modification des exutoires fluviaux, les dragages et rechargements ponctuels, l'extraction de sable, ainsi que la dégradation des mangroves et les implications des activités offshore. Ces interventions rigidifient certains tronçons, créent des déficits sédimentaires en aval et transfèrent le risque vers les segments non protégés. Le secteur nord (Saly-Mbour) illustre ce phénomène de « gain local / perte adjacente », tandis que le delta du Saloum bénéficie encore d'une atténuation naturelle grâce aux mangroves, désormais menacées.

L'analyse diachronique met en évidence une tendance générale au recul, ponctuée d'alternances locales d'érosion et d'accrétion. Elle souligne la nécessité d'un suivi intégré multi-sources (imagerie satellitaire, levés topo-bathymétriques) afin de distinguer les tendances de fond des fluctuations saisonnières, de définir des unités de gestion cohérentes et de hiérarchiser les priorités d'intervention.

En projection, la convergence des tendances historiques avec les scénarios d'élévation du niveau marin et d'intensification des événements énergétiques traduit une persistance, voire une amplification, des reculs sur les côtes sableuses peu végétalisées, une vulnérabilité accrue des zones basses et estuariennes en cas de dégradation des écosystèmes protecteurs, ainsi qu'un transfert de risque renforcé lorsque les réponses demeurent ponctuelles et rigides.

La troisième partie de cette étude sera consacrée à l'analyse des implications socio-économiques et environnementales des dynamiques côtières observées, à l'évaluation des stratégies d'adaptation mises en œuvre, ainsi qu'à la discussion des perspectives pour une gestion durable et intégrée du littoral sénégalais.

Troisième partie : Implications environnementales, socio-économiques de l'érosion côtière et stratégies d'adaptation

La troisième partie de notre recherche vise à analyser les implications environnementales et socio-économiques du recul des plages, depuis la Petite-Côte jusqu'au delta du Saloum. Dans un premier temps, l'accent sera mis sur les implications de l'évolution du trait de côte sur les écosystèmes littoraux, les activités économiques locales et les conditions de vie des populations riveraines. Dans un second temps, l'analyse portera sur l'identification et l'évaluation de l'efficacité des stratégies d'adaptation et des mesures de lutte contre l'érosion côtière mises en œuvre, tant par les communautés locales que par les autorités publiques.

Cette démarche double permet d'apprécier non seulement l'ampleur et la diversité des perturbations environnementales et socio-économiques engendrées par la dynamique côtière, mais également la pertinence et l'efficacité des réponses institutionnelles et communautaires face à ces pressions croissantes. Elle offre ainsi un cadre pour identifier les limites, les acquis et les perspectives d'amélioration des dispositifs existants, dans une optique de gestion durable et intégrée des espaces littoraux.

Chapitre VI : Implications environnementales et socio-économiques de la dynamique du trait de côte

La dynamique du trait de côte constitue un facteur déterminant dans l'évolution des environnements littoraux et des systèmes socio-économiques qui y sont associés. Les processus d'érosion et d'accrétion, lorsqu'ils s'inscrivent dans la durée, induisent des transformations profondes des paysages côtiers, affectant à la fois les écosystèmes naturels et les activités humaines.

Ce chapitre analyse les implications environnementales et socio-économiques de la dynamique du trait de côte à partir d'une approche intégrée, combinant l'analyse spatiale de la cinématique côtière issue des images satellitaires et les résultats des enquêtes socio-environnementales menées auprès des populations riveraines. Il vise à mettre en évidence l'ampleur des implications observées, la perception locale des changements littoraux et les formes de vulnérabilité qui en découlent, afin de mieux comprendre les interactions entre dynamiques physiques et enjeux humains sur le littoral étudié.

1. Vue d'ensemble des implications de la dynamique du trait de côte

La dynamique des plages a été évaluée à partir de l'analyse cinématique du trait de côte, réalisée sur des séries d'images satellitaires multi-temporelles couvrant la période 1973-2024. Les résultats indiquent un taux moyen de recul de -1,69 m/an, comparativement à un taux moyen d'accrétion de +1 m/an, révélant un déséquilibre globalement régressif du linéaire côtier (cf. tableau 11).

Cette évaluation spatiale est corroborée par les perceptions des populations riveraines, recueillies lors d'enquêtes de terrain (cf. fig. 53). Les habitants rapportent des modifications significatives du trait de côte, se traduisant par des pertes de terres, la dégradation des écosystèmes de mangrove et la disparition progressive de certaines plages exploitées pour la pêche, l'agriculture ou le tourisme. Ces observations locales confirment la sensibilité élevée du littoral aux processus d'érosion, et illustrent la convergence entre les données satellitaires et les implications perçus sur le terrain.

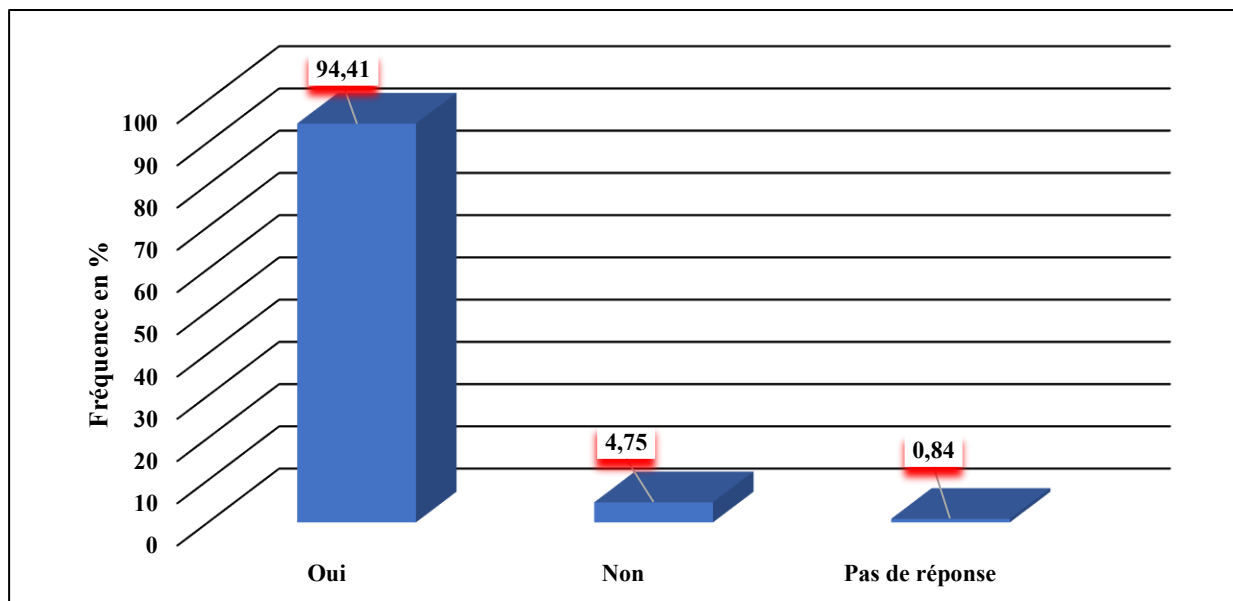


Figure 53 : Perception de la population sur les changements environnementaux observés sur le littoral, due à la dynamique du trait de côte (données d'enquêtes, 2025)

L'analyse des résultats de l'enquête socio-environnementale indique que la grande majorité des répondants (94,41 %) ont constaté des changements significatifs dans leur environnement littoral. En revanche, seulement 4,75 % des personnes interrogées n'ont pas perçu de modifications notables dans leur zone de résidence. Ces perceptions qualitatives corroborent les observations issues de l'analyse spatiale de la cinématique du trait de côte, établissant ainsi une convergence entre données objectives et ressentis locaux.

Les transformations rapportées traduisent une mutation profonde des environnements côtiers, avec des implications directes sur l'équilibre écologique des zones littorales et sur la durabilité des activités socio-économiques qui en dépendent, telles que la pêche, l'agriculture et le tourisme. L'ampleur et l'intensité de ces dynamiques soulignent la vulnérabilité croissante des littoraux face aux forçages naturels (houles, tempêtes, élévation du niveau marin) et anthropiques (urbanisation, infrastructures, extraction de sable, dégradation des mangroves).

Le graphique ci-dessous illustre la perception des populations concernant la nature et l'importance des implications observées, fournissant un complément qualitatif essentiel à l'analyse quantitative des modifications du trait de côte.

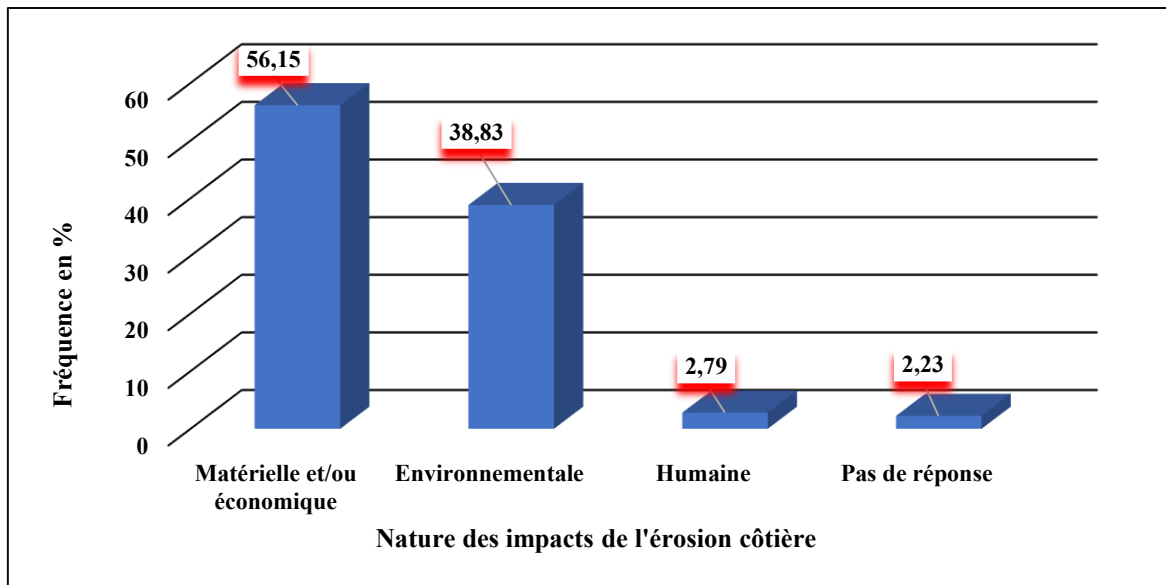


Figure 54 : Perception des populations sur la nature des implications de la dynamique littorale, de la Petite-Côte au delta du Saloum (données d'enquêtes, 2025).

L'analyse du graphique 56 indique que 56,15 % des répondants considèrent que la dynamique du trait de côte affecte prioritairement les infrastructures et l'économie locale, notamment par la dégradation des bâtiments, des installations économiques et la diminution des activités touristiques et halieutiques. Parallèlement, 38,83 % des enquêtés mettent en évidence des implications sur l'environnement littoral, tels que la disparition progressive des plages, la dégradation des mangroves et l'érosion des sols. Enfin, une minorité de 2,79 % signale des implications directes sur les populations, incluant des déplacements forcés ou des pertes humaines, témoignant de la gravité et de la complexité croissante des effets du recul du trait de côte sur les communautés riveraines.

À partir de cette vue d'ensemble des implications de la dynamique du trait de côte, il convient maintenant d'examiner plus en détail celles environnementales, qui constituent la première dimension des transformations observées sur le littoral.

2. Implications environnementaux de la dynamique du trait de côte

La dynamique du trait de côte induit un déséquilibre croissant du système côtier. Ces transformations se traduisent par un recul significatif du rivage, observable notamment par le rétrécissement des plages, l'érosion des dunes et la dégradation de la végétation littorale, laquelle joue un rôle essentiel dans la stabilisation des sols sableux. Par ailleurs, cette dynamique favorise l'occurrence de submersions marines et la salinisation progressive des sols, particulièrement dans les zones basses et les dépressions topographiques proches du littoral.

Ces modifications, affectant simultanément les composantes physiques et biologiques du milieu côtier, soulignent la vulnérabilité accrue des écosystèmes littoraux et la nécessité d'une gestion intégrée et adaptée.

2.1. Rétrécissement des plages

Le recul du trait de côte constitue le principal facteur de la réduction progressive des plages le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum. Cette dynamique régressive, persistante sur l'ensemble de la période étudiée (1973-2024), se manifeste de manière hétérogène selon les secteurs, en fonction des conditions locales d'exposition aux houles, de la granulométrie et de la nature des sédiments, des régimes hydrodynamiques et de l'intensité des pressions anthropiques.



Photo 4: Érosion à la plage à Teffess, Mbour (Yade, Avril 2025)

La photographie présentée illustre de manière explicite les effets directs de l'érosion côtière sur le littoral sableux de la Petite-Côte sénégalaise. On y distingue une falaise d'érosion clairement formée sur la plage, traduisant un retrait récent et actif du trait de côte. Cette coupe verticale des sédiments résulte de l'action continue des vagues de retour, exacerbée par l'absence de végétation stabilisatrice et par la pente accentuée du rivage, favorisant le déchaussement des sédiments.

Le cliché met également en évidence un rétrécissement significatif de la zone intertidale, observable par la réduction de l'espace entre le rivage et la rupture du cordon sableux. Ce type

de configuration est caractéristique des plages soumises à une forte pression érosive, en particulier lors des épisodes de houles intenses ou pendant la saison des pluies, lorsque l'action combinée du vent, des vagues et de la saturation hydrique fragilise les structures sédimentaires.

Cette dynamique, observée le long de plusieurs secteurs entre Saly Portudal, Mbour et Joal-Fadiouth, traduit les implications typiques d'une régression du trait de côte : diminution de la largeur des plages, perte de matériaux sédimentaires, exposition des arrière-plages et, à terme, menace directe des infrastructures littorales ainsi que des activités socio-économiques associées, telles que le tourisme, la pêche et l'artisanat local. En effet, le rétrécissement progressif des plages constitue une contrainte majeure pour le développement touristique, particulièrement dans les zones de forte fréquentation comme Saly et Mbour. La réduction des surfaces sableuses limite les espaces récréatifs, dégrade l'attractivité paysagère et entraîne une baisse potentielle des revenus liés au tourisme balnéaire. Cette évolution peut également engendrer une reconfiguration des investissements touristiques et une pression accrue sur les secteurs encore préservés.

2.2. Dégradation des formations dunaires

Les dunes constituent l'une des principales unités géomorphologiques de l'arrière-littoral de la Petite-Côte aux îles du Saloum, généralement situées en retrait immédiat des zones habitées. À l'instar du reste du bassin sénégal-mauritanien, ces formations sableuses présentent des dynamiques alternantes entre phases de mobilité, caractérisées par l'érosion et la progradation, et phases de stabilité, fortement conditionnées par la présence de végétation pionnière jouant un rôle de fixation naturelle des sédiments (Stéphan *et al.*, 2025).

Ces dunes peuvent bénéficier d'apports sédimentaires marins, issus notamment de la basse plage, favorisant leur régénération lors des périodes de faible énergie hydrodynamique. Cependant, en l'absence de couverture végétale ou en cas de déséquilibre du bilan sédimentaire, elles deviennent particulièrement vulnérables à l'érosion basale. Cette dernière résulte principalement du sapement par les vagues lors des marées hautes ou des tempêtes côtières (Thior, 2020).

Ce phénomène est illustré sur le site de Béttenty (photo 8), où l'érosion à la base des dunes provoque une transformation morphologique progressive, conduisant à la formation de cordons sableux orientés vers l'ouest, directement exposés à l'action maritime. Cette évolution met en évidence la fragilité des dunes littorales face aux contraintes naturelles et souligne l'importance des processus de végétalisation et de gestion sédimentaire pour leur préservation.



Photo 5: Dune de sable érodée à Bétenty (Yade, Avril 2025)

L'image présentée illustre de manière explicite les effets de l'érosion côtière sur les dunes meubles du littoral dans les îles du Saloum. On y observe des coupes nettes et verticales dans les formations dunaires, traduisant un affaiblissement significatif de leur structure sédimentaire sous l'effet combiné de l'action des vagues, du ruissellement et des vents dominants.

Ces dunes, constituées principalement de sables fins et peu consolidés, jouent un rôle clé dans la stabilisation du trait de côte en constituant des barrières naturelles contre l'intrusion marine. L'érosion observée affecte le pied des dunes, provoquant des effondrements progressifs, une perte de volume sédimentaire et la mise à nu de la végétation ancrée, signe d'une dynamique érosive active. Cette dernière peut être attribuée à la montée du niveau marin, à l'intensité des houles hivernales et à des perturbations anthropiques telles que la circulation d'engins ou le déboisement.

Les formes d'érosion dunaire identifiées témoignent d'une dégradation avancée des défenses naturelles du littoral, augmentant la vulnérabilité des terres intérieures aux submersions et aux perturbations écologiques. À moyen terme, si ces processus persistent sans mesures d'atténuation, ils risquent de provoquer une régression des cordons dunaires et un recul accéléré du trait de côte, comme l'illustrent les secteurs compris entre Joal-Fadiouth, Palmarin et la pointe sud de Mbour.

Cette photographie constitue ainsi un indicateur visuel de la fragilité des systèmes dunaires face aux dynamiques érosives et souligne l'importance d'intégrer la préservation et la restauration des dunes dans les stratégies de gestion et de protection des espaces côtiers. Par ailleurs, la dégradation des cordons dunaires et de la végétation stabilisatrice fragilise les systèmes de protection naturelle contre l'érosion et les submersions marines. Sur le plan économique, cette perte de protection expose davantage les infrastructures (habitats, routes, équipements touristiques) aux aléas côtiers, entraînant des coûts croissants en matière de protection, de réhabilitation et d'adaptation.

2.3. Recul du trait de côte, un facteur de dégradation des espèces végétaux

La dynamique littorale du Sénégal, en particulier le long de la Petite-Côte et du delta du Saloum, constitue un facteur majeur de dégradation des couvertures végétales, à l'instar de nombreuses zones côtières à l'échelle mondiale. Cette dynamique résulte de l'interaction de deux processus interdépendants : la littoralisation croissante et le recul progressif du trait de côte.

La littoralisation se traduit par une expansion rapide des surfaces bâties sur les marges littorales, souvent au détriment des espaces végétalisés naturels. Ce phénomène est étroitement lié aux activités anthropiques, incluant l'urbanisation, le développement touristique, l'extraction de sédiments et la conversion des milieux naturels en zones à usage économique. Ces pressions modifient profondément le fonctionnement écologique des écosystèmes côtiers, réduisant leur capacité de régénération, de stabilisation et de résilience face aux forçages naturels.

Parallèlement, l'érosion côtière contribue directement à la dégradation de la végétation littorale. Celle-ci englobe la végétation pérenne des hautes plages, les formations herbacées et arbustives des dunes meubles, ainsi que les mangroves (cf. photo 9), particulièrement vulnérables à l'érosion basale, à la submersion marine et à la salinisation. Ce processus de dégradation est progressif et continu, entraînant la fragmentation des habitats, la réduction de la biodiversité et une diminution des services écosystémiques, tels que la protection contre les tempêtes, la stabilisation des sols et le maintien des fonctions productives pour les activités humaines.



Planche photographique 6: Dégradation des espèces végétales par l'érosion côtière : A (Béttenty : Yade, Avril 2025) ; B (Dionewar : image Dmédia, 2018) ; C (Teffess : Yade, Avril 2025) ; D (Saly Portudal : image Sénégal7, 2018)

La planche photographique 5 illustre les implications visibles de l'érosion côtière sur la végétation littorale de la Petite-Côte sénégalaise et des îles du delta du Saloum. Les images mettent en évidence une dégradation progressive des formations végétales, notamment des arbustes, des filaos et des palmiers, qui jouent un rôle structurant essentiel dans la stabilisation du trait de côte. On observe des phénomènes de déracinement, de déchaussement des systèmes racinaires et d'effondrement des végétaux situés en bordure immédiate du rivage, implications directes du sapement par les vagues et du recul progressif du littoral.

Cette déstructuration de la couverture végétale est particulièrement accentuée dans les secteurs non protégés et soumis à une forte pression anthropique. Les images révèlent comment les systèmes racinaires des plantes fixatrices des dunes ou des arbres côtiers deviennent progressivement exposés, fragilisés, puis détruits. Cette dynamique compromet non seulement l'équilibre écologique local, mais réduit également la résilience des milieux littoraux face aux aléas marins, en favorisant les inondations, la salinisation des sols et l'accélération du processus érosif.

Ces observations confirment que, en l'absence de mesures de maîtrise, l'érosion côtière entraîne une perte substantielle de biodiversité végétale et compromet les fonctions écologiques des milieux littoraux. La photographie historique issue du projet de restauration des plages de Saly illustre la rapidité et le caractère potentiellement irréversible de cette dégradation lorsque les interventions de protection sont absentes ou insuffisantes. Elle souligne ainsi la nécessité d'intégrer la conservation et la restauration des écosystèmes végétalisés dans les stratégies de gestion durable du littoral sénégalais.

2.4. Submersion marine et/ou fluviale

Dans un contexte global marqué par l'élévation accélérée du niveau de la mer liée au réchauffement climatique, les zones côtières de faible altitude sont de plus en plus exposées aux risques de submersions marines et fluviales. Le littoral sénégalais, en particulier le secteur s'étendant de la Petite-Côte au delta du Saloum et caractérisé par une topographie basse, présente une récurrence accrue de tels événements. Les observations et enquêtes de terrain menées dans cette zone confirment la matérialité de ce phénomène et mettent en évidence une intensification temporelle de sa fréquence et de sa gravité. La Figure 55 synthétise les données recueillies auprès des populations locales, en représentant la fréquence des déclarations relatives aux submersions marines, ce qui atteste de l'expérience directe et répétée des riverains face à cet aléa côtier.

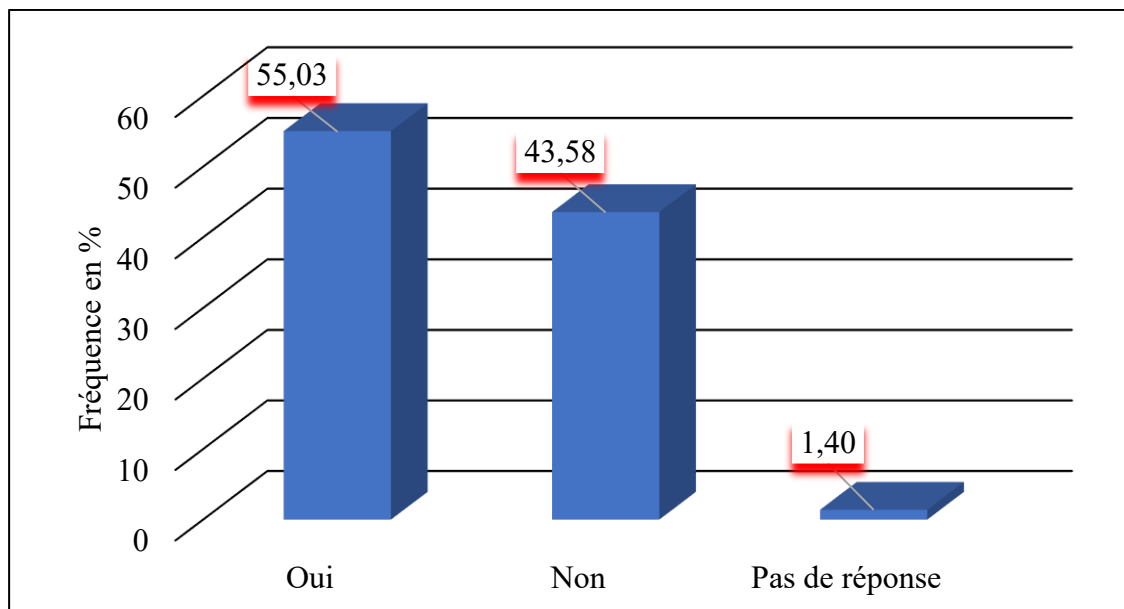


Figure 46 : Perception des populations sur la submersion marine et/ou fluviale (données d'enquêtes, 2025).

Le graphique présenté illustre les résultats d'une enquête de perception menée auprès des populations riveraines, portant sur la reconnaissance et l'intensification des phénomènes de submersion marine et fluviale le long du littoral sénégalais, du secteur de la Petite-Côte au delta du Saloum. L'analyse des réponses indique que 55,03 % des enquêtés perçoivent une augmentation de ces événements, qu'ils soient d'origine marine ou fluviale. Cette majorité traduit une conscience locale aiguë des dynamiques environnementales affectant le littoral et peut être corrélée à l'observation directe des implications matériels, tels que l'érosion des plages, les inondations récurrentes et la salinisation des sols et des nappes phréatiques, ainsi que les transformations paysagères observées au cours des dernières décennies. Cette perception est particulièrement prononcée dans les zones basses et vulnérables, notamment dans le delta du Saloum, où l'équilibre entre les apports fluviaux et marins est instable et fortement dépendant des aléas climatiques et anthropiques.

En revanche, 43,58 % des enquêtés ne constatent pas de phénomène de submersion accru, traduisant une hétérogénéité perceptuelle liée à la diversité des contextes géographiques, des niveaux d'exposition et des capacités locales d'adaptation. Dans certains secteurs encore relativement préservés ou protégés par des dispositifs naturels (mangroves, dunes littorales) ou aménagés (digues, brise-lames, par exemple à Saly Portudal et Djiffer), la perception de ces phénomènes demeure limitée. Enfin, une minorité de 1,40 % s'est abstenue de répondre, ce qui peut refléter un manque de connaissance, une incertitude ou un désengagement vis-à-vis du phénomène. Ces résultats témoignent globalement d'une conscience croissante des mutations physiques et climatiques affectant le littoral sénégalais.

Les submersions répétées induisent des implications environnementales significatives. Elles entraînent notamment une salinisation accrue des sols et des nappes phréatiques, perturbant les propriétés édaphiques et compromettant la fertilité, la biodiversité et les processus biogéochimiques essentiels, réduisant ainsi les services écosystémiques fournis par ces sols. Les écosystèmes littoraux, en particulier les mangroves, subissent une dégradation structurale et fonctionnelle, résultant de l'hyperhalinité et de l'exposition continue aux submersions. Les espèces sensibles, telles que les palétuviers du genre *Rhizophora*, présentent un dépérissement accéléré et une régénération inhibée, tandis que les espèces halotolérantes, comme *Avicennia*, peuvent se développer, entraînant une modification de la zonation haline et une homogénéisation de la structure forestière, avec des implications sur les services écologiques associés.

Ces perturbations se traduisent par une altération des habitats critiques et des stocks halieutiques, compromettant la résilience des socio-écosystèmes côtiers. La dépendance économique des populations riveraines, particulièrement dans les communautés urbaines telles que Joal-Fadiouth et dans les communautés insulaires (Béttenty, Dionewar, Niodior, Djinack Bara), accentue cette vulnérabilité. Les activités benthiques, dont les femmes assurent une part essentielle, sont directement affectées par la dégradation des habitats, entraînant une diminution des ressources exploitables et une précarisation socio-économique. Les témoignages recueillis lors des enquêtes qualitatives confirment ce lien : les populations rapportent une baisse tangible des revenus liés aux activités halieutiques, directement imputable à l'augmentation des submersions marines et à l'érosion accélérée du trait de côte.

Ces observations corroborent l'hypothèse d'une relation causale entre la dégradation des écosystèmes littoraux et la vulnérabilité socio-économique des communautés dépendantes, soulignant la nécessité d'intégrer des stratégies d'adaptation à la fois environnementales, économiques et sociales pour renforcer la résilience des littoraux sénégalais.

3. Les implications socio-économiques de la perte des plages

Cette section présente une analyse intégrée des données issues des enquêtes socio-économiques et des observations de terrain, portant sur les implications de l'érosion côtière sur les biens matériels (habitations, infrastructures) et les systèmes d'activités socio-économiques (tourisme, pêche, agriculture, commerce, artisanat) implantés le long de la frange littorale vulnérable. Les résultats mettent en évidence quatre dimensions principales de vulnérabilité socio-économique, étroitement interconnectées.

La première dimension concerne la destruction physique des infrastructures critiques. Les hôtels, équipements de pêche et de transformation, ainsi que les habitats résidentiels situés à proximité immédiate du rivage, subissent une érosion directe, entraînant des pertes matérielles significatives et compromettant la continuité des services essentiels. Cette érosion provoque également des déplacements contraints des populations, fragmentant les réseaux sociaux et perturbant les solidarités communautaires établies.

La deuxième dimension relève de la déstabilisation des activités productives locales. Le tourisme est affecté par la régression du trait de côte et la perte d'attractivité paysagère des plages. Les activités halieutiques, incluant la pêche artisanale et la transformation des produits de la mer, sont perturbées par la destruction des zones de débarquement et des installations de traitement. L'agriculture connaît une réduction drastique des superficies cultivables, combinant

recul physique du littoral et salinisation accrue des sols. Enfin, l'artisanat côtier est impacté par la perturbation des chaînes d'approvisionnement en ressources naturelles (coquillages, fibres végétales) et la destruction des structures de production et de vente exposées sur les plages.

La troisième dimension se rapporte à l'érosion des capitaux de subsistance, affectant particulièrement les groupes les plus dépendants des ressources naturelles, tels que les femmes engagées dans la transformation halieutique et les pêcheurs artisanaux. La raréfaction des ressources, couplée à la perte d'infrastructures productives, réduit considérablement leurs moyens d'existence, accentuant leur vulnérabilité socio-économique.

Dans une quatrième dimension, l'ensemble de ces implications génère un cercle de vulnérabilité systémique, où la dégradation environnementale alimente des rétroactions renforçant la précarité des communautés littorales. La combinaison de la destruction du cadre bâti, des déplacements contraints, de la désarticulation des systèmes économiques locaux et de l'érosion des capitaux de subsistance constitue un engrenage qui fragilise la résilience des sociétés riveraines face à la dynamique du trait de côte.

Les populations locales ont contribué à hiérarchiser ces vulnérabilités socio-économiques, permettant d'établir une typologie des implications directement associées à la régression côtière (Fig. 56). Ces résultats mettent en lumière la nécessité d'intégrer des mesures d'adaptation structurelles et non structurelles, ciblant à la fois la protection des infrastructures, le maintien des activités économiques et le renforcement des capacités de subsistance des groupes les plus exposés.

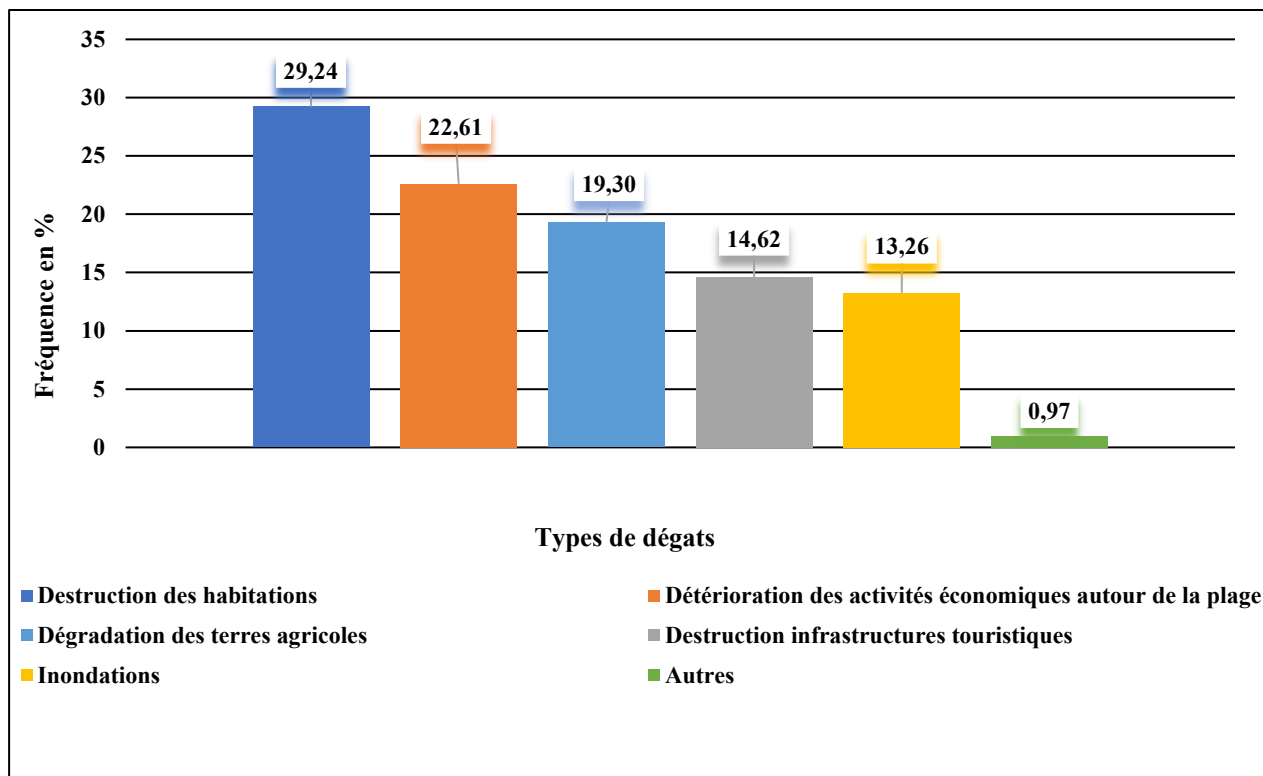


Figure 56 : Perception de la population sur les types d’implications socio-économiques de la dynamique du trait de côte sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum (données d’enquêtes, 2025)

Les enquêtes réalisées en 2025 auprès des populations côtières de la Petite-Côte au delta du Saloum ont permis d’évaluer la perception des implications socio-économiques induits par la dynamique du trait de côte. L’analyse des données montre que les effets les plus fréquemment signalés concernent la destruction des habitations (29,24 %) et la détérioration des activités économiques situées en bord de mer (22,61 %).

Ces résultats traduisent un ressenti marqué des populations face à la perte ou à la fragilisation de leur cadre de vie, en particulier par le recul du rivage qui emporte ou compromet les habitations proches du trait de côte. L’érosion affecte également les activités commerciales et artisanales développées sur la frange littorale, telles que les petits commerces, la restauration, la pêche et le tourisme informel, compromettant ainsi les sources de revenu des ménages riverains.

Viennent ensuite la dégradation des terres agricoles (19,30 %), la destruction des infrastructures touristiques (14,62 %) et les inondations (13,26 %), illustrant la pluralité et la complémentarité des vulnérabilités générées par l’érosion. Ces implications traduisent les effets cumulatifs de la régression du trait de côte, de la salinisation des sols et des submersions marines sur la viabilité des usages économiques et sur la sécurité des populations. Enfin, une proportion marginale

(0,97 %) rapporte d'autres types de dommages, tels que la destruction de pirogues, soulignant que certains effets secondaires, bien que moins cités, ne sont pas négligeables.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que la dynamique du trait de côte est perçue localement comme un facteur structurant de précarisation socio-économique, affectant simultanément les infrastructures physiques, les conditions de vie et la durabilité des activités littorales. Cette perception souligne l'importance de considérer les impacts multiples et interconnectés de l'érosion côtière dans les stratégies de planification et d'adaptation locales.

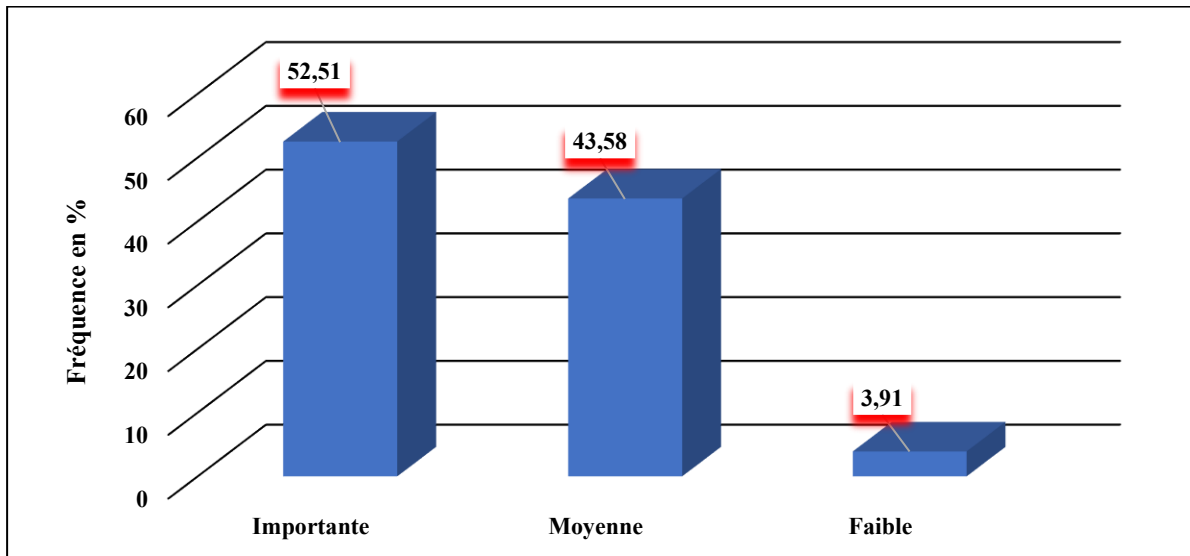


Figure 57 : Perception de la population locale sur l'ampleur des pertes dû à l'érosion côtière (données enquêtes, 2025)

L'analyse des perceptions locales concernant l'ampleur des pertes engendrées par l'érosion côtière (Figure 57) révèle un niveau de préoccupation significatif au sein des populations riveraines. En effet, 52,51 % des enquêtés estiment que les pertes subies sont importantes, reflétant un sentiment marqué de vulnérabilité face à la dégradation du trait de côte. Cette perception majoritaire traduit les implications tangibles de l'érosion sur les biens matériels, les activités économiques et les conditions de vie des communautés côtières.

