
Approche cartographique de l'évolution du trait de côte dans l'estuaire de la Casamance

A cartographic approach of the evolution of the coastline of the Casamance estuary

Aproximación cartográfica para el estudio de la evolución costera en la ría de Casamance

Mamadou Thior, Amadou Abou Sy, Idrissa Cisse, El Hadji Balla Dieye, Tidiane Sane, Boubacar Demba Ba, Boubacar Solly et Luc Descroix

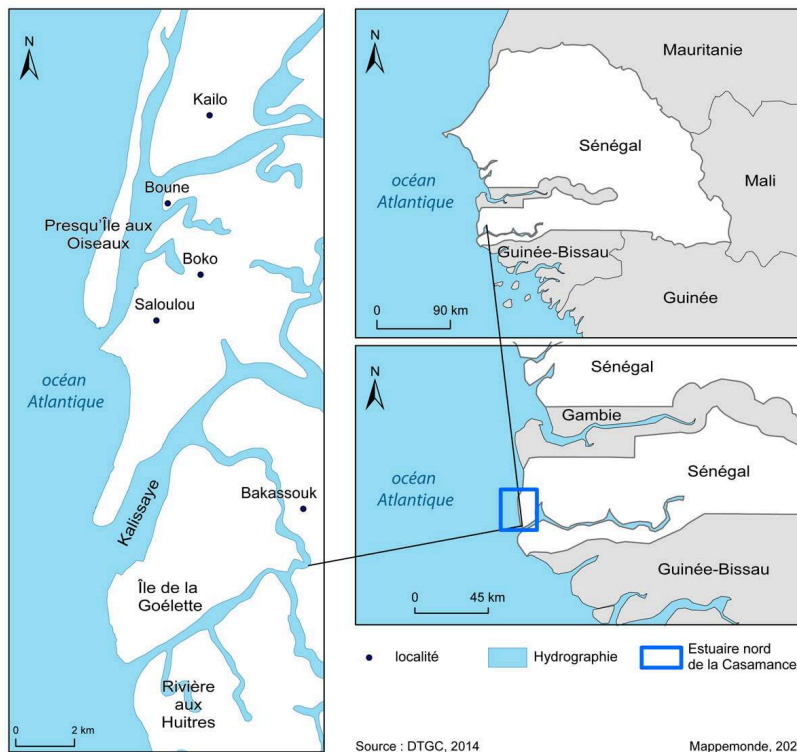
Introduction

- 1 Les connaissances sur la normalisation en cartographie de l'évolution historique du trait de côte ont connu un progrès non négligeable. Ainsi, beaucoup de littoraux ont fait l'objet de nombreuses études par différents champs disciplinaires et à travers les nouvelles approches cartographiques. Cependant, la plupart des littoraux de l'Afrique de l'Ouest ne sont pas encore suffisamment abordés avec les approches modernes d'analyse spatiale de l'évolution du trait de côte (Pennober, 1999 ; Faye *et al.*, 2011). À l'échelle locale, l'étude diachronique de la variation spatio-temporelle du trait de côte reste parfois très complexe. La variation complexe du trait de côte, due à de nombreux facteurs dont la basse topographie (2 m) sur le littoral de la Casamance appelle une réflexion sur les nouvelles techniques (Sadio, 2017 ; Thior *et al.*, 2019a). En effet, beaucoup d'études qui s'intéressent à la cinématique du littoral ont montré qu'il existe plus d'une douzaine de lignes de référence matérialisant la position du trait de côte (Robin, 2002 ; Boak et Turner, 2005 ; Faye, 2010 ; Ndour *et al.*, 2018). Cette diversité d'indicateurs provoque la recherche et la mise au point de nombreuses méthodes pour détecter, extraire et suivre l'évolution du trait de côte. Ainsi, les recherches concernant la cinématique du littoral ont mis au point des méthodes d'extraction et de suivi du trait de côte. Ces approches méthodologiques reposent sur la compilation et la

comparaison de données acquises, soit sur le terrain par des instruments de topométrie (niveau de chantier, théodolite, tachéomètre électronique, lidar, récepteur DGPS, etc.), soit en laboratoire par le traitement numérique d'images satellites ou aériennes (Costa, 2000 ; Faye, 2010 ; Federico *et al.*, 2018 ; Thior *et al.*, 2019a).

- 2 La méthode générale de détermination de la variation historique du trait de côte est basée sur une superposition d'images satellitaires Landsat multitudes (2004, 2008, 2012, 2016 et 2019). L'analyse a été réalisée sur la base de l'interprétation de ces données géospatiales. La méthode est fondamentalement basée sur le choix d'un indicateur de trait de côte, la correction géométrique des images satellitaires utilisées, la numérisation du trait de côte à l'écran au 1/1500^e, l'estimation des marges d'incertitude et le calcul du taux d'évolution du trait de côte à différentes dates. Ainsi, l'exploitation minutieuse des différentes images retenues à partir de différents canaux a permis de déterminer le trait de côte.
- 3 L'intérêt de cette démarche est de permettre des calculs statistiques d'extrapolation et des calculs de tendance utilisés en analyse diachronique de la dynamique du trait de côte. Cette base théorique de synthèse méthodologique est ensuite appliquée sur le littoral de la Casamance dans un système d'information géographique. Cette méthode permet d'obtenir une représentation cartographique et graphique des résultats statistiques sur l'évolution historique du trait de côte du littoral de la Casamance.
- 4 Par ailleurs, en Casamance littorale, la mer avance et affecte sur son passage des habitats humains et des espaces supports d'activités productives. Elle engloutit les dunes, les rizières, les forêts, les palmeraies, les rôneraies, les mangroves, les zones sacrées, etc.
- 5 Cet article s'intéresse également aux facteurs explicatifs de cette dynamique destructive et permet ainsi aux décideurs d'avoir accès à l'information scientifique sur la cinématique littorale dans une zone où les recherches ont très peu abordé cette question. Cette dynamique repose sur l'hypothèse générale selon laquelle la destruction des plages de la Casamance résulte des processus d'érosion naturelle exacerbée par les actions anthropiques. Aussi, la dynamique des plages de la Casamance intègre le fonctionnement hydrodynamique côtier (mer, fleuve, vent), la morphologie côtière (topographie, granulométrie) et les différentes formes d'intervention humaine. Un plan d'adaptation/sauvegarde de la Casamance littorale doit passer par une prise en compte de la dynamique de son littoral dans un contexte de changement climatique. Cette contribution propose une approche cartographique de la cinématique littorale pour répondre à ce besoin. Le fondement de cette réflexion reste ainsi le besoin d'approfondissement des connaissances pour une meilleure prise en charge des conditions de vie des populations de la Casamance : « Mieux connaître pour mieux gérer ».
- 6 Ainsi, la Presqu'île aux Oiseaux, l'embouchure de Kalissaye, l'île de la Goélette et la Rivière aux Huîtres nous servent d'étude de cas (**figure 1**).

