

Dynamique sédimentaire et évolution du trait de côte à Diembéring en Basse Casamance, Sénégal

Dome TINE^{1*}, Mamadou THIOR² et Mbagnick FAYE³

¹ *Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Département de Géographie, Laboratoire de Télédétection Appliquée (LTA), BP 5005 Dakar, Sénégal*

² *Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Département de Géographie, Laboratoire de Géographie Physique, BP 5005 Dakar, Sénégal*

³ *Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Département de Géographie, Laboratoire de Climatologie et d'Etudes Environnementales (LCE), BP 5005 Dakar, Sénégal*

(Reçu le 26 Avril 2024 ; Accepté le 02 Juillet 2024)

* Correspondance, courriel : dometine85@gmail.com

Résumé

Cette étude a pour objectif d'analyser la dynamique sédimentaire et l'évolution du trait le long du littoral de Diembéring. La méthodologie repose sur un traitement d'images satellitaires Sentinel-2 et des analyses granulométriques dont le prélèvement des échantillons a été effectué suivant trois radiales. Les analyses granulométriques sont effectuées par un granulomètre Laser de type Mastersizer 3000. Les courbes cumulatives, ainsi que le calcul des différents indices granulométriques ont été réalisés sous Excel à l'aide du programme GRADISTAT. L'analyse de la cinématique du trait de côte a été effectuée à l'aide de l'outil DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) sous ArcGis. Les résultats montrent que toutes les courbes cumulatives sont sigmoïdales, ce qui indique que les particules de sables sont transportées dans un milieu plus au moins agité avec évacuation des sédiments vers le large par les courants de retour. L'indice de classement des sables ne présente pas de grande variation. Toutes les radiales ont un Sorting index (σ_i) variant entre 0,35 et 0,5 ϕ et cela signifie qu'ils sont tous des sables bien classés et que les dépôts se sont effectués dans des conditions plus ou moins calmes. L'analyse de l'évolution du trait de côte révèle un recul très rapide avec des taux variant entre 7,28 et 23,73 m/an entre 2016 et 2019 tandis qu'entre 2019 et 2022, la vitesse de recul diminue et laisse apparaître des secteurs à progradation vers le nord.

Mots-clés : *dynamique sédimentaire, granulométrie, diembéring, trait de côte, Basse Casamance.*

Abstract

Sedimentary dynamics and evolution of the coastline in Diembéring, Lower Casamance, Senegal

The aim of this study is to analyse the sediment dynamics and shoreline evolution along the Diembéring coast. The methodology is based on the processing of Sentinel-2 satellite images and granulometric analyses, with samples taken along three radial lines. The granulometric analyses were carried out using a Mastersizer 3000

laser granulometer. The cumulative curves and the calculation of the various particle size indices were carried out in Excel using the GRADISTAT programme. The coastline kinematics were analysed using the DSAS (Digital Shoreline Analysis System) tool in ArcGis. The results show that all the cumulative curves are sigmoidal, indicating that the sand particles are transported in a more or less turbulent environment, with sediments being evacuated towards the open sea by return currents. There is not much variation in the sand classification index. All the radials have a sorting index (σ_i) varying between 0.35 and 0.5 ϕ , which means that they are all well classified sands and that deposition took place in more or less calm conditions. Analysis of the evolution of the coastline shows a very rapid retreat, with rates varying between 7.28 and 23.73 m/year between 2016 and 2019, while between 2019 and 2022 the rate of retreat decreases, revealing areas of northward progradation.

Keywords : *sediment dynamics, granulometry, Diembéring, coastline, Lower Casamance.*

1. Introduction

La frange littorale de la Basse Casamance est caractérisée par des formations sédimentaires constituées de grès profondément altérés et de sables argileux et des formations meubles d'apports récents. C'est une région où le transport sédimentaire est dominé par les apports fluviaux et éoliens marqués par une forte interception des unités morphologiques dont les plages sableuses, les cordons dunaires. Ces interceptions entraînent de faibles stocks sédimentaires en zone pré-littorale [1]. Les littoraux sableux font partie des zones les plus exposées et très vulnérables au risque d'érosion car elles sont composées essentiellement de sédiments meubles [2]. La stabilité des côtes dépend des flux sédimentaires d'origine marine, fluviale et continentale et des pertes en mer et en terres [3]. La frange littorale de la commune de Diembéring est façonnée en permanence par les courants de dérive littorale responsables du transit sédimentaire. Ces courants littoraux sont toujours présents et en intensité variable modifiant constamment les unités morphologiques littorales [1]. Le littoral de Diembéring est caractérisé, du point de vue géomorphologique, par un cordon sableux entrecoupé de dunes couvertes, par endroit, de végétation rampante et parfois ligneuse. Ces unités géomorphologiques sont séparées de la mer par un estran sableux très étroit et couvert de matières organiques issues de la destruction de la végétation par l'érosion littorale. Elles sont sous l'influence de la houle du sud-ouest, dont les effets sont responsables de l'orientation vers le nord des dunes sableuses, entre les localités de Diembéring et de Gnikine. L'action combinée des houles et des vagues provoque le transit des sédiments sableux tandis que l'élévation des deux extrémités de la côte sont à pente élevée explique l'importance de l'érosion entre Gnikine et Diembéring [4]. C'est un littoral qui évolue naturellement et continuellement en fonction de sa nature intrinsèque. Il rassemble l'essentiel des échanges sédimentaires en relation avec la position du trait de côte. Cette dynamique sédimentaire explique la répartition granulométrique le long de la côte et suivant la dérive littorale qui entraîne la présence de zones d'érosion, d'accrétion ou de reconstitution des plages [5]. Selon [6], l'analyse des résultats cartographiques issus de la cinématique du trait de côte est considérée comme l'étude des formes indépendantes des forces qui en sont les causes. La dynamique érosive est fonction de la morphologie littorale ainsi que de ses caractéristiques sédimentologiques et bathymétriques. L'étude de la mobilité du trait de côte nécessite une série temporelle de données satellitaires [7] et le choix d'un indicateur [4]. Le choix d'un indicateur dépend de la morphologie du milieu. Dans cette contribution, la ligne instantanée du rivage a été retenue comme indicateur de trait de côte et elle correspond à la limite des eaux en marée basse. Compte tenu de l'ampleur de l'érosion côtière dans un contexte de changement climatique, il est important de caractériser la dynamique sédimentaire et l'évolution du trait de côte afin de prévenir les potentiels risques côtiers dans la commune de Diembéring. Tel est l'objectif de cette contribution. Le suivi et l'analyse des indicateurs de la dynamique côtière sont des préalables à la gestion du littoral [8].

2. Matériel et méthodes

2-1. Zone d'étude

L'espace étudié appartient à la partie méridionale du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien qui s'est mis en place avec l'ouverture de l'Atlantique central au Jurassique et présente une couverture sédimentaire diversifiée. Il est d'âge méso-cénozoïque, et repose sur un substratum d'âge Précambrien à Paléozoïque (**Figure 1**). Il s'étend du Cap Blanc en Mauritanie au Cap Roxo au nord de la Guinée-Bissau. Il est formé généralement de plages, de cordons sableux et de dunes formant un ensemble de stock sédimentaire meuble [7]. Le sol est généralement sablonneux, très léger et pauvre en matières organiques. L'histoire géologique est marquée par la transgression Nouakchottienne au quaternaire pendant laquelle la sédimentation est essentiellement marine. Après le Nouakchottien un courant Nord-Sud de dérive littorale ferme le Golfe de la Casamance vers 3900-3500 BP par une série de cordons littoraux. Ces derniers auront pour effet de réduire les apports marins et de ralentir l'évolution morphologique [9].