Par ailleurs, 43,58 % des répondants évaluent ces pertes comme modérées. Cette proportion peut indiquer soit une exposition réduite aux processus érosifs, soit une capacité d'adaptation partielle face aux risques. Enfin, 3,91 % des participants jugent les pertes comme faibles, ce qui peut correspondre à des zones encore relativement épargnées ou résilientes, ou à une perception atténuée résultant d'un éloignement relatif du rivage.

Ces résultats soulignent la variabilité spatiale des impacts de l'érosion et mettent en évidence la nécessité d'intégrer les perceptions locales dans l'évaluation de la vulnérabilité côtière, afin de mieux orienter les stratégies d'adaptation et de gestion du littoral.

3.1. Destruction d'infrastructures et d'habitats

Les impacts de l'érosion côtière se traduisent de manière concrète par l'ampleur des dommages matériels observés le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum. Les données recueillies lors des enquêtes menées auprès des populations locales indiquent une exposition significative des habitats et des infrastructures socio-économiques, incluant ponts, hôtels, quais de pêche et voies de communication côtières (cf. planche 6 et 7), souvent implantés à proximité immédiate du trait de côte et actuellement menacés, voire déjà détruits.

Les observations de terrain corroborent ces perceptions locales, en mettant en évidence des signes tangibles de dégradation : effondrement d'habitations, détérioration d'équipements publics, et altération ou perte de fonctionnalité des espaces productifs et de services. Ces constats soulignent la vulnérabilité accrue des territoires littoraux face aux processus érosifs et mettent en évidence la nécessité d'intégrer la protection des biens matériels dans les stratégies locales d'adaptation au recul du trait de côte.

3.1.1. Impacts de l'érosion côtière sur les habitations

Les enquêtes de terrain et les observations directes effectuées dans le cadre de cette étude ont permis de documenter un nombre significatif d'habitations détruites ou gravement menacées par le recul du trait de côte (cf. planche 6). Ces cas, distribués le long de l'ensemble du littoral étudié, de la Petite-Côte au delta du Saloum, illustrent de manière empirique la vulnérabilité élevée des populations riveraines face aux processus érosifs.

L'analyse qualitative des dégâts matériels révèle une récurrence et une intensité importantes, témoignant à la fois d'un déficit d'adaptation locale et d'une prise en charge institutionnelle limitée. Dans de nombreuses communautés littorales, les mesures de réponse à l'érosion sont majoritairement improvisées, en raison de contraintes techniques et financières, ce qui amplifie l'exposition aux risques et renforce la perception de marginalisation par rapport aux priorités nationales.

Ces observations soulignent l'urgence de renforcer l'intégration des considérations de justice territoriale et environnementale dans les politiques publiques de gestion du littoral, en associant à la fois prévention des risques, planification spatiale adaptée et soutien aux stratégies communautaires d'adaptation.



Planche photographique 7: Destrutions d’habitations le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum (A : Golf ; B : Djiffer ; C : Teffess ; D : Darou Salam 1) (Avril 2025)

La planche présentée illustre de manière explicite les conséquences matérielles et sociales de l’érosion côtière sur les habitations situées le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum. Les quatre photographies documentent des cas concrets de logements détruits ou en ruine, localisés à Golf (A), Djiffer (B), Teffess (C) et Darou Salam 1 (D), témoignant de la gravité de la dynamique régressive du trait de côte et de ses implications directes sur le cadre de vie des communautés riveraines.

Au-delà des pertes matérielles, l’érosion côtière induit des effets sociaux significatifs. Les enquêtes de terrain menées en avril 2025 révèlent que plusieurs habitants du quartier Golf (commune de Mbour) ont été contraints de quitter leurs logements détruits ou menacés, pour être relogés dans le quartier de “Baay Deuk”, situé en retrait. Si ce relogement constitue une mesure d’adaptation, il est perçu par certaines personnes comme une rupture socio-spatiale, caractérisée par la perte de repères, l’affaiblissement des liens communautaires et la perturbation des activités traditionnelles liées à la mer.

Les témoignages collectés dans l’ensemble des localités étudiées font également état d’un sentiment d’abandon et d’une perception de vulnérabilité accrue. Les habitants dénoncent

l'absence de mesures préventives efficaces et le manque de soutien institutionnel, en termes de relogement, d'indemnisation ou de sécurisation du littoral. La destruction des habitations observée confirme ainsi un processus de précarisation croissante des populations côtières, exposées à la fois aux aléas naturels et aux déficits de gouvernance territoriale.

Cette situation souligne l'urgence de renforcer la prise en compte des dimensions sociales de l'érosion côtière. Elle plaide pour des politiques de relogement anticipées, participatives et intégrées, prenant en considération les réalités économiques, culturelles et identitaires des communautés affectées, tout en conciliant adaptation aux risques côtiers et préservation du tissu social local.

3.1.2. Destruction d'infrastructures socio-économiques, une des conséquences de l'érosion côtière

Les implications de l'érosion côtière dépassent largement la simple destruction des habitats, s'étendant à une dégradation significative des infrastructures socio-économiques implantées le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum (cf. planche 7). Les observations de terrain, corroborées par les témoignages des populations locales, mettent en évidence l'ampleur des dommages affectant des équipements essentiels au fonctionnement quotidien des communautés littorales.

Cette dégradation concerne principalement des infrastructures situées directement sur les plages ou à proximité immédiate du rivage, destinées à répondre aux besoins socio-économiques des populations côtières. Parmi celles-ci figurent les quais de pêche, les sites de transformation des produits halieutiques, les stations-service, ainsi que les structures hôtelières et de restauration. Ces équipements constituent des pôles d'activités générateurs de revenus, d'emplois et de services, et leur localisation en bordure du trait de côte les rend particulièrement vulnérables à l'avancée marine. La situation est aggravée par l'absence fréquente d'études d'impact environnemental et de projections concernant l'évolution future du littoral lors de leur implantation.

Les pertes matérielles induites fragilisent directement les systèmes de subsistance des communautés et affaiblissent l'économie locale, notamment la pêche artisanale, le tourisme balnéaire et les activités informelles. Par ailleurs, la dégradation ou la disparition de ces infrastructures contribue à la désorganisation du tissu socio-économique, accentue les inégalités d'accès aux services essentiels et réduit la capacité d'adaptation des ménages les plus exposés aux aléas côtiers.



Planche photographique 8: Destrutions d’infrastructures : (A : Pont de Dionewar, image Dmedia 2018 ; B : Case des tous petits à Saly Niakh Niakhal, image google earth 2020 ; C : Hôtel à Saly Portudal, Yade 2022 ; D : Quai de pêche Pointe Sarène, Yade, 2025)

La planche 7 présentée illustre la vulnérabilité des infrastructures socio-économiques situées le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, face aux dynamiques régressives du trait de côte. Les images fournissent des exemples concrets de dommages affectant des équipements essentiels au fonctionnement économique et social des communautés littorales.

La photo A documente l’effondrement du pont de Dionewar, survenu seulement deux jours après son inauguration. Ce cas met en évidence les limites des aménagements réalisés sans considération des processus côtiers, ainsi que les pertes immédiates en termes de mobilité locale et d’accès aux zones de pêche et de transformation halieutique. La photo B, issue de Google Earth (2020), montre la submersion progressive de la « case des tout-petits » à Saly Niakh Niakhal, infrastructure éducative exposée directement au recul du trait de côte. Cette situation illustre l’impact de l’érosion sur les équipements sociaux, ainsi que la perte d’espaces de vie collective et d’encadrement pour les jeunes populations.

La photo C documente la destruction partielle d’un hôtel à Saly Portudal, station balnéaire emblématique. La disparition de cette infrastructure touristique traduit un affaiblissement direct

de l'économie littorale, avec des implications sur l'emploi local, les revenus communautaires et l'attractivité du territoire. Enfin, la photo D met en évidence la dégradation avancée du quai de pêche de la Pointe Sarène (Yade, avril 2025), élément clé pour la pêche artisanale. Sa fragilisation limite les capacités de débarquement, de traitement et de conservation des produits de la mer, impactant l'ensemble de la chaîne de valeur halieutique.

Les résultats des enquêtes menées en avril 2025 corroborent ces observations, révélant une perception alarmante des populations locales quant aux pertes d'accès aux services socio-économiques essentiels. De nombreux répondants expriment un sentiment d'abandon face à l'insuffisance de mesures d'accompagnement et de planification adaptées. Dans un contexte où ces infrastructures constituent un levier majeur pour le développement territorial, leur dégradation ou disparition accentue la vulnérabilité des communautés et amplifie les inégalités d'accès aux ressources, aux opportunités et aux services de base.

Ainsi, cette planche confirme que l'érosion côtière, au-delà de son caractère environnemental, constitue un facteur structurant de précarisation socio-économique. Elle souligne la nécessité de repenser les politiques d'aménagement du littoral selon des principes de durabilité, de résilience et de justice spatiale, intégrant les dynamiques côtières dans la planification des infrastructures critiques.

3.2. Implications sur les activités socio-économiques

Les implications de l'érosion côtière sur le milieu physique exercent des répercussions directes et significatives sur les activités économiques des populations riveraines. En effet, toute modification du cadre physique, qu'il s'agisse du recul du trait de côte, de la submersion des plages, de la salinisation des sols ou de la destruction des infrastructures, engendre des perturbations importantes des systèmes productifs localisés dans ces zones vulnérables.

Sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte aux îles du Saloum, cette influence est particulièrement marquée dans les secteurs économiques dépendant directement du littoral, notamment le tourisme, la pêche artisanale, l'agriculture côtière, ainsi que les activités de transformation et le commerce informel. L'érosion côtière limite l'accès aux sites de production, dégrade les équipements essentiels, restreint les surfaces exploitables et affecte de manière cumulée les flux économiques et sociaux de ces territoires.

La figure 58 synthétise les perceptions recueillies auprès des populations riveraines concernant les secteurs économiques les plus exposés aux effets de l'érosion côtière. Ces perceptions, cohérentes avec les observations de terrain, mettent en évidence une hiérarchie des

vulnérabilités économiques et illustrent les effets en chaîne d'un aléa naturel, renforcé par des logiques d'occupation et d'aménagement souvent inadaptées aux dynamiques côtières.

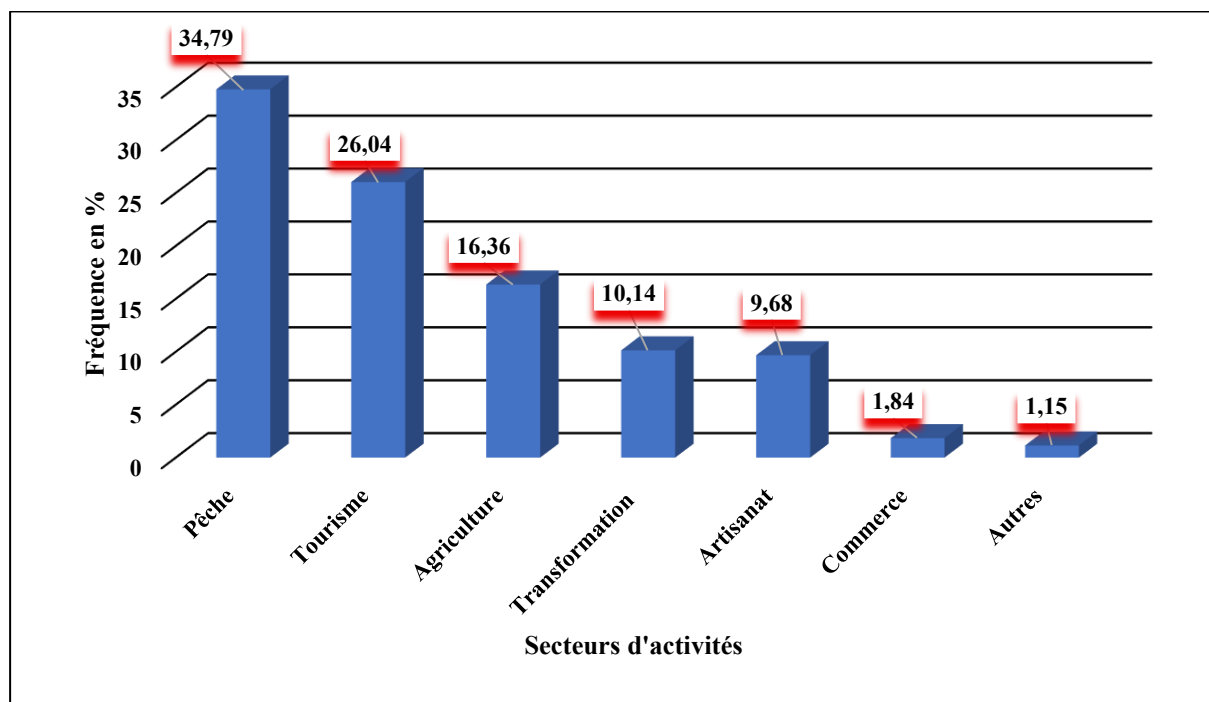


Figure 58 : Perception de la population sur les activités socio-économiques les plus touchées (données d'enquêtes, 2025)

Les résultats synthétisés dans la figure 61 mettent en évidence la perception des populations littorales concernant la vulnérabilité des différentes activités socio-économiques aux effets de l'érosion côtière. Ces données, issues des enquêtes menées en 2025 le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, révèlent une hiérarchisation nette des secteurs d'activités impactés.

La pêche constitue le secteur le plus exposé, avec 34,79 % des répondants la désignant comme vulnérable. Cette prédominance souligne à la fois le rôle central de la pêche artisanale dans les économies littorales et sa forte sensibilité aux transformations physiques du rivage, telles que le recul du trait de côte, la dégradation des quais de débarquement et l'inaccessibilité croissante de certaines zones de capture. Les témoignages des populations locales, notamment à Joal-Fadiouth, Djiffer, Niodior, Dionewar, Bétenty, Teffess, Golf et Pointe Sarène, confirment la fragilisation des moyens de subsistance halieutiques.

Le secteur touristique arrive en seconde position (26,04 %), en raison de la concentration d'infrastructures directement implantées sur les plages. La dégradation du paysage côtier, la réduction de la surface utile et la destruction partielle ou totale des structures hôtelières,

campements et restaurants de plage affectent directement l'attractivité touristique, entraînant des implications économiques et sociales significatives pour les communautés locales.

L'agriculture (16,36 %) et les activités de transformation des produits (10,14 %) apparaissent comme indirectement vulnérables, notamment en raison de la salinisation des sols, de la perte d'espaces productifs et des difficultés d'accès aux ressources naturelles. L'artisanat littoral (9,68 %) est également affecté, conséquence de la réduction de la fréquentation des sites côtiers et de la disparition de points de vente informels.

Enfin, le commerce (1,84 %) et les autres activités (1,15 %) sont moins représentés mais demeurent significatifs dans le système socio-économique local. Ces résultats traduisent une réalité territoriale dans laquelle l'érosion côtière contribue à un déséquilibre progressif du système économique, engendrant des effets en cascade sur l'emploi, les revenus et la cohésion sociale.

En synthèse, cette figure illustre une perception largement partagée par les populations riveraines : l'érosion côtière est associée à un affaiblissement structurel des activités économiques littorales les plus vitales, soulignant la nécessité d'une révision et d'un renforcement des stratégies d'aménagement, de protection et de résilience du littoral.

3.2.1. Pêche

Malgré son poids stratégique dans l'économie nationale, la pêche sénégalaise demeure fortement vulnérable aux effets délétères de l'érosion côtière. Selon les données de l'ANSD (2020), le secteur halieutique contribuait à hauteur de 2,3 % au PIB national en 2019, confirmant son rôle structurant non seulement au niveau national, mais également, et surtout, au sein des économies littorales locales. Le long de la Petite-Côte sénégalaise, de Saly à Djiffer en passant par Joal-Fadiouth, ainsi que dans les îles du Saloum, la pêche artisanale constitue l'une des principales activités économiques, mobilisant un grand nombre d'acteurs à travers une chaîne de valeur diversifiée incluant la capture, la transformation, la commercialisation, le transport et l'exportation.

Toutefois, cette activité essentielle subit les impacts multiformes de l'érosion côtière, avec des répercussions significatives sur l'ensemble de sa chaîne de valeur. Les observations de terrain et les enquêtes menées entre Saly, Mbour, Joal, Djiffer et dans les îles du Saloum ont permis d'identifier plusieurs points critiques :

- ✓ Dégradation des infrastructures portuaires et de débarquement : La détérioration des quais constitue un obstacle majeur aux opérations de pêche et à l'intégration des

produits sur les marchés. Le quai de pêche de Saly Portudal, avant sa rénovation dans le cadre du projet de restauration des plages, illustre cette vulnérabilité. De même, les quais de Mbour et de la Pointe Sarène connaissent des dégradations récurrentes, entraînant, dans certains cas, la perte d'agréments pour l'exportation et compromettant la participation des pêcheurs aux marchés internationaux ;

- ✓ Submersion et disparition des plages de carénage : La montée des eaux et l'action des vagues rendent difficile, voire impossible, le débarquement des produits halieutiques et la manutention des embarcations. Dans plusieurs localités (Saly, Mbour, Djiffer), des sites de carénage ont été totalement submergés, réduisant l'espace disponible pour l'entretien des pirogues et l'organisation des opérations de pêche ;
- ✓ Réduction des zones de débarquement et tensions entre pêcheurs : La diminution de l'espace exploitable augmente la concurrence locale et limite les volumes de pêche, entraînant des pertes de revenus quotidiennes et des tensions sociales entre acteurs ;
- ✓ Perturbation des habitats naturels et des cycles biologiques : La salinisation des bassins côtiers et la dégradation des habitats fragilisent les cycles de reproduction des espèces halieutiques, entraînant des migrations de stocks vers des zones moins perturbées et contribuant à la raréfaction des ressources disponibles, ce qui peut entraîner une diminution des captures et fragiliser les activités de pêche artisanale, essentielles à l'économie locale ;
- ✓ Destruction des espaces de transformation artisanale : La perte de sites de transformation, notamment à Saly et Mbour, affecte principalement les femmes impliquées dans cette activité, compromettant leurs revenus et la continuité de la chaîne de valeur. Bien que certains efforts de réhabilitation aient permis la réouverture de sites comme celui de Saly Portudal, d'autres zones restent structurellement vulnérables ;
- ✓ Impact sur les activités connexes : Les charpentiers de pirogues et les commerces associés (filets, carburant, glace) sont également touchés par la réduction des espaces disponibles et la dégradation des infrastructures, ce qui limite les capacités économiques et entrave la transmission de savoir-faire local ;
- ✓ Dommages aux embarcations et insécurité des activités : Les pêcheurs rapportent des pertes répétées de pirogues et de matériels de pêche, causées par des houles violentes et imprévisibles, principalement durant la saison hivernale nocturne, lorsque les dispositifs de surveillance sont moins efficaces. Ces événements accentuent la précarité économique et la vulnérabilité opérationnelle des pêcheurs ;

- ✓ Frein à l'investissement industriel : L'instabilité du trait de côte dissuade l'implantation d'unités industrielles de transformation, entraînant parfois des gaspillages de produits halieutiques et limitant les perspectives de développement économique local.

En synthèse, l'érosion côtière constitue un facteur structurant de vulnérabilité pour la pêche artisanale sénégalaise. Elle affecte non seulement les ressources biologiques, mais aussi les infrastructures, les circuits économiques et les emplois locaux, en particulier ceux des femmes, accentuant la précarité et compromettant la résilience socio-économique des communautés littorales.



Planche photographique 9 : Incidences de l'érosion sur la pêche : (A : destruction de pirogues par les houles à Golf ; B : rétrécissement des espaces d'activités à Mbour, vue aérienne image google earth 2025)

La planche présentée illustre de manière explicite les implications multiples de l'érosion côtière sur la pêche artisanale, activité économique centrale le long du littoral sénégalais, en particulier entre la Petite-Côte et le delta du Saloum. À travers deux images complémentaires, cette planche met en évidence la vulnérabilité des infrastructures, l'atteinte des espaces de travail et la pression croissante exercée sur les zones d'exploitation.

La photo A documente une pirogue artisanale endommagée par le passage de fortes houles. Les enquêtes de terrain menées en avril 2025 à Mbour, Joal et Djiffer indiquent que de tels événements entraînent des pertes matérielles répétées, des interruptions temporaires de l'activité de pêche et, par conséquent, une réduction significative des revenus quotidiens, accentuant la précarité des ménages côtiers.

La photo B illustre le rétrécissement marqué des plages historiquement utilisées pour le débarquement, la transformation du poisson, le carénage des embarcations et l'exercice

d'activités annexes telles que le travail des cordiers, des charpentiers et des commerçants de glace. Cette réduction de l'espace disponible génère une cohabitation difficile entre les usagers, augmente les risques d'accidents et limite les capacités de production et de stockage. À Saly, des femmes formatrices interrogées ont déclaré avoir perdu leur site de travail avant d'être relocalisées, entraînant un ralentissement significatif de leurs activités. L'image aérienne d'un site de débarquement très fréquenté à Teffess (Mbour) montre la densité des embarcations et des installations sur une plage de plus en plus étroite, révélant une vulnérabilité spatiale accrue et un risque majeur pour les investissements futurs dans le secteur.

Cette planche met en évidence le lien direct entre l'érosion littorale et la perturbation des dynamiques spatiales et organisationnelles de la pêche artisanale. Elle confirme que l'adaptation à ces transformations nécessite non seulement des interventions physiques ciblées (restauration des plages, protection des zones de carénage, infrastructures résilientes), mais également des politiques inclusives de soutien aux acteurs locaux, prenant en compte leurs connaissances endogènes, leurs pratiques traditionnelles et les réalités socio-économiques du littoral.

3.2.2. Tourisme

Malgré son importance stratégique pour l'économie nationale et locale, avec une contribution estimée à 7 % du PIB en 2019 (ANSD, 2020) et un rôle significatif dans la création d'emplois directs et indirects, le secteur du tourisme côtier figure parmi les activités les plus vulnérables aux effets de l'érosion littorale le long du littoral sénégalais, en particulier entre la Petite-Côte et le delta du Saloum. Cette vulnérabilité a été largement corroborée par les populations riveraines et les acteurs clés rencontrés lors des enquêtes de terrain menées en avril 2025, qui signalent une dégradation continue des conditions d'exploitation touristique sur plusieurs sites autrefois attractifs.

Les données recueillies révèlent que l'érosion affecte le tourisme de manière multifactorielle. Les implications les plus fréquemment rapportés incluent :

- ✓ la perte progressive des plages sableuses, constituant le principal facteur d'attractivité pour le tourisme balnéaire dominant dans cette zone ;
- ✓ la destruction ou la fragilisation des infrastructures hôtelières et récréatives implantées à proximité immédiate du rivage ;

- ✓ les inondations récurrentes des voies d'accès, des hôtels et des campements, entraînant une diminution de la fréquentation touristique et une altération de la qualité des services offerts.

La figure ci-dessous synthétise les perceptions des populations locales sur ces effets, révélant à la fois une conscience aiguë des enjeux environnementaux liés à l'activité touristique et une inquiétude croissante quant à sa durabilité dans les zones exposées à l'érosion. Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer les perceptions locales et les contraintes environnementales dans la planification territoriale et les politiques d'aménagement du littoral, afin de préserver le tourisme comme levier de développement durable des régions côtières.

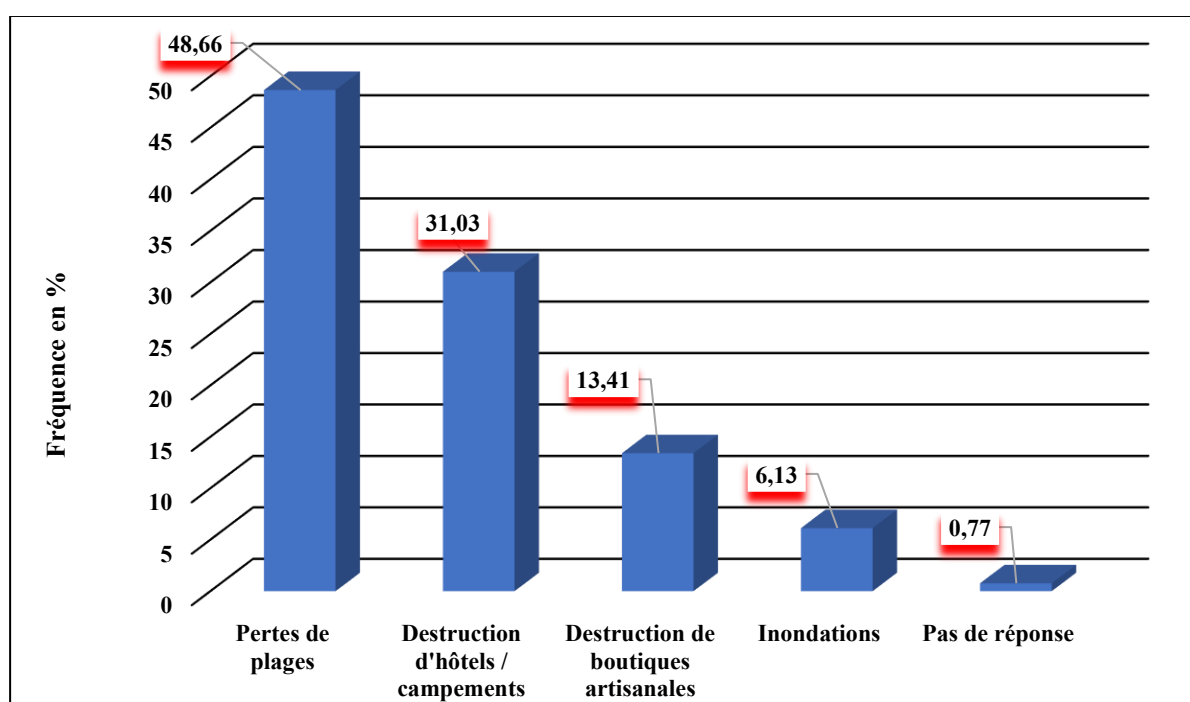


Figure 59 : Perception de la population sur les implications de l'érosion côtière sur le tourisme (données d'enquêtes, 2025)

La figure met en évidence les perceptions des populations locales concernant les implications de l'érosion côtière sur l'activité touristique, un pilier économique majeur le long du littoral sénégalais, entre la Petite-Côte et le delta du Saloum. Les données issues des enquêtes menées en 2025 révèlent que la perte de plages sableuses constitue l'impact le plus fréquemment cité, avec 48,66 % des réponses. Ce résultat souligne l'importance cruciale de la bande littorale dans l'attractivité touristique, en particulier à Saly, Joal, Palmarin et Djiffer, où les plages jouent à la fois un rôle récréatif et économique, accueillant des activités liées à la restauration, à l'artisanat et à l'animation.

La destruction des infrastructures hôtelières et des campements est le deuxième impact le plus mentionné, avec 31,03 % des répondants. Cette vulnérabilité traduit la sensibilité des investissements touristiques situés à proximité immédiate du rivage face au recul accéléré du trait de côte. Des destructions spectaculaires ont été observées à Saly Portudal, Pointe Sarène, Djiffer, Dionewar et Palmarin, entraînant des pertes économiques directes et une diminution de la fréquentation touristique.

Par ailleurs, 13,41 % des enquêtés signalent la destruction de boutiques artisanales, activité génératrice de revenus pour les femmes et les jeunes locaux. Les inondations, bien que moins fréquemment mentionnées (6,13 %), constituent également un risque préoccupant, notamment dans les zones basses telles que Mbour ou Dionewar, où elles compromettent l'accessibilité des établissements touristiques.

Ces résultats confirment que l'érosion côtière compromet la durabilité du développement touristique dans la région, en affectant simultanément les infrastructures, les paysages et les conditions d'exercice des activités annexes. Ils soulignent la nécessité d'intégrer les contraintes environnementales et les perceptions locales dans la planification touristique et les politiques d'aménagement du littoral.

L'impact de l'érosion est particulièrement marqué à Saly, principal pôle touristique du Sénégal, où le recul du trait de côte a compromis les atouts naturels et les infrastructures touristiques. Les enquêtes de terrain et les entretiens avec les acteurs locaux : personnels hôteliers (directeurs des hôtels Saly Hôtel et Bougainvillier), gestionnaires de campements, artisans, vendeurs de produits halieutiques et représentants institutionnels (directeur de SAPCO, deuxième adjoint au maire de Saly), confirment la gravité de la situation. Les effets les plus cités incluent la disparition des plages, la destruction ou la menace directe sur les infrastructures hôtelières, et la réduction des surfaces disponibles pour l'activité touristique.

Ces dégradations ont conduit à la fermeture ou à la reconversion de plusieurs hôtels, tels que Téranga, Savana Saly, Espadron ou l'hôtel Palmarin, entraînant une diminution significative de la capacité d'accueil et des flux touristiques. Cette contraction s'est traduite par une réduction des services offerts, le licenciement de nombreux employés et un ralentissement des activités économiques annexes (artisanat, restauration, commerce local).

Selon le directeur de l'hôtel Bougainvillier, la fréquentation hôtelière a chuté drastiquement, passant d'environ 350 clients par jour en haute saison à moins de 50 actuellement. Cette baisse

se reflète également dans les vols charters, qui ont diminué de 23 à 4 par semaine, traduisant une réduction hebdomadaire du nombre de touristes de plus de 5 000 à moins d'un millier.

Cette diminution brutale des activités touristiques entraîne des implications économiques significatives. Elle réduit les recettes fiscales des collectivités locales, notamment la commune de Saly Portudal, et affecte les ressources nationales allouées à l'Agence Sénégalaise de Promotion Touristique (ASPT), limitant ainsi les capacités d'investissement et de promotion du secteur touristique.

En résumé, l'érosion côtière apparaît comme un facteur majeur de vulnérabilité du tourisme littoral, compromettant non seulement les infrastructures et l'attractivité paysagère, mais aussi les revenus, l'emploi et la durabilité socio-économique des communautés côtières sénégalaises.



Planche photographique 10: Perte de plage à Saly Portudal image Google Earth (A : 2003 ; B : 2019)

L'analyse comparative des images satellitaires de la station balnéaire de Saly Portudal met en évidence une dynamique côtière préoccupante, caractérisée par une régression significative du trait de côte. La photographie A illustre l'état antérieur du site, marqué par une large bande sableuse bien développée, servant d'interface fonctionnelle entre l'espace touristique bâti et l'océan. La plage présentait alors une stabilité relative, aménagée avec des installations parasolaires et des accès piétonniers, contribuant pleinement à l'attractivité balnéaire du site.

En revanche, l'image B révèle une dégradation profonde de cet espace, avec une disparition quasi totale du cordon sableux initial. La mer atteint désormais directement les constructions hôtelières et les infrastructures riveraines, illustrant une érosion côtière avancée. Ce phénomène traduit non seulement une déstructuration physique du littoral, mais également une perturbation des usages socio-économiques associés, notamment touristiques.

D'un point de vue touristique, la disparition de la plage constitue un impact majeur sur l'attractivité du site. La bande sableuse, élément central de l'offre balnéaire, représente un atout clé pour les hôtels et les structures d'accueil situées en front de mer. Sa régression engendre une perte de valeur foncière et esthétique, réduisant l'attractivité touristique nationale et internationale. Plusieurs établissements, auparavant directement reliés à la plage, se retrouvent exposés à l'avancée marine et doivent recourir à des aménagements coûteux de protection, tels que digues, épis, enrochements ou remblaiements. Dans ce contexte, l'État du Sénégal, en partenariat avec la Banque mondiale, a lancé en 2018 le projet de restauration des plages de Saly.

Le recul du trait de côte impacte également la fréquentation touristique. Des entretiens avec des acteurs locaux (gestionnaires d'hôtels, guides touristiques, restaurateurs) confirment une diminution significative du nombre de visiteurs, corrélée à la dégradation du paysage côtier. Ce recul entraîne également un sentiment d'insécurité pour les touristes, notamment lors des marées hautes et des épisodes de houle, accentuant la vulnérabilité des infrastructures et des usagers.

La situation observée à Saly s'inscrit dans un contexte plus large de vulnérabilité des littoraux ouest-africains, résultant de la combinaison de dynamiques naturelles (houle, courants, élévation du niveau marin) et de facteurs anthropiques (urbanisation anarchique du rivage, déficit sédimentaire lié aux barrages en amont, absence de planification intégrée du littoral).

Ainsi, la régression du trait de côte à Saly ne constitue pas un cas isolé, mais illustre la nécessité urgente de repenser la gouvernance des zones littorales. La durabilité du tourisme côtier en Afrique de l'Ouest, et en particulier sur la Petite-Côte sénégalaise, requiert la mise en œuvre de stratégies adaptatives basées sur des diagnostics territoriaux rigoureux et une gestion intégrée du trait de côte.



Photo 6: Hôtel attaqué par l'érosion côtière à la station balnéaire de Saly Portudal (Yade, Février 2022)

En conclusion, l'érosion côtière exerce des implications multiformes et significatifs sur le secteur touristique. Parmi les effets les plus saillants figurent la perte progressive des plages, élément central de l'attractivité balnéaire et facteur déterminant des stratégies de promotion et de marketing des stations littorales. Cette régression du cordon sableux compromet directement la valeur esthétique et fonctionnelle du littoral, tout en réduisant l'expérience touristique offerte aux visiteurs.

Parallèlement, la destruction partielle ou totale d'infrastructures touristiques implantées en bordure immédiate du rivage accentue la vulnérabilité du secteur. L'avancée marine et le rapprochement des vagues génèrent des risques concrets pour la sécurité des usagers, tout en nécessitant des aménagements coûteux et complexes pour protéger les biens matériels.

Ces manifestations de la dynamique régressive du trait de côte contribuent à une diminution substantielle de la fréquentation touristique, avec des effets en cascade sur les activités économiques connexes, telles que la restauration, l'artisanat, le commerce et les transports. Les retombées socio-économiques se traduisent par une contraction des revenus locaux, une réduction des emplois liés au tourisme et une perte de contribution fiscale pour les collectivités territoriales, impactant à la fois l'économie locale et, à plus large échelle, le développement national.

3.2.3. Agriculture

Outre la pêche et le tourisme, l'agriculture constitue un pilier fondamental de l'économie sénégalaise, tant à l'échelle nationale qu'au niveau local. Sur le littoral de la Petite-Côte, cette activité demeure particulièrement importante dans les zones à faible densité urbaine, notamment à Joal-Fadiouth, Palmarin et dans l'ensemble des îles du Saloum, où elle contribue de manière significative à la sécurité alimentaire, à la création d'emplois et à la génération de revenus pour les populations riveraines. Les enquêtes de terrain menées dans le cadre de cette étude indiquent que 21,79 % des répondants déclarent pratiquer régulièrement une activité agricole dans cette bande côtière.

Cependant, malgré son importance socio-économique, l'agriculture littorale est aujourd'hui fortement menacée par l'avancée marine et les dynamiques d'érosion côtière. Le recul du trait de côte entraîne une perte progressive de terres cultivables, tandis que les submersions marines et fluviales favorisent la salinisation des sols, compromettant leur fertilité et rendant plusieurs parcelles impropres à la production agricole. Cette double contrainte contribue à une diminution notable de la productivité agricole, fragilise la résilience alimentaire des communautés locales et accentue leur vulnérabilité socio-économique.

Les résultats des enquêtes menées en 2025 auprès des populations locales confirment l'ampleur de cette problématique. Une majorité des répondants (62,82 %) indique avoir observé une perte de terres agricoles liée à l'érosion côtière et à la salinisation des sols, tandis que 37,18 % déclarent ne pas avoir encore constaté de diminution significative de leurs surfaces cultivables. Cette perception majoritaire souligne l'importance croissante de ces dynamiques environnementales dans la transformation des systèmes agricoles littoraux.

Ces observations rejoignent les analyses issues des données spatiales et cartographiques, qui mettent en évidence une régression progressive des surfaces agricoles exploitables dans les zones basses et proches du littoral, où l'intrusion saline et le recul du trait de côte exercent des pressions particulièrement fortes. Dans ce contexte, la préservation des terres agricoles apparaît comme un enjeu majeur pour les territoires littoraux de la Petite-Côte et du delta du Saloum, nécessitant la mise en œuvre de stratégies de gestion intégrée du littoral capables d'articuler protection des écosystèmes côtiers et maintien des activités productives locales.

La figure 60 complète cette analyse en documentant la perte tangible de parcelles agricoles dans les zones riveraines, traduisant une régression significative de la productivité et des rendements. Si certains facteurs exogènes, tels que les variations climatiques ou les pressions socio-

économiques, peuvent contribuer à cette situation, les processus physiques (érosion côtière et salinisation) apparaissent comme les principaux déterminants de la dégradation des terres. L'érosion grignote progressivement les espaces cultivables, tandis que l'intrusion saline altère la fertilité des sols, compromettant durablement la capacité productive des exploitations.