Figure 1. Localisation de la zone d'étude



Méthodologie

Ambiguïté et diversité de la définition des lignes de référence du trait de côte

- 7 La définition du trait de côte est tout aussi délicate que son espace reste dynamique. Dans la littérature existante, on peut retrouver autant de définitions que d'auteurs sur la question. Baulig (1996) se démarque des autres comme Boak et Turner (2005). En effet, pour lui, la limite est très mouvante d'autant plus qu'il s'agit de celle entre la côte et le rivage qui se déplace en fonction de l'état de la mer et de la marée. Il qualifie donc la marée de facteur déterminant dans la définition du trait de côte.
- 8 Pour Boak et Turner (2005), on pourrait avoir une multitude de traits de côte ; ce qui expliquerait d'ailleurs la possibilité pour eux de recenser 19 traits de côte à partir de 45 indicateurs relevés dans environ 80 publications. Le trait de côte a donc plusieurs définitions qui varient selon les indicateurs (Juigner, 2017 ; Stefan *et al.*, 2017). À côté de cette complexité qui revient constamment, due à la mobilité des espaces d'estran, se posent les problèmes liés aux définitions des différentes disciplines qui s'intéressent à la mobilité du trait de côte (géomorphologie, géographie, océanographie). Ainsi, en fonction de l'emplacement côtier, de la source de données et de la pertinence scientifique, différents indicateurs de position de la ligne de référence sont utilisés pour documenter les changements côtiers (Morton *et al.*, 2004). Les lignes de référence peuvent donc varier d'une discipline à une autre. C'est pourquoi leur utilisation en cinématique du littoral a fait l'objet de plusieurs études (Bird, 1985 ; Faye, 2010).

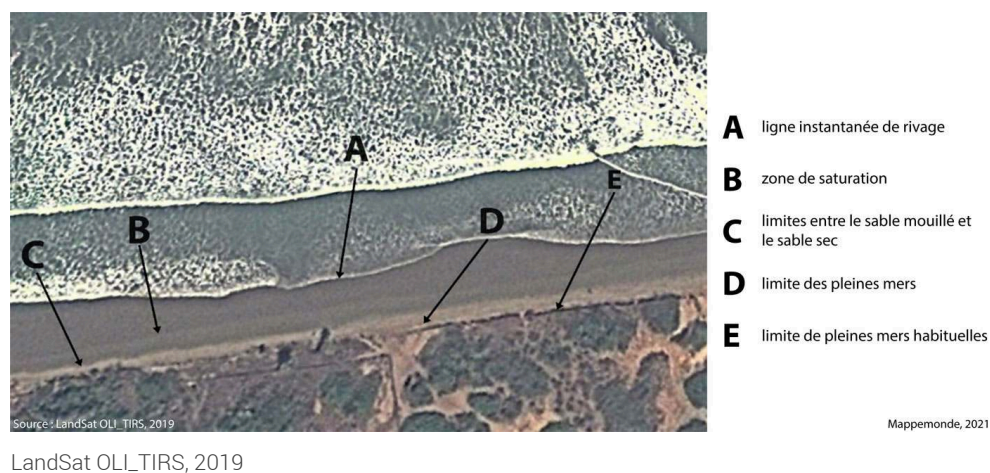
- 9 Au-delà de cette difficulté, s'ajoute la diversité des critères d'identification du trait de côte selon les spécialités. Limite de référence indéniable en tant que séparation linéaire entre deux domaines, terrestre et marin, le trait de côte est pourtant une notion ambiguë tant le passage de l'un vers l'autre est progressif dans l'espace et mobile dans le temps (Moore, 2000 ; Le Berre *et al.*, 2016).
- 10 Par ailleurs, la notion de trait de côte pose rapidement problème dès lors qu'elle change de signification littérale d'une langue à une autre. D'ailleurs, Bird (1985) soulignait déjà cette polémique conceptuelle. En effet, dans la littérature anglo-saxonne et américaine, en particulier, les termes *shoreline* et *coastline* sont considérés comme synonymes, alors qu'il faut les distinguer, car *shoreline* désignant la limite du plan d'eau en fonction des fluctuations du jet de rive et de la marée ; ce qui signifie littéralement en langue française la ligne instantanée de rivage. Quant à l'expression *coastline*, elle renvoie à la limite atteinte par les pleines mers des vives eaux d'équinoxe et pouvant être matérialisée selon le type de côte par le pied de falaise ou la limite de la végétation (Armaroli et Ciavola, 2011). Donc, en français, elle est liée à la notion de trait de côte.

Le choix d'une ligne de référence adaptée à l'estuaire de la Casamance

- 11 Le littoral de la Casamance offre la possibilité d'utiliser beaucoup d'indicateurs. Sa particularité morphologique et botanique donne plus d'avantages aux limites de la végétation (Thior *et al.*, 2019a). Néanmoins, dans cette étude, la disponibilité des données géospatiales de résolution relativement haute (30 m) et des informations sur les conditions météo-marines et topographiques (marnage et pente moyenne) autorise le choix d'une référence parmi les limites marégraphiques. Elles sont souvent les limites d'humectation d'estran et traduisent la limite supérieure du jet de rive selon les différentes hauteurs du plan d'eau déterminé par les variations de la marée et des conditions de surcote (Juigner *et al.*, 2012). Ainsi, au niveau des rivières aux Huîtres et de Kalissaye, qui sont des embouchures tidales, le marnage est de 1,1 m en moyenne et la pente est de 7,83 % (Sadio, 2017). Ayant la valeur de la pente moyenne et celle du marnage, la ligne instantanée de rivage bien visible sur les images Landsat peut être utilisée pour représenter le trait de côte. Elle correspond en effet à la surface linéaire marine sous l'influence de l'onde de marée et de la pente de l'estran à tout moment. Très mobile, la ligne instantanée de rivage est plus facile à remarquer sur les plages à large estran et à pente relativement faible (Dalongeville, 2005). Ce qui est globalement le cas pour les côtes de la Casamance.
- 12 Les limites d'humectation dans leur globalité permettent un choix multiple de marqueurs de trait de côte (**figure 2**). En effet, dès qu'il y a une différence de teneur en eau sur les plages à sable blanc, se présente une possibilité de ligne de référence. C'est la raison pour laquelle elles présentent autant d'erreurs qui pourraient être liées à la confusion qu'elles donnent de la diversité de marqueurs du trait de côte. Par ailleurs, il faut noter que, dans cette étude, on ne précise pas réellement si les variations des positions des lignes de référence marégraphiques sont dues aux processus tectoniques, eustatiques ou les deux, ou encore des phénomènes isostatiques ou non ; car les données hydrodynamiques sont rares dans la zone d'étude, voire inexistantes. Mais, dans tous les cas, les variations des limites d'humectation sont considérées ici comme

des mouvements relatifs apparents jusqu'à ce qu'elles soient nettement identifiées sur un support (Durand, 2002).