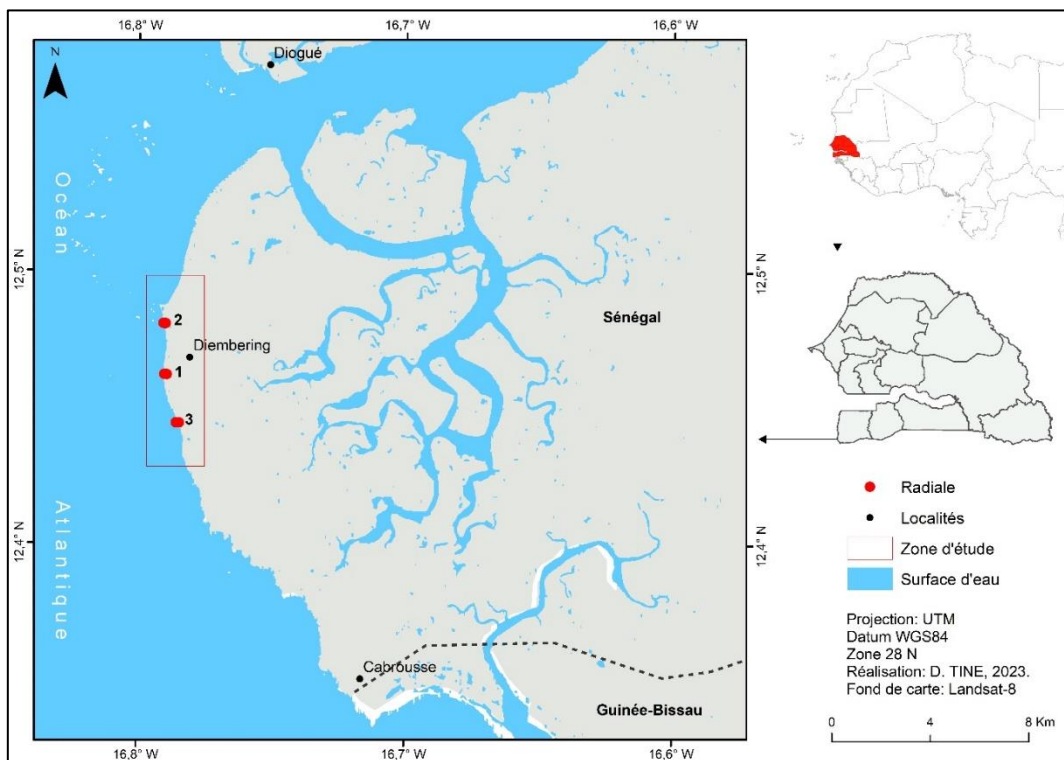


Figure 1 : *Situation géographique de la zone d'étude*

2-2. Méthode

2-2-1. Méthode d'analyse granulométrique

Les échantillons de sédiments sont prélevés en surface de la plage de Diembéring (**Figure 1**). Ces sédiments ont fait l'objet d'analyses sédimentologiques pour déterminer les différentes classes granulométriques. Le prélèvement des échantillons est effectué en surface et en profondeur (H0-20 et H20-40) pour les stations continentales et en surface à partir du cordon littoral jusqu'à la berme. Les stations ont été référencées par un GPS de type Garmin 73. Les analyses granulométriques des échantillons prélevés sont effectuées par un granulomètre Laser de type Mastersizer 3000. Il utilise la technique de la diffraction laser pour mesurer les distributions granulométriques de 10 μm à 3,5 mm. La norme de référence en analyse granulométrique est

la norme ISO 13320-1 qui traite des principes généraux de l'analyse granulométrique par diffraction laser. L'établissement des courbes cumulatives, ainsi que le calcul des différents paramètres granulométriques ont été réalisés à l'aide d'un programme sous Excel (GRADISTAT). Les paramètres granulométriques sont calculés selon la méthode de [10] et sont exprimés en Phi (Φ). Pour les trois radiales étudiées, les courbes cumulatives sont établies à partir desquelles les différents centiles sont extraits et mis en jeu pour le calcul des indices granulométriques.

2-2-2. Description des indices granulométriques calculés

La description des indices granulométriques est extraite de [7]. La moyenne granulométrique (M_z) représente la distribution granulométrique moyenne des sédiments et renseigne sur l'énergie cinétique moyenne lors du dépôt des sédiments. L'indice d'asymétrie ou Skewness ou (SK_i) permet de déterminer la déviation de la courbe granulométrique par rapport à la courbe de Gauss. Si le Coefficient de dissymétrie est égal à zéro, la courbe est symétrique et par conséquent la quantité de particules fines est égale à celle des grossières. Cependant, un coefficient de dissymétrie positif montre une prédominance des particules fines, tandis qu'une dissymétrie négative désigne une prédominance des particules grossières. L'indice de classement ou Sorting index (σ_i) constitue la meilleure représentation du classement granulométrique. Plus l'écart-type est faible plus les sédiments sont bien classés et plus qu'il fort plus les sédiments sont mal classés. Il renseigne sur les conditions de dépôt des sédiments. Plus le milieu est agité plus les sédiments sont mal classés. Le coefficient d'acuité ou Kurtosis (K_G) mesure l'angulosité de la courbe des fréquences. Si le mode est concentré dans des classes granulométriques restreintes, on a une distribution leptokurtique, s'il est dispersé on a une distribution platykurtique. Ces indices granulométriques (**Tableau 1**) ont permis de déterminer le mode de transport des sédiments à l'aide des diagrammes de [11].

Tableau 1 : Les indices granulométriques [10]

Indices granulométriques	Interprétation
<p>La moyenne granulométrique (M_z)</p> $M_z = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3} \quad (1)$	<p>$M_z < 1 \varphi$: Sables grossiers et graviers. $1 \varphi < M_z < 2 \varphi$: Sables moyens. $2 \varphi < M_z < 3 \varphi$: Sables fins. $3 \varphi < M_z < 4 \varphi$: Sables très fins. $M_z > 4 \varphi$: silts et argiles.</p>
<p>L'indice d'asymétrie ou Skewness (SK_i)</p> $SK_i = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}}{2 * (\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_{95} + \varphi_5 - 2\varphi_{50}}{2 * (\varphi_{95} - \varphi_5)} \quad (2)$	<p>$-1 < SK_i < -0.3$: courbe très asymétrique vers les grossiers. $-0.3 < SK_i < -0.1$: courbe asymétrique vers les grossiers. $-0.1 < SK_i < +0.1$: courbe presque symétrique. $+0.1 < SK_i < +0.3$: courbe asymétrique vers les fins. $+0.3 < SK_i < +1.0$: courbe très asymétrique vers les fins.</p>
<p>L'indice de classement ou Sorting index (σ)</p> $\sigma = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6.6} \quad (3)$	<p>$\sigma < 0.35 \varphi$: sable très bien classé. $0.35 \varphi < \sigma < 0.5 \varphi$: sable bien classé. $0.5 \varphi < \sigma < 0.7 \varphi$: sable assez bien classé. $0.7 \varphi < \sigma < 1 \varphi$: sable moyennement classé. $1 \varphi < \sigma < 2 \varphi$: Sable médiocrement classé. $2 \varphi < \sigma < 4 \varphi$: sable très mal classé. $\sigma < 4 \varphi$: sable extrêmement mal classé.</p>
<p>Le coefficient d'acuité ou Kurtosis (K_G)</p> $K_G = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44 * (\varphi_{75} - \varphi_{25})} \quad (4)$	<p>$K_G < 0.67$: courbe très platykurtique. $0.67 < K_G < 0.90$: courbe platykurtique. $0.90 < K_G < 1.11$: courbe mesokurtique. $1.11 < K_G < 1.50$: courbe leptokurtique. $1.50 < K_G < 3$: courbe très leptokurtique. $K_G > 3$: courbe extrêmement leptokurtique.</p>