Ces transformations spatiales et environnementales ont des conséquences directes sur la sécurité alimentaire des communautés riveraines et fragilisent les revenus des ménages dépendants de l'agriculture littorale pour leur subsistance. L'ensemble de ces éléments souligne l'urgence de développer des stratégies d'adaptation agroécologiques et de gestion intégrée des zones côtières, visant à préserver la productivité agricole et la résilience socio-économique des populations.

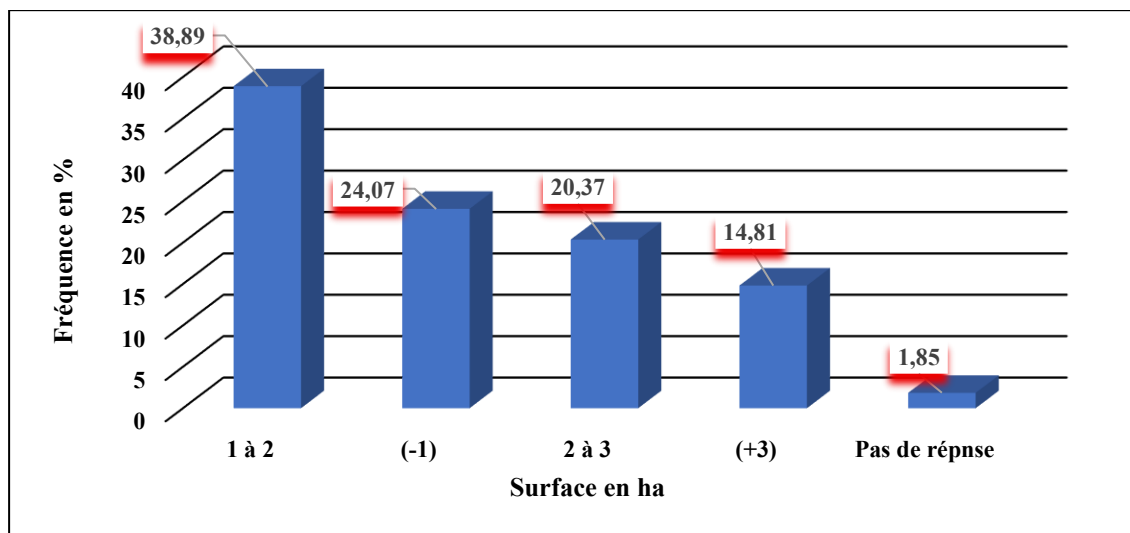


Figure 47 : Nombre d'hectares perdus selon la population de la zone d'étude (données d'enquêtes, 2025)

La figure présentée illustre les pertes foncières évaluées par les populations locales et les personnes ressources, exprimées en hectares. Il en ressort que la tranche de 1 à 2 hectares concentre la majorité des déclarations, représentant 38,89 % des réponses. Cette proportion dominante traduit une tendance largement répandue dans les zones insulaires du Saloum, où des pertes foncières relativement modestes en surface ont néanmoins un impact direct sur les moyens de subsistance, en particulier dans un contexte d'insularité et de pressions multiples sur l'espace.

Par ailleurs, 24,07 % des répondants estiment avoir perdu environ 1 hectare, ce qui traduit également des pertes significatives, souvent liées à la combinaison d'érosion marine et de salinisation progressive des sols. Cette problématique est particulièrement marquée à Joal et Palmarin, deux zones situées à l'interface entre le continent et les milieux insulaires, où les bas-

fonds rizicoles et les jardins maraîchers sont de plus en plus affectés par l'intrusion d'eaux salées. Ces dynamiques entraînent une forte réduction des rendements agricoles et favorisent la mise en jachère prolongée, voire l'abandon définitif de certaines parcelles cultivables.

La catégorie correspondant à des pertes comprises entre 2 et 3 hectares, citée par 20,37 % des répondants, indique une érosion ou une dégradation plus prononcée, touchant principalement les zones arrière-mangrove et les parcelles communautaires situées en périphérie des îles. Ce type de situation est récurrent dans des localités telles que Dionewar, Djinack Bara et Bétenty, où l'élévation du niveau marin, la fréquence accrue des submersions et l'ensablement des chenaux entraînent un recul progressif du trait de côte.

Enfin, les pertes supérieures à 3 hectares concernent 14,81 % des enquêtés, constituant une proportion significative compte tenu de la densité d'occupation dans les espaces insulaires. Ces cas extrêmes correspondent à des situations critiques, observées notamment dans les secteurs où les protections naturelles (mangroves, cordons sableux) sont fortement dégradées, exposant directement les terres à l'érosion frontale. Par ailleurs, 1,85 % des répondants n'ont pas pu fournir d'estimation chiffrée, ce qui reflète la difficulté à évaluer avec précision les superficies perdues en l'absence de repères cadastraux ou de mesures topographiques fiables.

Dans l'ensemble, l'analyse des données révèle une perception collective claire de la régression foncière, alimentée par des facteurs naturels (érosion, submersion, salinisation) et exacerbée par des pressions anthropiques telles que la surexploitation des ressources, l'absence de politiques foncières adaptées et la vulnérabilité socio-économique des populations. Le cas de Joal et Palmarin, où l'expansion rapide des tannes salées empiète sur les terres arables, illustre parfaitement la complexité des dynamiques en jeu et les défis à relever pour la mise en place de stratégies d'adaptation et d'une gestion intégrée des littoraux sénégalais.

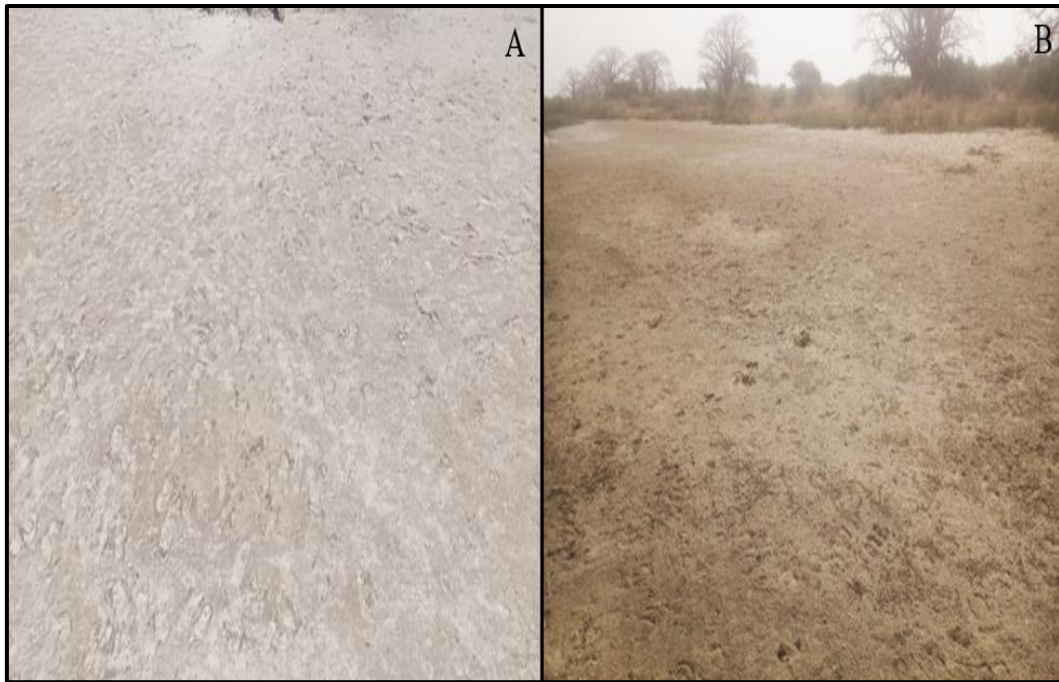


Planche photographique 11: Terres salées devenues des tannes : (A : Palmarin ; B : Bétenty) (Yade, Avril 2025)

En définitive, la dynamique actuelle du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum s'inscrit dans un contexte caractérisé par l'interaction de facteurs climatiques et anthropiques. Les effets conjugués des changements globaux, des épisodes de sécheresse récurrents des années 1970-1980 et de la pression croissante liée aux activités humaines ont profondément modifié l'équilibre écologique des zones agricoles riveraines. Cette perturbation se manifeste, d'une part, par une érosion côtière progressive, entraînant une perte directe de terres cultivables, et, d'autre part, par une salinisation accrue des sols, réduisant considérablement la surface exploitable pour l'agriculture.

Ces processus physiques ont des répercussions socio-économiques significatives. La diminution des superficies cultivables engendre une baisse notable de la production agricole, affectant directement les moyens de subsistance des populations rurales et accentuant la vulnérabilité alimentaire des communautés. Par ailleurs, la dépendance des ménages à l'agriculture vivrière et à la commercialisation des récoltes amplifie l'impact économique de cette régression foncière.

Ainsi, la dynamique du trait de côte ne se limite pas à un simple recul physique du littoral, mais constitue un facteur structurant de fragilisation du tissu socio-économique local, compromettant la durabilité des pratiques agricoles et renforçant l'exposition des populations côtières aux pressions environnementales et économiques.

En définitive, les dynamiques du trait de côte s'inscrivent dans un système d'interactions complexes entre processus physiques et activités humaines. Elles contribuent à renforcer la vulnérabilité des socio-écosystèmes côtiers, en affectant simultanément les fonctions écologiques, les infrastructures et les activités économiques. Cette situation souligne la nécessité d'une approche intégrée de la gestion du littoral, conciliant protection de l'environnement et maintien des activités économiques.

Conclusion du chapitre VI

Le recul du trait de côte exerce une influence profondément négative sur l'écosystème côtier, en modifiant progressivement sa morphologie et en perturbant son équilibre écologique. Cette transformation se traduit par le rétrécissement continu des plages, la dégradation des cordons dunaires et de la couverture végétale littorale, ainsi que par une salinisation croissante des sols, conséquence directe des phénomènes de submersion marine et fluviale récurrents. Ces altérations environnementales, documentées le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au Delta du Saloum, génèrent des implications significatives sur les dynamiques socio-économiques des territoires côtiers.

Sur le plan socio-économique, la progression de l'érosion se traduit par la destruction ou la fragilisation des infrastructures résidentielles et productives, compromettant ainsi les conditions de vie des populations riveraines. Les principales activités économiques, notamment le tourisme balnéaire et ses activités annexes, la pêche artisanale et l'agriculture littorale, subissent des perturbations notables, se traduisant par une réduction des revenus locaux et une amplification de la précarité des ménages. La combinaison de la dégradation des bases économiques et de la fragilisation sociale contribue de manière alarmante à l'accroissement de la vulnérabilité des communautés côtières.

Ces constats soulignent l'urgence d'adopter une stratégie d'aménagement et de gestion durable du littoral, fondée sur une approche intégrée et participative. La mise en œuvre de mesures visant à protéger et valoriser les zones côtières apparaît indispensable, tant pour la préservation des écosystèmes fragiles que pour assurer la pérennité des activités socio-économiques qui en dépendent. Une telle démarche doit articuler actions de protection physique (digues, enrochements, restauration des dunes et mangroves), planification spatiale et renforcement de la résilience des populations locales.

Chapitre VII : Analyse des stratégies d'adaptation

L'érosion côtière constitue une menace croissante pour les populations et les territoires littoraux de la Petite-Côte aux îles du Saloum. Face à ces dynamiques, différentes stratégies d'adaptation ont été développées, visant à limiter les implications environnementales et socio-économiques de la progression du trait de côte. Ce chapitre analyse ces mesures de protection et d'adaptation, en évaluant leur nature, leur efficacité et leur durabilité. Il s'articule autour de trois axes principaux : les méthodes non-structurelles, les méthodes structurelles et l'évaluation globale de l'efficacité des stratégies mises en œuvre.

1. Aperçu des stratégies d'adaptation développées par les populations littorales

Les dynamiques côtières exercent des implications significatives sur les communautés riveraines, affectant profondément leur cadre de vie et leurs activités économiques. La perception croissante des effets négatifs de l'érosion côtière, tant sur les écosystèmes littoraux que sur l'organisation sociale et économique des territoires, a conduit les populations locales, en complément des interventions publiques, à développer et mettre en œuvre diverses stratégies d'adaptation (Fig. 61). Ces initiatives, mobilisant à la fois les autorités et les communautés, visent à atténuer les pressions induites par la dynamique littorale et à préserver les ressources naturelles ainsi que les activités économiques essentielles à la subsistance des ménages.

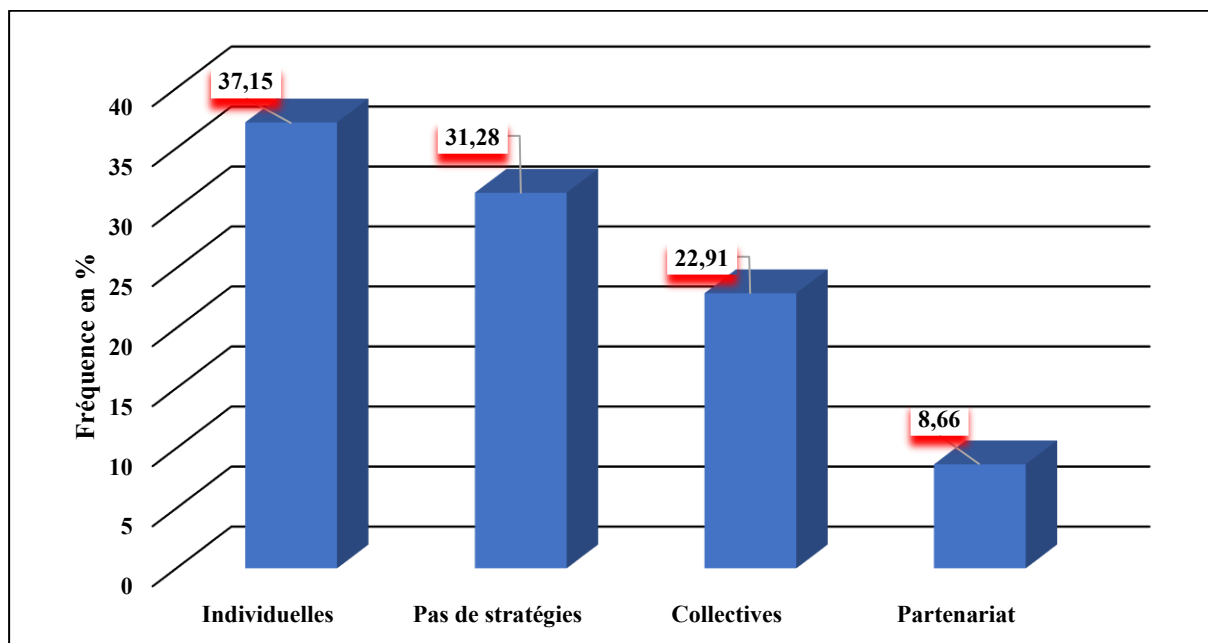


Figure 48 : Types de stratégies de lutte contre l'érosion côtière sur la Petite-Côte sénégalaise selon la population (données d'enquêtes, 2025)

Les populations de la Petite-Côte aux îles du Saloum ont développé une diversité de stratégies face à la progression de l'érosion côtière. Ces stratégies présentent des variations notables, tant par leur nature que par leur fréquence d'adoption, traduisant des capacités d'adaptation hétérogènes selon les contextes locaux et les ressources mobilisables.

Les données recueillies indiquent que 37,15 % des stratégies adoptées sont de nature individuelle. Ce résultat souligne la prédominance des initiatives personnelles et familiales, consistant généralement en la mise en place de dispositifs rudimentaires de protection, tels que des murets, des sacs de sable, des reboisements ponctuels ou l'utilisation de troncs d'arbres. Bien que ces mesures reflètent une volonté manifeste d'agir, elles demeurent limitées en efficacité et peinent à contenir l'ampleur des processus érosifs sur le moyen terme.

Parallèlement, 31,28 % des enquêtés déclarent ne disposer d'aucune stratégie spécifique face à l'érosion. Cette proportion importante met en évidence l'existence d'un segment notable de la population exposé directement aux aléas côtiers, en raison de contraintes financières, d'un manque de sensibilisation ou de l'absence de soutien technique. Ce constat souligne la nécessité de renforcer les dispositifs de vulgarisation, d'accompagnement technique et de conseil afin de réduire les vulnérabilités structurelles et de favoriser une meilleure appropriation des risques.

Les stratégies collectives sont mobilisées par 22,91% des populations. Elles reflètent la capacité de certaines communautés à mutualiser les efforts et à mettre en œuvre des actions concertées, telles que la pose de fascines, la plantation d'espèces stabilisatrices (filaos, palétuviers) ou l'installation de digues temporaires. Bien que ces initiatives témoignent d'un niveau d'organisation communautaire plus structuré, leur couverture spatiale reste souvent limitée et dépend fortement de l'engagement continu des membres des communautés locales.

Enfin, la dimension partenariale apparaît marginale, avec seulement 8,66% des enquêtés ayant recours à des collaborations avec des acteurs institutionnels, des ONG ou des projets de développement. Cette faible proportion reflète les limites des dispositifs de coopération, qui demeurent ponctuels et insuffisamment déployés sur l'ensemble de la Petite-Côte. Elle souligne également la nécessité d'intensifier les programmes d'accompagnement technique et financier, en particulier dans les zones les plus exposées.

Globalement, ces résultats indiquent que les stratégies de lutte contre l'érosion côtière sont encore majoritairement informelles, individuelles ou inexistantes. La structuration de réponses collectives ou partenariales reste embryonnaire, ce qui interroge la durabilité des mécanismes actuels et met en évidence l'importance d'une gouvernance locale plus inclusive et proactive

pour renforcer la résilience des populations littorales face à la dégradation continue du trait de côte.

L'analyse des pratiques locales permet de distinguer deux grandes catégories de méthodes d'adaptation et de lutte contre l'érosion côtière le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum.

- ✓ Les méthodes non-structurelles, qui privilégient une approche souple et préventive, visent à favoriser l'adaptation des sociétés littorales sans recourir systématiquement à des ouvrages rigides. Elles comprennent notamment : la restauration et la protection des écosystèmes côtiers (mangroves, cordons dunaires, herbiers marins), la régulation de l'occupation et de l'exploitation des zones exposées, ainsi que des actions de sensibilisation et de planification spatiale visant à limiter les implantations dans les secteurs à risque ;
- ✓ Les méthodes structurelles, plus traditionnelles, reposent sur la mise en œuvre d'aménagements durs, tels que les digues, les épis, les enrochements et autres ouvrages de protection destinés à contenir directement l'avancée de la mer.

À partir de cet aperçu des stratégies d'adaptation développées par les populations littorales, il convient maintenant de s'intéresser plus spécifiquement aux méthodes non-structurelles, qui privilégient des approches souples et préventives pour limiter l'impact de l'érosion côtière

2. Méthodes non-structurelles

Dans le contexte de la Petite-Côte, les méthodes non-structurelles regroupent une grande part des stratégies individuelles et collectives mises en œuvre par les populations locales. Elles reposent principalement sur des actions de restauration des écosystèmes naturels et sur des mesures d'adaptation à faible impact matériel. Il convient toutefois de noter que ces approches sont également mobilisées, quoique de manière plus limitée et ponctuelle, par les autorités publiques et les organisations partenaires.

2.1. Stratégies individuelles non-structurelles

Le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, les mesures individuelles de lutte contre l'érosion côtière présentent une grande diversité et reposent souvent sur des dispositifs rudimentaires. Parmi ces pratiques, on observe l'utilisation de sacs de sable ou de béton disposés en barrières, l'implantation de troncs d'arbres pour atténuer l'impact des vagues, ainsi que la protection immédiate des abords des habitations par des blocs rocheux de grande taille. S'y ajoutent également la construction de barrages et de dallages en pierre, destinés à

contenir la progression de l'érosion et à réduire la déstabilisation du sol au pied des constructions riveraines. Bien que ces solutions soient artisanales et limitées en efficacité spatiale et temporelle, elles traduisent la volonté manifeste des populations locales de préserver leurs biens face à l'avancée continue du trait de côte.



Planche photographique 12: Stratégies individuelles non-structurelles de lutte contre l'érosion côtière (A : Dionewar, image Dmédia 2018 ; B : Pointe Sarène, Yade, 2025 ; C : Golf, Yade, Février 2022 ; D : Golf, Yade, avril 2025)

2.2. Stratégies communautaires non-structurelles

Conscientes des limites et de l'efficacité réduite des méthodes individuelles non-structurelles dans la lutte contre l'érosion côtière, les populations riveraines du littoral sénégalais, de la Petite-Côte jusqu'au delta du Saloum, ont progressivement développé des stratégies collectives douces visant à atténuer l'avancée marine et à protéger les zones habitées ainsi que les espaces économiques.

Parmi ces initiatives, la replantation dunaire et les campagnes de sensibilisation environnementale menées à Joal et à Palmarin occupent une place centrale. Ces actions visent

principalement à reconstituer les cordons dunaires par l'installation de végétation fixatrice, renforçant ainsi leur rôle de barrière naturelle contre la dynamique marine.

Dans la localité de Djiffer, la stabilisation des dunes constitue également une stratégie collective privilégiée. Elle repose sur des interventions combinant fixation mécanique et biologique, destinées à limiter la mobilité éolienne et à réduire la vulnérabilité des formations dunaires face aux effets des vagues.

Dans les îles du Saloum, les communautés mettent en œuvre des programmes de reboisement des mangroves et de plantation de filaos, contribuant non seulement à la réduction de l'érosion littorale, mais également à la préservation des écosystèmes lagunaires et à la restauration des services écosystémiques essentiels pour les populations locales.

Cependant, certaines pratiques collectives non-structurelles présentent des enjeux environnementaux et sanitaires. À Bétenty, en dehors de la plantation de filaos, les habitants recourent au dépôt massif d'ordures ménagères le long du rivage dans le but de freiner l'énergie des vagues et de ralentir l'érosion des plages. Bien que cette méthode soit perçue localement comme efficace, elle entraîne une insalubrité préoccupante et détériore la qualité paysagère et écologique du littoral. Elle illustre néanmoins une solution pragmatique face à l'urgence et au manque de ressources techniques et financières pour des interventions plus durables et respectueuses de l'environnement.

À Dionouar, les stratégies collectives d'ingénierie écologique reposent sur l'assemblage de branches et de feuilles macrophylls pour former des dispositifs dissipateurs. Ces structures ont pour objectif de réduire l'énergie cinétique des vagues océaniques et de retenir les sédiments alluvionnaires transportés par la houle, participant ainsi à la protection des zones côtières.



Planche photographique 13: Stratégies collectives non-structurelles A et B à Bétenty ; C et D à Dionewar (Yade, Avril 2025)

2.3. Stratégies publiques non-structurelles

Sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, les limites avérées des stratégies non-structurelles mises en œuvre à l'échelle individuelle et communautaire pour lutter contre l'érosion côtière ont conduit les autorités publiques, ainsi que certains acteurs de la coopération internationale, à repenser les modalités d'intervention. Cette réflexion s'est progressivement orientée vers l'adoption d'approches plus intégrées, fondées sur des solutions dites « douces », respectueuses des écosystèmes côtiers et inscrites dans une perspective de durabilité à long terme.

Parmi ces mesures, la sensibilisation communautaire occupe une place centrale, en tant que levier d'appropriation locale des enjeux environnementaux et d'adoption de pratiques favorables à la résilience des territoires littoraux. La relocalisation des populations exposées constitue également une réponse pragmatique face à la vulnérabilité accrue des zones basses. À cet égard, des opérations de déplacement ont été mises en œuvre dans la commune de Mbour, où des ménages initialement installés dans le quartier de Golf ont été relogés à Baay Deuk, ainsi

qu'à Palmarin Diakhanor, où des mobilités volontaires ont permis de prévenir des situations de crise imminente liées à l'érosion et aux submersions marines.

Dans la station balnéaire de Saly Portudal, l'État du Sénégal, en partenariat avec la Banque mondiale, a engagé un projet de restauration des plages, matérialisé par d'importantes opérations de rechargement sédimentaire. Ces interventions visaient à reconstituer le cordon sableux érodé et à préserver la vocation touristique de la zone, fortement dépendante de la stabilité morphologique du littoral.

Par ailleurs, à la Pointe Sarène, des programmes de plantation de filaos ont été réalisés en périphérie des infrastructures touristiques afin de renforcer la stabilisation des sols et de limiter les processus de sapement induits par l'action des vagues. Dans cette même zone, une stratégie innovante de prévention des risques côtiers a récemment été adoptée par la Société d'Aménagement et de Promotion des Côtes et Zones Touristiques du Sénégal (SAPCO). Elle consiste à implanter les nouvelles infrastructures touristiques à une distance réglementaire de 140 mètres du trait de côte, dans l'objectif de réduire leur exposition directe aux dynamiques d'érosion et de submersion marine. Cette approche préventive traduit une volonté institutionnelle de concilier développement touristique et réduction de la vulnérabilité côtière, en tenant compte des projections d'élévation du niveau de la mer et des aléas morphodynamiques affectant durablement la stabilité des plages.

Enfin, dans les zones de mangrove, notamment à Joal et dans les îles du Saloum, plusieurs organisations non gouvernementales, à l'image de l'ONG Nébédjay, ont investi dans des programmes de régénération des mangroves. Ces formations végétales jouent un rôle écologique majeur en favorisant la fixation des sédiments, la dissipation de l'énergie hydrodynamique et la consolidation de la frange littorale. Ces initiatives illustrent une prise de conscience croissante de la nécessité d'articuler protection des écosystèmes, adaptation des populations riveraines et préservation des activités économiques littorales.



Planche photographique 14: Stratégies de politiques publiques non structurelles (A : image APIX, 2019 ; B, Pointe Sarène : Yade, Avril 2025).

Dans l'ensemble, les stratégies non-structurelles présentent plusieurs avantages qui expliquent leur adoption croissante le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum. Elles s'inscrivent dans une logique de gestion adaptative des zones côtières, visant à accompagner les dynamiques naturelles plutôt qu'à les contraindre par des interventions lourdes. Ces approches dites « douces » intègrent notamment la restauration des écosystèmes côtiers (replantation des mangroves, stabilisation et fixation des dunes), la sensibilisation et l'implication des populations locales, ainsi que des outils de planification spatiale tels que la relocalisation préventive des infrastructures exposées. L'ensemble de ces actions contribue au renforcement simultané de la résilience écologique et de la résilience sociale des territoires littoraux.

Par ailleurs, ces stratégies se distinguent par des coûts d'investissement et de maintenance généralement plus faibles et plus modulables que ceux associés aux ouvrages de protection structurels lourds (digues, épis, enrochements). Cette caractéristique les rend particulièrement attractives pour les collectivités territoriales et les communautés locales disposant de ressources financières limitées. Leur mise en œuvre progressive, souvent fondée sur des démarches participatives, permet également d'ajuster les interventions dans le temps, en fonction de l'évolution des contraintes environnementales, des dynamiques morpho-sédimentaires et des besoins exprimés par les populations riveraines. Cette flexibilité opérationnelle renforce leur acceptabilité sociale et constitue un facteur clé de leur durabilité à long terme.

Cependant, malgré leurs atouts, les stratégies non-structurelles présentent plusieurs limites qu'il convient de souligner. D'une part, leurs effets bénéfiques ne sont pas toujours immédiatement perceptibles : la stabilisation du trait de côte, la reconstitution des plages ou la restauration des

écosystèmes nécessitent généralement des temps de réponse longs avant l'atteinte d'un équilibre morphodynamique relativement stable. D'autre part, ces approches peuvent se heurter à des résistances sociales, notamment lorsqu'elles impliquent des opérations de délocalisation ou de relocalisation des populations riveraines. Ces mesures sont fréquemment perçues comme des atteintes aux droits fonciers, aux ancrages identitaires et aux modes de vie traditionnels, suscitant des craintes liées à la perte des espaces de résidence et des moyens de subsistance.

Ces contraintes mettent en évidence la nécessité d'une gouvernance côtière inclusive, fondée sur la concertation, la participation effective des communautés concernées et un accompagnement social renforcé. Une telle approche apparaît indispensable pour concilier les impératifs techniques de gestion durable du littoral avec l'acceptabilité sociale des projets de protection et d'adaptation face à l'érosion côtière.

3. Méthodes structurelles

Également désignées sous les termes de mesures structurelles ou de solutions « dures », ces approches reposent sur la mise en place d'aménagements physiques et d'ouvrages artificiels visant à lutter contre l'érosion côtière de manière directe, localisée et souvent immédiate. Elles se traduisent principalement par la construction d'infrastructures lourdes telles que des digues, des épis, des murs de protection ou des enrochements, conçus pour dissiper l'énergie des vagues, limiter le recul du trait de côte et assurer la protection des espaces exposés.

La mise en œuvre de ces stratégies structurelles relève le plus souvent de l'action des autorités centrales ou s'inscrit dans le cadre de partenariats institutionnels et de projets de coopération, en raison de coûts d'investissement et de maintenance élevés, généralement hors de portée des collectivités territoriales et des populations riveraines. Si ces ouvrages peuvent présenter une efficacité significative à court et moyen termes sur des segments spécifiques du littoral, leur durabilité à long terme demeure sujette à débat. En effet, de nombreux travaux soulignent leurs implications secondaires, notamment le transfert ou l'amplification de l'érosion vers des secteurs adjacents, la perturbation des bilans sédimentaires et l'altération des dynamiques morphodynamiques naturelles. Ces limites interrogent ainsi la pertinence de leur généralisation et plaident en faveur d'une intégration raisonnée de ces solutions dans des stratégies de gestion côtière plus globales et adaptatives.

3.1. Méthodes structurelles communautaires sur la Petite-Côte sénégalaise

Face à l'efficacité limitée à court terme des stratégies non-structurelles, certains acteurs, notamment les populations riveraines et les opérateurs économiques tels que les hôteliers de

Saly Portudal, ont progressivement initié des dynamiques collectives visant la mise en œuvre de stratégies structurelles de protection côtière. Ces formes d’auto-organisation traduisent une réponse adaptative à l’urgence et à l’intensité des processus d’érosion, qui menacent directement les investissements économiques, les infrastructures et les moyens de subsistance locaux.

Dans ce cadre, plusieurs dispositifs d’ingénierie côtière ont été déployés, parmi lesquels l’installation d’enrochements, la construction de murs de protection, ainsi que la mise en place de brise-lames et d’épis. Ces ouvrages sont conçus pour dissiper l’énergie hydrodynamique des vagues et limiter le recul du trait de côte. Si leur efficacité est généralement avérée à court terme sur les secteurs directement protégés, leur mise en œuvre s’accompagne fréquemment d’effets induits sur les dynamiques sédimentaires, se traduisant notamment par un report ou une accentuation de l’érosion sur les portions littorales adjacentes.

S’agissant plus spécifiquement des initiatives collectives portées par les populations riveraines, celles-ci ont été principalement observées sur les sites de Bétenty et de Djiffer. À Bétenty, les habitants se sont organisés autour d’un mécanisme de financement communautaire destiné à la construction d’un mur de protection ceinturant les zones d’habitat. Selon les données issues des enquêtes de terrain, cet ouvrage, implanté le long du front de mer, a contribué à une stabilisation relative du trait de côte à proximité immédiate des habitations. En revanche, dans les secteurs périphériques non protégés, les observations locales indiquent une accélération des processus érosifs, caractérisée par la réduction progressive des surfaces agricoles et la dégradation de la couverture végétale, en particulier des formations arborées littorales.



Planche photographique 15: Stratégies structurelles collectives à Bétenty (Yade, Avril 2025)

À Djiffer, une dynamique similaire s'est structurée autour d'un partenariat local associant la communauté villageoise et le dahira du marabout Seydina Mouhamadou Lamine Gaye. Dans ce cadre, un mur de protection en maçonnerie de pierre, d'une longueur d'environ 300 mètres, a été édifié afin de limiter la progression marine. D'après les observations et les témoignages recueillis auprès des habitants, cet ouvrage a contribué à une stabilisation relative du trait de côte sur la façade occidentale du village. En revanche, sa mise en place s'est accompagnée d'effets induits négatifs, notamment une accentuation des processus érosifs sur les plages adjacentes, illustrant le phénomène bien documenté de transfert spatial de l'érosion associé aux ouvrages de protection côtière localisés.



Planche photographique 16: Stratégies structurelles collectives à Djiffer (Yade, Avril 2025).

Dans la station balnéaire de Saly Portudal, l'ampleur des dégradations liées à l'érosion côtière, tant sur l'activité touristique que sur les secteurs économiques associés, a conduit à la structuration d'un collectif multipartite réunissant des acteurs institutionnels et privés. Ce collectif, composé notamment des autorités municipales de Saly Portudal, de la Société d'Aménagement et de Promotion des Côtes et Zones Touristiques du Sénégal (SAPCO), des opérateurs hôteliers et du ministère de l'Environnement et du Développement durable, s'est donné pour objectif prioritaire la préservation de la station balnéaire de Saly, considérée comme un pôle majeur du tourisme balnéaire et un levier essentiel de l'économie locale et nationale.

Dans cette optique, un premier projet de protection côtière a été mis en œuvre sous la conduite du génie civil militaire, aboutissant à la réalisation d'ouvrages de défense tels que des digues et des brise-lames. Selon le deuxième adjoint au maire de Saly, ces infrastructures visaient à ralentir le recul du trait de côte et à préserver des plages fortement dégradées par l'action combinée de l'hydrodynamisme marin et de l'urbanisation croissante du littoral. Toutefois, en dépit des investissements consentis, ces dispositifs se sont révélés insuffisamment résistants

face à la puissance des houles et à la dynamique morphosédimentaire particulièrement active dans ce secteur. Leur dégradation progressive, suivie de leur rupture sous l'effet de la houle, met en évidence les limites techniques et conceptuelles de ces interventions, révélant une prise en compte incomplète des mécanismes complexes régissant l'érosion côtière.

Conscientes de ces enjeux et des implications socio-économiques majeures de l'avancée marine sur l'attractivité touristique de la zone, les autorités sénégalaises, avec l'appui financier de la Banque mondiale, ont par la suite initié un projet de grande envergure de restauration des plages de Saly, marquant une inflexion vers des stratégies d'intervention plus intégrées et adaptées aux spécificités du système côtier.



Planche photographique 17: Enrochement aux abords des hôtels à la station balnéaire de Saly Portudal (Yade, Février 2022)

La faible diffusion des stratégies structurelles le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, s'explique principalement par le coût élevé des investissements qu'elles requièrent, lequel excède largement les capacités financières et techniques des populations locales, y compris lorsque celles-ci s'organisent au sein de collectifs communautaires. Les résultats des investigations de terrain mettent en évidence un constat récurrent : la majorité des habitants interrogés déclarent ne pas disposer des ressources matérielles, financières et techniques nécessaires à la mise en œuvre d'ouvrages lourds de protection côtière.

Cette contrainte structurelle contribue à maintenir la prééminence des approches non-structurelles, perçues comme plus accessibles et plus facilement mobilisables à l'échelle locale, bien que leur efficacité demeure souvent limitée dans le temps et dans l'espace. Cette situation souligne les inégalités d'accès aux dispositifs de protection côtière et interroge la soutenabilité à long terme des stratégies d'adaptation reposant principalement sur des initiatives locales à faibles moyens.

3.2. Méthodes structurelles publiques sur la Petite-Côte sénégalaise

Sur l'ensemble du littoral sénégalais compris entre la Petite-Côte et le delta du Saloum, la commune de Saly Portudal, et plus particulièrement sa station balnéaire, constitue à ce jour le seul espace bénéficiant d'infrastructures lourdes de protection contre l'érosion côtière. Cette situation relève d'une forme de priorisation territoriale, justifiée par le rôle stratégique attribué à cette station depuis les années 1970, période au cours de laquelle Saly s'est imposée comme le principal pôle du tourisme balnéaire au Sénégal. La singularité de Saly Portudal résulte ainsi d'une convergence de facteurs écologiques, économiques et politiques, qui ont conduit les pouvoirs publics successifs à lui accorder une attention particulière dans les politiques nationales de développement touristique.

Cette centralité se traduit par la mise en œuvre continue de programmes d'aménagement, de modernisation des infrastructures et de protection du littoral, témoignant d'une volonté institutionnelle durable de renforcer l'attractivité de la station. Cette dynamique s'inscrit dans une vision prospective plus large, visant à positionner la région de Thiès, et plus spécifiquement Saly Portudal, comme un pôle touristique d'excellence à l'échelle africaine et internationale.

Cette orientation stratégique est explicitement intégrée dans l'agenda de la « Vision Sénégal 2025 », porté par le régime en place. Selon les projections officielles formulées dans ce cadre, les plages de sable fin de la Petite-Côte sont appelées à faire du Sénégal une destination balnéaire de premier plan. À l'horizon 2050, la région de Thiès, caractérisée par ses complexes hôteliers haut de gamme, ses stations balnéaires modernisées et le développement d'activités nautiques, pourrait accueillir jusqu'à 800 000 touristes par an. Cette trajectoire de croissance touristique devrait s'accompagner d'une augmentation substantielle des recettes générées, estimées à un passage de 200 milliards de francs CFA en 2023 à près de 700 milliards de francs CFA à l'horizon 2050.

Toutefois, ce positionnement prioritaire de Saly Portudal, s'il contribue au dynamisme économique régional et national, soulève également des enjeux d'équité territoriale et de durabilité. La concentration des investissements publics et privés sur un espace littoral particulièrement exposé aux processus d'érosion et de submersion marine interroge la pérennité des modèles de développement fondés sur une forte spécialisation touristique dans des zones à haute vulnérabilité environnementale.