Figure 2. Les lignes de référence marégraphique



Le traitement cartographique

- 13 L'utilisation de l'imagerie Landsat pour la mesure de la cinématique du trait est pertinente dans le cas des littoraux extrêmement dynamiques dont l'évolution est supérieure à la marge d'erreur (Crowell *et al.*, 1994 ; Fletcher *et al.*, 2003 ; Faye, 2010). Or, le littoral de la Casamance est globalement caractérisé par une très forte dynamique de ses plages (Faye, 2010 ; Ndour *et al.*, 2018).
- 14 Les images satellitaires Landsat utilisées dans cette étude sont fournies par les capteurs ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) et OLI (*Operational Land Imager*). Elles sont disponibles et gratuitement téléchargeables sur le site de l'USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Leur résolution de 30 m est suffisante pour étudier l'évolution du trait de côte dans l'estuaire de la Casamance (Faye, 2010 ; Sadio, 2017). Cinq dates de prise de vues sont retenues (**tableau 1**).

Tableau 1. Données utilisées dans l'analyse diachronique entre 2004 et 2019

Satellite	Série	Capteur	Date d'acquisition	Résolution spatiale
Landsat	L7	ETM+	01/01/2004	30 m
Landsat	L7	ETM+	01/01/2008	
Landsat	L7	ETM+	15/03/2012	
Landsat	L8	OLI_TIRS	01/03/2016	
Landsat	L8	OLI_TIRS	01/01/2019	

- 15 La méthode de cartographie utilisée est basée sur la photo-interprétation assistée par ordinateur. Elle s'articule autour de quatre étapes à savoir la correction géométrique

des images Landsat téléchargées, la numérisation de la ligne instantanée de rivage à l'écran au 1/1500^e, l'estimation des marges d'incertitude et le calcul du taux d'évolution du trait de côte.

La correction géométrique

- 16 La superposition des images Landsat a montré des décalages géométriques qu'il fallait impérativement corriger pour assurer un bon suivi spatio-temporel du trait de côte afin de les projeter dans le système de projection cartographique UTM/WGS 84/Zone 28 Nord. La méthode de correction adoptée est le géoréférencement image par image avec choix de points amers à partir d'une image de référence en utilisant un polygone de second degré. 22 points de calage (ou points amers) par image disposés dans l'ensemble de la bande d'images découpée de part et d'autre du linéaire côtier qui est ici l'objet d'étude.
- 17 L'image Landsat OLI plus récente, et présentant une géométrie plus intéressante, de 2019 est utilisée comme image référence. Après correction, l'erreur résiduelle des images est inférieure à 0,2 pixel. Cependant, il est conseillé de ramener cette erreur à ± 1 pixel soit 2 pixels si on compare deux images (Coyne *et al.*, 1999 ; Durand, 2002 ; Faye, 2010).

Numérisation de la ligne instantanée de rivage

- 18 La numérisation de la ligne instantanée de rivage a d'abord nécessité un travail d'identification et d'extraction des marqueurs pertinents de trait de côte. Ce travail peut se faire manuellement sur les images satellitaires. Les marqueurs de trait de côte peuvent être directement visibles sur l'image si celle-ci a une haute résolution comme c'est le cas des images Landsat utilisées dans cette étude. C'est la raison pour laquelle la photo-interprétation et la photogrammétrie sont les techniques les plus utilisées pour extraire les lignes de référence (Boak et Tunner, 2005). Par ailleurs, la photo-interprétation assistée par ordinateur couplée à un SIG présente un avantage de coût en matériel (Juigner *et al.*, 2012). Dans cette étude, la version 10.5 d'ArcGIS a permis d'effectuer ce travail à travers l'interface Arcmap. Les marqueurs les plus faciles à détecter manuellement sont les lignes instantanées de rivage, les limites d'humectation et les limites de végétation. C'est pourquoi, Dolan *et al.* (1978) soulignent le consensus qui s'est fait sur le niveau de marée haute, puisqu'il est continu le long du littoral, et est facilement reconnaissable sur les images dans la mesure où il est situé à la limite entre les parties mouillées (qui apparaissent en gris foncé) et sèches (apparaissant en gris clair à blanc) de la plage. De même, il varie le moins horizontalement en fonction de la marée. Ainsi, pour cette étude, c'est la ligne instantanée de rivage qui a été utilisée comme marqueur du trait de côte. Étant identifiées, la numérisation s'est faite à l'écran au 1/1500^e en suivant ces lignes instantanées de rivage sur les différentes images.

Estimation des marges d'incertitude

- 19 Les résultats de mesure des taux d'évolution du trait de côte, quelle que soit l'approche par analyse spatiale, souffrent de plusieurs sources d'erreurs (Crowell *et al.*, 1994 ; Moore, 2000 ; Robin, 2002 ; Juigner, 2012 ; Sadio, 2017). La qualité des résultats d'une

analyse diachronique est donc intimement liée à la connaissance de la marge d'erreur (Juigner, 2017). En effet, les marges d'erreur permettent de caractériser la situation (érosion, stabilité, accrétion) sur une période bien déterminée. L'estimation de ces risques d'erreurs doit conduire à l'élaboration d'une marge d'erreur qui sera prise en compte dans l'interprétation des résultats (Durand, 2002 ; Gibbs *et al.*, 2015 ; Gould *et al.*, 2015). 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.

- 20 L'erreur globale, appelée Erreur de Position globale du trait de côte, est calculée en prenant la racine carrée de la somme des carrés de chaque erreur : erreur de pixel, de géoréférencement, de numérisation, oscillation (Mathieu, 2014 ; Juigner, 2012 ; Fletcher *et al.*, 2003).
- 21 Dans cette étude, trois sources d'erreur sont prises en compte :
- l'erreur de géoréférencement (*RMS Root Mean Square Error*). Lors du géoréférencement, le logiciel (*ArcGIS*) calcule automatiquement l'erreur pour effectuer la correction géométrique ;
 - 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. Or, sur les côtes à embouchure tidale de la Casamance, le marnage est de 1,1 m en moyenne et la pente de 7,83 % en l'absence de données marégraphiques coïncidant avec les prises de vue (Sadio, 2017) ;
 - l'erreur liée à la numérisation fait partie des erreurs aléatoires qu'il faut intégrer dans l'analyse des résultats. Mais il n'existe pas encore à ce jour une méthode objective pour l'évaluer (Morton *et al.*, 2004 ; Thieler *et al.*, 2009). 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 (Moore et Griggs, 2002 ; Fletcher *et al.*, 2003 ; Faye, 2010 ; Sadio, 2017) La marge d'erreur émanant de la numérisation est obtenue en cumulant sa moyenne + 2 écarts-types + taille pixel.
- 22 Ainsi, on calcule pour chaque année la valeur des trois erreurs déjà identifiées sur les images. Cela donne donc les équations suivantes :

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

Et

$$E\alpha = \frac{\sqrt{E_{pt}^2 + E_{pt}^2}}{Période(t)}$$

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

- 23 Ainsi, pour la période 2004-2008 par exemple, on a :
- 24 Pour l'image de 2004 :

- Une erreur de géoréférencement RMS (Eg) = 1 ;
- Une erreur de digitalisation (Ed)