2-3. Méthode d'analyse de la cinématique du trait de côte

2-3-1. Les données satellitaires utilisées

Les images Sentinel-2 sont des données à hautes résolutions spatiale et spectrale (*Tableau 2*). La période de revisite du satellite est de 5 jours. Les données sont libres d'accès, comme toutes les données du programme Sentinel. Le satellite Sentinel-2 utilise la technique du pushbroom (il est composé de deux capteurs : un détecteur en technique CMOS pour la lumière visible et un détecteur en technologie Mercure-Cadmium-Tellure pour l'infrarouge). Ce capteur prend des images dans les bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge avec différentes résolutions spatiales. Le choix des images Sentinel-2 est basé sur leur résolution spatiale de 10m, 20m ou 60m en fonction des bandes spectrales. La résolution spatiale de ces images donne la possibilité de digitaliser le trait de côte sur la base des indicateurs comme la ligne instantanée du rivage et la limite de la végétation continentale. Les images sont obtenues à partir de la base de données et de services pour les surfaces continentales Theia (<https://www.theia-land.fr/>) et sont prétraitées et disponibles en temps quasi-réel.

Tableau 2 : Caractéristiques spectrales et spatiales des images satellites utilisées

Capteur	Date d'acquisition	Bandes	Longueur d'onde (nm)	Largeur de bande (nm)	Résolution
MSI	03/02/2016	Bande 1 – Aérosol côtier	442.7	21	60
		Bande 2 – Bleu	492.4	66	10
		Bande 3 – Vert	559.8	36	10
		Bande 4 – Rouge	664.6	31	10
		Bande 5 – Végétation "red edge"	704.1	15	20
	23/05/2019	Bande 6 – Végétation "red edge"	740.5	15	20
		Bande 7 – Végétation "red edge"	782.8	20	20
		Bande 8 – PIR	832.8	106	10
	07/05/2022	Bande 8A – PIR "étroit"	864.7	21	20
		Bande 9 – Vapeur d'eau	945.1	20	60
		Bande 10 – SWIR – Cirrus	1373.5	31	60
		Bande 11 – SWIR	1613.7	91	20
		Bande 12 – SWIR	2202.4	175	20

2-3-2. Numérisation de la ligne instantanée de rivage

Pour analyser l'évolution historique du trait de côte, la ligne instantanée de rivage a été utilisée comme marqueur du trait de côte. Étant identifiée, la numérisation s'est faite à l'écran au 1/1500 sur les différentes images. Ainsi, la version 10.2 d'ArcGIS a permis d'effectuer la numérisation.

2-3-3. Les marges d'incertitude

La précision des résultats des analyses du trait de côte est très souvent influencée par plusieurs sources d'erreurs, surtout lorsque la position du trait de côte est historique [4, 12]. La qualité des résultats d'une analyse diachronique est donc intimement liée à la connaissance de la marge d'erreur. C'est la raison pour laquelle, les erreurs les plus récurrentes en cinématique du littoral, particulièrement en ce qui concerne l'analyse du trait de côte, sont principalement les erreurs de positionnement et les erreurs techniques. L'erreur globale, appelée Erreur de Position Globale du trait de côte, est calculée en prenant la racine carrée de la somme des carrées de chaque erreur : erreur de pixel, de géoréférencement, de digitalisation, oscillation [4, 13]. Ainsi, l'analyse de notre résultat prend en compte l'erreur de géoréférencement

(*RMS Root Mean Square Error*), l'erreur liée à la variation de la marée est obtenue par le rapport de la hauteur de la marée sur la pente moyenne de la plage. Quant à l'erreur liée à la digitalisation, elle est aléatoire et il n'existe pas encore à ce jour une méthode objective pour l'évaluer [14]. Néanmoins, il est recommandé de l'estimer en effectuant la numérisation plusieurs fois. L'erreur émanant de la numérisation de chaque ligne de rivage étant obtenue par addition de la moyenne des écarts à 2 écarts-types de ces écarts et à la taille du pixel [13, 15, 16]. La marge d'erreur émanant de la numérisation est obtenue en cumulant sa moyenne + 2 écarts-types + taille pixel. Ainsi, on calcule pour chaque année la valeur des trois erreurs déjà identifiées sur les images. Cela donne donc les **Équations** suivantes :

$$E_{pt} = \sqrt{Eg^2 + Ed^2 + Eo^2}$$

$$E\alpha = \frac{E_{pt}}{Période(t)}$$

(1)

Ept: Erreur de position globale du trait de côte
 Eg : Erreur de Géoréférencement (RMS)
 Ed : Erreur de digitalisation
 Eo : Erreur de l'oscillation de marée
 Eα : Erreur globale en moyenne en m/an

Ainsi, les erreurs relatives à chaque image sont contenues dans le **Tableau 3** :

Tableau 3 : Les marges d'erreurs

Intervalle de mesure	Ligne de référence	Estimation de l'erreur annuelle (m)
2016-2019	Ligne instantanée de rivage	± 14,3
2019-2022	Ligne instantanée de rivage	± 13,6

2-3-4. Analyse statistique de l'évolution du trait de côte avec DSAS

Le calcul des statistiques relatives à l'évolution du trait de côte a été effectué avec l'application DSAS4.3. En effet, le « Digital Shoreline Analysis System » est une extension du logiciel ArcGIS qui permet de faire des calculs sur les écarts des traits de côte déjà digitalisés à partir des images retenues. Développé depuis les années 1990 par l'US Geological Survey, DSAS fournit une méthode normalisée qu'on peut répéter pour le calcul de l'évolution statistique tout en analysant les changements passés, présents et futurs du littoral [14]. Lorsque tous les paramètres d'entrée sont correctement renseignés, le DSAS génère automatiquement les transects selon le pas de mesure choisi. Les transects, perpendiculaires aux linéaires côtiers, permettent de mesurer les écarts entre les traits de côte. C'est sur cette base que les taux moyens de déplacement des traits de côte sont calculés sur chaque transect. À partir de ce moment, il est nécessaire de créer une *geodatabase* c'est-à-dire un environnement qui favorise le calcul statistique. Il s'agit notamment de créer deux entités : une première entité contenant une ou plusieurs lignes de référence nommées *baseline*. Celle-ci se situe en retrait du trait de côte, et les transects générés lui sont perpendiculaires. On a une seconde entité constituée de traits de côte déjà numérisés sur ArcMap nommée *shorelines*. Ces deux entités sont incluses dans la zone tampon (*buffer shoreline*) qui permet de stabiliser l'espace linéaire dans lequel les traits de côte ont été numérisés.