Dans ce contexte, deux projets majeurs relevant de stratégies structurelles ont été mis en œuvre par les autorités publiques dans la station balnéaire de Saly. Ces interventions visent

explicitement la protection et la sécurisation durable de ce linéaire côtier stratégique, dans une logique de préservation des infrastructures touristiques et de maintien des conditions nécessaires à la continuité de l'activité économique. Elles illustrent ainsi la place centrale accordée à la protection du capital touristique dans les politiques de gestion du littoral sénégalais.

3.2.1. Projet fonds d'adaptation

Mis en œuvre entre 2012 et 2015, ce projet avait pour objectif principal de renforcer la résilience des zones côtières fortement vulnérables à l'érosion le long de la Petite-Côte sénégalaise. Les interventions ont ciblé plusieurs localités stratégiques, notamment Rufisque (Thiawlène), Saly Portudal et Joal-Fadiouth. Dans un contexte marqué par une dégradation rapide du trait de côte et une situation d'urgence environnementale, le projet a notamment permis la construction d'un mur de soutènement à Saly Portudal, destiné à contenir l'intense érosion observée sur ce site à cette période.

Le financement assuré par le Fonds d'Adaptation a contribué à la sécurisation temporaire d'infrastructures socio-économiques situées en bordure immédiate du rivage, en particulier des établissements hôteliers et des espaces dédiés à la transformation des produits halieutiques. À Saly Coulang, les enquêtes menées auprès des femmes actives dans ce secteur ont mis en évidence l'importance stratégique de ces installations, qui constituent des lieux essentiels de travail et de génération de revenus. Le projet a ainsi permis la réhabilitation de la zone de transformation des produits de la pêche, précédemment détruite par l'érosion, sur une superficie totale de 878 m². Il a également abouti à la construction d'un hangar, à la réfection des claies de séchage, à l'installation de l'éclairage public et à l'édification de toilettes fonctionnelles, améliorant de manière significative les conditions d'exercice des activités de transformation halieutique.

Toutefois, malgré ces acquis initiaux, le dispositif mis en place n'a pas été en mesure de résister durablement aux sollicitations marines répétées et s'est révélé insuffisamment adapté aux dynamiques morphosédimentaires et aux contraintes socio-économiques locales. À terme, le mur de soutènement a subi un effondrement, entraînant la destruction de plusieurs infrastructures et habitations situées à proximité immédiate du rivage. Cet échec partiel, imputable notamment à une prise en compte insuffisante des spécificités physiques et sociales du littoral de Saly, a conduit les autorités publiques et leurs partenaires à engager une réflexion stratégique plus ambitieuse. Celle-ci a débouché sur la conception d'un projet de plus grande envergure : le programme de restauration des plages de Saly, initié par l'État du Sénégal en

partenariat avec la Banque mondiale, qui vise à apporter une réponse plus structurante et mieux adaptée à la vulnérabilité côtière chronique de cette zone à haute importance écologique et socio-économique.

3.2.2. Programme de restauration des plages de Saly, dans la Projet de Croissance et de Développement des Exportations de l'APIX_{sa}

Doté d'un financement de 74 millions de dollars américains, ce projet poursuit des objectifs pluriels, articulés autour du renforcement de la compétitivité économique et de la résilience des zones littorales sénégalaises. Il vise notamment à promouvoir la création et le développement des petites et moyennes entreprises (PME), à améliorer leur accès aux marchés d'exportation, à soutenir la relance durable du secteur touristique, ainsi qu'à renforcer l'environnement des affaires à l'échelle nationale.

Son cadre institutionnel se caractérise par une gouvernance multipartite mobilisant une pluralité d'acteurs institutionnels et territoriaux, parmi lesquels figurent le ministère en charge du Tourisme, l'Agence nationale pour la promotion des investissements et des grands travaux (APIX), la Direction de l'Environnement et des Établissements classés (DEEC), le Centre de Suivi Écologique (CSE), à travers la Maîtrise d'Ouvrage Locale (MOLOA), le comité de gestion de la station touristique de Saly, ainsi que la mairie de Saly Portudal. Cette architecture institutionnelle complexe reflète la transversalité des enjeux abordés, à l'interface du développement économique, de la gestion environnementale et de l'aménagement du territoire.

La diversité et la complémentarité des parties prenantes impliquées témoignent de l'importance stratégique accordée à la station balnéaire de Saly, à la fois en tant que pilier de l'économie touristique nationale et comme moteur du développement local. La durabilité de ce pôle touristique apparaît ainsi étroitement dépendante de la capacité collective des acteurs à répondre de manière coordonnée aux défis posés par l'érosion côtière, la dégradation des écosystèmes littoraux et la concurrence internationale accrue.

Initialement, le projet avait pour objectif exclusif la protection de la station balnéaire de Saly Portudal, considérée comme un espace prioritaire en raison de sa forte valeur touristique et économique. Toutefois, à l'issue des études d'impact environnemental et social et des concertations menées entre les différentes parties prenantes, les autorités ont décidé d'élargir le périmètre d'intervention à un linéaire côtier total de 4,8 kilomètres, conformément aux orientations précisées par le directeur général de la Société d'Aménagement et de Promotion des Côtes et Zones Touristiques du Sénégal (SAPCO).



Photo 7: Secteurs d'intervention du programme de restauration des plages de Saly (APIX, 2017)

Le programme a permis la mise en œuvre d'un ensemble d'actions intégrant des techniques de restauration et de protection structurelle du littoral, visant à limiter le recul du trait de côte et à renforcer la résilience morphologique et écologique des plages. Ces interventions combinent des mesures de reconstitution sédimentaire et des ouvrages d'ingénierie côtière, parmi lesquelles figurent :

- ✓ le dragage : extraction ciblée de sédiments marins (sables et vases) à partir de zones définies, afin de constituer des stocks sédimentaires utilisables pour la reconstitution des plages dégradées ;
- ✓ le remblaiement : dépôt des sédiments extraits sur le rivage dans le but de rehausser et d'élargir l'estran, reconstituant ainsi le profil transversal de la plage détruit par l'érosion ;
- ✓ le rééquilibrage des plages : redistribution contrôlée des matériaux déposés afin d'obtenir un profil côtier stable, limitant les déséquilibres qui pourraient accélérer l'érosion latérale ou longitudinale ;
- ✓ la construction d'épis : ouvrages rigides perpendiculaires à la ligne de rivage, destinés à piéger les sédiments transportés par la dérive littorale et à réduire leur entraînement vers le large ;
- ✓ les brise-lames immergés : structures submergées dissipant l'énergie des vagues avant leur impact sur la plage, contribuant à l'atténuation de l'érosion côtière ;

- ✓ les brise-lames émergés : ouvrages affleurants ou surélevés au-dessus du niveau de la mer, constituant une barrière physique visible contre le déferlement des vagues et renforçant la protection du cordon sableux.

L'ensemble de ces interventions vise à stabiliser durablement le trait de côte, à protéger les infrastructures touristiques et à restaurer la fonctionnalité et l'attractivité de la plage de Saly, fortement dégradée sous l'effet combiné de l'érosion marine et des pressions anthropiques. Ces aménagements illustrent une approche intégrée de gestion côtière, combinant ingénierie et restauration sédimentaire pour limiter les risques côtiers tout en maintenant les usages socio-économiques du littoral.



Planche photographique 18: Stratégies structurelles de politiques publiques à la station balnéaire de Saly Portudal (Yade, Avril 2025)

Le projet de restauration des plages de Saly a permis une reconstitution substantielle du linéaire côtier, avec un gain d'environ 50 mètres de largeur de plage, contribuant ainsi à la restauration d'un espace sableux précédemment sévèrement dégradé. Cette reconquête spatiale a favorisé la réhabilitation d'infrastructures socio-économiques stratégiques, notamment le quai de pêche, les zones de transformation des produits halieutiques, ainsi que plusieurs hôtels et campements touristiques directement affectés par l'érosion.

Au-delà de la restauration physique, ces aménagements ont exercé un effet structurant sur la dynamique touristique et sur les filières économiques connexes. La relance de la fréquentation touristique a été accompagnée d'une stratégie de valorisation et de promotion à l'échelle internationale, matérialisée par une campagne médiatique qui, selon le directeur de la SAPCO et le responsable de l'hôtel Saly, mettait en avant « la récupération des plages jadis perdues ».

Les retombées socio-économiques et événementielles du projet se sont également manifestées à travers l'organisation d'événements sportifs majeurs. La Coupe d'Afrique des Nations de beach soccer a pu se tenir sur le site restauré, et plusieurs activités de plage sont programmées dans le cadre des Jeux Olympiques de la Jeunesse 2026.

L'efficacité de ces interventions est aujourd'hui observée directement sur le terrain et confirmée par l'adhésion des acteurs locaux. Les résultats des enquêtes auprès des populations riveraines, ainsi que les entretiens avec les autorités et les acteurs du développement, attestent de manière concordante de la pertinence et de l'impact positif de cette opération de restauration côtière (cf. figure 68). Ces constats soulignent l'intérêt d'approches intégrées combinant ingénierie côtière et valorisation socio-économique, afin de renforcer simultanément la résilience du littoral et la durabilité des activités économiques dépendantes du trait de côte.



Planche photographique 19: Évolution de la plage de Saly entre 2003, 2019 et 2025 (image Google Earth)

La planche 18 illustre de manière diachronique l'évolution de la plage de Saly, mettant en évidence l'impact des stratégies structurelles sur la dynamique côtière et la récupération du linéaire sableux. La première image, datant de 2003, montre un état initial où la plage demeure relativement large et fonctionnelle, caractérisée par un cordon sableux continu, constituant un atout majeur pour l'attractivité touristique et les usages locaux.

La seconde image, prise en 2019, matérialise l'acmé du processus érosif, avec une régression significative du trait de côte. À cette période, l'érosion a amputé une grande partie du domaine sableux, entraînant l'exposition directe des infrastructures hôtelières et résidentielles aux assauts de la houle. Cette situation critique a fortement compromis les activités socio-économiques, en particulier le tourisme balnéaire, et accru le sentiment de vulnérabilité des acteurs locaux, comme en témoignent les entretiens réalisés auprès des responsables d'établissements et des autorités territoriales.

Enfin, la photographie de 2025 illustre les effets tangibles du projet de restauration des plages de Saly, initié en partenariat avec l'État du Sénégal et la Banque mondiale. On observe clairement la reconstitution du domaine sableux grâce aux opérations combinées de dragage, remblaiement, rééquilibrage des sédiments et à l'édification d'ouvrages de protection, tels que les brise-lames immergés et émergés. Le linéaire côtier restauré présente une largeur accrue et stabilisée, offrant à nouveau un espace fonctionnel favorable aux activités touristiques et économiques. Cette dynamique de récupération souligne l'efficacité des stratégies structurelles, qui, bien que coûteuses, constituent une réponse technique décisive face à l'ampleur de l'érosion côtière, permettant à la fois la sauvegarde des infrastructures et la relance de l'économie locale.

Les méthodes structurelles, comme toute stratégie de gestion du littoral, présentent avantages et limites qu'il convient d'examiner de manière critique.

Du côté des avantages, ces interventions offrent une efficacité rapide et directement observable sur le terrain, comme en témoignent les ouvrages réalisés à Saly Portudal et à Bétenty. Elles permettent une protection immédiate des zones fortement urbanisées, incluant les infrastructures stratégiques et les habitats situés à proximité du trait de côte. Dans ce contexte, les ouvrages structurels constituent souvent une solution d'urgence face à la progression accélérée de l'érosion, contribuant à sécuriser les biens et les activités économiques locales.

Cependant, ces méthodes présentent également des contraintes majeures. Sur le plan financier, leur mise en œuvre et leur entretien exigent des investissements importants, souvent difficiles

à supporter pour les collectivités locales. Par exemple, le suivi et la maintenance des ouvrages réalisés dans le cadre du projet de Saly mobilisent un budget annuel d'environ 400 millions de francs CFA, selon le directeur de la SAPCO. Sur le plan environnemental, ces interventions peuvent générer des effets indésirables, tels que le transfert du risque d'érosion vers les plages adjacentes non protégées, aggravant la vulnérabilité d'autres segments du littoral. De plus, l'artificialisation du trait de côte par ces ouvrages rigides perturbe les dynamiques sédimentaires et affecte les écosystèmes littoraux sensibles (zones de ponte, mangroves, herbiers marins), compromettant ainsi l'équilibre écologique à long terme.

En somme, les stratégies structurelles se révèlent efficaces pour une protection ponctuelle et urgente, mais leur durabilité écologique, financière et sociale nécessite une planification intégrée, combinant mesures techniques, restauration écologique et gouvernance participative.

4. Évaluation des stratégies

L'évaluation des stratégies de lutte contre l'érosion côtière, présentée dans cette étude, s'est fondée sur une approche méthodologique combinant l'observation directe sur le terrain, l'analyse des perceptions des populations locales, la réalisation d'entretiens semi-directifs avec des acteurs institutionnels et communautaires, ainsi que l'exploitation de sources secondaires diversifiées, incluant reportages et documents officiels. Cette démarche intégrative a permis de dresser un inventaire systématique des mesures mises en œuvre, en distinguant les stratégies selon leur nature (structurelles ou non-structurelles) et leur mode d'opération (initiatives individuelles, collectives ou publiques).

L'analyse comparative de ces dispositifs met en évidence des divergences significatives en termes d'efficacité, d'acceptabilité sociale et de durabilité. Ces variations se manifestent à plusieurs niveaux : entre les types de stratégies, avec une distinction nette entre les interventions structurelles et les approches non-structurelles, et entre les modalités de mise en œuvre, qu'elles relèvent d'initiatives individuelles, d'actions collectives ou d'interventions publiques.

4.1. Évaluation des stratégies individuelles

Les stratégies individuelles, limitées exclusivement à des méthodes non-structurelles, apparaissent, d'après les perceptions recueillies auprès des populations et les observations de terrain, globalement inefficaces face à la dynamique érosive qui affecte le littoral sénégalais. Ces dispositifs, souvent initiés de manière isolée et dépourvus d'un accompagnement technique approprié, montrent une capacité limitée à assurer une protection durable contre le recul du trait de côte et les phénomènes de submersion marine récurrents.

L'absence quasi totale de mise en œuvre individuelle de stratégies structurelles s'explique essentiellement par le coût élevé et la complexité technique associés à ces ouvrages lourds. La figure ci-dessous illustre de manière explicite la perception des enquêtés concernant l'efficacité et la durabilité restreintes des interventions individuelles reposant uniquement sur des méthodes douces, confirmant leur caractère provisoire et leur faible contribution à la résilience globale du littoral.

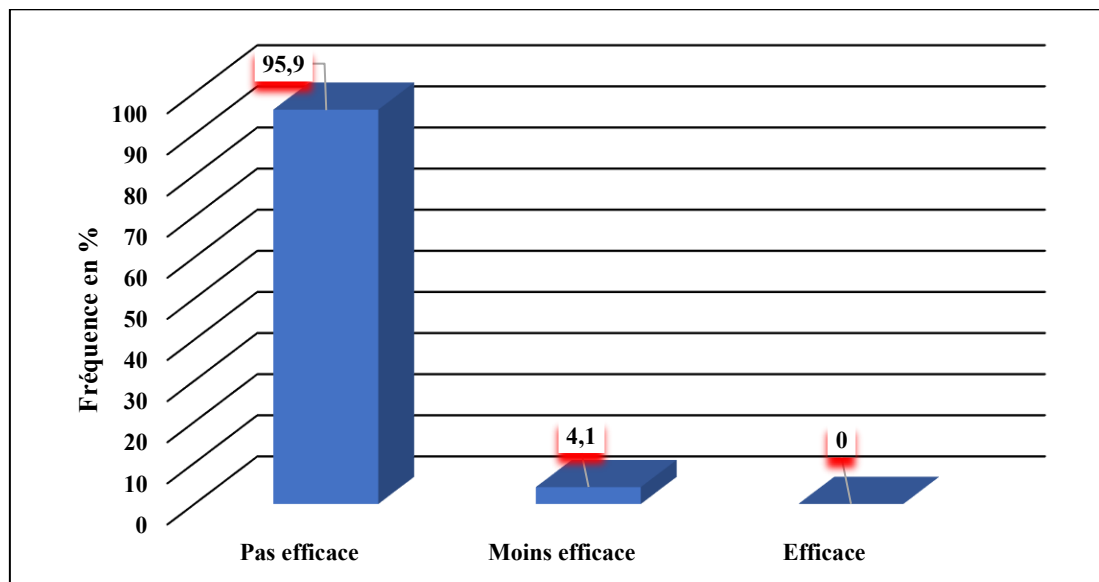


Figure 49 : Perception de la population sur l'efficacité des stratégies individuelles non-structurelles (données d'enquêtes 2025)

La figure 62 met en évidence le jugement critique des populations littorales concernant l'efficacité des stratégies individuelles de lutte contre l'érosion côtière. En effet, une large majorité des enquêtés (95,9 %) considère ces dispositifs comme inefficaces. Cette perception dominante traduit un manque de confiance et de satisfaction à l'égard des mesures artisanales, telles que l'usage de sacs de sable, de troncs d'arbres ou de petits enrochements réalisés à titre individuel. Elle reflète également la conscience des limites techniques de ces pratiques et de leur faible capacité à prévenir durablement le recul du trait de côte.

Une faible proportion des personnes interrogées (4,1 %) estime que ces stratégies sont partiellement efficaces, mettant ainsi en évidence leur potentiel d'atténuation limité dans le temps, notamment lorsqu'elles sont renforcées par des actions collectives ou un suivi technique approprié. Il est notable qu'aucun des enquêtés n'ait jugé ces méthodes pleinement efficaces, ce qui souligne leur caractère provisoire, limité et peu pérenne face à l'ampleur des dynamiques érosives et à la force des aléas côtiers.

Ces résultats corroborent les observations de terrain, selon lesquelles les stratégies individuelles constituent principalement des réponses d'urgence, motivées par la nécessité immédiate de protéger les biens plutôt que par une perspective d'efficacité à long terme. Cette perception largement négative souligne l'importance de renforcer les alternatives collectives et structurelles, ainsi que l'accompagnement technique des communautés, afin de favoriser des solutions durables et adaptées aux enjeux de la gestion intégrée du littoral sénégalais.

4.2. Évaluation des stratégies collectives

Les stratégies collectives d'atténuation, combinant de manière complémentaire des méthodes non-structurelles et des approches structurelles, sont globalement perçues par les populations riveraines comme présentant une efficacité modérée (cf. figure 63). Cette perception majoritaire traduit une appréciation nuancée : si les initiatives collectives assurent une protection plus tangible et permettent une meilleure coordination des efforts par rapport aux actions individuelles, elles restent néanmoins limitées par l'intensité des pressions érosives et la variabilité de leurs résultats selon les sites.

Cette évaluation est corroborée par les observations directes effectuées sur le terrain, les entretiens menés auprès des acteurs institutionnels et communautaires, ainsi que par l'analyse de sources secondaires diversifiées, incluant plusieurs reportages. Ces sources convergentes confirment le diagnostic communautaire, en soulignant que ces stratégies, bien qu'efficaces dans leur principe, peinent encore à produire des effets pleinement durables et à répondre aux enjeux croissants associés à la dynamique du trait de côte.

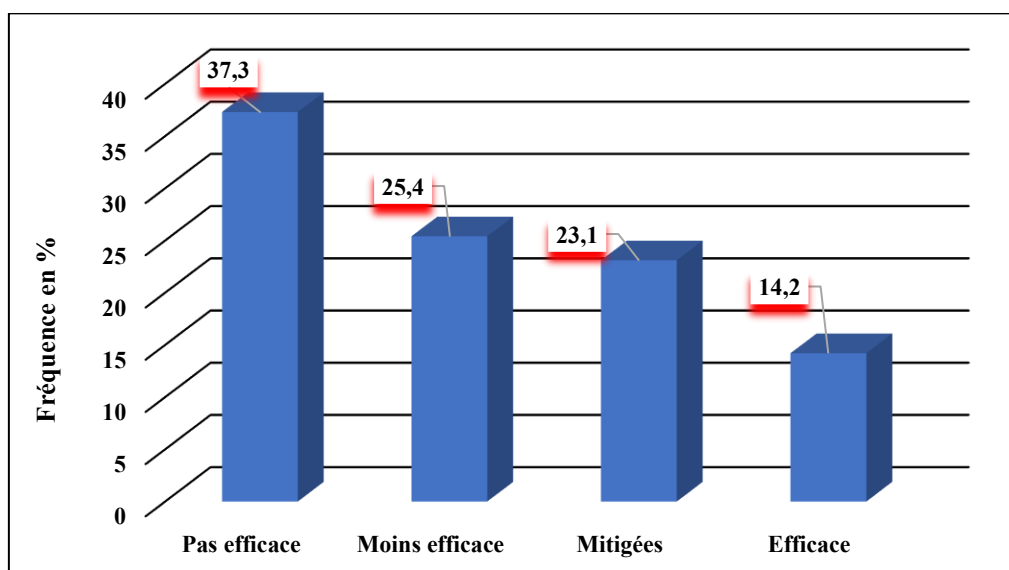


Figure 63 : Perception de la population sur l'efficacité des stratégies collectives non-structurelles (données d'enquêtes, 2025)

La figure 66 illustre la perception des populations côtières quant à l'efficacité des stratégies collectives de lutte contre l'érosion sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au Delta du Saloum. Les résultats de l'enquête indiquent qu'une majorité relative (37,3 %) des répondants considèrent ces dispositifs comme inefficaces. Cette appréciation critique traduit une insatisfaction manifeste à l'égard des approches mises en œuvre, souvent jugées inadaptées face à l'intensification des dynamiques érosives locales.

Par ailleurs, 25,4 % des enquêtés estiment ces stratégies « moins efficaces », tandis que 23,1 % leur reconnaissent une efficacité mitigée, oscillant entre succès ponctuel et limites structurelles. Ces opinions nuancées révèlent que, malgré une adhésion communautaire relativement forte, les mesures douces, telles que la sensibilisation, le reboisement dunaire ou la stabilisation végétale, peinent à freiner durablement le recul du trait de côte en l'absence d'un accompagnement technique et institutionnel renforcé.

Enfin, seuls 14,2 % des participants jugent ces stratégies véritablement efficaces, confirmant le caractère minoritaire de la perception positive de la capacité des actions collectives structurelles à réduire les implications sur les espaces habités et les activités économiques. Ces résultats soulignent la nécessité de réévaluer les limites de ces pratiques et d'explorer leur complémentarité avec des dispositifs réglementaires et techniques plus ambitieux, spécifiquement adaptés aux caractéristiques des milieux littoraux sénégalais.

4.3. Évaluation des stratégies publiques

L'observation systématique menée sur le terrain, combinée à l'analyse des perceptions des populations locales et des acteurs institutionnels, indique que les stratégies publiques apparaissent globalement plus efficaces et plus durables que les initiatives individuelles ou collectives non institutionnelles. En effet, les dispositifs portés par les pouvoirs publics bénéficient non seulement de moyens techniques et financiers significatifs, mais également d'une planification territoriale plus structurée et d'un suivi méthodique des interventions. La figure 64 illustre explicitement la perception des enquêtés concernant l'efficacité des mesures gouvernementales et des actions conduites par des organisations non gouvernementales (ONG) dans la lutte contre l'érosion côtière sur le littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum.

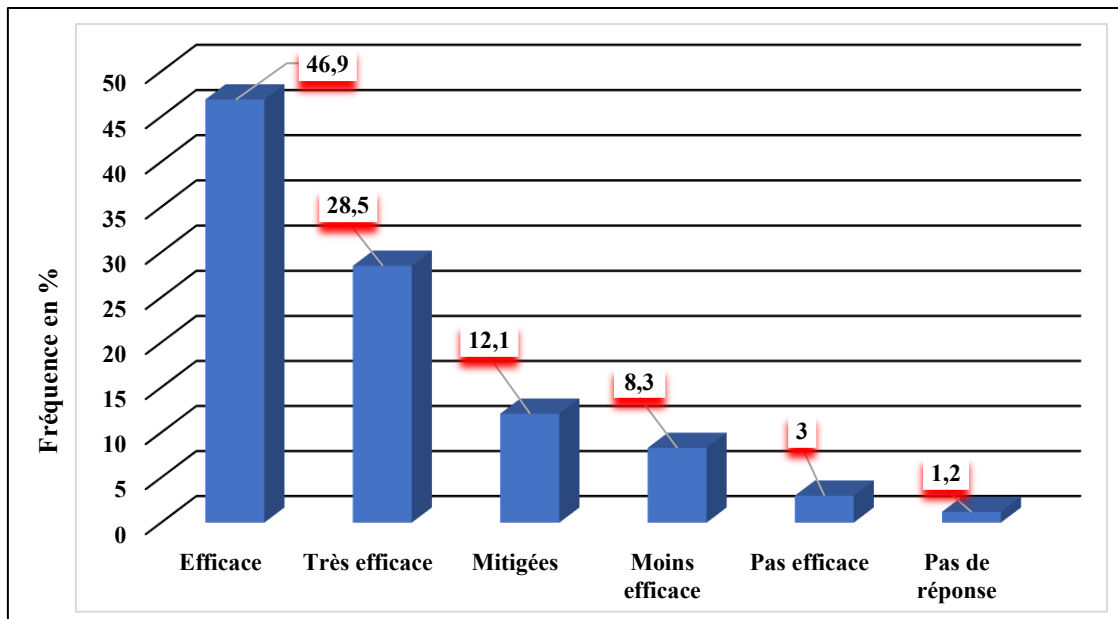


Figure 50 : Perception de la population sur l'efficacité des stratégies de politiques publiques (données d'enquêtes)

La figure ci-dessus illustre la perception des populations riveraines quant à l'efficacité des stratégies publiques déployées pour lutter contre l'érosion côtière le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au Delta du Saloum. Les résultats de l'enquête révèlent une adhésion majoritaire à la pertinence de ces dispositifs : 46,9 % des répondants les considèrent efficaces, tandis que 28,5 % les jugent très efficaces, traduisant une appréciation globalement positive de l'action publique dans la préservation du trait de côte.

Toutefois, une proportion significative de la population (12,1 %) adopte un jugement plus nuancé, estimant que l'efficacité de ces interventions demeure mitigée. Par ailleurs, 8,3 % des enquêtés les jugent moins efficaces, et 3 % les considèrent inefficaces, ce qui révèle l'existence de perceptions différenciées, probablement liées aux disparités spatiales dans la mise en œuvre et aux variations locales de l'impact réel des dispositifs.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que les stratégies publiques ; qu'il s'agisse de mesures non-structurelles, telles que la sensibilisation, la relocalisation et les actions de restauration écologique, ou d'interventions structurelles comme les épis, brise-lames et enrochements, bénéficient d'un certain crédit auprès des populations côtières. Ils soulignent néanmoins l'importance de consolider ces dispositifs, d'assurer leur évaluation et leur suivi, et de les adapter de manière continue afin de renforcer leur acceptabilité sociale et leur efficacité perçue.

L'évaluation des stratégies mises en œuvre le long du littoral sénégalais met en évidence des résultats globalement mitigés, voire ponctuellement insuffisants pour contenir durablement la dynamique érosive et protéger les espaces socio-économiques et environnementaux. Ces constats reflètent les limites d'approches souvent fragmentées, ponctuelles ou insuffisamment coordonnées. Ils soulignent la nécessité de concevoir des stratégies intégrées et rigoureusement planifiées, articulant une vision globale des processus côtiers et des interventions adaptées à l'échelle locale.

Enfin, la mise en place de dispositifs innovants, combinant recherche scientifique, expertise technique et participation active des communautés riveraines, apparaît indispensable pour renforcer la résilience des littoraux face aux menaces cumulées de l'érosion, du changement climatique et de la pression anthropique croissante.

Conclusion du chapitre VII

En synthèse, le chapitre VII met en évidence, à travers une analyse systémique des stratégies de protection côtière mises en œuvre entre la Petite-Côte et le Delta du Saloum, une diversification des approches selon leur nature méthodologique (interventions structurelles versus mesures non-structurelles fondées sur des méthodes douces) et leurs échelles de gouvernance (individuelle, collective et publique).

Les initiatives individuelles, limitées aux mesures non-structurelles, présentent une efficacité marginale face aux forçages hydrodynamiques. Les actions collectives combinent les deux registres avec des résultats contrastés : si les ouvrages lourds (épis, enrochements) offrent une protection immédiate mais localisée, leurs externalités écologiques restreignent la résilience à moyen terme. Quant aux politiques publiques, bien qu'elles génèrent des bénéfices locaux appréciables grâce à la combinaison de mesures techniques, elles entraînent systématiquement un transfert spatial des risques vers les segments littoraux adjacents et perturbent les processus sédimentaires naturels, compromettant ainsi la durabilité socio-écologique.

Cette tripartition opérationnelle souligne l'urgence de repenser la stratégie de protection côtière en adoptant une approche intégrée. Celle-ci devrait combiner de manière raisonnée des solutions fondées sur la nature et des protections ciblées, articulée dans le cadre d'une gouvernance adaptative transcalaire et d'une planification spatiale proactive, afin de concilier efficacité locale et équité territoriale face à l'accélération de l'érosion côtière.

Chapitre VIII : Discussion sur les politiques et perspectives de gestion durable du littoral

Le littoral sénégalais, compris entre la Petite-Côte et le Delta du Saloum, constitue un espace stratégique, à la fois écologique, socio-économique et culturel, mais caractérisé par une vulnérabilité structurelle clairement mise en évidence par les analyses diachroniques de la cinématique du trait de côte et par les projections à l'horizon 2055, 2075 et 2100. Cette vulnérabilité résulte de l'interaction complexe entre facteurs naturels (hydrodynamisme, variabilité climatique, élévation du niveau de la mer, caractéristiques granulométriques des sédiments, etc.) et facteurs anthropiques (urbanisation côtière, extraction de sable, aménagements non planifiés, etc.), avec des contrastes sectoriels significatifs et des trajectoires locales différenciées. Il s'agit ainsi de dépasser le simple constat scientifique pour élaborer des perspectives opérationnelles visant à réduire l'exposition des populations et des actifs tout en préservant les fonctions écosystémiques.

Dans cette optique, le chapitre s'appuie sur le cadre conceptuel de la gouvernance adaptative et de la Gestion intégrée des zones côtières (GIZC), en cohérence avec les programmes et cadres existants, notamment le Plan national d'adaptation (volet zones côtières), le MOLOA et le WACA, ainsi qu'avec les objectifs internationaux (ODD 13 et 14) et les évaluations récentes du GIEC (AR6). Tout en reconnaissant la valeur de ces instruments, l'analyse interroge les conditions de faisabilité, incluant la coordination interinstitutionnelle, la pérennité des financements, l'appropriation locale et la traduction effective des résultats scientifiques dans les politiques publiques. Elle propose également des leviers techniques, institutionnels et socio-économiques spécifiquement adaptés au contexte sénégalais.

L'objectif poursuivi est double : d'une part, décliner des pistes de gestion durable cohérentes avec les résultats de la thèse (cinématique du trait de côte, projections futures, signatures granulométriques) et, d'autre part, contribuer au débat régional sur l'adaptation en formulant des options territorialisées, évaluables et révisables, susceptibles de renforcer la résilience des littoraux face aux menaces combinées de l'érosion, du changement climatique et de la pression anthropique croissante.

1. Analyse critique des programmes existants

Au Sénégal, l'architecture des politiques visant à renforcer la résilience côtière s'organise désormais selon une structure tripartite et complémentaire. Le premier niveau regroupe les instruments nationaux, parmi lesquels le Plan national d'adaptation du secteur des zones

côtières (PNA-ZC) et la Vision Sénégal 2050, associée à une stratégie climatique de long terme en cours d'élaboration. Le deuxième niveau concerne les initiatives régionales structurantes, en particulier le programme WACA et le dispositif d'observation coopérative MOLOA. Le troisième niveau repose sur les référentiels internationaux, qui fournissent le cadre normatif et méthodologique d'action, tels que la Gestion intégrée des zones côtières (GIZC/UNESCO), les Objectifs de développement durable 13 et 14, et les évaluations récentes du GIEC (AR6) portant sur l'élévation du niveau de la mer.

Pris ensemble, ces instruments constituent un socle solide pour la planification intégrée et l'adaptation aux dynamiques côtières. Cependant, la fragmentation institutionnelle et l'hétérogénéité territoriale de leur mise en œuvre limitent leur impact opérationnel. Cette situation souligne la nécessité d'un passage à l'échelle effectif, qui passe par la territorialisation des politiques, à travers la mise en place de plans intercommunaux, d'indicateurs de suivi et de financements pluriannuels, ainsi que par l'articulation systématique entre connaissances scientifiques, aménagement du territoire et gouvernance locale.

1.1. Programmes nationaux

Cette section analyse les principaux instruments nationaux encadrant la résilience côtière au Sénégal, à savoir Vision Sénégal 2050, le Plan Sénégal Émergent (PSE), le Plan national d'adaptation (PNA, volet zones côtières) et le Plan d'action pour la gestion intégrée des écosystèmes littoraux (PAGEL). L'objectif est d'évaluer leur cohérence stratégique, leur degré d'opérationnalisation et les implications potentielles de leur mise en œuvre face aux dynamiques du trait de côte identifiées dans le cadre de cette thèse.

L'analyse adopte une approche critique centrée sur la territorialisation des actions, la gouvernance multi-acteurs et les mécanismes de suivi-évaluation, afin de mettre en évidence les forces, limites et conditions de réussite de ces dispositifs dans un contexte de gestion intégrée et durable des zones côtières.

- **Horizon / « Vision Sénégal 2050 »**

Le nouveau cap stratégique à l'horizon 2050 propose une vision de développement sobre en carbone et résilient, intégrant une territorialisation des politiques d'adaptation dans les domaines de la mobilité, de l'énergie, de l'aménagement du territoire et de la gestion des risques. Pour le littoral, cette approche se traduit par la planification d'un recul stratégique dans les zones les plus exposées, par la conditionnalité des investissements à des diagnostics précis

de vulnérabilité, et par l’ancrage de l’action publique à des indicateurs de suivi partagés et standardisés.

La Vision Sénégal 2050, officiellement lancée, s’inscrit dans la continuité et l’évolution du Plan Sénégal Émergent (PSE), avec des jalons définis par les travaux « long-terme vision », constituant ainsi un cadre stratégique cohérent pour orienter le développement national et renforcer la résilience des territoires face aux enjeux climatiques et environnementaux.

- **Plan Sénégal Émergent (PSE).**

Depuis 2014, le Plan Sénégal Émergent (PSE) et ses Plans d’Actions Prioritaires, notamment le PAP-3 (2024-2028), constituent un cadre macroéconomique structurant intégrant des programmes d’infrastructures et de résilience urbaine susceptibles de renforcer la capacité d’adaptation des systèmes côtiers, tels que le transport collectif, le drainage urbain et les équipements structurants.

Cependant, en l’absence de zonages littoraux opposables, incluant servitudes et bandes de recul, et de mécanismes clairs d’arbitrage foncier, certains investissements peuvent générer des pressions localisées sur le front de mer, notamment à travers l’artificialisation, les effets de rive et la spéculation foncière. Ces enjeux soulignent la nécessité d’arrimer systématiquement le PSE aux instruments d’aménagement littoral et aux diagnostics de vulnérabilité, afin de garantir une cohérence entre développement économique, planification territoriale et gestion durable des zones côtières.

- **Plan national d’adaptation : secteur des zones côtières (PNA-ZC).**

Le Plan national d’adaptation du secteur des zones côtières (PNA-ZC), articulant diagnostic et plan d’action, identifie les risques d’érosion et de submersion, propose un portefeuille d’options comprenant la surveillance côtière, les solutions fondées sur la nature, les ouvrages souples et la relocalisation ou le repli stratégique ciblé, et fournit une estimation des coûts de mise en œuvre pour les premières années. Il constitue le référentiel technique et politique le plus opérationnel pour hiérarchiser les interventions à court et moyen termes et structurer le dialogue avec les partenaires financiers.

Le principal défi réside dans l’appropriation effective par les collectivités locales et dans l’ancrage budgétaire pluriannuel nécessaire pour assurer un véritable passage à l’échelle des mesures proposées, garantissant ainsi leur pérennité et leur efficacité opérationnelle.

- **Cadre national GIZC et outils d'appui (ONL).**

Au-delà du cadre réglementaire, la Gestion intégrée des zones côtières (GIZC) nécessite un renforcement opérationnel par l'élaboration d'un Plan national GIZC et de plans locaux là où ils font encore défaut, afin d'éviter la dispersion et la juxtaposition d'initiatives isolées. La création de l'Observatoire national du littoral (ONL) s'inscrit dans cette logique : il vise à produire et partager des données standardisées (trait de côte, houles, submersions), à outiller les collectivités locales et à coordonner l'action multi-acteurs. Ces dispositifs sont essentiels pour assurer la visibilité des priorités, le suivi des résultats et la cohérence des investissements.

Pris dans leur ensemble, ces instruments constituent un socle cohérent pour le renforcement de la résilience côtière. Leur opérationnalisation demeure toutefois hétérogène selon les territoires et dépend fortement des capacités locales et des ressources financières disponibles. Trois leviers sont déterminants pour améliorer leur efficacité : territorialiser les orientations à travers des plans intercommunaux, des zonages littoraux opposables et des calendriers pluriannuels ; documenter en continu la dynamique côtière et les résultats des interventions à l'aide de l'ONL et d'indicateurs partagés ; et conditionner les investissements à des diagnostics de vulnérabilité et à des protocoles d'évaluation rigoureux, incluant la largeur et le volume des plages, l'exposition des ménages et le rapport coûts/effets des mesures.