Moyenne des écarts =1,88	
Écart-types 1,33x2 = 2,66	= 34,54

Taille du pixel = 30 m	
------------------------	--

- Une erreur de l'oscillation de marée (E_o) = 0,14

25 Pour l'image de 2008 :

- Une erreur de géoréférencement RMS (E_g) = 1 ;
- Une erreur de digitalisation (E_d)

Moyenne des écarts = 1,51	
Écart-types 1,19x2 = 2,38	= 33,90
Taille du pixel = 30 m	

- Une erreur de l'oscillation de marée (E_o) = 0,14

26 Pour calculer l'erreur de la période 2004-2008 par exemple, on a :

$$\begin{array}{lcl} \text{Ept}_{2004} = \sqrt{1^2 + 34.54^2 + 0.14^2} = 35.55 & \text{et} & \text{Ept}_{2008} = \sqrt{1^2 + 33.90^2 + 0.14^2} = 34.90 \\ \text{Ept}_{2004} = 35.5 & \text{et} & \text{Ept}_2 = 34.90 \end{array}$$

27 Alors

$$E\alpha = \frac{\sqrt{35,55^2 + 34,90^2}}{4} = \frac{\sqrt{70,45^2}}{4} = \frac{70,45}{4} = 17,6\text{m}$$

28 La même procédure est appliquée pour calculer les erreurs des périodes 2008-2012 ; 2012-2016 ; 2016-2019.

Tableau 2. Les marges d'erreur

Intervalle de mesure	Ligne de référence	Estimation de l'erreur annuelle (m)
2004-2008	Ligne instantanée de rivage	± 17,6
2008-2012	Ligne instantanée de rivage	± 17,1
2012-2016	Ligne instantanée de rivage	± 16,51
2016-2019	Ligne instantanée de rivage	± 21,58
2004-2019	Ligne instantanée de rivage	± 11,25

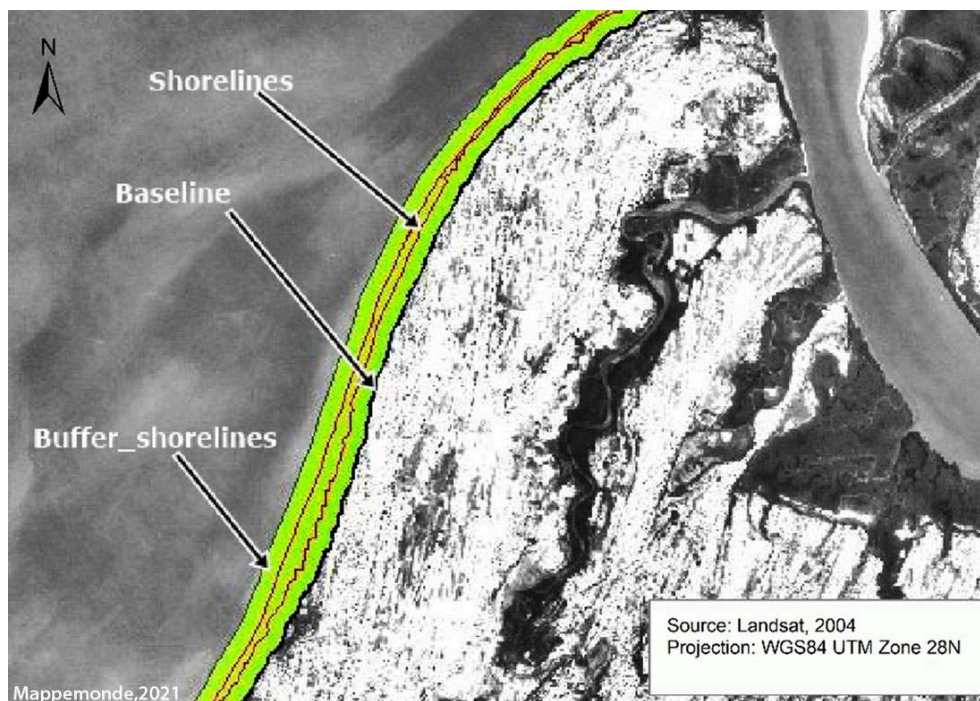
Les statistiques d'évolution du trait de côte

29 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 (Thieler *et al.*, 2009).

- 30 Le calcul du taux d'évolution du trait de côte nécessite au préalable la mise en place d'au moins deux traits de côte numérisés à différentes dates. Le principe général de l'outil DSAS est de mesurer les écarts entre les traits de côte d'une même série et de calculer les statistiques des taux d'évolution (en m/an). Pour cela, l'exploitation de l'outil demande au préalable une mise en forme rigoureuse des données dans une géodatabase personnalisée, la création d'une ligne de base et de transects équidistants, une estimation de l'incertitude liée à la méthode ainsi que le choix des indices relatifs à l'évolution du trait de côte (Juigner *et al.*, 2012 ; Crowell *et al.*, 1994 ; Faye *et al.*, 2011). 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.
- 31 À partir de ce moment, il est nécessaire de créer une géodatabase 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 (**figure 3**).