3. Résultats

3-1. Analyse des indices granulométriques

L'analyse granulométrique des sédiments superficiels de la cellule sédimentaire de Diembéring met en évidence un faciès lithologique. Il s'agit des sables de couleur blanche, couverts par des débris végétaux dans la partie continentale. Les indices granulométriques calculés à partir des courbes cumulatives sont composés de la moyenne des sédiments (Mz), de l'indice de classement (σ_i), de l'indice d'asymétrie (S_{ki}) et du coefficient d'acuité ou Kurtosis (KG) (**Tableau 4**). La moyenne granulométrique des sables est comprise entre 2,15 ϕ et 2,76 ϕ . Ces résultats indiquent qu'il s'agit globalement de sables fins. La taille moyenne des grains de sables ne suit aucune tendance spatiale à partir du continent vers la berme. Cela prouve qu'il n'existe pas de tri granulométrique effectué par les agents de la dynamique littorale même si le retour de la houle s'effectue naturellement avec une mobilisation sélective des particules. Les grosses particules ont tendance à ne pas bouger pendant que les particules de taille très petite sont drainées vers la plage sous-marine peu profonde. Les particules les plus fines sont, ensuite, transportées et déposées au niveau des petits fonds plus profonds [7]. Au niveau du continent, les horizons 0-20 cm et 20-40 cm ont des moyennes granulométriques respectives de 2,51 ϕ et 2,76 ϕ pour la radiale 1, 2,36 ϕ et 2,45 ϕ pour la radiale 2 et 2,52 ϕ et 2,56 ϕ . Les sables du continent de la berme ont une moyenne granulométrique toujours supérieure à ceux du cordon littoral, de la haute plage et de la basse plage. Cependant, ils restent des sables fins avec un Mz compris entre $2 \phi < Mz < 3 \phi$. L'homogénéité de la taille des grains des sables dans les trois radiales peut être liée à l'unicité de la source sédimentaire. L'indice de classement des sédiments ne présente pas de grande variation. Toutes les radiales ont un Sorting index (σ_i) variant entre 0,35 et 0,5 ϕ et cela signifie qu'ils sont tous des sables bien classés et que les dépôts se sont effectués dans des conditions plus ou moins calmes. L'indice d'asymétrie ou Skewness ou (S_{ki}) de la radiale 1 et 2 présente des valeurs partout positives excepté au de la berme. Les valeurs de l'asymétrie des courbes de distribution granulométrique des sables varient entre -0,01 ϕ et 0,03 ϕ . Ces résultats indiquent que les courbes sont toutes presque asymétriques. Le Skewness présente une légère variation entre les différentes radiales. Du continent jusqu'au cordon littoral, il varie entre 0,01 ϕ et 0,03 ϕ pour les radiales 1 et 2 pendant qu'il reste invariable au niveau de la berme avec -0,01 ϕ . Dans la troisième radiale, l'indice d'asymétrie varie entre -0,02 ϕ et 0,03 ϕ . La caractérisation des courbes presque asymétriques vers les sables fins témoigne de l'influence de plusieurs sources d'apports sédimentaires avec des courants de différentes intensités [7]. L'indice d'acuité (KG) indique que toutes les courbes sont mesokurtiques. Le kurtosis varie légèrement entre les trois radiales. Ses valeurs sont toujours comprises entre $0,90 \phi < KG < 1,11 \phi$. Les différents indices granulométriques calculés montrent que tous les paramètres analysés présentent une évolution transversale et longitudinale identique. Toutes les courbes cumulatives sont sigmoïdales (**Figure 2, 3 et 4**) et cela indique que ce sont des sables transportés dans un milieu plus au moins agité avec une évacuation des particules fines vers le large par les courants de retour et le stock sédimentaire est homogène et l'énergie est adaptée à la charge transportée [17].

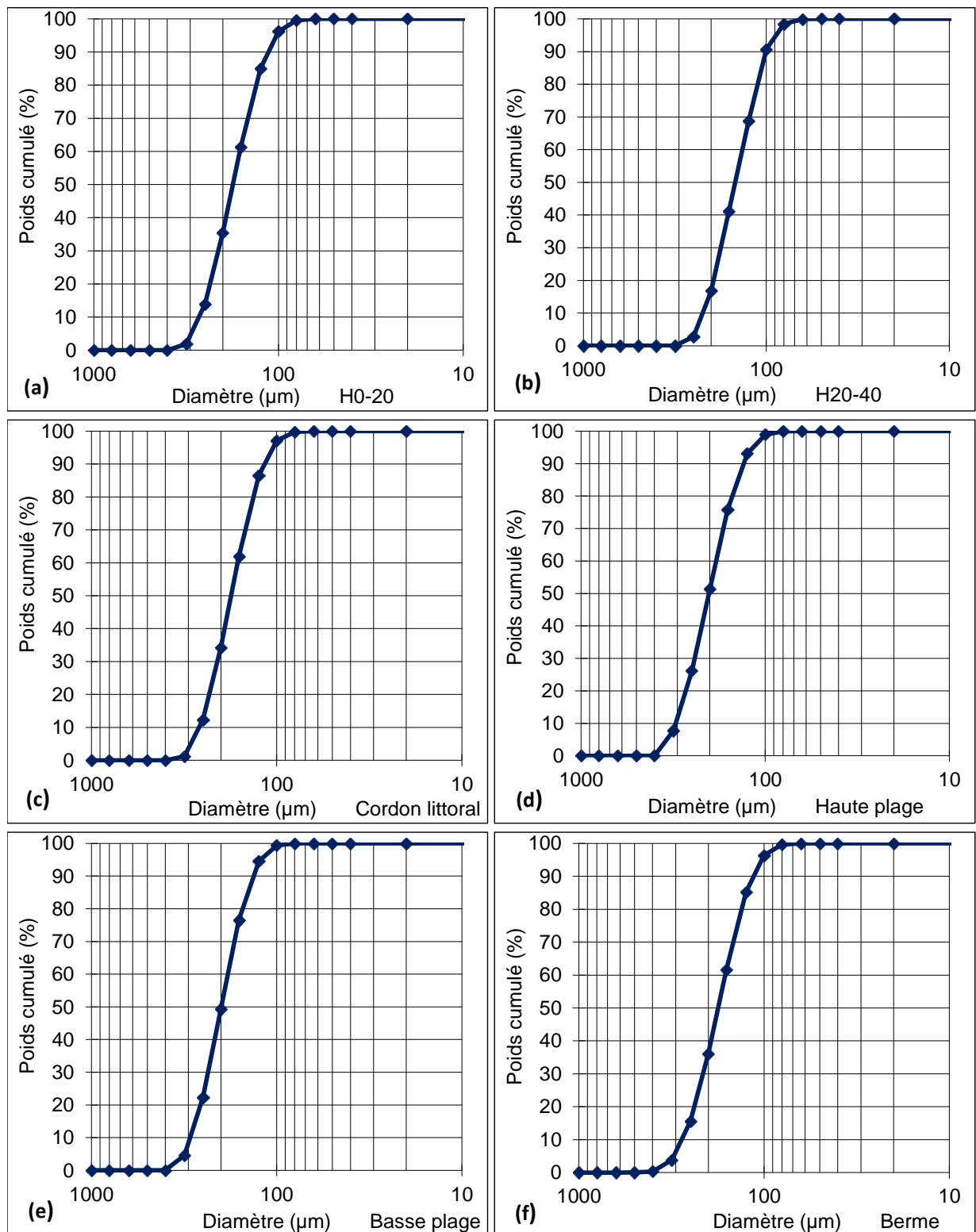


Figure 2 : *Courbes cumulatives des sédiments superficiels de la plage de Diembéring (radiale 1)*