1.2. Programmes régionaux

Les dispositifs régionaux assurent une fonction d'interface entre les orientations internationales et leur déclinaison opérationnelle au niveau national. Ils fournissent un appui technique, financier et méthodologique tout en favorisant le partage de connaissances et l'apprentissage entre pays confrontés à des dynamiques littorales comparables. Cette analyse met particulièrement l'accent sur le rôle du programme WACA, du dispositif d'observation coopérative MOLOA, ainsi que des cadres institutionnels régionaux de l'UEMOA et de la CEDEAO.

- **West Africa Coastal Areas Management Program (WACA)**

La plateforme régionale WACA, initiée par la Banque mondiale et ses partenaires, vise à faciliter l'accès aux expertises et aux financements pour la réduction des risques côtiers, à promouvoir le partage et la mutualisation des connaissances, et à soutenir l'opérationnalisation de projets intégrés combinant protection douce, restauration écosystémique et renforcement de la gouvernance littorale.

Les premiers retours d'expérience issus de pays pilotes tels que le Togo, le Bénin et le Sénégal mettent en évidence l'intérêt d'approches hybrides, expérimentées sur des tronçons pilotes et évaluées à l'aide d'indicateurs standardisés, incluant la largeur et le volume des plages, l'exposition des populations et les co-bénéfices écologiques. Ces résultats soulignent la pertinence de mettre en place des sites instrumentés au Sénégal, permettant un suivi rigoureux et une évaluation objective des mesures d'adaptation côtière.

- **Mission d'Observation du Littoral Ouest-Africain (MOLOA)**

Initiée avec le soutien de l'UEMOA et hébergée au sein du Centre de Suivi Écologique (CSE), la plateforme MOLOA constitue un mécanisme régional de coopération visant à standardiser le suivi du trait de côte, à agréger des données sur l'érosion et les submersions, et à orienter les priorités d'intervention à l'échelle ouest-africaine. Ce dispositif a également servi de fondement à l'Observatoire régional du littoral ouest-africain (ORLOA).

Pour le Sénégal, l'enjeu consiste à consolider les séries temporelles existantes et à articuler ces données avec les processus décisionnels locaux en matière d'aménagement et de gestion intégrée des zones côtières, afin d'améliorer la pertinence et l'efficacité des mesures d'adaptation.

- **Cadres de coopération et d'intégration : UEMOA / CEDEAO (ECOWAS)**

L'UEMOA a exercé un rôle moteur dans la dynamique régionale de gestion des littoraux, notamment à travers la réalisation d'études régionales et l'appui au dispositif MOLOA. Parallèlement, la Stratégie climatique régionale de la CEDEAO (2022-2030) fournit un cadre harmonisé pour l'adaptation, incluant la prise en compte des risques littoraux et la territorialisation des actions.

Pour le Sénégal, l'intérêt principal réside dans l'alignement des plans locaux avec ces référentiels régionaux, ce qui permet non seulement l'accès aux instruments régionaux de financement et d'expertise, mais également la coordination transfrontalière des interventions, garantissant ainsi une cohérence et une efficacité accrues des mesures de résilience côtière.

1.3. Référentiels internationaux

Les référentiels internationaux constituent le cadre normatif et conceptuel de l'action côtière, en structurant la planification intégrée, en objectivant les risques liés à l'élévation du niveau de la mer, et en légitimant les mesures d'adaptation et de conservation dans le cadre du développement durable. Leur contribution est déterminante, à condition que ces principes soient

traduits à l'échelle locale par des diagnostics précis et des dispositifs rigoureux de suivi-évaluation, permettant une articulation efficace entre standards internationaux et réalité territoriale.

- **UNESCO / GIZC**

Le cadre de la Gestion intégrée des zones côtières (GIZC) favorise une planification intersectorielle, la coordination des usages et le suivi systématique des interventions à l'aide d'indicateurs clés, tels que l'état du trait de côte, les pressions anthropiques et les réponses mises en œuvre. Il met par ailleurs l'accent sur la participation des parties prenantes et sur l'importance de l'échelle territoriale dans l'action. Les guides méthodologiques développés par l'UNESCO-COI constituent la référence historique et opérationnelle pour la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des plans GIZC, offrant un cadre structurant pour assurer la cohérence, la durabilité et l'efficacité des interventions côtières.

- **IPCC AR6**

Le Groupe I du sixième rapport du GIEC (AR6) actualise l'état des connaissances sur l'élévation du niveau de la mer et ses déterminants, incluant l'océan et la cryosphère, et fournit des projections quantitatives selon différents scénarios socio-économiques partagés (SSP). Ces résultats soulignent l'importance d'anticiper les risques côtiers par des mesures telles que la préemption foncière, la planification de reculs stratégiques et le recours aux solutions fondées sur la nature. Ce corpus constitue une base scientifique solide pour calibrer les trajectoires d'adaptation et définir les fenêtres temporelles optimales pour la mise en œuvre des interventions côtières.

- **Agenda 2030 (ODD 13 et 14)**

Les Objectifs de Développement Durable (ODD) 13, relatif à l'action climatique, et 14, dédié à la vie aquatique, établissent des objectifs visant à réduire la vulnérabilité climatique et à préserver les écosystèmes marins et côtiers, en soulignant la nécessité d'intégrer l'adaptation dans les politiques publiques et de renforcer la coopération internationale. Leur mise en œuvre effective requiert une contextualisation à l'échelle locale, notamment à travers la priorisation des actions, la définition d'indicateurs pertinents et la sécurisation de financements, afin de minimiser les écarts entre les ambitions et les résultats concrets.

Ces référentiels sont complémentaires : la Gestion intégrée des zones côtières (GIZC) définit les modalités opérationnelles (« comment »), les rapports du GIEC documentent les enjeux et

les limites des phénomènes (« pourquoi et jusqu'où »), et l'Agenda 2030 fixe les finalités et objectifs stratégiques (« pour quoi faire »). La valeur ajoutée réside dans l'articulation de ces instruments à l'échelle des communes littorales, à travers l'élaboration de plans opérationnels assortis d'indicateurs vérifiables et d'un calendrier budgétisé, garantissant ainsi la cohérence, la mesurabilité et la pérennité des interventions.

1.4. Synthèse critique transversale

Au-delà de la diversité des cadres institutionnels et des projets déployés, l'efficacité opérationnelle des politiques de gestion côtière repose sur trois déterminants structurants : l'effet d'échelle des interventions, la transférabilité des bonnes pratiques entre territoires, et la qualité de la gouvernance, incluant la coordination multi-acteurs, la participation locale et la capacité d'adaptation des dispositifs.

- **Efficacité.**

Les projets pilotes, tels que les mesures de protection douce et les actions de restauration écosystémique, génèrent des bénéfices mesurables à l'échelle locale, mais peinent à produire des effets durables à l'échelle des cellules sédimentaires. Cette limitation souligne la nécessité de dépasser les interventions ponctuelles et isolées pour développer des programmes territorialisés, articulés avec la dynamique du trait de côte et accompagnés d'indicateurs partagés et standardisés, permettant un suivi rigoureux et une évaluation cohérente des implications sur la résilience côtière.

- **Transférabilité.**

Les « succès » rapportés dans des contextes pilotes tels que le Togo ou le Bénin ne peuvent être transposés directement à d'autres littoraux sans adaptation. Leur reproduction nécessite une analyse fine des budgets sédimentaires, des régimes de houle et des configurations bathymétriques locales, ainsi qu'un suivi instrumenté incluant des indicateurs tels que la largeur et le volume des plages, et l'exposition des populations et infrastructures, afin de calibrer et d'ajuster les dispositifs d'adaptation aux dynamiques spécifiques de chaque site.

- **Gouvernance.**

Les chevauchements de compétences et l'hétérogénéité dans la mise en œuvre des interventions limitent fortement l'appropriation locale et la cohérence des réponses aux dynamiques côtières. Une amélioration de l'efficacité passe par la mise en place d'instances intercommunales dotées de budgets dédiés, par l'alimentation d'un observatoire fournissant des séries standardisées sur

le trait de côte et les submersions, ainsi que par la conditionnalité des investissements à des diagnostics précis et à des protocoles rigoureux d'évaluation. À cet égard, le Plan national d'adaptation (PNA, volet zones côtières) fournit un cadre opérationnel pour la priorisation des actions, l'estimation des coûts et la planification de reculs stratégiques, tandis que la plateforme MOLOA constitue l'ossature régionale pour la standardisation et la mutualisation des données. L'articulation des différents référentiels, la Gestion intégrée des zones côtières (GIZC) pour les modalités opérationnelles (« le comment »), le GIEC AR6 pour les fondements scientifiques et les limites du phénomène (« le pourquoi et jusqu'où »), WACA et MOLOA pour les mécanismes de coordination et la production de données, et le PNA pour la programmation, permet de dépasser les interventions ponctuelles, en générant des trajectoires d'adaptation programmées, évaluées et répliquables à l'échelle des communes littorales.

2. Articulation avec les résultats de la thèse

Les analyses diachroniques du trait de côte, réalisées à l'aide des métriques LRR (*Linear Regression Rate-of-change*) et EPR (*End Point Rate*) sous DSAS, confirment une dynamique globalement régressive sur la période 1973-2024, avec une érosion moyenne d'environ -1,69 m/an et des extrêmes locaux pouvant atteindre -11,60 m/an sur des tronçons fortement exposés tels que Palmarin, Djiffer ou Pointe Sarène. Cette tendance générale n'est toutefois pas homogène : des secteurs d'accrétion persistent au niveau des mangroves actives, notamment au sud de Toubacouta, à Joal-Fadiouth et à Niodior, soulignant le rôle amortisseur des écosystèmes côtiers dans la modulation des dynamiques littorales.

À l'échelle du linéaire étudié, 1 158 transects présentent un état d'érosion, correspondant à une perte cumulée d'environ 1 957 m, ce qui confirme l'ampleur et la gravité du phénomène. Les analyses granulométriques révèlent une dominance de sables fins à moyens en surface, avec, localement (cas de Djiffer), un enrichissement en fractions plus grossières en profondeur, reflet de contextes hydrodynamiques plus énergétiques et d'une sensibilité accrue au remaniement par la houle.

Ces résultats mettent en évidence une hétérogénéité spatiale marquée des processus d'érosion et d'accrétion, appelant à des stratégies d'adaptation différenciées, adaptées à l'échelle des cellules sédimentaires et proportionnées à l'intensité de l'aléa côtier.

Implications opérationnelles :

- ✓ Prioriser les solutions fondées sur la nature dans les cellules sédimentaires présentant des phénomènes d'accrétion et une résilience écosystémique avérée, telles que la restauration des mangroves, la reconstitution dunaire et les rechargements contrôlés, accompagnés d'un suivi volumétrique systématique.
- ✓ Recourir à des ouvrages souples et réversibles** (brise-houle à faible impact, épis bas) sur les tronçons exposés à une forte énergie hydrodynamique, afin de dissiper l'énergie incidente tout en préservant la continuité des transits sédimentaires.
- ✓ Planifier un recul stratégique gradué sur les sites critiques, en combinant zonages opposables, servitudes littorales et phasage des investissements, conformément aux horizons de projection (2055, 2075, 2100).
- ✓ Institutionnaliser une gouvernance multi-niveau, impliquant les intercommunalités littorales, les services techniques et les usagers, adossée à un dispositif de suivi-évaluation par indicateurs (largeur et volume de plage, mobilité du trait de côte par transect, exposition des ménages et des actifs), afin de piloter l'adaptation de manière incrémentale, transparente et réactive.

En synthèse, la traduction opérationnelle des résultats de la thèse plaide pour le développement de trajectoires hybrides, territorialisées et évaluables, dans lesquelles chaque option est proportionnée au signal morpho-sédimentaire local et aux enjeux socio-économiques, et où les décisions peuvent être ajustées à la lumière d'un suivi régulier. Ces principes constituent le cadre méthodologique pour la déclinaison sectorielle présentée dans la section suivante.

3. Perspectives de gestion durable

La déclinaison sectorielle présentée ci-après intègre de manière systématique les diagnostics physiques et socio-économiques pour chaque segment littoral, et propose un portefeuille d'actions graduées, hiérarchisées et mesurables au moyen d'indicateurs standardisés. Ces mesures sont conçues pour être modulables et adaptatives, permettant leur ajustement en fonction de l'évolution des dynamiques côtières et des contextes socio-économiques locaux.

3.1. Mbour-Saly

Ce tronçon littoral se distingue par une urbanisation linéaire dense et la présence d'ouvrages ponctuels, destinés à protéger des parcelles isolées, qui ont fragmenté la cellule sédimentaire. Les effets de rive induits entraînent un transfert des foyers d'érosion vers l'aval des flux sédimentaires, tandis que l'étroitesse de l'estran limite à la fois l'usage récréatif de la plage et

la dissipation naturelle de l'énergie des houles. La plage est majoritairement constituée de sables fins à moyens, caractérisés par une forte mobilité, ce qui accentue la vulnérabilité du front sableux face aux variations saisonnières et aux épisodes tempétueux. Par ailleurs, l'intensité des usages anthropiques (hôtellerie, voirie littorale, infrastructures en front de mer) augmente l'exposition des actifs et complique la gestion foncière et la prise de décision en matière d'aménagement.

- **Perspectives de gestion durable**

- ✓ Rechargements sédimentaires pluriannuels sur les cellules homogènes, intégrant des tests de compatibilité granulométrique et un suivi volumétrique précis (profils topobathymétriques, largeur de plage) pour assurer l'adéquation des apports aux dynamiques locales.
- ✓ Ouvrages souples et réversibles (épis bas, dispositifs dissipatifs peu crêtés, brise-houles écologiques immergés) visant à réduire l'énergie incidente tout en maintenant la continuité des transits sédimentaires.
- ✓ Reconstitution dunaire et végétalisation à l'aide de ganivelles, pièges à sable et plantations d'espèces locales, afin de restaurer un stock tampon sédimentaire et de limiter la saltation et la déflation éolienne.
- ✓ Servitudes littorales et zones de recul opposables sur les secteurs critiques, planifiées en cohérence avec les horizons de projection 2055, 2075 et 2100, pour sécuriser l'espace et encadrer le développement côtier.
- ✓ Schéma communal de gestion des plages, incluant un protocole de nettoyage doux (sans extraction de sédiments), l'interdiction de prélèvements de sable, la régulation des accès et une surveillance saisonnière des indicateurs clés (profils, ligne d'eau, incidents), afin de garantir la durabilité et la résilience des systèmes littoraux.

- **Modalités de mise en œuvre et suivi.**

- ✓ Phasage opérationnel : initier les interventions sur deux sites pilotes (nord de Mbour et centre de Saly), procéder à une évaluation approfondie sur une période de 18 à 24 mois, puis étendre progressivement les mesures aux secteurs adjacents selon les résultats et les ajustements identifiés.
- ✓ Indicateurs clés de performance (KPI) : largeur moyenne de plage (m), variation volumétrique (m^3/m), vitesse annuelle de recul du trait de côte ($m \cdot an^{-1}$), nombre de jours d'indisponibilité d'usage récréatif, valeur des actifs protégés (FCFA). Ces indicateurs permettent un suivi quantitatif et comparatif de l'efficacité des interventions.

- ✓ **Gouvernance** : établissement d'une convention intercommunale Mbour-Saly-Somone, appuyée par un comité technique réunissant collectivités, services techniques, opérateurs touristiques et usagers. Les résultats seront publiés trimestriellement pour assurer transparence et ajustement continu des actions.
- ✓ **Financement** : combinaison de ressources communales et étatiques, appuis de programmes régionaux et affectation d'une redevance littorale auprès des établissements en front de mer, contractualisée via des objectifs liés aux KPI afin de garantir la pérennité et la performance des mesures.
 - **Gestion des risques.**

Établir des seuils d'alerte opérationnels fondés sur des indicateurs physiques, tels que la largeur de plage inférieure à une valeur critique ou un recul du trait de côte supérieur à un seuil défini sur une période donnée (N mois), afin de déclencher automatiquement des interventions d'entretien des rechargements sédimentaires ou des ajustements des ouvrages souples. En cas d'événements extrêmes (tempêtes, submersions majeures), activer un plan de continuité d'activité comprenant la sécurisation des installations et le maintien des accès, tout en accélérant, si nécessaire, la mise en œuvre des mesures de recul stratégique sur les parcelles les plus exposées, afin de limiter les implications socio-économiques et préserver la résilience des systèmes littoraux.

3.2. Joal-Fadiouth-Pointe Sarène

Le secteur étudié se caractérise par une mosaïque morphodynamique, où des segments littoraux régressifs alternent avec des poches d'accrétion localisées, étroitement associées aux mangroves actives qui jouent un rôle crucial de piégeage sédimentaire et d'amortissement de l'énergie des houles. Les bas-fonds et les terres périphériques présentent une salinisation chronique, résultant de la submersion saline récurrente et d'un drainage insuffisant des casiers, ce qui compromet les usages agricoles et augmente la vulnérabilité des habitats. Par ailleurs, l'artificialisation ponctuelle des rivages et la discontinuité des protections induisent des effets de rive, tandis que la continuité des flux hydro-sédimentaires (chenaux, passes) demeure localement sous-optimale, limitant la résilience naturelle du système côtier.

- **Perspectives d'une gestion durable**

Restauration et extension des mangroves à partir d'espèces autochtones (*Rhizophora spp.*, *Avicennia spp.*), appuyées par des diagnostics de salinité et le choix de fenêtres de plantation adaptées aux conditions hydrologiques et saisonnières locales.

Consolidation des digues anti-sel et réhabilitation des casiers hydrauliques (seuils, vannes, entretien des exutoires) afin de limiter les intrusions salines et d'améliorer le drainage gravitaire des terres agricoles et zones humides périphériques.

By-pass sédimentaires ciblés, consistant en un déplacement ou une redistribution contrôlée de sédiments entre cellules déficitaires et excédentaires, précédé de tests de compatibilité granulométrique et d'une évaluation systématique des implications écologiques et hydrodynamiques.

Plan de prévention de la submersion, intégrant une cartographie fine des aléas et enjeux, la matérialisation d'itinéraires d'évacuation, la désignation de zones refuges et la mise en place d'un dispositif d'alerte précoce.

Encadrement strict du bâti en zones basses, par l'instauration de servitudes, de bandes de recul et de prescriptions constructives, assorti d'un contrôle de conformité et de la conditionnalité des permis de construire, afin de réduire l'exposition des populations et des infrastructures aux risques littoraux.

○ **Modalités de mise en œuvre et suivi**

- ✓ Phasage opérationnel : mise en œuvre initiale sur deux sites pilotes : Joal-Fadiouth (restauration de mangroves et réhabilitation des casiers hydrauliques) et Pointe Sarène (by-pass sédimentaire et contrôle des effets de rive), suivie d'une évaluation sur 18 à 24 mois. Les interventions seront ensuite étendues aux tronçons adjacents en fonction des résultats et ajustements identifiés.
- ✓ Indicateurs de suivi et de performance (KPI) : vitesse de recul du trait de côte ($m \cdot an^{-1}$), largeur moyenne de plage (m), volume sédimentaire (m^3/m), salinité des sols et des eaux ($g \cdot L^{-1}$ ou $mS \cdot cm^{-1}$), nombre de jours de submersion, superficie de mangroves restaurées (ha) et taux de survie des plantations (%). Ces indicateurs permettent un suivi quantitatif précis et la comparaison des performances entre sites et sur la période de suivi.
- ✓ Gouvernance multi-acteurs : comité technique intercommunal réunissant communes, services techniques, acteurs de la pêche, de la conchyliculture/ostréiculture et organisations de femmes transformatrices. Les résultats seront publiés semestriellement pour assurer la transparence et favoriser l'adaptation continue des interventions.
- ✓ Financement : mobilisation combinée de ressources étatiques et communales, appui de guichets régionaux (programmes côtiers) et co-financements privés liés aux filières halieutiques et au tourisme responsable, garantissant la pérennité et la performance des mesures.

- **Gestion des risques et ajustements**

- ✓ Risque technique : mortalité des plants de mangrove en cas de mauvaise adéquation espèce-site. Ce risque peut être réduit par la mise en place d'un protocole d'essais-parcelles, assorti de révisions saisonnières pour ajuster les espèces et les techniques de plantation aux conditions locales.
- ✓ Risque hydro-sédimentaire : inefficacité ou dysfonctionnement des by-pass sédimentaires mal calibrés. Une surveillance mensuelle des profils, de la granulométrie et de la ligne d'eau est indispensable, avec arrêt ou réorientation des interventions si les seuils critiques sont dépassés.
- ✓ Risque socio-foncier : conflits d'usage liés à la pêche, la conchyliculture, la transformation et le tourisme. La prévention repose sur une concertation préalable, des mécanismes de compensation et l'établissement de chartes d'usage négociées entre les parties prenantes.

En synthèse, la trajectoire de gestion intégrée doit :

- ✓ valoriser et préserver les services écosystémiques des mangroves ;
- ✓ sécuriser le régime hydrique des casiers hydrauliques ;
- ✓ rééquilibrer les budgets sédimentaires via des transferts contrôlés, le tout étant soutenu par une gouvernance intercommunale et un suivi instrumenté et standardisé, garantissant l'adaptabilité et la résilience des systèmes côtiers.

3.3. Palmarin-Djiffer

Ce secteur littoral est caractérisé par une érosion accentuée, des submersions marines récurrentes et des pertes agricoles significatives, associées à des cordons littoraux très mobiles, susceptibles de céder lors d'épisodes de houle et de surcote. Les analyses menées dans le cadre de cette thèse indiquent des vitesses de recul extrêmes, atteignant jusqu'à environ -11,6 m/an sur certains tronçons, et une signature granulométrique différenciée, avec un enrichissement en fractions grossières en profondeur, révélant des contextes hydrodynamiques énergétiques et un profil d'équilibre sédimentaire instable. La proximité immédiate des voies d'accès, villages et casiers salicoles aux zones basses accentue la vulnérabilité des ménages et complique les arbitrages fonciers, soulignant la nécessité d'approches intégrées conciliant protection côtière, adaptation agricole et planification territoriale.

○ **Perspectives d'une gestion durable**

- ✓ Recul stratégique phasé : mise en œuvre progressive proportionnée à l'exposition, mesurée par les vitesses de recul et la fréquence des submersions, ainsi qu'à la densité des enjeux. Les mesures incluent le gel du foncier neuf en bande côtière, l'instauration de servitudes littorales et la relocalisation graduelle des parcelles et équipements les plus exposés.
- ✓ Renforcement naturel des cordons littoraux : reconstitution dunaire à l'aide de pièges à sable et ganivelles, végétalisation par des espèces locales adaptées aux conditions hydrologiques, et densification des mangroves en queue de cordon lorsque la salinité et la submersion le permettent, afin de restaurer les fonctions tampon et d'amortissement de l'énergie des houles.
- ✓ Ouvrages souples temporaires : installation de pieux ou épis bas biodégradables, ainsi que de brise-houles écologiques immergés, destinés à stabiliser les rechargements sédimentaires et à offrir un délai supplémentaire pour les opérations de relocalisation.
- ✓ Plans communaux de protection et dispositifs d'alerte (PCA) : cartographie fine des itinéraires d'évacuation et des zones refuges, définition de seuils d'intervention et organisation d'exercices réguliers pour renforcer la préparation et la résilience des communautés.
- ✓ Mécanismes d'indemnisation et réserves foncières de substitution : mise en place de banques foncières et de dispositifs de compensation afin de sécuriser l'acceptabilité sociale des reculs, éviter la précarisation des populations et faciliter la mise en œuvre des mesures de retrait stratégique.

○ **Modalités de mise en œuvre et de suivi**

- Phasage (3-5 ans) :
 - ✓ Mise en place de sites pilotes sur deux tronçons représentatifs : un cordon littoral très mobile et un front villageois exposé.
 - ✓ Ajustement des dispositifs souples et des rechargements sédimentaires en fonction des retours d'expérience sur 12-18 mois.
 - ✓ Extension progressive aux tronçons adjacents, accompagnée de l'instauration de servitudes littorales et de réserves foncières de substitution.
- Indicateurs clés de performance (KPI) :
 - ✓ Morpho-sédimentaires : largeur moyenne de plage (m), variation volumétrique (m³/m) mesurée sur profils topo-bathymétriques, vitesse annuelle de recul par transect (m/an).
 - ✓ Hydro-maritimes : jours de submersion et hauteurs d'eau sur points témoins.

- ✓ Écologiques et socio-économiques : taux de survie des plantations (dunes et mangroves), nombre de ménages et d'actifs relocalisés, coût par mètre linéaire protégé ou transformé.
- Gouvernance :
 - ✓ Constitution d'une cellule technique intercommunale (Palmarin-Djiffer) regroupant les services déconcentrés, les comités de village, les organisations de femmes transformatrices et les représentants des secteurs pêche et tourisme.
 - ✓ Publication semestrielle des résultats et ajustement des mesures sur la base des indicateurs partagés.
- Financement :
 - ✓ Mix budget communal et État, complété par les programmes régionaux d'appui au littoral.
 - ✓ Contributions privées contractualisées (tourisme, saliculture), adossées à des engagements de résultats mesurés via les KPI.
- **Gestion des risques et clauses d'adaptation**
 - Seuils d'alerte opérationnels : déclenchement automatique des mesures correctives lorsque les indicateurs morpho-sédimentaires et hydrodynamiques dépassent les valeurs critiques (par exemple : largeur de plage < X m ; recul > Y m sur 12 mois ; submersions répétées). Ces seuils conditionnent le rechargement sédimentaire d'entretien et l'adaptation ou le renforcement des protections souples.
 - Scénarios d'événements extrêmes : activation du Plan de Continuité d'Activité (PCA), incluant la protection des personnes et des biens, la continuité des services essentiels et, si nécessaire, l'accélération des mesures de recul stratégique sur les parcelles les plus exposées.
 - Réévaluation annuelle des servitudes et zones de recul : ajustement à la lumière des données de monitoring et de l'évolution de l'occupation du sol, afin de prévenir les effets d'appel ou de densification en bande côtière et de garantir la cohérence avec les trajectoires morpho-sédimentaires locales.
- **Cap sur l'acceptabilité sociale**

Il est recommandé d'associer les mesures de relocalisation à des co-bénéfices socio-économiques et environnementaux afin de renforcer leur acceptabilité et leur efficacité. Ces co-bénéfices incluent : l'amélioration de l'accès à l'eau et à l'énergie, la sécurisation des infrastructures et activités stratégiques (débarcadères, marchés), le développement de compétences via des formations ciblées (écoconstruction, écotourisme durable, aquaculture

adaptée aux contraintes côtières), ainsi qu'un accompagnement économique ponctuel (micro-crédits, dispositifs sociaux temporaires).

Dans le secteur Palmarin-Djiffer, la trajectoire d'adaptation optimale combine un recul stratégique proportionné à l'exposition, le renforcement des services écosystémiques naturels (restauration des dunes et mangroves) et le recours à des structures souples temporaires pour stabiliser les zones sensibles. Cette approche doit être guidée par une planification rigoureuse, intégrant un cadre foncier clair et des mécanismes d'indemnisation définis. L'objectif n'est pas de « figer » le trait de côte, mais de réduire l'exposition aux risques, organiser la mobilité du littoral et protéger les populations et les actifs économiques, tout en maintenant la résilience écologique du secteur.

3.4. Îles du Saloum (Béttenty, Niodior, Dionewar)

L'archipel, caractérisé par une faible altitude et une forte insularité, est soumis à la dynamique des chenaux tidaux et aux épisodes de surcote, générant une mobilité marquée du trait de côte. Les îles présentent une combinaison de phénomènes contrastés : érosion des marges externes exposées et accrétion localisée sous protection des mangroves, illustrant le rôle amortisseur des écosystèmes côtiers.

La gestion et la maintenance des aménagements sont compliquées par l'insularité : les ouvrages lourds, tels que les enrochements continus ou les digues rigides, entraînent des effets de rive et limitent la navigabilité des chenaux. Par ailleurs, les services essentiels (points de débarquement, écoles, structures de santé, approvisionnement en eau et énergie) demeurent vulnérables. La forte dépendance des communautés à la pêche et aux liaisons maritimes accentue leur exposition socio-économique, les rendant particulièrement sensibles aux interruptions d'activité lors des épisodes de houle, de submersion ou de variations extrêmes du niveau marin.

○ Perspectives d'une gestion durable

- ✓ Stabilisation douce et renforcement naturel des digues : mise en œuvre de fascines et de palissades végétalisées, replantation de palétuviers autochtones selon des protocoles d'essais-parcelles validant l'adéquation espèce-site et les fenêtres de plantation, et reconstitution dunaire sur les tronçons où la disponibilité en sable et les conditions hydrodynamiques le permettent.
- ✓ Dispositifs anti-houle à faible impact : installation de récifs artificiels modulaires écologiques sur les marges exposées pour dissiper l'énergie des houles, complétée,

lorsque les conditions écologiques le permettent, par des récifs coquilliers communautaires (huîtres et autres bivalves) intégrant la bio-construction et contribuant simultanément à la restauration des écosystèmes.

- ✓ Sécurisation des infrastructures critiques : élévation et ancrage des débarcadères, surélévation des seuils des écoles et centres de santé, consolidation des réseaux d'eau et d'énergie par micro-réseaux solaires et dispositifs tampons, et matérialisation de couloirs d'évacuation pour réduire la vulnérabilité en cas d'événements extrêmes.
- ✓ Diversification économique et renforcement de la résilience locale : développement d'activités d'aquaculture écologique (huîtres, bivalves), promotion d'écotourisme à faible empreinte environnementale, amélioration des chaînes de froid et des capacités de transformation halieutique pour sécuriser les revenus et limiter l'exposition socio-économique aux aléas côtiers.
- ✓ Plans de continuité d'activité (PCA) insulaires : élaboration de protocoles logistiques de crise incluant l'approvisionnement en eau, énergie et vivres, mise en place de systèmes de télé-alerte et d'avertissement communautaire, et identification de sites refuges pour assurer la protection des populations et la continuité des activités essentielles.
- **Modalités de mise en œuvre et suivi**
 - Phasage opérationnel (24-36 mois) :
 - ✓ Sites pilotes : un site « berge/chenal » combinant fascines et replantation de mangroves, et un site « marge externe » équipé de récifs écologiques modulaires.
 - ✓ Évaluations intermédiaires à 12 et 24 mois : mesures des profils topo-bathymétriques, suivi de la ligne d'eau, vérification de la stabilité des ouvrages souples et analyse des usages locaux.
 - ✓ Extension graduelle aux tronçons adjacents conditionnée au dépassement des seuils de performance définis par les indicateurs de suivi.
 - Indicateurs de performance (KPI) : largeur moyenne de plage (m), variation volumétrique (m³/m) des profils, vitesse annuelle du trait de côte (m/an), nombre de jours de submersion ou d'«overtopping», taux de survie des plantations (dunes/mangroves), disponibilité des services essentiels (jours/an), incidents de navigation liés aux aménagements.
 - Gouvernance : mise en place d'un comité inter-îles (Béttenty, Niodior, Dionewar) regroupant les communes, services techniques, organisations de pêcheurs et de transformatrices, opérateurs de transport maritime et gestionnaires de la frange littorale.

Adoption d'une charte d'usage définissant les modalités d'accès, les interdictions d'extraction de matériaux et les zones de mouillage.

- Financement : combinaison de ressources communales et étatiques, appui de programmes régionaux (ex. WACA), fonds climat et contributions privées locales (tourisme et filières halieutiques), conditionnée à la réalisation des objectifs définis par les KPI.
- **Gestion des risques et clauses d'adaptation**
- Navigation : mise en place d'un balisage précis des récifs pilotes, accompagnée d'études d'alignement et de notices d'information destinées aux usagers pour garantir la sécurité maritime et limiter les risques de collision.
- Écologie : réalisation de tests préalables à l'implantation (analyse des courants, dynamique sédimentaire, qualité physico-chimique de l'eau) avec activation de procédures d'arrêt ou de réorientation des dispositifs en cas de dépassement des seuils environnementaux définis.
- Dimension sociale : co-conception des sites avec les comités villageois et les parties prenantes locales, intégrant des mécanismes de compensation ou d'accès alternatif en cas de restriction temporaire ou permanente.
- Suivi et ajustement annuel : réexamen systématique des installations pour adapter l'implantation et la porosité des dispositifs, planifier les rechargements sédimentaires d'entretien et décider de l'extension ou du retrait des ouvrages selon les indicateurs de performance et les résultats environnementaux et sociaux observés.

Pour les îles du Saloum, l'objectif n'est pas de « bétonner » le littoral, mais de réduire l'énergie incidente, stabiliser progressivement les berges et sécuriser les infrastructures et services essentiels, tout en générant des co-bénéfices socio-économiques (pêche, aquaculture durable, écotourisme). Le succès de cette trajectoire repose sur la mise en place de sites pilotes instrumentés, sur une gouvernance inter-îles consolidée et sur un Plan de Continuité d'Activité (PCA) capable de maintenir les fonctions vitales lors d'événements extrêmes.

Les stratégies privilégient des solutions hybrides combinant ingénierie douce et approches fondées sur la nature pour amortir l'énergie des houles tout en respectant les cellules sédimentaires. Elles comprennent :

- ✓ Restauration et extension de mangroves : sélection d'espèces autochtones, densités et phasage adaptés aux conditions locales de salinité et de submersion ;

- ✓ Reconstitution dunaire : implantation de pièges à sable et ganivelles, végétalisation par espèces locales pour restaurer le stock sédimentaire et limiter la déflation ;
- ✓ Récifs artificiels écologiques : sites pilotes destinés à dissiper l'énergie incidente tout en préservant la connectivité écologique ;
- ✓ Ouvrages réversibles : épis bas, brise-houles flottants ou immergés, pieux en bois ou fibre, conçus pour stabiliser les zones critiques sans interrompre les transits sédimentaires.

Du point de vue de la planification spatiale, la trajectoire intègre :

- ✓ Zones de recul obligatoires et servitudes littorales ;
- ✓ Encadrement du bâti via documents d'urbanisme actualisés (PU, PAU, SCOT), afin de guider les implantations et réduire l'exposition future.

La gouvernance, le financement et le cadre juridique sont organisés autour de comités inter-communes littoraux (Mbour-Saly-Somone, Joal-Fadiouth-Pointe Sarène, Palmarin-Djiffer, îles du Saloum) disposant de plans de gestion partagés, de budgets dédiés et de tableaux de bord publics pour assurer la transparence et le suivi. Le financement combine : budget national, appuis des programmes régionaux (WACA, partenaires bilatéraux) et redevance littorale fléchée pour les secteurs privés exposés (tourisme, halieutique), conditionnée par des engagements de performance (largeur de plage, réduction de l'exposition). Le cadre juridique (servitudes, zonages opposables, conditionnalité des permis) sécurise les arbitrages fonciers, garantit la continuité des investissements et facilite la relocalisation lorsque nécessaire.

Le suivi-évaluation et le pilotage adaptatif reposent sur un dispositif unifié d'indicateurs :

- ✓ Physiques : largeur de plage, volume sédimentaire (m³/m), fréquence des débordements, recul/avancée du trait de côte par transect, état dunaire et état des mangroves ;
- ✓ Socio-économiques : ménages exposés, valeur des actifs protégés, jours d'interruption des services, revenus halieutiques et touristiques ;
- ✓ Gouvernance : réunions effectives, exécution budgétaire, publication des données, participation des acteurs.

La production des données s'appuie sur : profils saisonniers, levés topo-bathymétriques récurrents, bouées de houle couplées à des modèles numériques (WW3, ERA-5), photogrammétrie par drone et SIG participatif. Des seuils d'alerte partagés déclenchent les ajustements nécessaires : rechargements d'entretien, reconfiguration des ouvrages,

renforcement des règles d'occupation du sol. Ce dispositif assure un pilotage adaptatif et transparent**, aligné sur des calendriers pluriannuels et capable de faire évoluer les mesures en fonction de l'état du trait de côte et des enjeux socio-économiques.

4. Études de cas comparatives

Cette section s'appuie sur l'analyse de cas régionaux afin d'évaluer la transférabilité et les conditions de mise à l'échelle des stratégies de gestion côtière examinées dans cette thèse. L'objectif est de dégager des enseignements opérationnels concernant les dispositifs hybrides, les zonages de recul, la restauration participative et la standardisation des données, en s'appuyant sur les expériences issues de WACA (Togo, Bénin), de la Vision 2050 au Sénégal, de la Casamance et de MOLOA. L'accent est mis sur l'identification d'indicateurs vérifiables et sur le renforcement de la gouvernance multi-acteurs, afin d'orienter la priorisation et l'adaptation des interventions sur les secteurs côtiers étudiés.