Figure 3. Les entités d'une géodatabase personnalisée



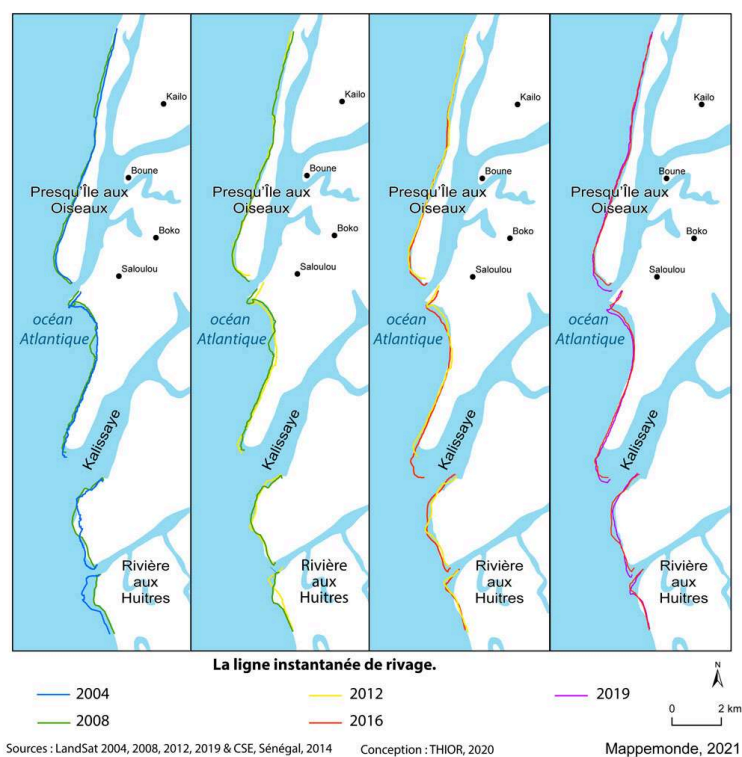
La représentation graphique

- 32 La représentation des résultats est faite sur la base de deux échelles temporelles. La première correspond à l'écart entre deux dates (deux traits de côte) et la seconde présentation correspond à l'échelle globale qui prend en compte tous les traits de côte (2004, 2008, 2012, 2016 et 2019). Mais, au préalable, il faut définir les indices de calcul de taux d'évolution.
- 33 L'*End Point Rate* (EPR) calcule le rapport de la distance entre le trait de côte correspondant à la date la plus ancienne et à la date la plus récente. Ainsi, lorsqu'on dispose uniquement de deux traits de côte, l'EPR reste un bon indice pour évaluer la cinématique (Moore, 2000 ; Thielers *et al.*, 2009 ; Himmelstoss, 2009). C'est pourquoi nous l'avons utilisé pour évaluer les variations entre 2004, 2008, 2012, 2016 et 2019.
- 34 Le *Linear Regression Rate* (LRR) est l'indice qui permet d'estimer l'évolution de chaque segment sur l'ensemble de la période considérée (2004, 2008, 2012, 2016 et 2019). Le nombre d'individus de la série statistique est celui du nombre de traits de côte. Si ce nombre est faible comme pour l'EPR, cela pose le problème de la pertinence et de la robustesse des résultats. Ainsi, calculant le taux d'évolution annuelle de la ligne de référence le long de chaque transect, le LRR est donc plus pertinent lorsqu'on analyse la cinématique littorale pour plus de deux dates. En effet, la méthode de calcul tient compte de la distance évolutive du trait de côte sur toute la période considérée (Djagoua *et al.*, 2016 ; Faye *et al.*, 2011). Par ailleurs, la représentation graphique est conditionnée par les résultats statistiques des indices calculés. Elle restitue visuellement les évolutions mesurées sous plusieurs formes de graphiques. Ainsi, en fonction des indices, deux types de représentations graphiques sont utilisées dans cette étude. La première représentation est basée sur la classification des transects sur ArcGIS, permettant de voir le taux d'évolution entre deux traits de côte. La seconde représentation graphique est sous forme d'aire. Ainsi, sur l'axe des ordonnées on a l'axe longitudinal de l'étendue linéaire de la plage et, sur l'axe des abscisses, l'évolution du trait de côte.

Résultats statistiques et représentations cartographiques

- 35 L'analyse des résultats cartographiques issus de la cinématique est considérée par Pennober (1999) comme l'étude des formes indépendantes des forces qui en sont les causes. Naturellement, trois situations sont observées sur le littoral de la Casamance : la stabilisation, l'érosion et l'accrétion. Cela permet une double représentation graphique après traitement statistique. Mais, au préalable, il est nécessaire de représenter la position du trait de côte sur un support iconographique pour montrer visuellement la variation (**figure 4**). Cette représentation ne permet pas d'obtenir des taux de variation du trait de côte, mais permet d'apprécier la situation (érosion, accrétion, stabilisation) à une période donnée.

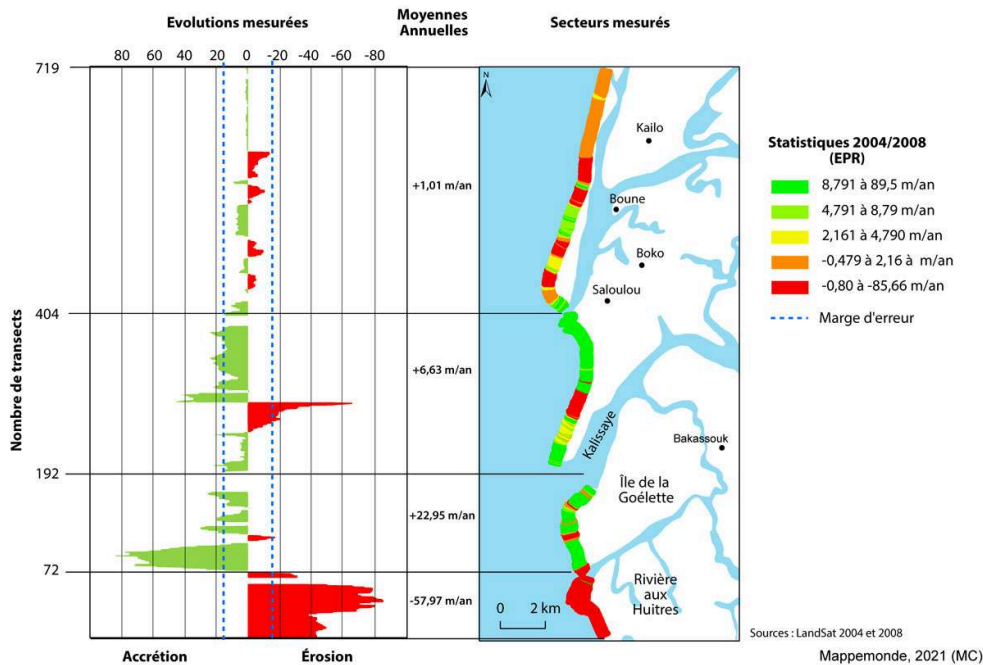
Figure 4. Position de la ligne rivage entre 2004, 2008, 2012, 2016, et 2019



Évolution de la ligne instantanée de rivage entre 2004 et 2008

- 36 Le secteur de la presqu'île aux Oiseaux, compris entre les transects 404 et 719, serait globalement caractérisé par une faible accrétion de 1,0 m/an, mais les moyennes des écarts mesurés sont comprises dans la marge d'erreur. Ce résultat ne serait donc pas significatif.
- 37 À l'image du nord du secteur mesuré, on peut observer une sédimentation sur la baie de l'embouchure de Kalissaye, mais avec une partie érodée du segment médian. Cette variation moyenne entre les transects 172 et 404 (+6,63 m/an) est comprise dans la marge d'erreur. Cependant, par endroit, les taux sont largement supérieurs à la marge d'erreur (+45,31, -63,17 m/an). Sur la plage de l'île de la Goélette, comprise entre les transects 72 et 404, la vitesse d'accrétion s'est accentuée soit +22,95 m/an. Cette valeur, toujours supérieure à la marge d'incertitude, laisse constater une accrétion.
- 38 L'embouchure de la rivière aux Huîtres présente une évolution significative. L'érosion est généralisée sur tous les transects (de 1 à 72). Ce qui donne un recul global de 57,97 m/an (**figure 5**). En résumé, les mouvements calculés entre 2004 et 2008 sont compris dans la marge d'erreur. Au sud du segment, ils sont largement supérieurs à la marge d'incertitude et sont significatifs, ce qui autorise leur prise en considération.