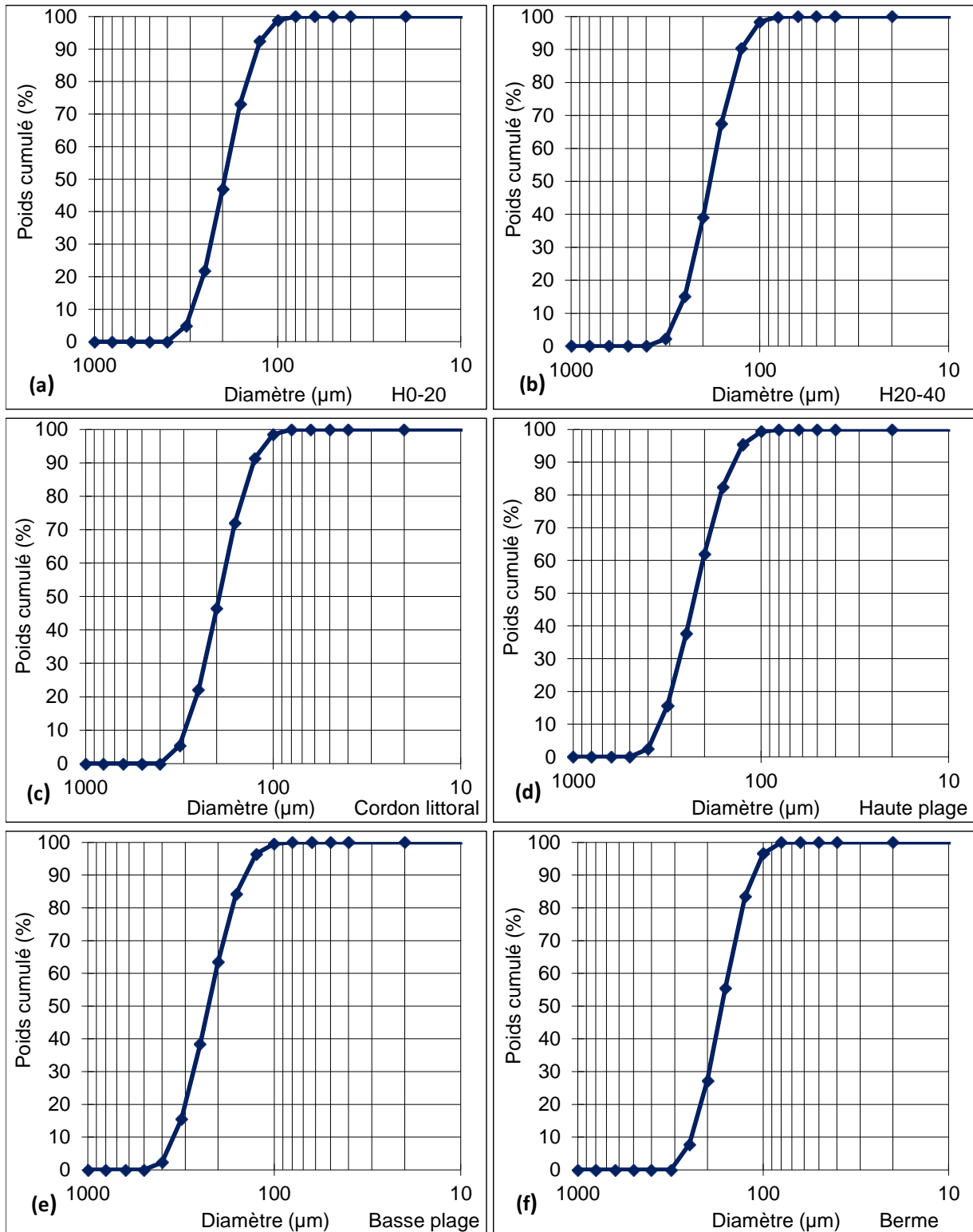


Figure 3 : Courbes cumulatives des sédiments superficiels de la plage de Diembéring (radiale 2)

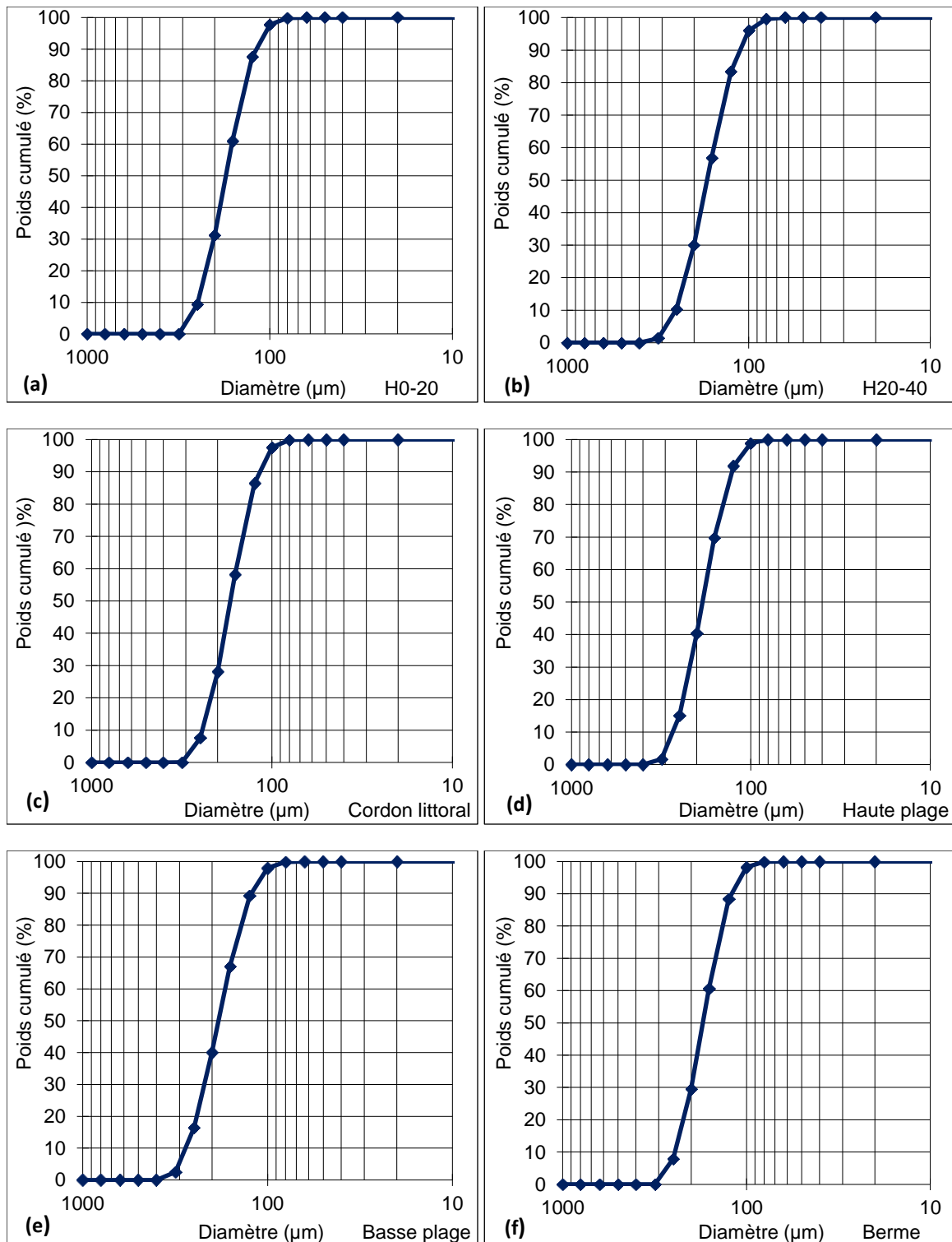


Figure 4 : *Courbes cumulatives des sédiments superficiels de la plage de Diembéring (radiale 3)*