▪ Togo et Bénin - WACA (approches hybrides)

Les interventions menées dans le cadre du programme WACA, combinant ouvrages souples (destinés à la dissipation énergétique et à la réversibilité) et mesures de restauration écosystémique (reconstitution de mangroves, rechargements sédimentaires contrôlés), ont démontré des effets mesurables : réduction des vitesses locales d'érosion, amélioration qualitative et quantitative des habitats de mangrove restaurés ou protégés, ainsi que renforcement des capacités institutionnelles. Les enseignements principaux issus de ces expériences soulignent la nécessité de :

- ✓ Déployer initialement des tronçons pilotes instrumentés pour calibrer les interventions ;
- ✓ Mettre en place un suivi systématique à l'aide d'indicateurs physiques (largeur et volume de plage), socio-économiques (exposition des ménages et des infrastructures) et écologiques (biodiversité, survie des plantations) ;

Intégrer et arrimer les travaux aux plans d'usage locaux afin de réguler l'accès, les zones de mouillage et les activités halieutiques.

▪ Sénégal-Vision 2050 (zonages de recul et intégration climat-aménagement)

La Vision « Sénégal 2050 » consolide l'intégration des enjeux climatiques dans l'aménagement territorial, en articulant mobilité bas-carbone, infrastructures résilientes et planification stratégique des zones exposées. Elle s'appuie sur des instruments d'urbanisme et de gestion foncière adaptés (SCOT, plans d'urbanisme, servitudes littorales, plans littoraux intégrés) afin

de faciliter le recul stratégique sur les sites à risque élevé. Les retours d'expérience mettent en évidence la nécessité d'un phasage opérationnel réaliste et d'une ingénierie financière multi-source (État, collectivités locales, bailleurs de fonds), coordonnée avec les plans côtiers intégrés existants pour garantir la cohérence, la continuité et l'efficacité des interventions.

- **Casamance (restauration participative des mangroves)**

La restauration communautaire mise en œuvre en partenariat avec Océanium illustre une trajectoire de « solutions fondées sur la nature » (SfN) à grande échelle, avec la replantation et l'entretien de plusieurs milliers d'hectares depuis la fin des années 2000. Les résultats démontrent des effets positifs mesurables, notamment la réduction de la salinisation des sols et la reconstitution d'habitats côtiers, générant des co-bénéfices sur les stocks halieutiques et le séquestre de carbone bleu. Les évaluations indépendantes mettent en évidence la nécessité d'un diagnostic site-spécifique préalable, d'une sélection d'espèces adaptée aux conditions locales, ainsi que d'un suivi post-plantation pluriannuel pour assurer la pérennité et l'efficacité écologique des interventions.

- **MOLOA (standardisation et plaidoyer régional)**

La Mission d'Observation du Littoral Ouest-Africain (MOLOA), soutenue par l'UEMOA et articulée à l'Observatoire régional, constitue un cadre harmonisé de suivi des dynamiques côtières et des aléas associés (trait de côte, submersions, érosion). Elle facilite l'agrégation et l'échange de données standardisées, tout en renforçant le plaidoyer et la mutualisation d'outils pour la gestion intégrée des zones côtières. Dans le contexte sénégalais, l'enjeu principal réside dans la traduction opérationnelle de ces produits scientifiques en décisions locales : hiérarchisation des interventions, programmation sectorielle et communication transparente des résultats auprès des acteurs et des collectivités.

Les études de cas examinées mettent en évidence plusieurs enjeux structurants pour la mise en œuvre d'une gestion intégrée et durable des zones côtières sur la Petite-Côte et le delta du Saloum. Sur le plan scientifique, elles soulignent l'impératif de disposer d'outils de suivi harmonisés et comparables, incluant des indicateurs standardisés, des protocoles de mesure fiables et des typologies de vulnérabilité adaptées, afin de garantir la transférabilité et la reproductibilité des résultats à d'autres littoraux sénégalais.

Sur le plan opérationnel, ces expériences confirment que l'efficacité des interventions repose sur une approche hybride, combinant solutions fondées sur la nature et ingénierie souple, intégrée à des dispositifs de suivi et d'évaluation locaux permettant un pilotage adaptatif.

Sur le plan institutionnel et politique, elles mettent en exergue l'importance d'une gouvernance multi-acteurs, de la coordination intercommunale et de la pérennisation des financements, conditions indispensables pour transformer des projets pilotes en programmes durables et évolutifs.

Ces enseignements permettent ainsi de situer les résultats de cette thèse dans un cadre plus large d'adaptation systémique du littoral sénégalais, dans lequel la convergence entre science, planification et action publique constitue un préalable à la résilience territoriale et à la réduction effective de la vulnérabilité côtière.

5. Limites de la thèse

Les résultats présentés dans cette thèse reposent sur des outils d'analyse spatiale éprouvés (DSAS, métriques LRR/EPR) et sur une base de données multi-sources. Toutefois, leur interprétation nécessite de considérer explicitement les limites méthodologiques et informationnelles, afin de situer la portée des tendances observées et la pertinence des recommandations formulées.

Sur le plan méthodologique, plusieurs sources d'incertitude influencent l'estimation des vitesses de mobilité du trait de côte. Premièrement, les erreurs de géo-référencement et de co-enregistrement temporel des lignes de rivage peuvent générer des déplacements artificiels du trait de côte, affectant la pente des régressions LRR/EPR, en particulier sur les segments où les vitesses observées sont modérées. Ces erreurs planimétriques résiduelles résultent de la qualité variable des ortho-rectifications, de l'hétérogénéité des capteurs et des dates de prise de vue.

Deuxièmement, le choix du proxy de trait de côte (ligne d'eau, pied de dune, limite de végétation) influence la position mesurée. La ligne d'eau est sensible aux variations marégraphiques et au setup/run-up, tandis que la limite de végétation répond plus lentement aux forçages naturels mais peut intégrer des effets liés à l'occupation du sol. L'absence d'un niveau de référence strictement homogène entre millésimes peut donc conduire à une sur- ou sous-estimation de la dérive réelle.

Troisièmement, l'usage du modèle de transfert de Bruun pour projeter l'évolution morphologique doit être envisagé avec prudence. Ce modèle unidimensionnel repose sur l'hypothèse d'un profil côtier en équilibre et d'une réponse uniforme du littoral à l'élévation du niveau marin. Bien qu'il présente des avantages en termes de simplicité et d'opérationnalité, il néglige plusieurs éléments essentiels tels que les transports longitudinaux, les ouvrages côtiers, les discontinuités lithologiques et la complexité des cellules sédimentaires. Dans des

environnements complexes comme celui de la Petite-Côte, caractérisés par une forte variabilité morphologique, des apports sédimentaires hétérogènes et des influences anthropiques significatives, ces simplifications peuvent conduire à une représentation partielle des dynamiques réelles. Ainsi, les résultats issus de son application doivent être interprétés comme des tendances générales, et non comme une représentation exhaustive de la réponse du système côtier.

Enfin, le sous-échantillonnage des événements extrêmes (tempêtes, surcotes) dans les séries analysées peut lisser des ruptures de tendance ou minorer l'ampleur de reculs rapides, alors que ces épisodes contrôlent une part significative de la variabilité interannuelle. En effet, ces événements, bien que ponctuels, sont souvent responsables des phases les plus intenses de recul du trait de côte. Leur faible représentation dans les séries temporelles peut ainsi conduire à une atténuation des taux d'évolution calculés et à une sous-estimation de la variabilité réelle du système côtier.

Sur le plan informationnel, plusieurs lacunes limitent la précision des diagnostics. Les bathymétries fines proches du rivage sont rares ou espacées dans le temps, alors qu'elles sont déterminantes pour caractériser les zones de déferlement et les réservoirs sédimentaires (barres, hauts-fonds) contrôlant l'énergie incidente et la dissipation. De même, les séries longues de houle (direction, hauteur significative et période) demeurent insuffisamment denses ou hétérogènes selon les sources, limitant l'analyse des tendances et la fiabilité des forçages utilisés pour interpréter les vitesses de recul.

Ces limitations n'invalident pas les tendances observées, mais invitent à les interpréter avec prudence, notamment sur les segments où les vitesses sont proches des marges d'erreur. Il est recommandé de :

- ✓ rapporter systématiquement les intervalles de confiance (IC 95 %) associés aux métriques LRR/EPR ;
- ✓ traiter avec précaution les classes « faible recul/quasi-stabilité » ;
- ✓ privilégier des diagnostics convergents (croisement trait de côte / granulométrie / usage du sol) avant de conclure à un changement de trajectoire ;
- ✓ adosser les décisions d'aménagement à un suivi révisable, capable d'intégrer de nouvelles données issues d'événements extrêmes, de levés bathymétriques ou de séries de houle enrichies.

Cette posture garantit des perspectives solides mais révisables, conformément aux principes de gouvernance adaptative mobilisés dans cette thèse.

Conclusion du chapitre VIII

En définitive, la confrontation des politiques de gestion aux dynamiques morfo-sédimentaires locales montre qu'aucune solution unique ne peut suffire. La durabilité repose sur des combinaisons contextualisées, une gouvernance multi-acteurs et une programmation pluriannuelle, soutenues par un suivi transparent et des indicateurs fiables. Les recommandations formulées dans cette thèse s'inscrivent dans ce cadre et proposent une trajectoire de résilience réaliste pour la Petite-Côte et le delta du Saloum.

Conclusion de la troisième partie

La troisième partie de cette thèse a mis en évidence que la régression du trait de côte entre la Petite-Côte et le delta du Saloum engendre une cascade d'implications écologiques et socio-économiques. Les plages se rétrécissent, les cordons dunaires et la végétation littorale se dégradent, tandis que les submersions récurrentes et la salinisation des sols compromettent la qualité des terres. Ces mutations entraînent des pertes d'habitats et d'infrastructures, perturbent les principaux piliers productifs locaux (pêche artisanale, tourisme balnéaire, agriculture côtière) et accentuent la vulnérabilité des ménages. Les perceptions recueillies sur le terrain corroborent l'ampleur et la diversité de ces dommages et mettent en lumière des contrastes sectoriels significatifs (Mbour-Saly, Joal-Fadiouth, Palmarin-Djiffer, îles du Saloum), où se conjuguent désorganisation des activités, transferts de risque le long du rivage et difficultés de maintien des services essentiels.

L'analyse des stratégies d'adaptation montre une hiérarchie claire : les mesures individuelles « douces » présentent une efficacité limitée, les initiatives collectives sont plus structurées mais restent hétérogènes, tandis que les interventions publiques obtiennent la meilleure évaluation lorsqu'elles combinent planification, ressources et suivi. Toutefois, ces actions peuvent générer des externalités non désirées (effets de rive, artificialisation) si elles ne sont pas territorialisées et adaptées aux dynamiques locales.

À partir de ces constats, un cap opérationnel se dessine autour de cinq priorités :

- ✓ déployer un portefeuille d'options hybride et localisé, associant solutions fondées sur la nature et ouvrages souples ou réversibles, calibrés aux caractéristiques des cellules sédimentaires ;

- ✓ mettre en œuvre un recul stratégique phasé, appuyé par des servitudes littorales et un accompagnement social pour sécuriser les ménages et les activités ;
- ✓ instaurer une gouvernance intercommunale, dotée d'indicateurs publics et d'un dispositif de suivi-évaluation, afin de piloter l'adaptation de manière transparente et incrémentale ;
- ✓ conditionner les investissements à des diagnostics et évaluations à l'échelle des cellules sédimentaires pour éviter les externalités et optimiser la résilience ;
- ✓ veiller à l'acceptabilité sociale et à l'équité territoriale dans la planification et la mise en œuvre des mesures.

Enfin, les limites de connaissance identifiées, notamment la faible résolution des bathymétries côtières et l'insuffisance des séries de houle, justifient un renforcement de l'observation et l'institutionnalisation du suivi-évaluation. Aucune solution unique n'étant suffisante, la résilience du littoral étudié repose sur des combinaisons contextualisées, évaluables et révisables, intégrant science, planification et action publique.

Conclusion générale

Cette thèse est consacrée à l'évolution morphodynamique du littoral sénégalais entre la Petite-Côte et le delta du Saloum. Elle vise à décrire et expliquer les trajectoires historiques et futures du trait de côte à long terme, à caractériser les déterminants sédimentaires et hydrodynamiques, et à évaluer leurs implications environnementales et socio-économiques.

Pour atteindre ces objectifs, la méthodologie a combiné plusieurs approches :

- ✓ une analyse diachronique du trait de côte sur la période 1973-2024 à partir d'images Landsat, traitées via l'outil DSAS (extension ArcMap), utilisant les métriques EPR (évolution entre deux dates successives) et LRR (tendance globale sur l'ensemble de la période) ;
- ✓ une caractérisation granulométrique fine sur des sites représentatifs (Mbour, Djiffer, Bétenty) conformément à la norme NF EN 12620 ;
- ✓ un dispositif prospectif intégrant les tendances historiques, l'élévation projetée du niveau marin (AR6/SSP), le contrôle par l'état de mer (profondeur de fermeture selon Hallermeier), et la prise en compte des facteurs géophysiques et anthropiques locaux, afin d'estimer les positions futures du rivage aux horizons 2055, 2075 et 2100.

Parallèlement, une revue documentaire et des travaux de terrain (enquêtes, entretiens, prélèvements) ont permis d'appréhender les dynamiques morpho-sédimentaires et leurs implications socio-écologiques.

L'analyse conjointe des données a permis d'identifier les facteurs principaux de la dynamique côtière. La régression observée résulte de processus naturels, action des houles et marées, nature sableuse du rivage, élévation du niveau marin, bathymétrie et topographie basses, et est amplifiée par des pressions anthropiques : aménagements non réglementés, modifications hydrologiques, extraction de sable et déplacement de risques lié aux protections ponctuelles.

Les résultats diachroniques confirment une tendance régressive moyenne de $-1,69$ m/an sur 1973-2024, avec une forte variabilité spatiale : des vitesses extrêmes atteignent $-11,6$ m/an sur certains tronçons (Mbour-Pointe Sarène, Palmarin, Djiffer, Niodior, Bétenty), tandis que d'autres segments présentent un recul modéré ($-0,04$ m/an) ou même une accrétion localisée ($+1,64$ à $+7,14$ m/an) associée aux mangroves actives ou aux influences fluviales. Sur les 1 158 transects analysés, la perte cumulée atteint environ 1957 m sur 51 ans, avec une marge

d'incertitude estimée à $\pm 0,58$ m/an pour les vitesses LRR. Ces données mettent en évidence la nécessité d'une lecture multi-scalaire et contextualisée des processus.

Les analyses granulométriques révèlent une prédominance de sables fins à moyens en surface, avec un enrichissement local en fractions moyennes à grossières en profondeur. Cette stratification traduit des dépôts hérités de contextes hydrodynamiques plus énergétiques et une forte sensibilité des couches superficielles aux remaniements par houle et vent. La haute plage, relativement homogène verticalement, reste vulnérable aux événements extrêmes et aux apports éoliens. Ces observations expliquent les contrastes spatiaux d'érosion et d'accrétion selon l'exposition aux houles, la bathymétrie, la présence de mangroves et l'emprise des ouvrages littoraux.

Le dispositif prospectif combine la tendance historique (LRR), la règle de Bruun ajustée par les scénarios AR6/SSP, les facteurs locaux et un contrôle hydrodynamique via la profondeur de fermeture. Il permet d'estimer les positions futures du rivage pour 2055, 2075 et 2100, avec des intervalles d'incertitude à 95 % respectivement de $\pm 50,2$ m, $\pm 55,6$ m et $\pm 65,5$ m. Ces cartes décisionnelles spatialement explicites renseignent les zones d'érosion potentielle, les occupations du sol exposées et orientent le phasage des interventions.

Les transformations observées comprennent :

- ✓ rétrécissement continu des plages, dégradation des cordons dunaires et de la végétation littorale ;
- ✓ salinisation croissante des sols due aux submersions marines et fluviales ;
- ✓ destruction d'infrastructures résidentielles et productives ;
- ✓ perturbation des activités économiques locales (tourisme, pêche artisanale, agriculture), accentuant la vulnérabilité des ménages côtiers.
- ✓ Mbour-Saly : densification urbaine et ouvrages ponctuels provoquant des effets de rive. Solutions recommandées : rechargements pluriannuels, ouvrages souples et réversibles, reconstitution dunaire, zones de recul juridiquement opposables et schéma communal de gestion des plages.
- ✓ Joal-Fadiouth - Pointe Sarène : coexistence de régression et d'accrétion liée aux mangroves. Solutions : restauration écologique, consolidation de digues anti-sel, by-pass sédimentaires ciblés, plan de prévention de la submersion.
- ✓ Palmarin-Djiffer : cumuls érosion-submersion-pertes agricoles. Solutions : recul stratégique phasé, renforcements naturels (dunes, plantations, pieux biodégradables),

ouvrages souples temporaires, PCA communaux, mécanismes d'indemnisation et foncier de substitution.

- ✓ Îles du Saloum (Béttenty, Niodior, Dionewar) : priorité aux solutions à faible impact (fascines, palétuviers, récifs écologiques pilotes), sécurisation des équipements et diversification économique.

Une gouvernance intercommunale, dotée de budgets dédiés, tableaux de bord partagés et publication ouverte des suivis, est essentielle. L'intégration aux référentiels existants (PNA zones côtières, WACA, GIZC/UNESCO, AR6/ODD 13-14) est opérée via des plans d'action multi-niveaux, des indicateurs opérationnels (largeur de plage, volumes sableux, ménages exposés, actifs protégés, jours d'interruption de services, taux d'exécution) et des financements pluri-sources conditionnés à des engagements de résultats.

Cette thèse apporte une contribution significative à la compréhension des dynamiques littorales sur la façade sénégalaise, en particulier entre la Petite-Côte et le delta du Saloum. Elle se distingue par une approche intégrée combinant l'analyse diachronique du trait de côte sur plus de cinq décennies (1973-2024), une caractérisation morphosédimentaire fine et l'élaboration de scénarios prospectifs fondés sur les projections climatiques récentes (AR6). Contrairement aux travaux antérieurs souvent localisés ou sectoriels, cette recherche propose une lecture spatialisée et multi-scalaire du littoral, mettant en évidence des zones critiques d'érosion et de résilience. Elle apporte également une contribution originale en articulant les caractéristiques physiques et les implications socio-économiques sur la dynamique du trait de côte, permettant de faire des projections, afin d'orienter les stratégies de gestion intégrée du littoral dans un contexte de changement climatique.

Les principales limites concernent :

- ✓ l'hypothèse de linéarité des tendances (LRR), susceptible de masquer des ruptures locales ;
- ✓ la validité partielle de la règle de Bruun pour des profils complexes ;
- ✓ l'incertitude sur la performance à long terme des ouvrages.

Ces limites plaident pour : densification des observations (bathymétries fines, suivis topobathymétriques récurrents, stations de houle), fusion de données multi-sources (imagerie haute résolution, altimétrie, réanalyses de houle) et expérimentation de solutions hybrides SfN + ouvrages souples, accompagnée d'évaluations socio-économiques et juridiques pour sécuriser les zones de recul.

Cette thèse établit de manière quantifiée et spatialisée les trajectoires régressives du littoral et leur variabilité. Elle propose un chaînage méthodologique intégré alliant analyse des tendances, projections du niveau marin et forçages hydrodynamiques, tout en traduisant les résultats en recommandations opérationnelles sectorielles. Aucune solution unique n'étant pertinente, la résilience repose sur la combinaison contextualisée de solutions fondées sur la nature, d'ouvrages souples et de reculs stratégiques, pilotée par une gouvernance intercommunale transparente et dotée d'indicateurs. Par cette articulation entre science et action, le travail contribue à éclairer durablement les choix d'aménagement et la gestion intégrée du littoral entre la Petite-Côte et le delta du Saloum.

Bibliographie

1. Abdulkarim, P. R., Akinnigbagbe, A. E., et Imo, D. O. (2015). Grain size analysis of beach sediment along the barrier bar lagoon coastal system, Lagos, Nigeria; its implication on coastal erosion. *Global Journal of Geological Sciences*, 12(1), 31-38.
2. ACCC/UNESCO., 2015. Rapport du séminaire de clôture sur la Gestion Intégrée des Zones Côtières et les Changements Climatiques en Afrique de l'Ouest, Dakar/Sénégal, 5p.
3. Adjoussi P.,2001. Impacts du prélèvement du sable marin sur l'évolution du trait de côte à Yoff : essai d'étude de vulnérabilité, (Presqu'île du Cap-Vert, Sénégal). Mémoire de DEA, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 71p.
4. Afaf B D H., Darmawan W., Nandika., D., Rahayu I., Lumongga. (2018). Radial Variation Selected Wood Properties of Indonesian Merkusii Pine. *Pissn* :1017-0715.
5. AFNOR. (2008). NF EN 12620+A1 :2008 - Granulats pour béton. Association Française de Normalisation.<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-12620-a1/granulats-pour-beton/fa157250/31276>
6. Agence Nationale de la Statistique et de la démographie. (2019). Situation économique du Sénégal en 2018 (édition 2018). Repéré à <http://www.ansd.sn>.
<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-12620-a1/granulats-pour-beton/fa157250/31276>.
7. AJE. (2025). Implications or recommendations in research: What's the difference? AJE Author Services. <https://blog.aje.com/en/implications-or-recommendations-in-research/>
8. AKADJE A.M.L.M.C., 2010. Analyse de la cinématique du trait de côte du Port-Bouët à l'aide du couplage télédétection et SIG (Côte d'Ivoire), DEA, Université de Cocody-Abidjan, 42 p.
9. Almar, R., Castelle, B., et Marieu, V. (2015). Wave and sediment dynamics in coastal areas: Case study from the West African coast. *Marine Geology*, 369.
10. Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>.
11. ANSD. (2013). Situation économique du Sénégal en 2013. Repéré à <http://www.ansd.sn>
Agence Nationale de la Statistique et de la démographie. (2023). Situation économique du Sénégal en 2023. Repéré à <http://www.ansd.sn> Agence Nationale de la Statistique et

- de la démographie. (2020). Situation économique du Sénégal en 2019 (édition 2019). Repéré à <http://www.ansd.sn>.
12. ANSD. (2023). : RGPFAE, 2023. Repéré à <http://www.ansd.sn>.
 13. ANSD. (2020). Situation économique et sociale de la région de Thiès en 2019. Repéré à <http://www.ansd.sn>.
 14. Anthony, E. J., Dolique, F., Gardel, A., Gratiot, N., Proisy, C., et Polidori, L. (2015). The dynamics of coastal sedimentation and erosion processes along the West African coast. *Journal of Coastal Research*, 31(3).
 15. Anthony, EJ, Dolique, F., et Gardel, A. (2014). L'impact géomorphologique de l'élévation du niveau de la mer sur les côtes deltaïques d'Afrique de l'Ouest : une revue. Geological Society, Londres, Special Publications, 388 (1), 219-233.
 16. ATLAS.ti. (n.d.). Research implications: Definition, examples & tips. *ATLAS.ti Research Hub*. <https://atlasti.com/research-hub/research-implications>
 17. Ayodele, O. S., et Madukwe, H. Y. (2019). Granulometric and sedimentologic study of beach sediments, Lagos, Southwestern Nigeria. *International Journal of Geosciences*, 10(2), 1-10.
 18. Bâ, K., Diouf, P. S., et Sarr, A. (2021). « Stratégies de gestion et conservation des mangroves face à l'érosion dans le delta du Saloum. » Cahiers de l'Environnement et du Développement Durable, 15(4), 203-219.
 19. Bâ K., 2013. Apport de la télédétection et des SIG dans l'étude de l'évolution de la Langue de Barbarie et de l'estuaire du fleuve. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 218 p.
 20. Badji, M., Sambou, H., Mbow, C., et Sedrati, M. (2025). Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion du littoral sénégalais. *Espace Géographique et Société Marocaine*, 1(95), 293-319.
 21. Bailly *et al.* (2005). Les concepts de la géographie humaine, Armant Colin, 5ème édition, Paris, 333p.
 22. Banque mondiale. (2020). Étude d'impact environnemental et social du dragage/rechargement en sable des plages de Saly. Ministère de l'Environnement et du Développement durable.
 23. Barusseau J P., 1980. Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous l'action des houles entre Saint-Louis et Joal (Sénégal). Ass, Sénégal. Et. Quatern. Afr. Bull. Liaison, Dakar, 58-59, 31-39, 435p.

24. Baulig H., 1956. Vocabulaire franco-anglo-allemand de géomorphologie. Fascicule 130. Société. Les Belles Lettres, Paris, 230p.
25. Bird E C F., 1985. Coastline changes. A global review. Joh Wiley et Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 219p.
26. Blanchet, A., et Gotman, A. (2010). L'entretien. L'enquête et ses méthodes. Armand Colin.
27. Boak E H et Turner I L., 2005. Shoreline definition and detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, Vol. 21. No 4, p. 688-703.
28. Boateng, I. (2012). An application of GIS and coastal geomorphology for large scale assessment of coastal erosion in Ghana. *Journal of Coastal Conservation*, 16(3), 383-392.
29. Boudjera A., 2010. Impact des structures hydrauliques sur l'érosion littorale en Côte Nord : Etude de cas précis : CAS DE SEPT-ÎLES. Mémoire de maîtrise en géographie. Université de Québec à Montréal, 137 p.
30. Bourles B., 1998. Variabilité de la hauteur dynamique dans l'Atlantique Tropical vue par altimétrie. In *Evolution des littoraux de la Guyane et de la Zone Caraïbe Méridionale pendant le Quaternaire*. PICG 274/ORSTOM. Coll. Colloques et Séminaires, IRD. Paris.
31. Bowen A J et al., 1996. Budget of Littoral Sands in the Vicinity of port Arguello, California. Technical Memorandum No. 19, Coastal Engineering research Center, U.S. Army Corps Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 41p.
32. Boyer, A., Sylla, M. B., et Giorgi, F. (2019). Sédimentation et érosion côtière dans les estuaires et les zones côtières : étude des processus et impacts. *Sciences des Estuaires, des Côtes et des Plateaux*, 226, [...].
33. BRGM., 2012. Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte, Rapport final, 202p. Doi : infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60616-FR.
34. Brown, S., Nicholls, R. J., Woodroffe, C. D., et Hanson, S. (2018). La mer, l'élévation du niveau marin et l'impact sur les zones côtières : une évaluation globale. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 4.
35. Brunet R., Ferras R., Théry H., 2005. Les mots de la géographie : dictionnaire critique, Reclus-la documentation française, 518 pages.
36. Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88(1), 117-130.

37. Bruun, P. (1988). The Bruun Rule of erosion by sea-level rise: A discussion on large-scale two- and three-dimensional usages. *Journal of Coastal Research*, 4(4), 627-648.
38. Caloz R et Collet C.,2001. Traitement numérique d'image de télédétection, Précis de Télédétection-Vol. 3, Presse Universitaire du Québec, 381p.
39. Caruana R., Niculescu-Mizil A., 2006. An empirical comparison of supervised learning algorithms. Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning, p 161-168.
40. Centre de Suivi Ecologique, Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (Sénégal), 2004. Etude et cartographie du phénomène de l'érosion côtière dans la zone de Saly Portudal. Rapport final, 28p.
41. Chambers R., 1989. Editorial Introduction: Vulnérabilité, Coping and Policy. *IDS bulletin* 202: 1-7. Doi: 10.1111/j.1759-5436. 1989.mp20002001.
42. Church, J. A., et White, N. J. (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Nature Geoscience*, 4(9), 689-695. <https://doi.org/10.1038/ngeo1327>.
43. Cissé, C. O. T., Almar, R., Youm, J. P. M., Jolicoeur, S., Taveneau, A., Sy, B. A., Sakho, I., Sow, B. A., et Dieng, H. (2023). *Extreme coastal water levels evolution at Dakar (Senegal, West Africa)*. *Climate*, 11(1), 6. <https://doi.org/10.3390/cli11010006>.
44. Cissé, C. O. T., Marić, I., Domazetović, F., et Almar, R. (2024). Derivation of coastal erosion susceptibility and socio-economic vulnerability models for sustainable coastal management in Senegal. *Sustainability*, 16(17), 7422. <https://doi.org/10.3390/su16177422>.
45. Nicholls, R. J., et Cazenave, A. (2010). *Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones*. *Science*, 328(5985), 1517-1520. <https://doi.org/10.3390/su16177422>.
46. Cissé C O T.,2023. Approche géomorphologique pour déterminer le potentiel de franchissement du trait de côte par les vagues de tempête à partir de l'exemple de la Petite-Côte sénégalaise. *Société Royale de Belge en Géographie*, ISSN : 2294-9135, DOI : 10.4000/belgeo.61738, 16p.
47. Cooper, J. A. G., et Pilkey, O. H. (2004). Sea-level rise and shoreline retreat: Time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43(3-4), 157-171. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.07.001>.
48. Costa S., 2000. Réactualisation des connaissances et mise en place d'une méthode de suivi de la dynamique du littoral Haut-normand et Picard. Rapport final, Préfecture de Picardie. Contrat de Plan Interrégional du Bassin de Paris (CPIBP), 103p.

49. Crowell, M., Leatherman, S. P., et Buckley, M. K. (1997). Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 13(3), 1024-1033.
50. Crowell M., Leatherman S., Buckley M K., 1991. Shoreline change rate analysis: long term versus short term data. *Shore and Beach*, vol. 61, N°2, p 13-20.
51. Dabo, M. (2006). Dynamiques sédimentaires et risques côtiers en Mauritanie. Nouakchott : Centre National de Recherches Océanographiques.
52. Dabo B., 2006. Erosion côtière au Sénégal : l'exemple de Mbour. Thèse de Doctorat, troisième cycle en Géosciences, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 150p.
53. Dabo S., 1994. « Ethnicité et urbanisation : les Manding de Mbuur XIXe -XXe siècle », Mémoire de Maitrise en Histoire. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 121p.
54. Dada O., Adeyeye O., Rasheded B A., and Yinusa A A B., 2019. Effect of coastal land use change on coastline dynamics along the Nigerian transgressive Mahin mud coast. *Ocean and Coastal Management* 168, p 251-264.
55. Dean, R. G., et Dalrymple, R. A. (2002). Coastal processes with engineering applications. *Cambridge University Press*.
56. Debaud E., 1950. La barre du Sénégal après l'hivernage 1945. In : 2ème Conf.Intern. Africanistes de l'Ouest, Bissau, 1947, Ministres Colonias, Lisbonne, 1, p 151-160.
57. Delgado-Fernandez, I., Davidson-Arnott, R. G. D., et Ollerhead, J. (2013). Meso-scale aeolian sediment input to coastal dunes: The nature of aeolian transport events. *Geomorphology*, 183, 1-10.
58. Delourme, J. (1956). Le régime des alizés et leur influence sur les océans tropicaux. *Météorologie Océanique*, 14(1), 35-49.
59. Dème, A., Faye, I., Sow, A. A., et al. (2024). Coastal vulnerability mapping in Senegal using geospatial approaches. *Journal of Coastal Conservation*, 28(1), 45-62.
60. Dennis K C., Niang-Diop I., Nicholls R J., 1995. *Sea-level rise in Senegal: potential impacts and consequences*. J. Coastal Res., Fort Lauderdale (Flo.), Nicholls, R J et Leatherman, S P. (eds). "The potential impacts of accelerate sea-level rise on developing countries".
61. Diadhiou Y B.,2016. Littoral sénégalais : dynamique actuelle du milieu, modélisation et approche de la gestion des risques liés aux changements climatiques (de Joal à Palmarin, Petite-Côte, Sénégal) ; Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 227p.

62. Diallo, M., et Sagna, M. (2008). Influence de la mousson sur l'érosion et le transport des sédiments dans les zones côtières sahéliennes. *Journal of African Coastal Dynamics*, 25(3), 52-67.
63. Diarra, M. (1999). Les tempêtes et leur rôle dans l'érosion côtière sur la Petite-Côte sénégalaise. *Journal of Coastal Studies*, 17(2), 80-92.
64. Diarra M., 1999. Formation et évolution fini-holocènes et dynamique actuelle du delta Saloum-Gambie (Sénégal Afrique de l'Ouest) Géomorphologie, Stratigraphie, sédimentologie et dynamique sédimentaire, Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 161p.
65. Diarra, I. (2011). La mousson et son impact sur la dynamique hydrologique et sédimentaire des côtes sénégalaises. *Bulletin de l'Institut Fondamental d'Afrique Noire*, 73(4), 120-135.
66. Diatta L S., 2020 Impacts de la dynamique du littoral entre Cabrousse et Boudiédiète (Commune de Diembéring) en Basse Casamance. Mémoire de Master en Géographie. Université Assane Seck de Ziguinchor, 119 p.
67. Diaw, M., Sarr, M., et Ndoye, M. (1990). Les phénomènes de submersion marine et d'érosion sur la Petite-Côte sénégalaise. *Annales de Géographie*, 101(4), 105-121.
68. Diaw A T., Diop N., Thomas Y F., 1990. "Rupture of the spit of Sangomar. Estuary of the Saalum, Senegal", AIAA, Series Progress in Astronautics and Aeronautics, Washington, 170-180.
69. Diaw A T., 1997. Evolution des milieux littoraux du Sénégal : Géomorphologie et télédétection. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Lettres, Université de Paris I : Panthéon-Sorbonne, 270 p.
70. Diédhiou, A., Faye, B., et Ndiaye, M. (2018). Les impacts de l'érosion côtière sur les écosystèmes et les communautés au Sénégal : une analyse des vulnérabilités et des stratégies d'adaptation. *Revue Africaine d'Écologie*, 56(2), 230-243.
71. Dieng, M., Faye, S. et Sagna, P. (2021). Évolution des systèmes côtiers du Sénégal face aux changements climatiques : Le cas de Palmarin. *Revue de Géographie Tropicale*, 18, 45-67.
72. Dièye, E. H. B., Sarr, R., Sané, T., et Faye, I. (2013). Dynamique récente du trait de côte et risques d'érosion dans le delta du Saloum (Sénégal). *Physio-Géo*, 7, 125-142.
73. Dieye E B., Diaw A T., Sane T., Ndour N., 2013. Dynamique de la mangrove de l'estuaire du Saloum (Sénégal) entre 1972 et 2010. In *Cybergeo: European Journal of Geographie, Environnement*, 22p.

74. Diop, S., Diaw, A. T., et Sambou, H. (2015). « Dynamique sédimentaire et érosion côtière dans le delta du Saloum. » *Revue Sénégalaise de Géosciences*, 10(2), 65-78.
75. Diop, S., Diallo, O., et Sow, A. (2016). "Stratégies d'adaptation face aux changements côtiers induits par les vents et les houles au Sénégal." *Cahiers de l'Environnement et du Développement Durable*, 10(4), 189-207.
76. Diop, S., Barousseau, J. P., et Descamps, C. (2018). *The Land/Ocean Interactions in the Coastal Zone of West and Central Africa*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56179-0>.
77. Diop, E.S., Barousseau, J.P., et Descamps, C. (2014). *Le littoral ouest-africain : Enjeux et perspectives de gestion durable*. IRD Éditions. <https://books.openedition.org/irdeditions/13225>.
78. Paskoff, R. (1993). *Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution*. Armand Colin. <https://books.openedition.org/irdeditions/13225>.
79. Diop, E.S. (1990). *La côte ouest-africaine : du Saloum (Sénégal) à la Mellacorée (Guinée) - Dynamique des littoraux et aménagement*. ORSTOM.
80. Diop, E. S. (1993). *Technical report of the project conservation and sustainable utilization of mangrove forests in Latin America and Africa regions: Part II, Africa*. International Society for Mangrove Ecosystems; *International Tropical Timber Organisation*.
81. Diop, E. S., 1990. *La côte ouest-africaine, du Saloum (Sénégal) à la Mellacorée (République de Guinée)*. Paris: ORSTOM, 1990, 366p.
82. Diouf S., 2015. *Evolution morpho-sédimentaire du littoral de Saly Portudal dans un contexte d'installation de brise-lames*. Mémoire de Master en Géologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 65p.
83. Direction de la météorologie nationale (ANACIM). (2023). *Le Sénégal, troisième pays d'Afrique le plus vulnérable à l'érosion côtière*. Agence de presse sénégalaise (APS).
84. Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés, Dakar (Sénégal). (2002). *Rapport National sur l'Etat de l'Environnement marin et côtier*.
85. Direction de météorologie nationale (France) : Delourme A., 1956. *De la circulation Atmosphérique et de l'influence de l'air polaire dans les régions intertropicales de l'Atlantique*.
86. Moser C., 1998. *The Asset Vulnerability Framework: Re-assessing Ultra-Poverty Reduction Strategies*. *World Development* Vol 1, N°26. 1-19. DOI: 10.1080/13669877.2015.1119181.