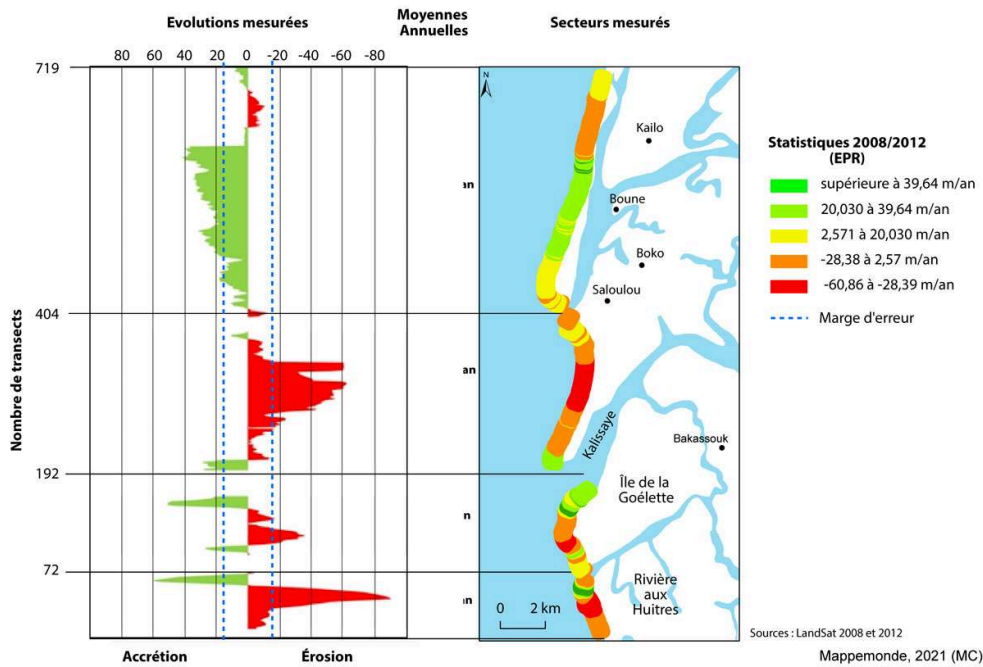
Figure 5. Évolution spatio-temporelle de la ligne de rivage du littoral nord de la Basse-Casamance (2004-2008)



Évolution de la ligne instantanée de rivage entre 2008 et 2012

- 39 La période 2008-2012 est globalement caractérisée par un déficit sédimentaire, avec cependant une variation irrégulière de la ligne de rivage. Cette situation montre une importante progradation de la plage de la presqu'île aux Oiseaux avec des taux d'accrétion pouvant atteindre 40 m/an et des reculs compris dans la marge d'erreur. Cependant, la moyenne des écarts enregistrée (11,5 m/an) entre les transects 404 et 719 est inférieure à la marge d'erreur.
- 40 En revanche, la baie de Kalissaye a reculé de 13,78 m/an, mais avec une accumulation au niveau du poulrier¹ vers le sud. Cette moyenne entre les transects 172 et 404 est également comprise dans la marge d'erreur, mais par endroit de la partie médiane de la baie, les taux de recul peuvent atteindre 50 à 60 m/an.
- 41 Cependant, la variation très irrégulière de l'île de la Goélette présente une accrétion moyenne (3,8 m/an) inférieure à la marge d'erreur entre le transect 72 et 192. Ainsi, la croissance du poulrier de l'île la Goélette a entraîné une ablation de la berge opposée (musoir). Ce qui a occasionné un recul moyen de 16,4 m/an sur la plage de la rivière aux Huîtres. Cette moyenne est légèrement inférieure à la marge d'erreur, mais l'ablation du musoir a entraîné des taux de recul maximal d'environ 73m/an entre les transects 1 et 72 (**figure 6**).

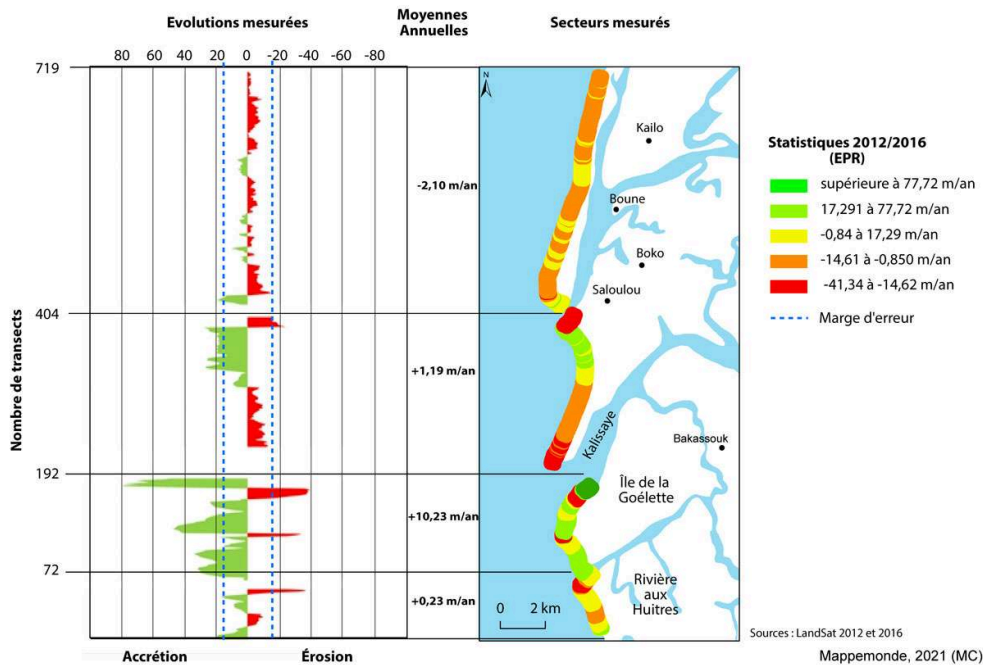
Figure 6. Évolution spatio-temporelle de la ligne de rivage sur le littoral nord de la Basse-Casamance (2008-2012)



Évolution de la ligne instantanée de rivage entre 2012 et 2016

- 42 Contrairement aux périodes précédentes, caractérisées par de forts taux de variation de la ligne de rivage, la période 2012-2016 est moins dynamique. La presque-île aux Oiseaux a globalement reculé entre 2012 et 2016, même si par endroits la plage a progradé, mais les valeurs mesurées sont comprises dans la marge d'erreur comme dans toutes les autres cellules hydro-sédimentaires. Inversement, la baie de Kalissaye qui avait reculé entre 2008 et 2012, a légèrement progradé sur son segment distal. Cependant, une bonne partie du segment proximal est caractérisée par un recul de la ligne de rivage. La plage de l'île de la Goélette a maintenu sa progradation depuis 2008, avec des taux de progradation maximale d'environ 70 m/an même si l'accrétion moyenne entre les transects 72 et 192 (10,23 m/an) est également comprise dans la marge d'erreur (**figure 7**).