Tableau 4 : Indices granulométriques du littoral de Diembéring

Indices granulométriques	Radiale 1					
	Continent		Cordon littoral	Haute plage	Basse plage	Berme
	H0-20	H20-40				
Moyenne (M_z)	2,51	2,76	2,51	2,31	2,33	2,50
Sorting index (σ_i)	0,47	0,45	0,45	0,49	0,43	0,48
Skewness (SK_i)	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	-0,01
Kurtosis (K_G)	0,92	0,90	0,93	0,98	0,94	0,93
Indices granulométriques	Radiale 2					
Moyenne (M_z)	2,36	2,45	2,37	2,17	2,15	2,58
Sorting index (σ_i)	0,46	0,44	0,48	0,50	0,48	0,43
Skewness (SK_i)	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	-0,01
Kurtosis (K_G)	0,94	0,94	0,94	0,91	0,92	0,95
Indices granulométriques	Radiale 3					
Moyenne (M_z)	2,52	2,56	2,55	2,44	2,45	2,53
Sorting index (σ_i)	0,42	0,46	0,41	0,43	0,46	0,41
Skewness (SK_i)	0,01	-0,02	0,00	0,03	0,03	0,01
Kurtosis (K_G)	0,95	0,95	0,96	0,95	0,93	0,96

3-2. Analyse de la cinématique du trait de côte

3-2-1. Évolution du trait de côte entre 2016 et 2019

Le littoral de Diembéring est caractérisé par des formations meubles et mobilisables par les agents d'érosion. Le caractère meuble et mobilisable des modelés d'accumulation (**Figure 5**), accentue sa vulnérabilité dans un contexte de changement climatique. Le linéaire côtier analysé s'étend sur 7 km. Le maximum de recul de la ligne de rivage est de 23,47 m/an entre 2016 et 2019 tandis qu'aucune progradation n'a été observée. Concernant la vitesse de mobilité, il est important de signaler que le recul a été très rapide à l'espace de trois ans. Les taux de recul varient entre 7,28 et 23,73 m/an (**Figure 6**). La vitesse de l'érosion est variable par endroit sur le littoral de Diembéring. Elle est cependant, plus faible au nord vers l'embouchure (Gnikine) de la Casamance qu'au sud. Toutefois, les taux de recul restent élevés le long du linéaire analysé. Le processus de mobilité du trait de côte dépend des caractéristiques morphodynamiques et hydrodynamiques des environnements côtiers. Les caractéristiques granulométriques des sédiments littoraux, les cordons dunaires, la topographie, le forçage climatique et les apports sédimentaires fluviaux jouent un rôle important dans la cinématique du trait de côte. Ainsi, les plus forts taux d'érosion sont localisés au sud du village de Diembéring et évoluent entre 16,24 m/an et 23,47 m/an. Notons qu'en dehors du reboisement des filaos, qu'aucune autre stratégie de lutte contre l'érosion côtière n'a été observée sur le littoral de la ville de Diembéring pendant la campagne de prélèvement des échantillons de sédiments. Par conséquent, il est exposé aux actions hydrodynamiques marines et au forçage climatique en permanence.



Figure 5 : Érosion du cordon sableux et destruction de la végétation au sud du village de Diembéring (photo prise le 05 avril 2021 de direction sud)

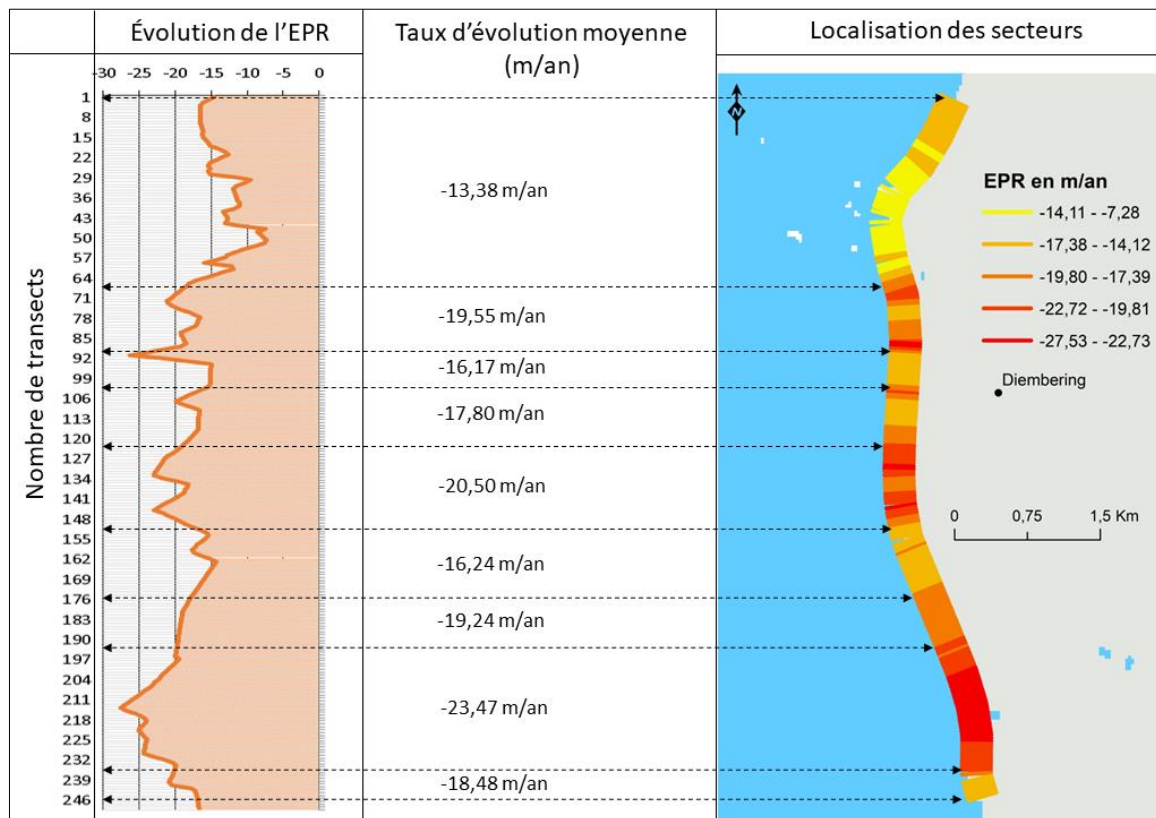


Figure 6 : Variation du taux moyen annuel (EPR) de l'évolution du trait de côte de 2016 à 2019 à Diembéring

3-2-2. Évolution du trait de côte entre 2019 et 2022

L'analyse de la dynamique du trait de côte le long de la ville de Diembéring montre que tendance reste globalement érosive (**Figure 7**). Le taux de recul le plus élevé est noté dans la partie sud de la ville. Contrairement à la période 2016-2019, la période 2019-2022 est marquée par des progradation par endroit,

au nord de Diembéring. L'accrétion varie entre 5,73 et 6,63 m/an. Cette progradation pourrait être liée aux apports sédimentaires fluviaux d'autant plus cette partie constitue la rive gauche de l'embouchure du fleuve Casamance. Les sédiments transportés par le fleuve vers le littoral sont remobilisés vers le sud par la houle du nord. Ces apports sédimentaires fluviaux sont tributaires, en grande partie, à la quantité de précipitation observée en amont des bassins versants. La réduction de ces apports sédimentaires fluviaux peut entraîner un déficit en réserves sédimentaires qui participent à la stabilisation des côtes et ralentissent l'érosion littorale. Cependant, ces accumulations de sables ne concernent que de petits espaces. Les secteurs à érosion dominant avec des vitesses variables. Les taux d'érosion varient entre 3,10 m/an et 19,02 m/an. Cette période enregistre les plus faibles taux d'érosion.