87. Dolan R., Hayden B P., Heywood J., 1978. A new photometric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, vol2, p 21-39.
88. Domain, F. (1976). Les fonds de pêche du plateau ouest-africain entre 17°N et 12°N. CRODT, 20 p.
89. Domain, F. (1980). Contribution à la connaissance de l'écologie des poissons démersaux du plateau continental sénégal-mauritanien. Les ressources démersales dans le contexte général du Golfe de Guinée. Thèse de Doctorat d'État en Sciences Naturelles, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 342 p + annexes.
90. Dronkers, J. (2016). *Dynamics of coastal systems (2nd ed.)*. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/9789813206817>.
91. Dufresne, M. (1991). Les alizés et leur transformation sur les côtes africaines : Impact de la continentalisation des vents. *Journal of African Climatology*, 16(4), 45-60.
92. Duvat, V., et Magnan, AK. (2019). Risques côtiers en Afrique de l'Ouest : évaluation de la vulnérabilité et des stratégies d'adaptation. *Global Environmental Change*, 57, 101-116.
93. D'Ercole R., Thouret J C., Dollfus O., Asté J P., 1994. Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. In: *Revue de géographie alpine*, Tome 82 N°4. pp. 87-96.
94. Elie F., 2006. Les marées. Repéré à. <http://fred.elie.free.fr>.
95. Ellis, J. T., Medeiros Carvalho, A., Lamothe, M., et Parente Maia, L. (2015). Using Wind Direction and Shoreline Morphology to Model Sand Dune Mobilization. *Journal of Coastal Research*, 31(6), 1401-1410. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00258.1>.
96. Elouard P., 1967. Le quaternaire de la région de Mbour (Sénégal), Livret et guide, excursion sur la Petite-Côte, 21-33p.
97. Emmanuel B., 2017. Etude des dynamiques du trait de côte de la Région Bretagne à différentes échelles spatio-temporelles. Thèse de Doctorat en Géographie. Université de Bretagne Occidentale-Brest, 302p.
98. Esmail M., Mahmud W E., Fatha H., 2019. Assessment and prediction.
99. FAO. (2007). *The world's mangroves 1980-2005*.
100. FAO. (2021). *The world's mangroves: Status and future outlook*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

101. Faucon F., 2014. Lexique Histoire-Géographie-Enseignement Moral et Civique : comprendre le vocabulaire pour comprendre le cours. DOI : <https://lewebpedagogique.com/prof84700/>.
102. Fauve A., 2008. « Auriez-vous dit « littoralisation » ? », Nouvelle Europe [en ligne], Jeudi 31 Janvier 2008.
103. Faye G., 1993. L'érosion côtière sur le littoral Sud du Cap-Vert à l'embouchure du Saloum. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 278p.
104. Faye I., Giraudet E., Gourmelon F., Hénaff A., 2011. "Cartographie normalisée du trait de côte ». Mappemonde, N° 104. Repéré à : <http://mappemonde-archive.mgm.fr/num32/articles/art11404.html>.
105. FAYE I.N., 2010. Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Thèse de Doctorat en Géographie. Université de Bretagne Occidentale. (Volume 1) 321p.
106. Fernandez-Delgado M., Cernadas E., Barro S., 2014. Do we need Hundreds of Classifiers to Solve Real Word Classification Problems? *Journal of Machine Learning Research* 15. (2014). 3133-3181, 49p.
107. Fletcher C H; Rooney J Canadas., Barbee M., Lim S C., Richmond B., 2003. Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal Of coastal Research*, Special Issue n°38, p 106-124.
108. French, J. R., et Burningham, H. (2013). *Coasts and climate: Insights from geomorphology. Progress in Physical Geography*, 37(4), 498-513. <https://doi.org/10.1177/0309133313494962>.
109. Garcia C., Vanroye C., 2008. Les données marines au service de la gestion des risques littoraux : les réseaux de mesures du Littoral Languedoc-Roussillon. Xème Journées Nationales Génis Côtier-Génie Civil, 14-16Octobre 2008, Sophia Antipolis, p 533-542.
110. Garlan, T., Almar, R., Gauduin, H., Gosselin, M., Morio, O., et Labarthe, C. (2020). 3D variability of sediment granulometry in two tropical environments: Nha Trang (Vietnam) and Saint-Louis (Sénégal). *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 495-499.
111. George P. et Verger F., 2013, Dictionnaire de Géographie, 4^{ème} édition, Paris PUF, 478p.
112. George P. et Verger F., 2006. Dictionnaire de la Géographie. 9^{ème} édition, Paris, Presses Universitaires de France, 472p. (ISBN 2-13-055750-3).

113. Giardino, A., Schrijvershof, R., Nederhoff, C. M., de Vroeg, H., Brière, C. D. E., Tonnon, P. K., Caires, S., Walstra, D. J., Sosa, J., van Verseveld, W. J., Schellekens, J., et Sloff, C. J. (2018). A quantitative assessment of human interventions and climate change on the West African sediment budget. *Ocean et Coastal Management*, 156, 249-265. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.008>.
114. GIEC. (2019). Le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres.
115. GIEC., 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II, III au quatrième Rapport d'évolution du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC, Genève, Suisse, 103p.
116. Guilcher A., 1954. Rapport sur une mission d'étude de la Langue de Barbarie et l'embouchure du Sénégal, M.A.S, 56 p.
117. Guilcher A., Nicolas J P., 1954. Observations sur la Langue de Barbarie et les bras du Sénégal aux environs de Saint-Louis. *Bull. Inf. COEC*, Paris, VI (6), 227-242 9 pl.
118. Gumuchian, H., et Marois, C. (2000). La rigueur du qualitatif. Les méthodes d'enquête en géographie sociale. *Anthropos*.
119. Hallermeier, R. J. (1981). A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4(3), 253-277. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(80\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(80)90022-8).
120. Himmelstoss E A., Zichichi J L., Ayhan E., 2008. *Digital Shoreline Analysis system (DSAS) version 4.0. An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. USGS Open-File Report 2008-1278. Updated for version 4.3.
121. Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Perrette, M., Nicholls, R. J., Tol, R. S., ... Levermann, A. (2014). Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3292-3297.
122. IED AFRIQUE, Bâtir des communautés locales résilientes face aux crises, rapport 2021-2022.
123. Infociments. (2009). Normalisation des granulats : NF EN 932-1 à EN 932-6 Méthodes d'échantillonnage, préparation, tamisage. Infociments. <https://www.infociments.fr/betons/normalisation-des-granulats>.
124. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment*

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
125. Lillesand, T., Kiefer, R. W., et Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation (7th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
 126. IPCC., 2019. Climate change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 874p. In press.
 127. IPCC.,2022. *Climate Change 2022: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
 128. Jonah, F. E., Adu-Boahen, K., Agbo, N. W., et al. (2016). *Coastal erosion in Ghana: Causes, policies, and management*. University of Cape Coast Press.
 129. Jonah F E., Mensah E A., Edziyie R E., Boateng D A., 2016. Coastal erosion in Ghana: Causes, Policies, and Management, *Coastal Management*, 44: 2,116-130, DOI: 10.1080/08920753.2016.1135273.
 130. Juigner E De.,2012. Cinématique d'un trait de côté sableux en Vendée entre 1920 et 2010, Méthode et analyse, Géolittomer CNRSUMR 6554 LETG, Université de Nantes, 13p.
 131. Kish, L. (1965). Survey Sampling. John Wiley et Sons.
 132. Komar, P. D. (1998). Beach processes and sedimentation (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
 133. Kounta, L., Capet, X., Jouanno, J., Machu, E., Ndoye, S., et Sow, B. (2018). A model perspective on the dynamics of the shadow zone of the Eastern tropical North Atlantic. *Ocean Science*, 14(5), 971-997. <https://doi.org/10.5194/os-14-971-2018>
 134. Le Cozannet, G., Thiéblemont, R., Rohmer, J., et Bulteau, T. (2019). Future coastal flood hazard in the context of climate change: A global assessment. *Nature Communications*, 9(1),
 135. Louise P., 1918. Considérations sur le littoral des environs de Saint-Louis du Sénégal. Bull. Com. Et. Hist. Scient. A.O. F, 1-16.
 136. Leroux, P. (1983). Les vents tropicaux et leur impact sur la dynamique côtière. *Annales de Géographie*, 92(7), 203-214.
 137. Leroux M., 1983. Le climat de l'Afrique Tropicale. Champion ed, Paris/Genève, 1, 633p.

138. Lévêque, A. (1973). Méthode de présentation des résultats de l'analyse granulométrique des sables en vue de leur interprétation pour les sols développés sur le socle granito-gneissique au Togo. ORSTOM, Service des sols et de la conservation des eaux et des forêts.
139. Lohr, S. L. (2010). Sampling: Design and Analysis (2nd ed.). *Brooks/Cole, Cengage Learning*.
140. Louisseau, L., Sy, O., et Ndiaye, P. (2019). Erosion côtière et télédétection : Cas du littoral sénégalais. *Journal of Coastal Research*, 35(3), 540-552.
141. Luijendijk, A., Hagenaaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., et Aarninkhof, S. (2018). The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8, 6641.
142. Lussault M., Levy J., 2003. Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés.
143. MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 1, 281-297.
144. Marchand, M. (2010). Concepts et science pour la gestion de l'érosion côtière. *Springer Science et Business Médias*.
145. Manno, G., Anfuso, G., Messina, E., et Williams, A. T. (2022). An approach for the validation of a Coastal Erosion Vulnerability Index (CVI). *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 23. <https://doi.org/10.3390/jmse11010023>.
146. Marico, L. (1996). Les vents et la dynamique littorale des côtes sablonneuses : étude comparative des effets des vitesses éoliennes sur le transport sédimentaire. *Revue de Géographie Physique*, 32(4), 215-227.
147. Marico D., 1996. Contribution à l'étude géomorphologique des côtes mauritaniennes : du Cap Timiris à Ndiago. Thèse de Doctorat de troisième cycle (Diplôme de Recherches Approfondies : DRA) - Option Géographie physique, Université des Lettres, des Arts et des Sciences humaines - Tunis I, Tunis, 227 p.
148. Martonne E De., 1909. Traité de la géographie physique. A. Colin, Paris, 910 p.
149. Masse J P., 1968. Contribution à l'étude des sédiments actuels du plateau continental de la région de Dakar (République du Sénégal). Essai d'analyse de la sédimentation biogène. Rapport N° 23, Laboratoire de Géologie de la Faculté des sciences de l'Université de Dakar, 84 p.
150. Masselink, G., et Hughes, M. G. (2003). Introduction to coastal processes and geomorphology. *London: Hodder Arnold*.

151. Masselink, G., Hughes, M. G., et Knight, J. (2014). Introduction to coastal processes and geomorphology (2nd ed.). *Routledge*. <https://doi.org/10.4324/9780203785461>
152. Mathieu L., 2014. Cartographie et analyse de l'aléa instabilité sur les falaise et talus rocheux du littoral vendéen. Mémoire de Master, institut de géographie et d'aménagement régional de l'Université de Nantes, 109p.
153. McFeeters S K., 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, p 17-20.
154. McIvor, A. L., Spencer, T., Möller, I., et Spalding, M. (2012). Storm surge reduction by mangroves. *Natural Coastal Protection Series: Report 1*. https://www.naturalcoastalprotection.org/wpcontent/uploads/2012/03/StormSurgeReductionbyMangroves_NCP_Report_1.pdf.
155. Mensah, A., et Appeaning Addo, K. (2011). Quantitative Analysis of Shoreline Change: *Keta, Ghana*. *Mathematical Sciences*, 5(1), 23-34.
156. MEPN. (2019). Rapport national sur la vulnérabilité des zones côtières du Sénégal. Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature, Dakar.
157. Michel-Guillou E ; Meur-Ferec C., 2016. Representation of coastal risk (erosion and marine flooding) among inhabitants of at-risk municipalities, *Journal of Risk Research*.
158. Ministère de la protection de la Nature., 1997. Communication initiale du Sénégal à la convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques.
159. Ministère de l'Environnement et du développement durable : Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés, Rapport de la DEEC en 2019 sur l'Elaboration de scénarios climatiques dans le cadre du volet adaptation de la Contribution Déterminée au niveau National (CDN). 2019, 21p.
160. Mittelstaedt, E. (1991). The ocean boundary along the northwest African coast. *Progress in Oceanography*, 26(4), 307-355. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90011-A](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90011-A)
161. Miossec A., 1998. Les littoraux entre nature et aménagement, SEDES, 200p.
162. Moore L J., Grayson R B., Ladson A R., 1994. Digital modelling: Review of hydrological, geomorphological and biological application. *Advance in Hydrological Processes. Terrain analysis and distributed modelling in Hydrology*, New York, p 7-34.
163. Morduch J., 1994. Poverty and vulnerability. *American Economic Review Papers and proceedings*, 84, N°2, 221-225.
164. Moriconi-Ebrard, F., Harre, D., et Heinrigs, P. (2016). Urbanisation dynamics in West Africa 1950-2010: *Africapolis I, 2015 update*. *OECD Publishing*. <https://doi.org/10.1787/9789264252233>

165. Morton R A., Miller T L., Moore L J. (2004). National assessment of shoreline change: Part 1: Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the U.S Gulf of Mexico: *USGS Open-File Report 2004-1043*, 45p.
166. Martonne E. (de), 1909. *Traité de la Géographie physique*. A. Colin, Paris, 910p.
167. Moussaid J., Fora A Colling., Zourarah B., Maanan M., Maanan M., 2015. Using automatic computation to analyze the rate of shoreline change on the Kenitra coast, Morocco. *Ocean Engineering* N°102, 71-77.
168. NAP Global Network. (2024). PNA sensible au genre - Sénégal. [Plan-national-adaptation-genre-senegal.pdf](#) IUCN (2000). *Gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal*. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/WTL-009.pdf>
169. Nardari B., 1993. *Analyse de la houle sur les côtes du Sénégal. Application à la pointe de Sangomar, rapport de stage UTIS, ISRB/ORSTOM, Dakar*, p 31.
170. Ndao M., 2012 : *Dynamiques et gestions environnementales de 1970 à 2010 des zones humides au Sénégal : étude de l'occupation du sol par télédétection des Niayes, Djidah, Thiaroye Kao (à Dakar), Mboro (à Thiès) et Saint-Louis*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 371p.
171. Ndaw N., 2008. *Problématique de la gestion des espaces halieutiques et des infrastructures de Pêche sur la Langue de Barbarie, Mémoire de Maitrise, Université Gaston Berger de Saint-Louis*, 119p.
172. Ndiaye, S. (2015). *Dynamique du littoral et processus d'érosion le long des côtes pauvres en sédiments : aperçus de l'Afrique de l'Ouest*. *Coastal Engineering Journal*, 92, 120-135.
173. Ndiaye, A., Diop, O., et Faye, G. (2020). "Érosion côtière et impacts anthropiques sur la Petite-Côte du Sénégal." *Revue de Géomorphologie Tropicale*, 8(2), 45-63.
174. Ndiaye-Dia M., 2016. *Dynamique, vulnérabilité socio-économique et gouvernance des littoraux de Saly Portudal et de Langue de Barbarie au Sénégal*. Thèse de Doctorat. Université Gaston Berger de Saint-Louis, 342 p.
175. Ndour, A., Sagna, P., et Sall, M. (2020). "Analyse de la variabilité climatique et ses impacts sur l'érosion côtière à Mbour." *Journal Sénégalais de Climatologie et Environnement*, 8(2), 45-62.
176. Ndour, A., Diaw, A. T., et Faye, I. (2018). *Évolution de la flèche de Sangomar (Delta du Saloum, Sénégal) : dynamiques récentes et enjeux environnementaux*. *Revue de Géomorphologie*, 24(2), 145-160.

177. Ndour A., Laïbi R A., Sadio M., Degbé G E., Diaw A T., Oyede L M., Anthony E J., Dussouillez P., Sambou H., Dieye E B., 2018. Management strategies for coastal erosion problems in West-Africa: Analysis, issues, and constraints drawn from the examples of Senegal and Benin. *Ocean et Coastal management* 156, p 92-106.
178. Ndoye, S., Capet, X., Estrade, P., Sow, B., Dagorne, D., Lazar, A., Gaye, A. T., et Brehmer, P. (2014). SST patterns and dynamics of the southern Senegal-Gambia upwelling center. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(12), 8315-8335. <https://doi.org/10.1002/2014JC010242>.
179. Neumann, B., Vafeidis, A.T., Zimmermann, J., et Nicholls, R.J. (2015). Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *PLOS ONE*, 10(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>.
180. Niang, S. (2017). Les effets de l'Harmattan sur les systèmes éoliens et l'érosion des côtes sahéliennes. *Géographie et Climat*, 34(1), 56-68.
181. Niang N A., 2009. Dynamique socio-environnementale et développement local des régions côtières du Sénégal : l'exemple de la pêche artisanale. *Géographie*, Université de Rouen.
182. Niang S., 2017. Dégradation chimique et mécanique des terres agricoles du Gandiolais (littoral Nord du Sénégal). Analyse des dynamiques actuelles d'adaptation. Thèse de Doctorat, Université Gaston Berger de Saint-Louis, 355p.
183. Niang-Diop, I., Diop, S., et Sadio, M. (2020). Changements du trait de côte et vulnérabilité côtière en Casamance (Sénégal). *African Journal of Marine Science*, 42(4), 451-463.
184. Niang, I. (2003). Dynamiques côtières et impacts sur les sociétés de la Petite-Côte sénégalaise (Mémoire de maîtrise). Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
185. Niang-Diop I., 1995. L'érosion sur la Petite-Côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque. Passé - Présent - Futur. Thèse de Doctorat en Géologie Littoral. Université d'Angers. 477p.
186. Nicholls, R. J., et Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985), 1517-1520.
187. Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V. R., Codignotto, J. O., Hay, J. E., McLean, R. F., Ragoonaden, S., et Woodroffe, C. D. (2007). Coastal systems and low-lying areas. In M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, et C. E. Hanson (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*

- Climate Change (pp. 315-356). Cambridge University Press Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. *Cambridge University Press*.
188. Nichols S. et McLaughlin J., 1984. Tide mark or tidal datum: the need for an interdisciplinary approach to tidal boundary delimitation. *The Canadian Surveyor*. Vol. 38, N°3, p193-208.
 189. Noblet M., Seck A., Faye A., Sadio M., Camara I., Bah A., 2018. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable et le bureau d'étude allemande le GIZ (Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit) : Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière au Sénégal (Climate Analytics GmbH, Berlin. 76p.
 190. Normes., 2001. Dictionnaire de l'Environnement. 3ème édition. AFNOR. 262p.
 191. Nourdi, N. F., et al. (2021). Seasonal to decadal-scale shoreline changes along the Bight of Benin. *Marine Geology*, 436, 106-132.
 192. Observatoire du Côte Aquitaine., 2016. Les risques côtiers.
 193. ONERC., 2007. Stratégie Nationale d'Adaptation au Changement Climatique, La Documentation française, 2007, 95 p. ISBN : 978-2-11-006618-3. PAHO, 1994... 206 p.
 194. Pajak M J et Leatherman S., 2002. The high-water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, vol. 20, N°3, p 6-9 PAPSEN. (2015). Etude préliminaire sur l'horticulture dans les régions de Thiès, Diourbel et Fatick. Rapport N° 12, Mai 2015.
 195. Paskoff, R. (1998). Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution. Armand Colin.
 196. Paskoff, R. (2001). Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution. Armand Colin.
 197. Paskoff, R. (2004). Les littoraux : impacts des aménagements sur leur évolution. Collection Géographie. Armand Colin.
 198. Paskoff, R. (1993). Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution. Masson.
 199. Paskoff R., 1981. L'érosion des côtes. Collection Que sais-je ? Edition P.U.F., Paris, 127p.
 200. Petit M., 2013. What does the new IPCC report say about climate change? Que dit le nouveau rapport du GIEC sur le changement Climatique ? France.

201. Philipon P. (1999). Le transport éolien des sédiments sur les côtes semi-arides : le cas du Sénégal. *Journal of Coastal Studies*, 16(2), 123-136.
202. Philippon S., 1999. La côte de Nouakchott (Mauritanie) : une évolution naturelle et anthropique. Mémoire de Maitrise en Géographie, Université Paris 1/ Panthéon-Sorbonne, Paris, 165p.
203. PNACC. (2016). Plan National d'Adaptation aux Changements Climatiques du Sénégal. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, Dakar.
204. PNUE. (1985). Méthodologie d'inventaire et de contrôle de l'érosion côtière dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre : Rapports et études des mers régionales (n° 107), 107p.
205. Pouye, I., Adjoussi, D., Ndione, J., Sall, A., Adjaho, K., et Gomez, M. (2022). Coastline dynamics analysis in Dakar Region, Senegal, from 1990 to 2040. *American Journal of Climate Change*, 11(3), 345-361.
206. Quelennec R E., 1987. Erosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre : causes naturelles et anthropiques, prospective et conséquences pour la protection et l'aménagement du littoral. *Nature et Ressources*, vil. XXIII, n°3-4, p. 2 - 9.
207. Quenault B., 2013. Sur le champ/Sur le Terrain, politique et pratique de résilience : Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique. *Open Edition Journal*, N°24.
208. Ranasinghe, R., Stive, M. J. F., et Cowell, P. J. (2013). Coastal erosion and shoreline variability: mechanisms, forecasts and management. *Earth-Science Reviews*, 123, 1-2.
209. Rebert J P., 1983. Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. *Doc. Scient., CRODT/ISRA*, 89, 99 p.
210. Riffault A., 1980. Les environnements sédimentaires actuels et Quaternaires du plateau continental sénégalais (Sud de la Presqu'île du Cap-Vert), Thèse 3e cycle, Université de Bordeaux 1, 145p.
211. Robin M., 1984. Physiographie d'un paysage littoral de l'Ouest de la France par traitement d'images aériennes et spatiales. Thèse de Doctorat 3e cycle, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 290p.
212. Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., de Vries, J. v. T., McCall, R., et Lescinski, J. (2009). *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*. *Coastal Engineering*, 56(11-12), 1133-1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>.

213. Roubertou A et Bonneval H., 1965. La photographie aérienne en hydrographie marine. In (CHEVALIER R., Ed) La photographie aérienne. Panorama intertechnique. Gauthier - Villars Editeur, Paris, p. 51-56.
214. Roussel S., 2007. Efficacité d'une gestion intégrée des zones côtière (GIZC), Thèse de Doctorat, Université de Montpellier 1, 264p.
215. Ruë, O. (2002). Évolution de l'environnement physique de l'estuaire de Gambie : Impacts possibles des modifications du régime du fleuve sur les mangroves (Rapport technique, 42 p.). Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie (OMVG) / Cabinet Gressard.
216. Ruë O., 2005. Evolution du régime des vents des côtes en Afrique de l'Ouest, Parc National du Banc d'Arguin.
217. Ruggiero P., Kaminsky G M., Gelfenbaum G., 2003. Linking proxy-based and datum-based shoreline on a high-energy coastline: implications for shoreline change analysis. *Journal of Research*, Special Issue N°38, p 57-82.
218. Sadio, M., Diop, O., Almar, R., et Anthony, E. J. (2017). Shoreline changes on the wave-influenced Senegal River Delta, West Africa: The roles of natural processes and human interventions. *Water*, 9(5), 357. <https://doi.org/10.3390/w9050357>.
219. Lacoste Y., 2003. De la géopolitique aux paysages : dictionnaire de la géographie, Armand Colin, 2003, 413p. <https://doi.org/10.3390/w9050357>.
220. Sadio, M., *et al.* (2022). Multi-decadal dynamics of the Saloum River delta mouth, Senegal. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 266, 107-126.
221. Sadio M., 2017. Morphodynamique et aménagement des flèches littorales de la côte du Sénégal. Thèse de Doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Aix-Marseille Université, 375p.
222. Sagna M. (2005). Les alizés et leur influence sur les climats tropicaux : Le cas de la côte sénégalaise. *Revue de Climatologie Tropicale*, 21(3), 145-157.
223. Sagna P., 2005. Dynamique du climat et son évolution récente dans la partie Ouest de l'Afrique Occidentale. Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Géographie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2006. Tomes I et II, 786p.
224. Sakho, I., Almar, R., Castelle, B., *et al.* (2011). Coastal geomorphology and hydrodynamics along the Senegalese coast. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 128(1-2).
225. Sakho *et al.*, 2019. Vulnérabilité du littoral du Saloum dans un contexte de changement climatique. REFMAR, Mars, Paris La Défense, France.

226. Sall, B. (1982). L'influence des houles de tempêtes sur la dynamique littorale en Afrique de l'Ouest. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 26(1), 45-61.
227. Sall M., 1982. Dynamique et morphogénèse actuelle au Sénégal Occidental. Thèse de Doctorat d'Etat en Lettres, Université Louis Pasteur-Strasbourg, 604p.
228. Samou, M. S., Bertin, X., Sakho, I., Lazar, A., Sadio, M., et Diouf, M. B. (2023). Wave climate variability along the coastlines of Senegal over the last four decades. *Atmosphere*, 14(7), 1142. <https://doi.org/10.3390/atmos14071142>. <https://doi.org/10.3390/atmos14071142>.
229. Sané, T., Camara, A., et Jallow, B. (2017). Coastal erosion and management challenges in The Gambia. *Journal of Coastal Conservation*, 21(3), 355-366.
230. SENAT (France). (1999). Les actions menées en faveur de la politique maritime et littoral de la France, Rapport Piquard, 408p.
231. Serge, B., et Koffi, A. (2017). "Gestion durable du littoral face à l'érosion : approche intégrée et solutions adaptées." *Cahiers d'Études Littorales et Maritimes*, 12(1), 122-138.
232. Sissoko M., 2001. Etat de l'érosion côtière au Sénégal, 60p.
233. Smit Durand P., 2004. L'évolution des plages de l'Ouest du Golfe du Lion au XXe siècle - Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire, analyse prévisionnelle. Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 321 p.
234. Savolainen, R. (2025). The role of discussion sections in research articles: The case of health information-seeking studies. *Information Research*, 30(3), 63-92. <https://doi.org/10.47989/ir30341812>.
235. SONEL. (2023). Global mean sea level trends from satellite altimetry (1993-2023) [Data set]. Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales. Retrieved from.
236. Sow, A. (2018). Dynamique morpho-sédimentaire et vulnérabilité des littoraux de Casamance. Thèse de doctorat, Université Assane Seck de Ziguinchor.
237. Sow A., 2020. Evolution morpho-sédimentaire des plages de la Petite-Côte : cas de la station balnéaire de Saly (Sénégal). Mémoire de Master, Université Assane Seck de Ziguinchor, 115p.
238. Stafford D B et Langfelder J., 1971. Air photo survey of coastal erosion. *Photogrammetric Engineering*, Vol.37, p. 178-206.
239. Stefan et al., 2017. Application of the coastal hazard wheel to assess erosion on the Maltess coast, Institute of Earth Systems, University of Malta, *Ocean et Coastal Management*, 156p. (2018). 209-222.

240. Suárez, S., Paskoff, R., et Costa, S. (2012). Morphodynamique et processus sédimentaires dans les dunes côtières d'Afrique de l'Ouest : étude de cas de Pointe Sarène, Sénégal. *Journal of Coastal Research*, 28(3), 541-552.
241. Sy M A A., 2013. Dynamiques sédimentaires et risques actuels dans la l'axe Saint-Louis-Gandiol, littoral du Nord du Sénégal. Thèse de Doctorat. Université Gaston Berger de Saint-Louis, 328p.
242. Sylla, M. B., Ndiaye, B., et Sall, M. (2019). Vulnérabilité des littoraux sableux au Sénégal : Approche morphodynamique et modélisation des risques d'érosion. *Journal Africain des Sciences Marines*, 27, 85-102.
243. Sylla, M. B., Faye, B., et Giorgi, F. (2020). Impact du changement climatique sur l'érosion côtière au Sénégal. *Changement Climatique*, 161(3), 455.
244. Sylla, M. B., Ndiaye, M., et Faye, S. (2018). "Impacts du climat et des vents sur la morphologie côtière du delta du Saloum." *Journal Africain de Géographie Physique*, 7(1), 112-130.
245. Syvitski, JPM, et Saito, Y. (2007). Morphodynamique des deltas sous l'influence des humains. *Global and Planetary Change*, 57(3-4), 261-282.
246. Tahri M., Maanan M., Bouksim H., Hakdaoui M. (2017). Using Fuzzy Analytic Process multi-criteria and automatic computation to analyse coastal vulnerability. *Physical Geographie*, Vol. 41(3) 268-285.
247. Taylor, L., et al. (2018). Le transport éolien des sédiments et ses effets sur les écosystèmes côtiers. *Journal of Sedimentary Processes*, 56(4), 78-89.
248. Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., et Ergul, A. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-An ArcGIS extension for calculating shoreline change (*US Geological Survey Open-File Report 2008-1278*).
249. Thieler E R., O'Connell J F., Schupp C A., 2001. The Massachusetts shoreline change project 1800s to 1994. Technical report, USGS, Woods Hole, 39p.
250. Thieler E R., Martin D., Ergul A. (2005). The Digital Shoreline Analysis System, version 2.0 Shoreline change measurement software extension for ArcView: *USGS Open-File Report 03-076*.
251. Thior *et al*, 2019., Érosion côtière et impacts socioéconomiques dans la commune de Diembéring en basse Casamance (Sénégal). *Bulletin de l'IFAN Cheikh Anta Diop, Série B, Sciences Humaines*, 21p.

252. Thior, M. (2021). L'aménagement du littoral de la Casamance. Études caribéennes. <https://napglobalnetwork.org/wp-content/uploads/2024/03/napgn-fr-2024-plan-national-adaptation-genre-senegal.pdf>.
253. Thior M., Bâ D., Sy A A., Cisse I., Dièye E H., Sané T., Solly., Descroix L. (2021). Approche cartographique de l'évolution du trait de côte dans l'estuaire de la Casamance. Mappemonde, 131-2021. URL : <https://journals.openedition.org/mappemonde/5939>.
254. Thior M., 2020. Dynamique du littoral de la Casamance : caractéristiques morphodynamiques, changements environnementaux et impacts socioéconomiques. Thèse de Doctorat. Université Assane Seck de Ziguinchor, 388p.
255. Thomas Y F., Diaw A T., 1997. Suivi (1984-1993) de la rupture de la flèche de Sangomar, Estuaire du Fleuve Saloum, Sénégal, Photo-Interprétation, N°.3-4, 199-208.
256. Timmerman P., 1981. Vulnerability, resilience and the collapse of society. *Institute for Environmental Study*, 46 P.
257. Tisseron S., 2009. La résilience. Que Sais-Je, Paris, PUF, 3ème édition Doi : 10.3917/puf.tisse.2017.02.
258. Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276.
259. Tounkara, M. (2016). Le rôle des précipitations dans le transport des sédiments en milieu côtier au Sénégal. *Revue des Sciences et Techniques*, 54(2), 98-115.
260. Touré B., 2012. Dynamique du trait de côte : Actualisation des vitesses d'évolution du trait de côte et premières réflexions sur les rythmes d'évolution : cas du littoral Normand-picard, rapport de stage, Université de Nantes, 94p.
261. Trépanier I J., Dubois M M., Bonn F., 2010. Suivi de l'évolution du trait de côte à partir d'images RHV (XS) de SPOT : Application au Delta du fleuve Rouge, Viêt-Nam, *International Journal of Remote Sensing*, 23 :5,917-937, Doi : 10.1080/01431160110070348.
262. Turmine V., 2000. La dynamique littorale entre Mbour et Joal (Petite-Côte, Sénégal). Mémoire de Maîtrise Géographie, Université Paris VII, 249 p.
263. UNEP. (2006). Africa Environment Outlook 2 - Our Environment, Our Wealth. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/africa-environment-outlook-2-our-environment-our-wealth> WACA / World Bank (2019). West Africa Coastal Areas Management Program. <https://www.unep.org/resources/africa-environment-outlook-2-our-environment-our-wealth>.

264. UNESCO/IOC. (2001). Steps and Tools Towards Integrated Coastal Area Management. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers21-03/010028103.pdf
WACA - World Bank. West Africa Coastal Areas Management Program. <https://www.wacaprogram.org/> WACA - Senegal country page.
265. UNESCO (2001). Methodological Guide to Integrated Coastal Management. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000121249>.
Doi.org/10.3390/coasts4020016.
266. UNFCCC. (1992). Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 33p.
267. UNFCCC. (2022). PNA - Secteur zones côtières - Sénégal (PDF). https://unfccc.int/sites/default/files/resource/PNA_du_secteur_des_zones_cotieres_2022_Senegal_FR.pdf UNFCCC (2025). Plan national d'adaptation - Sénégal. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/PNA_du_secteur_des_zones_cotieres_2022_Senegal_FR.pdf.
268. USGS. (2009). Le système d'analyse numérique du littoral (DSAS) version 4.0- Une extension ArcGIS pour le calcul des changements du littoral. Institut Géologiques des États-Unis. N°2008-1278. Doi: 10.3133-ofr2008-1278.
269. Van H., Sublet F., Debouverie T., 2012 Mer et littoral : érosion côtière. Disponible à l'adresse : [valention.bors.free.fr/Mer-et littoral /G1%20%20%E9rosion%20cotiere.pdf](http://valention.bors.free.fr/Mer-et_littoral/G1%20%20%E9rosion%20cotiere.pdf).
270. Veyret et Reghazza., 2006. « Vulnérabilité et risques l'approche récente de la vulnérabilité » RESPONSABILITE et ENVIRONNEMENT N°43 Juillet 2006, 9p.
271. Vousdoukas, M. I., Ranasinghe, R., Mentaschi, L., et al. (2020). Coastal flooding and erosion in the face of climate change: Global assessment and projections. *Nature Communications*, 10(3).
272. Wade C T., 2008. Ecosystème et environnement problématique de la gestion durable des usages littoraux au niveau de la Grande Côte sénégalaise, Thèse de Doctorat, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 302p.
273. Walker B., Holling C S., Stephen R., Carpenter., Kinzig A., 2004. Resilience, adaptability and transformability in socio-ecological systems. *Ecology and society*, Volume 9, article n°2. Repéré à <http://ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>.
274. Weissenberger S et al., 2016. Changements climatiques et changements du littoral et évolution de la vulnérabilité côtière au fil du temps : comparaison des territoires

français, canadien et sénégalais. VertigO- La revue électronique en science de l'environnement.

275. Weissenberger S et Chouinard O., 2015. Le rôle d'internet et des technologies de l'information et de la communication dans le partage de connaissance sur l'adaptation des communautés côtières aux changements climatiques : retour sur l'expérience de création d'un contenu en ligne. VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, hors-série 23. Repéré à <https://vertigo.revues.org/16748>. Doi : 10.4000/vertigo.16748.
276. Youm, C. I., Gueye, A., García-Villalba, E., Doumbouya, M. F., Sow, I.-S., Sow, E., et Morales, J. A. (2024). Lithofacies and sediment sequences of a microtidal, wave-dominated tropical estuary in Somone Lagoon (Senegal, West Africa). *Coasts*, 4(2), 306-322. <https://doi.org/10.3390/coasts4020>.