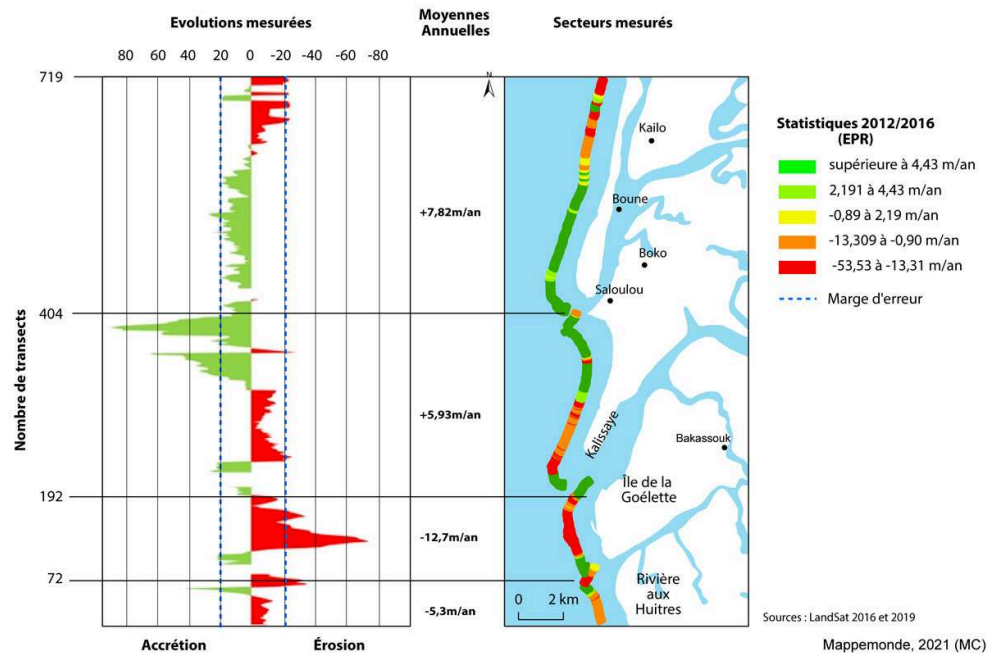
Figure 7. Évolution spatio-temporelle de la ligne de rivage du littoral nord de la Basse-Casamance (2012-2016)



Évolution de la ligne instantanée de rivage entre 2016 et 2019

- 43 À l'image de la période 2012-2016, celle de 2016-2019 présente des valeurs de taux de variation de la ligne de rivage qui sont comprises dans la marge d'erreur. Ainsi, la plage de la presqu'île des Oiseaux s'est sédimentée, surtout sur la partie distale. Cependant, la partie proximale est caractérisée par un recul de la ligne de rivage. Inversement, sur la baie de Kalissaye, les segments proximal et distal sont en accrétion alors que le segment médian a connu une érosion. La ligne de rivage de l'île de la Goélette a, par contre, reculé de 12,7 m/an entre le transect 72 et 192, même si ses deux extrémités sont en accrétion. Cette variation moyenne est comprise dans la marge d'erreur, mais le recul maximal a atteint 67,87 m/an (figure 8).

Figure 8. Évolution spatio-temporelle de la ligne de rivage du littoral nord de la Basse-Casamance (2016-2019)



44 En substance, les analyses effectuées sur les quatre secteurs de la zone d'étude permettent de dégager les dynamiques ci-après :

- Sur le secteur de la presqu'île aux Oiseaux :

45 Entre 2004 et 2008, le secteur de la presqu'île aux Oiseaux aurait subi une faible accrétion (1,0 m/an). Cette accrétion est plus importante entre 2008 et 2012 avec une progradation d'environ 11,5 m/an. Contrairement aux périodes précédentes, le secteur a reculé entre 2012 et 2016 pour une moyenne de 2,10 m/an. Entre 2016 et 2019, il a subi à nouveau une accrétion de l'ordre de +7,82 m/an. Globalement, sur toute la période d'observation le secteur de la presqu'île aux Oiseaux serait caractérisé par une dynamique accumulative, mais les moyennes des écarts mesurés sont comprises dans la marge d'erreur. Au regard de ce résultat, le secteur de la presqu'île aux Oiseaux n'est pas très dynamique.

- Sur le secteur de la baie de Kalissaye

46 Entre 2004 et 2008, il y a eu une sédimentation sur la baie de l'embouchure de l'ordre +6,63 m/an. En revanche, la baie de Kalissaye a reculé de 13,78 m/an entre 2008 et 2012. Entre 2012 et 2016, elle a légèrement progradé (1,9 m/an). Entre 2016 et 2019, on note une accrétion moyenne de 5,93 m/an. Globalement, sur toute la période d'observation, le secteur de la baie de Kalissaye serait également caractérisé par une tendance accumulative, mais avec des moyennes des écarts mesurés comprises dans la marge d'erreur ;

- Sur le secteur de l'île de Goélette

47 Sur la plage de l'île de la Goélette, on note une accrétion de l'ordre de +22,95 m/an entre 2004 et 2008. Cette accrétion se maintient entre 2008 et 2012 et se situe à 3,8 m/an. La progradation se poursuit entre 2012 et 2016, avec un taux 10,23 m/an. Sur la dernière séquence, 2016-2019, l'île de la Goélette a, par contre, reculé de 12,7 m/an. Globalement, sur toute la période d'observation le secteur de l'île de la Goélette est

caractérisé par une dynamique d'accumulation. Cette dynamique est plus accentuée durant la période 2004-2008 avec la moyenne des écarts mesurés supérieurs à la marge d'erreur.

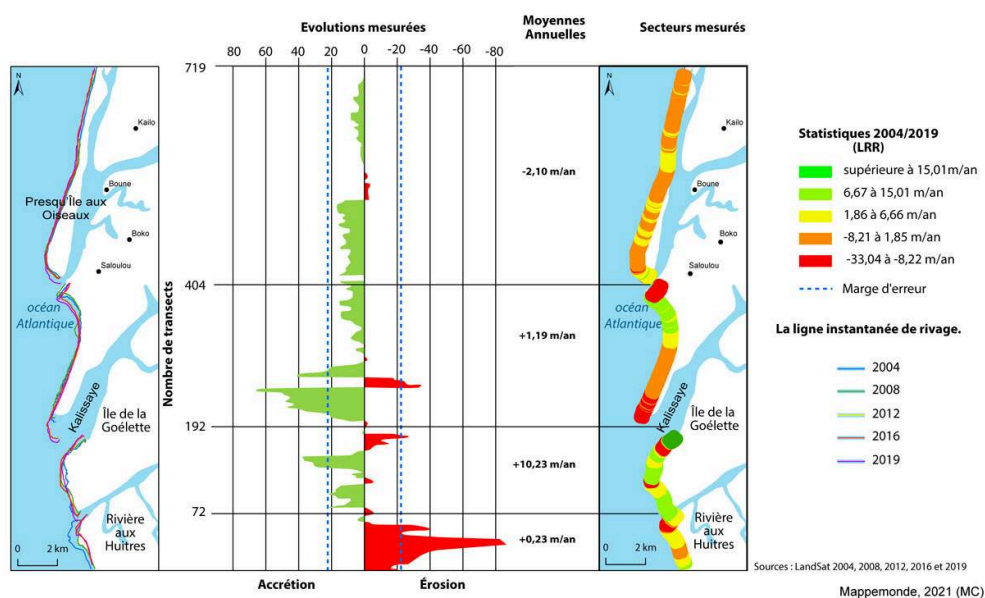
- Sur le secteur de l'embouchure de la rivière aux Huîtres

- 48 Au niveau de l'embouchure de la rivière aux Huîtres, l'érosion est généralisée entre 2004 et 2008, soit un recul global de 57,97 m/an. De 2008 à 2012, le secteur aurait enregistré un recul moyen de l'ordre 16,4 m/an. De 2012 à 2016, la plage de la rivière aux Huîtres est restée relativement stable. Elle a perdu cet équilibre entre 2016 et 2019, soit un recul de l'ordre de 5,3 m/an. Globalement, sur toute la période d'observation le secteur de la rivière aux Huîtres est caractérisé par une dynamique érosive.