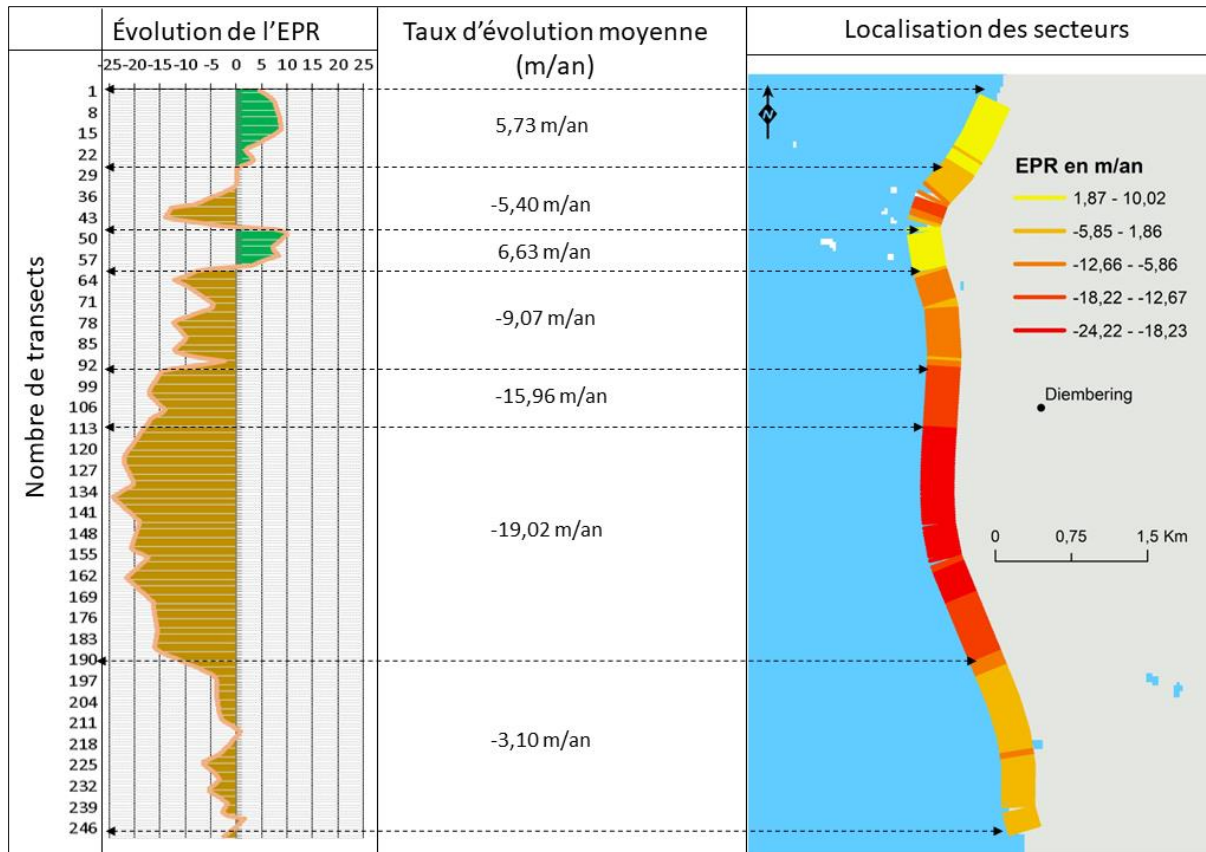


Figure 7 : Variation du taux moyen annuel (EPR) de l'évolution du trait de côte de 2019 à 2022 à Diembéring

3-2-3. Impacts du recul de trait de côte

Les impacts du recul du trait de côte se manifestent par la destruction du couvert végétal naturel et artificiel. Le littoral du village de Diembéring subit constamment l'agressivité des facteurs hydrodynamiques dont les conséquences se résument entre autres au recul du trait de côte et à la destruction de la végétation. Une perte importante du couvert végétal est observée à Diembéring (Figure 8). Certains filaos plantés par les populations locales pour stabiliser la dune bordière sont déracinés par les vagues. Étant donné que la plupart des plages sont caractérisées par une limite supérieure de la végétation. Ce qui entraîne un affaiblissement progressif de la végétation côtière [18] et la formation de microfalaises. Cet affaiblissement de la végétation est accompagné du recul du cordon dunaire et la perte d'énormes quantités de sédiments remobilisées vers le large.



Figure 8 : *Végétation emportée par l'action des vagues à Diembéring*

4. Discussion

L'action du courant a formé, à hauteur du village de Diembéring, un compartiment sédimentaire marquée par une érosion permanente. La constance des courants de dérive met en perpétuel mouvement les sédiments le long de la plage. Ce phénomène de dérive n'est pas homogène sur toute la côte. La morphodynamique de ces littoraux meubles dépend des échanges et des transferts de sédiments. Cependant, au niveau des côtes sédimentaires du village de Diembéring, l'érosion constante prouve que les pertes en sédiments sont toujours supérieures aux apports. Cette plage est bordée par endroit d'un cordon dunaire parallèle à la côte et support d'une végétation caractéristique du milieu. Ces dunes constituent des réserves sédimentaires et jouent un rôle important dans la stabilisation des côtes [7]. Cependant, l'attaque constante des vagues déferlantes entraîne de grosses quantités de sédiments dans les petits fonds. Étant donné que le secteur est toujours agité, ces sables érodés ne peuvent plus remonter et se déposer sur la plage. Ils sont drainés par un transport longshore vers le sud dont leur dépôt entraîne la formation et le développement des flèches sableuses généralement à pointe libre. À l'absence du cordon dunaire, l'action des houles entraîne la formation de microfalaise d'une hauteur de 1,23 m et la dégradation de la végétation continentale. Les résultats des indices granulométriques n'ont pas connu une grande variation entre les radiales. La taille du grain moyen varie entre $2,15 \phi$ et $2,76 \phi$ sur l'ensemble des radiales, ce qui indique qu'il s'agit de sables fins. Ces résultats sont également en concordance avec ceux de [4] qui indiquent que la majorité des sables des plages en Basse Casamance est composée de sédiments fins. L'indice de classement évolue entre $0,35 \phi$ et $0,5 \phi$, ce qui signifie qu'ils sont tous des sables bien classés. L'indice d'asymétrie montre que toutes les courbes sont presque asymétriques tandis que l'acuité indique des courbes mesokurtiques. Toutes les valeurs du kurtosis sont comprises entre $0,90 \phi < KG < 1,11 \phi$ avec une légère variation entre les trois radiales. Les courbes cumulatives semi-logarithmiques des sables des trois radiales sont toutes sigmoïdales, bien redressé et bien régulier. Cela montre un stock sédimentaire homogène et des conditions d'énergie adaptées à la charge transportée [19]. Les données satellitaires utilisées semblent adéquates pour étudier ces genres de thématiques compte tenu de la finesse de leur résolution spatiale (10m) et spectrale (12 bandes). La ligne instantanée du rivage reste identifiable dans les canaux comme le proche infrarouge et par composition colorée fausse couleur infrarouge. Cependant, plusieurs éléments doivent être pris en compte lors du choix de la ligne de référence de trait de côte en raison de la complexité du système côtier. Plusieurs éléments doivent être pris en compte comme l'alternance des marées, l'heure de passage du satellite etc. [7]. La précision des résultats permettrait de prendre de meilleures décisions dans la lutte contre l'érosion côtière.