Listes des illustrations

Table des cartes

Carte 1 : Localisation de la zone d'étude	32
Carte 2 : Sensibilité des sols à l'érosion côtière entre la Petite-Côte et le delta du Saloum (IVC : Indice de Vulnérabilité Côtière) adapté de Manno et al., 2022).....	35
Carte 3 : Réseau hydrologique de la Petite-Côte au delta du Saloum.....	39
Carte 4 : Localités de nos interlocuteurs (enquêtes de terrain)	52
Carte 5 : Bathymétrie du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum	139
Carte 6 : Modèle Numérique de Terrain de la Petite-Côte au delta du Saloum	141
Carte 7 : Évolution de la population des communes de la zone d'étude entre 2002 et 2023	153
Carte 8 : Évolution de l'occupation des sols sur la Petite-Côte au delta du Saloum de 1973 à 2025	156
Carte 9 : Changements d'occupation des sols sur la période 1973-2025.....	159
Carte 10 : Évolution du trait de côte de la Petite-Côte sénégalaise au delta du Saloum de 1973 à 1987	201
Carte 11 : Évolution du trait de côte de la Petite-Côte au delta du Saloum de 1987 à 2002.....	203
Carte 12 : Évolution du trait de côte de la Petite-Côte au delta du Saloum de 2002 à 2013.....	206
Carte 13 : Évolution du trait de côte de la Petite-Côte au delta du Saloum de 2013 à 2024.....	209
Carte 14 : Synthèse de l'évolution du trait de côte de la Petite-Côte au delta du Saloum de 1973 à 2024.....	211
Carte 15 : Projections de l'évolution du trait de côte de 2024 à 2055 de la Petite-Côte au delta du Saloum.....	227
Carte 16 : Projections de l'évolution du trait de côte de 2024 à 2075 de la Petite-Côte au Delta du Saloum.....	230
Carte 17 : Projections de l'évolution du trait de côte de 2024 à 2100 de la Petite-Côte au Delta du Saloum.....	233

Table des figures

Figure 1 : Schémas d'analyse du concept de littoral	18	
Figure 2 : Schémas d'analyse du concept de dynamique	20	
Figure 3 : Schémas d'analyse du concept de vulnérabilité.....	23	
Figure 4 : Deux scènes d'images qui couvrent la zone d'étude (A) ; Fusion des images : mosaïque (B)	63	
Figure 5 : Image à corriger	Figure 6 : Image de référence	64
Figure 7 : Image géoréférencée	Figure 8 : Tableau des GCP.....	64
Figure 9 : Extraction de la zone d'étude.....		65
Figure 10 : Lignes de références géomorphologiques (Réalisation : Yade, 2025).....		68
Figure 11 : Limites de végétation dunaire et pérenne (Source : Boak et Turner, 2005 ; Modifié par Faye, 2010).....		70
Figure 12 : Lignes de références marégraphiques.....		74
Figure 13 : Limite terre-mer (Source : Image Landsat 9).		76
Figure 14 : Schéma de différentes lignes de référence du trait de côte (source : Boak et Turner, 2005 ; adapté et traduit par le BRGM, 2012).		77
Figure 15 : Schéma récapitulatif du protocole d'extraction du trait de côte		80
Figure 16 : Les entités d'une géodatabase personnalisée		82

Figure 17 : Résultats des calculs des indices.....	85
Figure 18 : Représentation graphique des transects	86
Figure 19 : Composition colorée 754 (image 2024).....	93
Figure 20 : Indice de séparabilité	94
Figure 21 : Coefficient Kappa	95
Figure 22 : Terrain d’entraînement (A) ; Tableau des ROIs (B) : image 1973.	95
Figure 23 : Facteurs naturels de la dynamique du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, selon la population (données enquêtes 2025).....	102
Figure 24 : Fréquence en moyenne de la direction des vents à Mbour (données climat NASA 1981-2022).....	106
Figure 25 : Fréquence en moyenne de la direction des vents au delta du Saloum (données climat NASA 1981-2022).	108
Figure 26 : Variations de la vitesse moyenne des vents à Mbour de 1981 à 2022 (données climat NASA 1981-2022).	109
Figure 27 : Variations de la vitesse moyenne des vents au delta du Saloum de 1981 à 2022 (données climat NASA 1981-2022).	111
Figure 28 : Évolution des indices de la pluviométrie sur le littoral de la Petite-Côte sénégalaise, Mbour. (Données Nasa).	115
Figure 29 : Évolution des indices de la pluviométrie sur le littoral de la Petite-Côte sénégalaise, Palmarin (Données Nasa).	116
Figure 30 : Évolution des indices la pluviométrie sur le littoral de la Petite-Côte sénégalaise, Toubacouta (Données Nasa).....	117
Figure 31 : Évolution des indices des températures moyennes sur le littoral de la Petite-Côte dans le département de Mbour, 1981 à 2022. (Données Nasa).	119
Figure 32 : Évolution des indices des températures moyennes sur le littoral de la Petite-Côte (Palmarin), 1981 à 2022. (Données Nasa).....	120
Figure 33 : Évolution des indices des températures sur le littoral de la Petite-Côte sénégalaise, Toubacouta (Données Nasa).....	122
Figure 34 : Variations des houles sur la Petite-Côte sénégalaise	125
Figure 35 : Directions des houles habituellement observées sur le littoral sénégalais, de la Petite-côte au delta du Saloum.	127
Figure 36 : Caractéristiques des vagues au large des côtes du Sénégal (source : Nardari, 1993).	129
Figure 37 : Évolution journalière de la marée de type semi-diurne (source : Elie, 2006).....	131
Figure 38 : Evolution de l’élévation du niveau global de la mer entre 1993 et 2021 (NASA, 2022).134	
Figure 39 : Projection de l’élévation du niveau moyen mondial de la mer au cours du 21e siècle (Source : IPCC, 2013).	137
Figure 40 : Profils topographiques de la zone de Mbour	143
Figure 41 : Profils topographiques de la zone de Fatick.	145
Figure 42 : Profils topographiques de la zone de Foundiougne	147
Figure 43 : Les facteurs anthropiques qui influencent la dynamique du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum selon la population (données d’enquêtes, 2025).....	150
Figure 44 : Évolution de l’occupation des sols du littoral de la Petite-Côte au delta du Saloum sur la période 1973-2025 (source : Image Landsat).....	160
Figure 45 : Courbes granulométriques du site sud du secteur de Béttenty.....	193
Figure 46 : Perception des populations sur la submersion marine et/ou fluviale (données d’enquêtes, 2025).....	247
Figure 47 : Nombre d’hectares perdus selon la population de la zone d’étude (données d’enquêtes, 2025).....	269

Figure 48 : Types de stratégies de lutte contre l'érosion côtière sur la Petite-Côte sénégalaise selon la population (données d'enquêtes, 2025).....	273
Figure 49 : Perception de la population sur l'efficacité des stratégies individuelles non-structurelles (données d'enquêtes 2025).....	293
Figure 50 : Perception de la population sur l'efficacité des stratégies de politiques publiques (données d'enquêtes)	296

Table des tableaux

Tableau 1 : Nombre de ménages par quartier ayant fait l'objet d'enquêtes.....	55
Tableau 2 : Objectifs et apports des enquêtes socio-économiques	57
Tableau 3 : Données Géospaciales	59
Tableau 4 : Caractéristiques en eau profonde des houles longues au large des côtes sénégalaises	124
Tableau 5 : Répartition des échantillons	173
Tableau 6 : Interprétation granulométrique selon la Norme européenne NF NE 12620	175
Tableau 7 : Synthèse de l'évolution moyenne du trait de côte du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum, de 1973 à 2024.....	213
Tableau 8 : Comparaison des taux d'évolution du trait de côte des années 1970 à aujourd'hui.....	215
Tableau 9 : Marges d'erreur globales.....	224
Annexe 1 : Tableau 10 : Récapitulatif des caractéristiques granulométriques de la Petite-Côte (Mbour, Djiffer et Bétenty)	V
Annexe 2 : Tableau 11 : Récapitulatif des sources de données mobilisées pour l'analyse et les projections du trait de côte	VII
Annexe 3 : Tableau 12 : de la marge d'erreur globale	VIII
Annexe 4 : Tableau 13 : comparatif par Secteurs, vulnérabilités, indicateurs et stratégies	IX

Table des photos et planches

Photo 1 : Traces de prélèvement de sable marin à Bétenty	161
Photo 2 : Une centrale solaire construite sur la plage de Bétenty (Image Google earth, 2025)	163
Photo 3 : Plateforme offshore de Sangomar (ADS services, juin 2024)	169
Photo 4 : Érosion à la plage à Teffess, Mbour (Yade, Avril 2025)	242
Photo 5 : Dune de sable érodée à Bétenty (Yade, Avril 2025).....	244
Photo 6 : Hôtel attaqué par l'érosion côtière à la station balnéaire de Saly Portudal (Yade, Février 2022).....	267
Photo 7 : Secteurs d'intervention du programme de restauration des plages de Saly (APIX, 2017) ..	288

Planche photographique 1 : Ouvrages de protection sur la Petite-Côte sénégalaise (A : Saly Portudal ; B : Pointe Sarène ; C : Djiffer ; D : Bétenty)

Planche photographique 2: Infrastructures de protection occasionnant le transfert de risque (A : Saly Portudal ; B : Bétenty) (Yade, Avril 2025)

Au total, 36 échantillons de sédiments ont été collectés dans trois localités représentatives de la Petite-Côte sénégalaise aux îles du Saloum : Mbour (nord de la zone d'étude, département de Mbour), Djiffer (centre de la zone, département de Fatick) et Bétenty (sud de la zone, département de Foundiougne) (planche photographique 3). Dans chaque localité, deux sites distants d'environ 100 m ont été sélectionnés afin d'évaluer la variabilité granulométrique, l'homogénéité des dépôts et d'identifier d'éventuels liens génétiques entre les sédiments.....

Planche photographique 4: Localités de prélèvement (A) d'échantillons granulométriques (image google earth) ; B : Photo campagne de prélèvement à Djiffer (Avril 2025)

Planche photographique 5: Appareils utilisés pour l’analyse granulométrique au laboratoire du département de physique de l’UASZ	174
Planche photographique 6: Dégradation des espèces végétales par l’érosion côtière : A (Béttenty : Yade, Avril 2025) ; B (Dionewar : image Dmédia, 2018) ; C (Teffess : Yade, Avril 2025) ; D (Saly Portudal : image Sénégal7, 2018).....	246
Planche photographique 7: Destrutions d’habitations le long du littoral sénégalais, de la Petite-Côte au delta du Saloum (A : Golf ; B : Djiffer ; C : Teffess ; D : Darou Salam 1) (Avril 2025)	254
Planche photographique 8: Destrutions d’infrastructures : (A : Pont de Dionewar, image Dmedia 2018 ; B : Case des tous petits à Saly Niakh Niakhal, image google earth 2020 ; C : Hôtel à Saly Portudal, Yade 2022 ; D : Quai de pêche Pointe Sarène, Yade, 2025)	256
Planche photographique 9 : Incidences de l'érosion sur la pêche : (A : destruction de pirogues par les houles à Golf ; B : rétrécissement des espaces d’activités à Mbour, vue aérienne image google earth 2025).....	261
Planche photographique 10: Perte de plage à Saly Portudal image Google Earth (A : 2003 ; B : 2019).....	265
Planche photographique 11: Terres salées devenues des tannes : (A : Palmarin ; B : Béttenty) (Yade, Avril 2025)	271
Planche photographique 12: Stratégies individuelles non-structurelles de lutte contre l’érosion côtière (A : Dionewar, image Dmédia 2018 ; B : Pointe Sarène, Yade, 2025 ; C : Golf, Yade, Février 2022 ; D : Golf, Yade, avril 2025).....	276
Planche photographique 13: Stratégies collectives non-structurelles A et B à Béttenty ; C et D à Dionewar (Yade, Avril 2025).....	278
Planche photographique 14: Stratégies de politiques publiques non structurelles (A : image APIX, 2019 ; B, Pointe Sarène : Yade, Avril 2025).....	280
Planche photographique 15: Stratégies structurelles collectives à Béttenty (Yade, Avril 2025).....	282
Planche photographique 16: Stratégies structurelles collectives à Djiffer (Yade, Avril 2025).....	283
Planche photographique 17: Enrochement aux abords des hôtels à la station balnéaire de Saly Portudal (Yade, Février 2022).....	284
Planche photographique 18: Stratégies structurelles de politiques publiques à la station balnéaire de Saly Portudal (Yade, Avril 2025).....	289
Planche photographique 19: Évolution de la plage de Saly entre 2003, 2019 et 2025 (image Google Earth).....	290

Annexes

Annexe 1 : Tableau 10: Récapitulatif des caractéristiques granulométriques de la Petite-Côte (Mbour, Djiffer et Bétenty)

Échantillons	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu = D60/D10	Cc = (D30 ²) /(D60×D10)	Module de Fitness (MF)
Mbour						
Site Nord						
Plage Immergée- Horizon 0 cm	0,157	0,229	0,323	2,06	1,03	1,70
Plage Immergée- Horizon 20 cm	0,171	0,263	0,380	2,22	1,06	2,03
Estran -Horizon 0 cm	0,168	0,251	0,345	2,05	1,09	1,87
Estran-Horizon 70 cm	0,210	0,304	0,386	1,84	1,14	2,10
Haute Plage - Horizon 0 cm	0,163	0,239	0,319	1,96	1,10	1,66
Haute Plage - Horizon 70 cm	0,15	0,178	0,294	1,96	0,72	1,44
Site sud						
Plage Immergée- Horizon 0 cm	0,231	0,298	0,362	1,57	1,06	1,91
Plage Immergée- Horizon 20 cm	0,168	0,263	0,368	2,19	1,12	1,95
Estran -Horizon 0 cm	0,149	0,21	0,307	2,06	0,96	1,56
Estran-Horizon 70 cm	0,155	0,221	0,319	2,06	0,99	1,66
Haute Plage - Horizon 0 cm	0,134	0,16	0,197	1,47	0,97	1,15
Haute Plage - Horizon 70 cm	0,13	0,182	0,272	2,09	0,94	1,41
Djiffer						
Site Nord						
Plage Immergée- Horizon 0 cm	0,191	0,285	0,345	1,81	1,23	1,80
Plage Immergée- Horizon 20 cm	0,251	0,339	0,584	2,33	0,78	3,02
Estran -Horizon 0 cm	0,160	0,231	0,319	1,99	1,05	1,64
Estran-Horizon 70 cm	0,217	0,324	0,506	2,33	0,96	2,77
Haute Plage - Horizon 0 cm	0,200	0,293	0,350	1,75	1,23	1,85
Haute Plage - Horizon 70 cm	0,168	0,259	0,345	2,05	1,16	1,87

Site sud						
Plage Immergée- Horizon 0 cm	0,146	0,185	0,259	1,77	0,91	1,43
Plage Immergée- Horizon 20 cm	0,178	0,341	0,641	3,60	1,02	3,00
Estran -Horizon 0 cm	0,179	0,276	0,345	1,93	1,23	1,78
Estran-Horizon 70 cm	0,271	0,318	0,374	1,38	1,00	2,01
Haute Plage - Horizon 0 cm	0,177	0,267	0,334	1,89	1,21	1,76
Haute Plage - Horizon 70 cm	0,179	0,272	0,345	1,93	1,20	1,80
Béttenty						
Site Nord						
Plage Immergée- Horizon 0 cm	0,141	0,177	0,251	1,78	0,89	1,38
Plage Immergée- Horizon 20 cm	0,139	0,182	0,267	1,92	0,89	1,42
Estran -Horizon 0 cm	0,136	0,157	0,185	1,36	0,98	1,05
Estran-Horizon 70 cm	0,153	0,207	0,298	1,95	0,94	1,56
Haute Plage - Horizon 0 cm	0,132	0,158	0,197	1,49	0,96	1,14
Haute Plage - Horizon 70 cm	0,136	0,16	0,203	1,49	0,93	1,19
Site sud						
Plage Immergée- Horizon 0 cm	0,200	0,285	0,350	1,75	1,16	1,83
Plage Immergée- Horizon 20 cm	0,146	0,179	0,246	1,68	0,89	1,46
Estran -Horizon 0 cm	0,136	0,158	0,188	1,38	0,98	1,10
Estran-Horizon 70 cm	0,143	0,194	0,289	2,02	0,91	1,49
Haute Plage - Horizon 0 cm	0,139	0,163	0,200	1,44	0,96	1,20
Haute Plage - Horizon 70 cm	0,132	0,155	0,185	1,40	0,98	1,05

Source : Relevés *in situ*, Avril 2025

Annexe 2 : Tableau 11: Récapitulatif des sources de données mobilisées pour l'analyse et les projections du trait de côte

Type de données	Source / Organisme	Période couverte	Utilisation principale
Imagerie satellitaire	Landsat MSS, TM, ETM+, OLI (USGS/NASA)	1973-2024	Extraction diachronique des traits de côte
	Sentinel-2 (ESA/Copernicus)	2015-2024	Affinement récent de la ligne de rivage
Données climatiques (températures, pluviométrie et vents)	(USGS/NASA)	1981-2024	Influences sur la variation de la dynamique du trait de côte
Données océanographiques	NOAA / ERA5 (ECMWF)	1980-2024	Hauteur significative de houle, direction
	GEBCO	Variable	Bathymétrie du littoral et des estuaires
	WW3 (WaveWatch III)	2017-2025	Forçage houle/vents dans la modélisation
Données topographiques	Diva gis	Variable	Modèle numérique de terrain
Données granulométriques	Prélèvements de terrain (2025)	Campagnes avril, 2025	Caractérisation sédimentaire des plages
Occupation du sol	Classification supervisée (ENVI) à partir d'images satellitaires	2025	Analyse de l'occupation du sol
Ouvrages de protection côtière	Image google earth	2025	Localisation et intégration dans le modèle
Enquêtes	<i>In situ</i>	Avril, 2025	Perceptions de la population locale
Traitements et projections	Yade (2025)	2024-2100	Modélisation prospective (scénarios O, C, P)

Annexe 3 : Tableau 12: de la marge d'erreur globale

Erreurs/dates	1973	1987	2002	2013	2024
Erreur liée aux pixels	±15	±15	±15	±15	±15
Erreur d'ortho-rectification (RMS)	0,27	...	...	...	...
Erreur liée à l'oscillation de la marée	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Erreur de positionnement Globale du Trait de côte	±15,008	±15,001	±15,001	±15,001	±15,001
Erreur Globale en moyenne par période en m/an	1973-1987	1987-2002	2002-2013	2013-2024	
	±1,51	±1,41	±1,92	±1,92	
Erreur sur toute la période considérée	1973-2024				
	±0,58				

Annexe 4 : Tableau 13: comparatif par Secteurs, vulnérabilités, indicateurs et stratégies

Secteur	Vulnérabilités physiques/hydro-sédimentaires	Indicateurs clés (extraits)	Enjeux socio-éco	Stratégies proposées
Mbour- Saly	Plages fines-moyennes ; pression touristique ; effets de rive par ouvrages ; sensibilité houles NW/SW.	LRR négative ; pics -11 m/an ; granulométrie mobile en surface.	Tourisme, immobilier, emplois ; fronts bâtis ; pression foncière.	Rechargements nourriciers ; ouvrages souples ; reconstitution dunaire ; zones de recul ; servitudes ; schéma de plages.
Joal-Fadiouth-Pointe Sarène	Segments en retrait, poches d'accrétion ; salinisation ; mangroves locales.	-3,28 à -11 m/an ; accrétion ponctuelle au sud de Joal-Fadiouth.	Pêche artisanale ; habitats vulnérables ; bas-fonds salinisés.	Restauration/extension de mangroves ; digues anti-sel ; by-pass sédimentaire ; PPR submersion ; encadrement du bâti bas.
Palmarin-Djiffer	Forte exposition à la submersion/érosion ; cordons fragiles ; enrichissement granulométrique en profondeur.	Extrêmes -11,6 m/an ; 1 158 transects en érosion ; perte \approx 1 957 m.	Terres agricoles/saliculture ; villages ; voies d'accès ; équipements publics.	Recul stratégique phasé ; renforcement naturel (dunes, plantations) ; ouvrages souples temporaires ; PCA ; indemnisation/relocalisation.
Îles du Saloum (Béttenty, Niodior, Dionouar)	Insularité ; chenaux mobiles ; submersion ; sensibilité aux tempêtes ; pressions émergentes.	Recul bords externes ; accrétion côté mangroves (+1 m/an) ; signaux communautaires récents.	Pêche, transformation ; habitats précaires ; infrastructures critiques.	Digues naturelles (mangroves) ; stabilisation douce ; récifs écologiques pilotes ; sécurisation équipements ; diversification ; PCA.

Annexe 5 : Questionnaire

Fiche

N° :

IDENTIFICATIONS :

Enquêteur :

Prénom et nom

Date de l'enquête :

Lieu de l'enquête.....

Répondant :

Quartier ou localité

PRENOM :

NOM :

TEL :

ADRESSE :

PROFESSION :

Pêcheur Commerçant Fonctionnaire Exploitant de Sel

Guide touristique Employé(e) d'hôtel Restauratrice

Transformatrice Mareyeur Ouvrier Paysan

Agriculteur Autres

Avez-vous une activité secondaire ?

Oui Non

Si oui, laquelle ?

.....

Si non, pourquoi ?

AGE :

0-17 18-65 65 et plus

Ethnie :

Wolof Puulaar Sérère Diola
Bambaras Sarakholé Autres

1-Depuis quand habitez-vous dans ce quartier ?

-5 5-10 10-15 15-20 plus de 20 ans

QUESTIONS RELATIVES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET A L'EROSION COTIERE

2- Connaissez-vous ce qu'on appelle changement climatique ?

Oui non

3-Si oui, comment se manifeste-t-il ?

Inondation vague de chaleur hausse des températures

Sècheresse hausse du niveau de la mer Autres

4- Comment appréciez-vous la température durant ces 30 dernières années ?

Plus chaude Moins chaude constante Pas d'observation

5- Comment appréciez-vous les précipitations durant ces 30 dernières années ?

Augmentation diminution constantes pas d'observation

6-Connaissez-vous le littoral ?

Oui Non

7-Avez-vous remarqué un changement dans votre environnement littoral ?

Oui Non

8-Si oui, comment est ce changement ?

Positif Négatif

9-Comment se manifeste ce changement ?

Recul de la mer

Avancée de la mer

10-Et quels sont les éléments qui vous permettent de dire qu'il y'a une avancée ?

.....
.....

11-L'intensité de l'avancée de la mer

Faible moyenne Forte

12-Cette avancée est-elle saisonnière ou permanente ?

Saisonnière Permanente

13-Si saisonnière, quelle saison avance-t-elle le plus ?

Saison sèche Hivernage

14- Quels phénomènes avez-vous remarqué ?

Avancée stabilité Recul

15- Comment appréciez-vous le rythme d'avancé de la mer ?

Rapide Moyen Lent

16- Les causes de cette avancée sont-elles naturelles ou anthropiques ?

Naturelles Anthropiques

17-Naturelles

Élévation du niveau de la mer Augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues

Topographie du milieu Nature du sol

Autres

18- Comment appréciez-vous le niveau de la mer ?

Élévation Stabilité Baisse Pas d'observation

19-Est-ce que vous avez remarqué une avancée de la mer ?

Oui Non Pas de réponse

20- si oui depuis quand ?

1-10 ans 11-20 ans 21-30 ans +30 ans

21- Combien de mètres par an ?

0.5 à 1m 1 à 2m 2 à 3m 3 et plus

Anthropiques

22-Quelles sont les activités humaines qui expliquent l'avancée de la mer ?

Constructions Occupation anarchique Exploitation marine

Prélèvement de sable

Autres

.....

23-Quel est le type de construction de la concession ?

Traditionnel Moderne Mixte

24-Quel est le type de revêtement de votre concession

Sable Ciment Carreaux

25-Si c'est du sable d'où provient-il ?

Extrait de la plage Carrières Autour de la maison

26-Avez-vous librement accès à la plage

Oui Non Pas totalement

27-Si non ou pas totalement, pourquoi ?

Installation touristique plage éloignée

QUESTIONS RELATIVES AUX IMPLICATIONS DE L'EROSION CÔTIÈRE

28- L'érosion côtière a-t-elle des implications sur votre environnement ?

Oui Non

Si Oui,

29- Positifs Négatifs

30-Quelle est la nature de ces implications ?

Humaine Matérielle et/ou économique Environnementale

31-Implications Matériels et/ou socio-économiques

Destruction des infrastructures hôtelières Destruction des habitats

Inondations Détérioration des activités économiques autour de la plage

Dégradation des terres agricoles

Autres

.....

32- Quels sont les aspects les plus touchés ?

Pertes humaines Dégâts matériels L'économie

33- Comment appréciez-vous la nature des pertes ?

Importante moyenne faible

34- Êtes-vous impactés ?

Oui non

35- si oui directement Ou indirectement

36- Comment êtes-vous impactés ?

.....
.....
.....

37- Quelles sont les activités les plus touchées ?

Pêche Tourisme Hôtellerie Artisanat Commerce

Agriculture Exploitation de Sel Transformation de produits halieutiques

Autres

.....

38- Et pourquoi ?

.....
.....
Dégâts matériels

39- Est-ce que les infrastructures qui se trouvent sur le littoral sont menacées par l'avancée de la mer ?

Oui non

40- Si oui comment ?

Inondation Destruction

41- Est-ce qu'il y'a des constructions qui sont détruites par la mer ?

Oui Non

42- si oui quel genre de constructions ?

Hôtels Habitats Infrastructures

43- Le degré d'importance des destructions :

Très faible faible moyen faible moyen fort fort très fort

Implications sur les activités socio-économiques

44- quelle est votre principale activité ? (Qui génère plus de revenu)

Pêche Tourisme Hôtellerie Artisanat Commerce

Exploitant de Sel Agriculture

45- Autres activités

.....
.....

46- Votre activité a-t-elle une relation avec la mer ou les eaux de surface ?

Oui Non

47- Si oui quelles relations ?

.....
.....

48- Est-ce que votre activité est menacée par l'érosion côtière ?

Oui Non

49- Si oui comment ?

.....
.....

50- Avec l'érosion côtière, pratiquez-vous toujours votre activité ?

Oui Non

51- Si non quelle est votre activité de reconversion ?

.....

Implications sociales

52- Êtes-vous confrontés à des inondations d'origine marine (submersion) ?

Oui Non

53-Si Oui, depuis quand ?

1 à 10 ans 11 à 20 ans 21 à 30 ans 30 et plus

54-Et sur quelle période ?

Hivernage saison sèche les deux

55- Quelles sont les implications de ces inondations ?

.....
.....

56-ET quelles sont les mesures de lutte contre cette submersion marine ?

.....
.....

Implications économiques

L'agriculture

57-Pratiquez-vous l'agriculture ?

Oui Non

58-Avez-vous vos propres terres agricoles ?

Oui Non

59-Si oui, est-ce que vous-en avez déjà perdu à cause de la salinisation et/ou de la submersion ?

Oui Non

60-Si Oui, combien d'hectares ?

1 à 2 2 à 3 3 à 4 4 et plus

61-Quel est l'ampleur de cette perte ?

Faible Moyen fort

62-Quels sont les implications de cette perte de terres sur l'agricultures ?

.....
.....
.....

63-Avez-vous stratégies de lutte contre ces phénomènes ?

Si oui, les Quelles ?

.....
.....
.....

64-Avec qui ?

.....
.....

65-Sont-elles efficaces ?

Inefficaces Faiblement efficaces Moyennement efficaces

Efficaces Fortement efficaces

-Autres

précisions :
.....

Tourisme

66-Vos revenus ont-ils des relations avec le tourisme ?

Oui Non

67-Si oui, lesquelles ?

Employé d'hôtel Guide touristique Artisanat Fournisseur d'hôtel

Transport

Autre à préciser.....

68- Vos revenus émanant du tourisme vous permettent-ils de satisfaire vos besoins ?

Oui Non

69-Si non, comment vous faites pour assurer le reste ?

.....
.....

70-Quels sont les implications de l'érosion côtière sur le tourisme ?

Destruction d'hôtel /campement Dégradation des plages Inondation

Destruction de boutiques artisanales

-Implications environnementaux

Changement environnemental

71-Si y'a salinisation, depuis quand avez-vous remarqué ces phénomènes ?

0 à 10 ans 11 à 20 21 à 30 30 et plus

72- Quels sont les implications de la salinisation sur votre environnement ?

.....
.....

La biosphère

73-Connaissez-vous des espèces végétales ou animales victimes de l'érosion côtière ?

Oui Non

74-Si oui, lesquelles ?

Animales Végétales

Si végétales, lesquelles et comment ?

.....
.....

75- Et quelles implications ?

.....
.....

Si animales, lesquelles et comment ?

.....
.....

76- Et quelles implications ?

.....
.....

QUESTIONS RELATIVES AUX STRATEGIES D'ADAPTATION

77- Avez-vous entrepris des mesures de lutte contre l'érosion côtière ?

Oui Non

78- quel genre ?

Collectives Individuelles

79- Actions individuelles
.....

80- Actions collectives
.....

81-Sont-elles efficaces ?

Moins efficaces efficaces très efficaces mitigées pas efficaces

81- Existe il des actions menées par des partenaires ?

Oui Non

83- Si oui par qui ?

Gouvernement Collectivités locales ONG Autres

84- Comment appréciez-vous les actions des partenaires ?

Moins efficaces efficaces très efficaces mitigées pas efficaces

85- Envisagez-vous d'autres actions ?

Oui Non

86- si oui lesquelles ?

.....
.....

87- Avec qui ?

Gouvernement ONG Partenaires internationaux Associations locales

88- avez-vous des suggestions à faire ?

.....
.....

Annexe 5 : Guides d'entretien

Guide d'entretien adressé aux autorités locales

I. Identification

Nom :

Prénom :

Tel :

II. Erosion côtière

1°) Comment percevez-vous l'érosion côtière sur votre littoral ?

.....
.....

2°) Qu'est-ce qui est à l'origine de cette avancée de la mer ?

.....
.....

III. Implications de l'érosion côtière sur votre localité

3°) Quelles sont les implications socio-environnementales de l'érosion côtière ?

.....
.....

4°) Quelles sont les implications sur l'économie de votre localité ?

.....
.....

IV. Les stratégies d'adaptation

5°) Quelles sont les stratégies que vous mettez en place pour stopper l'avancée de la mer ?

.....
.....

6°) Avez-vous des partenaires qui vous aident dans cette lutte ?

.....
.....

7°) Lesquels

.....
.....

8°) Quelle est la nature de ce partenariat ?

.....
.....

9°) comment appréciez-vous ce partenariat ?

.....
.....

10°) Comment jugez-vous l'efficacité et la durabilité de ces stratégies ?

.....
.....

11°) Avez-vous des suggestions ?

.....
.....

Guide d'entretien adressé au responsable du projet de croissance et de développement des exportations (SAPCO Saly)

I. Identification

Nom :

Prénom :

Tel :

II. Erosion côtière

1°) Comment percevez-vous l'érosion côtière sur votre littoral ?

.....
.....

2°) Qu'est-ce qui est à l'origine de cette avancée de la mer ?

.....
.....

III. Implications de l'érosion côtière sur les activités touristiques

3°) Quelles sont les implications de l'érosion côtière sur votre secteur ?

.....
.....

4°) Quels sont les répercussions sur vos économies ?

.....
.....

IV. Les stratégies d'adaptation

5°) Quelles stratégies adaptez-vous pour lutter contre cette avancée de la mer ?

.....
.....

6°) Sont-elles efficaces ?

.....
.....

7°) Si non, quelles alternatives préconisez-vous ?

.....
.....

8°) Avez-vous des partenaires ?

.....
.....

9°) Lesquels

.....
.....

10°) Quelle est la nature de ce partenariat ?

.....
.....

11°) Avez-vous des suggestions ?

.....
.....

Guide d'entretien adressé aux chefs des services régionaux du tourisme

I. Identification

Nom :

Prénom :

Tel :

II. Erosion côtière

1°) Comment percevez-vous l'érosion côtière sur votre littoral ?

.....
.....

2°) Qu'est-ce qui est à l'origine de cette avancée de la mer ?

.....
.....

III. Implications de l'érosion côtière sur les activités touristiques

3°) Quelles sont les implications de l'érosion côtière sur votre secteur ?

.....
.....

4°) Quels sont les répercussions sur vos économies ?

.....
.....

IV. Les stratégies d'adaptation

5°) Quelles stratégies adaptez-vous pour lutter contre cette avancée de la mer ?

.....
.....

6°) Sont-elles efficaces ?

.....
.....

7°) Si non, quelles alternatives préconisez-vous ?

.....
.....

8°) Avez-vous des partenaires ?

.....
.....

9°) Lesquels

.....
.....

10°) Quelle est la nature de ce partenariat ?

.....
.....

11°) Avez-vous des suggestions ?

.....
.....

Guide d'entretien adressé aux propriétaires d'hôtels

I. Identification

Nom :

Prénom :

Tel :

II. Erosion côtière

1°) Comment percevez-vous l'érosion côtière sur votre littoral ?

.....
.....

2°) Qu'est-ce qui est à l'origine de cette avancée de la mer ?

.....
.....

III. Implications de l'érosion côtière sur l'hôtellerie

3°) Quelles sont les implications de l'érosion côtière sur votre secteur ?

.....
.....

4°) Quels sont les répercussions sur vos économies ?

.....
.....

IV. Les stratégies d'adaptation

5°) Quelles stratégies adaptez-vous pour lutter contre l'avancée de la mer ?

.....
.....

6°) Ces stratégies sont-elles efficaces et durables ?

.....
.....

7°) Avez-vous des partenaires ?

.....
.....

8°) Lesquels

.....
.....

9°) Quelle est la nature de ce partenariat ?

.....
.....

10°) Avez-vous des suggestions ?

.....
.....
Guide d'entretien adressé aux acteurs des secteurs d'activités clés (pêche et agriculture)

I. Identification

Nom :

Prénom :

Tel :

II. Erosion côtière

1°) Comment percevez-vous l'érosion côtière sur votre littoral ?

.....
.....

2°) Qu'est-ce qui est à l'origine de cette avancée de la mer ?

.....
.....

III. Implications de l'érosion côtière sur votre secteur d'activité

3°) Quelles sont les implications de l'érosion côtière sur votre secteur ?

.....
.....

4°) Quels sont les répercussions sur vos économies ?

.....
.....

IV. Les stratégies d'adaptation

5°) Quelles stratégies adaptez-vous pour lutter contre l'avancée de la mer ?

.....
.....

6°) Ces stratégies sont-elles efficaces et durables ?

.....
.....

7°) Avez-vous des partenaires ?

.....
.....

8°) Lesquels

.....

9°) Quelle est la nature de ce partenariat ?

.....

10°) Avez-vous des suggestions ?

.....
.....

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
Résumé	v
Abstract.....	vi
Liste des sigles et acronymes	vii
Introduction générale.....	1
Première partie : Cadre théorique et fondements scientifiques.....	8
Chapitre I : Cadre théorique et présentation de la zone d'étude.....	9
1. Cadre conceptuel et opératoire	9
1.1. État de l'art	9
1.2. Discussion conceptuelle.....	15
2. Cadre géographique, physique et humaine de la zone d'étude	31
2.1. Situation géographique de la zone d'étude.....	31
2.2. Cadre physique de la zone d'étude : des unités naturelles en mutation.....	33
2.2.3. Caractéristiques hydrologiques de la zone d'étude	38
2.3. Caractéristiques humaines de la zone d'étude.....	42
Conclusion du chapitre I.....	49
Chapitre II : Données et méthodologie de recherche	50
1. Revue documentaire.....	50
2. Collecte et traitement des données.....	50
2.1. Données de terrain.....	50
2.2. Données géospatiales	58
2.3. Technique de traitement du suivi de l'évolution de l'occupation des sols.....	91
Conclusion chapitre II.....	95
Conclusion de la première partie	96
Deuxième partie : Caractéristiques morphodynamiques, cinématique du trait de côte et projections.....	98
Chapitre III : Caractéristiques morphodynamiques et granulométriques.....	99
1. Caractéristiques morphodynamiques.....	99
1.1. Facteurs naturels	100
1.1.2. Facteurs hydrodynamiques et morphologiques.....	123
1.2. Facteurs anthropiques	148
1.2.1 Littoralisation de la Petite-Côte sénégalaise	150

1.2.2. Extraction du sable marin	161
1.2.3. Constructions sur les plages	162
1.2.4. Les ouvrages de protection et leurs réponses paradoxales à l'érosion côtière	164
1.2.5. Dégradation des écosystèmes de mangrove, protecteur naturel contre l'érosion côtière	165
1.2.6. Interventions humaines sur le régime hydrologique et le transfert de risques	166
1.2.7. Exploitation du pétrole, une nouvelle forme de dégradation de la côte sénégalaise..	168
2. Caractéristiques granulométriques, leur distribution spatiale de la Petite-Côte aux îles du Saloum et leurs implications sur la dynamique du trait de côte	171
2.1. Méthodes	172
3.2. Caractéristiques granulométriques des sédiments et leurs implications sur l'évolution du trait de côte	176
2.3. Discussion des résultats granulométriques.....	194
Conclusion chapitre III	197
Chapitre IV : Cinématique du trait de côte à partir de l'imagerie satellitaire.....	199
1. Évolution du trait de côte de 1973 à 1987.....	199
2. Évolution du trait de côte de 1987 à 2002.....	202
3. Évolution du trait de côte de 2002 à 2013.....	204
4. Évolution du trait de côte de 2013 à 2024.....	207
5. Synthèse de l'évolution du trait de côte de 1973 à 2024	210
6. Discussion des résultats de la cinématique du trait de côte	214
Conclusion du chapitre IV	216
Chapitre V : Projections futures de l'évolution du trait de côte (2055, 2085 et 2100)	217
1. La modélisation de l'évolution future du trait de côte	218
1.1. Acquisition et préparation des données.....	218
1.2. Extraction du trait de côte et analyse diachronique.....	218
1.3. Modélisation prospective	220
1.4. Intégration des paramètres physiques et anthropiques	221
1.5. Incertitudes et marges d'erreur	221
1.6. Production cartographique et SIG.....	224
1.7. Limites et reproductibilité	225
2. Résultats et discussions	225
2.1. Projection de 2055	226
2.2. Projection de 2075	229
2.3. Projection de 2100	232
Conclusion chapitre V	235
Conclusion de la deuxième partie	236

Troisième partie : Implications environnementales, socio-économiques de l'érosion côtière et stratégies d'adaptation	238
Chapitre VI : Implications environnementales et socio-économiques de la dynamique du trait de côte	239
1. Vue d'ensemble des implications de la dynamique du trait de côte	239
2. Implications environnementaux de la dynamique du trait de côte.....	241
2.1. Rétrécissement des plages.....	242
2.2. Dégradation des formations dunaires.....	243
2.3. Recul du trait de côte, un facteur de dégradation des espèces végétaux	245
2.4. Submersion marine et/ou fluviale	247
3. Les implications socio-économiques de la perte des plages	249
3.1. Destruction d'infrastructures et d'habitats	253
3.2. Implications sur les activités socio-économiques	257
Conclusion du chapitre VI.....	272
Chapitre VII : Analyse des stratégies d'adaptation	273
2. Méthodes non-structurelles	275
2.1. Stratégies individuelles non-structurelles.....	275
2.2. Stratégies communautaires non-structurelles.....	276
2.3. Stratégies publiques non-structurelles.....	278
3. Méthodes structurelles	281
3.1. Méthodes structurelles communautaires sur la Petite-Côte sénégalaise	281
3.2. Méthodes structurelles publiques sur la Petite-Côte sénégalaise	285
4. Évaluation des stratégies.....	292
4.1. Évaluation des stratégies individuelles	292
4.2. Évaluation des stratégies collectives	294
4.3. Évaluation des stratégies publiques	295
Conclusion du chapitre VII	297
Chapitre VIII : Discussion sur les politiques et perspectives de gestion durable du littoral	298
1. Analyse critique des programmes existants	298
1.1. Programmes nationaux	299
1.2. Programmes régionaux	301
1.3. Référentiels internationaux	302
1.4. Synthèse critique transversale.....	304
2. Articulation avec les résultats de la thèse.....	305
3. Perspectives de gestion durable.....	306
3.1. Mbour-Saly	306

3.2. Joal-Fadiouth-Pointe Sarène	308
3.3. Palmarin-Djiffer	310
3.4. Îles du Saloum (Béttenty, Niodior, Dionewar)	313
4. Études de cas comparatives	317
5. Limites de la thèse	319
Conclusion du chapitre VIII.....	321
Conclusion de la troisième partie.....	321
Conclusion générale	323
Bibliographie.....	327
Listes des illustrations.....	I
Table des cartes	I
Table des figures.....	I
Table des tableaux.....	III
Table des photos et planches	III
Annexes	V