Dans un contexte de changement climatique et d'amplification de l'érosion littorale, l'étude de la cinématique côtière est un préalable indispensable à la gestion des espaces côtiers. L'analyse de la cinématique du trait de côte et les observations in situ montrent une forte érosion côtière suivie d'un recul très rapide de la ligne de rivage entre 2016 et 2022. Les taux de recul varient entre 7,28 et 23,73 m/an entre 2016 et 2019. Tout le secteur est en érosion suivi d'un important recul du trait de côte. Le taux de recul maximal est de 23,47 m/an. Les plus forts taux d'érosion sont localisés au sud du village de Diembéring et évoluent entre 16,24 m/an et 23,47 m/an. Ces importants taux de recul observés entre 2016 et 2019 ont connu une légère baisse entre 2019 et 2022. Des secteurs d'engrèvement peuvent être observés au nord de la ville de Diembéring avec des taux de progradation variant entre 5,73 et 6,63 m/an tandis que les taux d'érosion varient entre 3,10 m/an et 19,02 m/an.

5. Conclusion

Cette contribution a permis caractériser la dynamique sédimentaire et l'évolution du trait de côte le long du littoral de la ville de Diembéring. Les analyses granulométriques des sables superficiels de la plage de Diembéring montrent que cette dernière est caractérisée essentiellement par des sables fins, bien classés avec des courbes presque asymétriques et mesokurtiques. En ce qui concerne l'étude de l'évolution du trait de côte, le linéaire analysé s'étend sur sept (7) kilomètres et est en érosion durant la période 2016-2019. Cette dernière détient les plus forts taux de recul compris entre 16,24 m/an et 23,47 m/an. Les secteurs à progradation apparaissent durant la période 2019-2022 notamment au nord de la ville. Ces secteurs pourraient bénéficier des apports sédimentaires fluviaux et déposés par les courants de dérive littorale induits par la houle du nord. Les résultats de l'étude de la mobilité du trait de côte montrent un littoral très dynamique sous l'action des courants de dérive.

Références

- [1] - D. TINE, "Évolution climatique et dynamiques des espaces littoraux par approche géomorphologique dans la partie septentrionale des Rivières du Sud : de la Basse Casamance (Sénégal) au Rio Gêba (Guinée Bissau)". Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop, (2023) 304 p.
- [2] - C. BOUVIER, "Barres d'avant-côte et trait de côte : dynamique, couplage et effets induits par la mise en place d'un atténuateur de houle". Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, (2019) 220 p.
- [3] - ARTELIA, CEREMA, UNPG, "Évolution du trait de côte et extraction de granulats marins : point sur les connaissances et les pratiques actuelles". Rapport d'étude, (2021) 114 p.
- [4] - M. THIOR, T. SANE, O. SY, L. DESCROIX, L. G. NDIAYE, A. K. SAMBOU, D. CISSOKHO et B. SOLLY, "Caractéristiques granulométriques et dynamique sédimentaire entre les différentes unités géomorphologiques du littoral de la Casamance, Sénégal", *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 33 (2019) 189 - 213
- [5] - O. RAYNAL, R. CERTAIN, C. BRUNEL, N. ALEMAN, N. ROBIN, B. GUERINEL et L. MONTEL, "Analyse volumétrique et granulométrique du prisme sableux littoral du Languedoc-Roussillon". Rapport final, *LITTOSIS*, (2015) 46 p.
- [6] - G. PENNOBER, "Analyse spatiale de l'environnement côtier de l'archipel des Bijagós (Guinée Bissau)". Thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, Institut supérieur européen de la mer, (1999) 233 p.
- [7] - D. TINE, M. FAYE, A. ATOUI et G. FAYE, "Caractérisation granulométrique et dynamique sédimentaire dans les plages septentrionales des rivières du sud : cas de la basse Casamance". *Afrique SCIENCE*, 21 (3) (2022) 157 - 173 p. <https://www.afriquescience.net/PDF/21/3/12.pdf>

- [8] - C. MALLET and A. MICHOT, "Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte". BRGM, (2012). <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60616-FR.pdf>
- [9] - C. MARIUS, "Mangroves du Sénégal et de la Gambie : Écologie, pédologie, géochimie, mise en valeur et aménagement". Paris : ORSTOM, (1985) 357 p.
- [10] - R. L. FOLK and W. C. WARD, "Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters". *Journal of sedimentary Petrology*, Vol. 27, N°1 (1957) 3 - 26 p.
- [11] - G. S. VISHER, "Grain size distributions and depositional processes". *Jour. Sedim. Petrol., Tulsa*, Vol. 39, N° 3 (1969) 1074 - 1106 p.
- [12] - M. ROBIN et F. GOURMELON, "La télédétection et les SIG dans les espaces côtiers". *Éléments de synthèse à travers le parcours de François Cuq, Norois* [En ligne], (2016) 196 2005/3. URL : <http://norois.revues.org/368>
- [13] - C. H. FLETCHER, J. J. ROONEY, M. BARBEE, S. C. LIM et B. RICHMOND, "Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii". *Journal of Coastal, Research, Special Issue*, N°38 (2003) 106 - 124 p.
- [14] - E. R. THIELER, D. MARTIN et A. ERGUL, "The Digital Shoreline Analysis System, version 2.0: Shoreline change measurement software extension for ArcView : USGS U.S". Geological Survey Open-File Report, (2003) 03 - 076. https://www.revist.ci/REVIST_33/REVIST_33_12.pdf
- [15] - I. FAYE, "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 analyses de cartes anciennes". Thèse de l'université de Bretagne occidentale, (2010) 321 p. <https://hal.inria.fr/tel-00472200/>
- [16] - M. SADIO, "Morphodynamique et aménagement des flèches littorales de la côte du Sénégal". Thèse de doctorat, UCAD ; AIX Marseille Université, (2017) 375 p.
- [17] - A. ATOUI and M. BRAHIM, "Distributions granulométriques des sédiments de surface de la frange littorale du Ras Taguermess au Ras Marmor (Golfe de Gabès, Tunisie)". In : Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime. *Édition 1, Hammamet*, (2009) 75 - 78
- [18] - M. THIOR, T. SANE, A.A. SY, E.B. DIEYE, B. BARRY, L. DESCROIX, "Évolution morphologique du cordon sableux sur le littoral de la Casamance (Sénégal)", *Revue marocaine de géomorphologie*, <https://revues.imist.ma/index.php/Remageom/article/view/19334/11768>
- [19] - H. SAIDI, M. BRAHIM et M. GUEDDARI, "Caractérisation granulométrique et minéralogique des sédiments de surface de la frange littorale Sidi Bou Said - la Goulette". *Bull. Inst. Natn. Scien. Tech. Mer de Salammbô*, Vol. 31, (2004) 97 - 106 p. <https://aquadocs.org/handle/1834/1169>