Synthèse de l'évolution globale de la ligne de rivage sur toute la période

- 49 L'analyse de l'indice du LRR qui permet d'apprécier l'évolution globale de la ligne de rivage du secteur étudié montre que le nord du segment serait en accrétion, mais les moyennes des écarts mesurés sont comprises dans la marge d'erreur, tandis que le sud est caractérisé par une forte érosion avec des taux de recul largement supérieurs à la marge d'erreur.
- 50 On peut globalement noter que l'estuaire nord de la Casamance présente des caractéristiques morpho-dynamiques particulières. La présence des trois embouchures tidales joue un rôle dans la morphogenèse des unités qui se dégagent, en plus du travail de l'érosion qui façonne périodiquement la baie (**figure 9**).

Figure 9. Synthèse de l'évolution spatio-temporelle de la ligne de rivage du littoral nord de la Basse-Casamance (2016-2019)



Facteurs hydrodynamiques et anthropiques à l'origine de l'évolution du trait de côte en Casamance littorale

- 51 Les côtes casamançaises, à l'instar des côtes ouest-africaines, sont touchées par les houles de nord-ouest des hautes latitudes boréales et les houles du sud-ouest (Ndour *et al.*, 2018 ; Thior *et al.*, 2019a).
- 52 En Casamance littorale, deux types de vents circulent. La saison sèche ou printemps de février à mai-juin est dominée par les alizés continentaux et maritimes. Les alizés sont contrôlés par l'anticyclone des Açores et sa direction est dominée par le N-NO. L'hivernage ou été (juin-juillet à septembre-octobre) correspond à la période de mousson. La mousson est issue de l'anticyclone de Sainte-Hélène et est de direction S-SO. Elle atteint son maximum septentrional entre septembre et octobre en Casamance.
- 53 Les vagues se forment par un processus de transfert d'énergie induit par la houle du vent à la surface de l'eau. En Basse-Casamance, comme partout ailleurs sur les côtes du Sénégal, les vagues surviennent en même temps que les grandes marées récurrentes tous les 15 jours. La grande marée est souvent accompagnée de très grandes vagues dont les plus dévastatrices sont fréquentes entre le mois de septembre et de novembre. Sur les côtes sénégalaises, le marnage est inférieur à 2 m. En Casamance maritime, le marnage maximal est de 1,1 m.
- 54 Ainsi, les facteurs hydrodynamiques globaux et leurs manifestations locales justifient les résultats obtenus et qui témoignent d'une dynamique érosive et accumulative par endroit de la côte casamançaise.
- 55 Les houles créent des phénomènes d'engraissement, d'érosion et de transit sédimentaire. Les alizés maritimes jouent un rôle important dans le remaniement des sédiments des dunes et deviennent également destructeurs lorsque le climat est aride pendant l'année éolienne. Les vagues provoquent l'usure des falaises et des microfalaises meubles. Elles sont particulièrement dévoreuses de sable lorsqu'elles surviennent brusquement lors des tempêtes. L'action efficace et combinée des vagues et des houles du nord et du sud contribue ainsi à dégager les sédiments meubles tombés au pied des microfalaises par effet d'éboulement. Il s'y ajoute que la topographie basse de la Casamance (altitude en moyenne de 2 m) l'expose davantage aux effets de l'élévation du niveau de la mer consécutive au changement climatique.
- 56 Cette dynamique se traduit également par le recul de la végétation qui est un indicateur pertinent du recul du trait de côte en zone casamançaise. Cette dynamique s'explique donc essentiellement par des facteurs naturels exacerbés par des actions anthropiques (prélèvement du sable de la plage, ouvrages de protection sur la côte). C'est à l'image du ponton de Karabane dont la réalisation semble provoquer d'importantes conséquences sur le profil des plages situées juste à ses extrémités, car sans lui, cette partie de la côte aurait reculé naturellement de manière homogène. Le mur protège certainement la zone hôtelière et l'embarcadère, en revanche, les plages situées aux extrémités (est et ouest) sont davantage agressées puisqu'il y a moins de sable au pied du mur de protection.
- 57 Par ailleurs, en Casamance, les plages sableuses constituent une destination récréative populaire et sont souvent entourées de biens immobiliers précieux. On note des occupations concurrentielles des acteurs du tourisme. Ces formes d'occupation créent un blocage des échanges sédimentaires entre l'avant-côte et l'arrière côte et

contribuent ainsi au déséquilibre sédimentaire de la plage qui est en fait un « organisme vivant ». Le sable marin est prisé pour la construction de maisons pour plusieurs raisons. Sa composition granulométrique varie entre 0,063 mm et 0,6 mm, avec une moyenne de 0,2 mm (Thior *et al.*, 2019b). Les prélèvements de sable sur la plage, même si actuellement ce n'est pas une pratique à grande échelle en Casamance littorale, perturbent le bilan sédimentaire de la plage.

Conclusion

- 58 L'analyse de l'évolution du trait de côte, d'une manière générale en cinématique du littoral, exige tout d'abord le choix d'un indicateur du trait de côte. En effet, des études dans ce domaine ont montré qu'il existe plus d'une douzaine de lignes de référence matérialisant la position du trait de côte. Cette diversité d'indicateurs explique la recherche et la mise au point de nombreuses méthodes pour détecter, extraire et suivre la mobilité du trait de côte. Dans cet article, nous avons mis au point une méthode d'extraction et de suivi de la ligne instantanée de rivage en nous basant sur la nature de la côte de la Casamance, le matériel, mais aussi les données disponibles. Dans le cadre de cette étude, l'application de l'outil de calcul statistique DSAS dans cette démarche sur le littoral de la Casamance suppose d'abord que l'on dispose de données géospatiales multitudes (Thieler *et al.*, 2009). Il est ressorti de cette étude, malgré les erreurs et les limites de la méthodologie, que la ligne de rivage du nord de l'estuaire de la Casamance est globalement en accrétion. À l'exception de la rive sud des rivières aux Huîtres, tous les autres segments sont en accrétion. C'est pourquoi l'indice de variation de trait de côte LRR a été choisi pour calculer les taux de variation globale. Cependant, les intervalles de pas de temps dont l'EPR a servi d'indice de calcul ont témoigné des variations très contrastées de la ligne de rivage.
- 59 Au total, le phénomène analysé est très complexe, car très changeant sur une même portion du littoral. On peut ainsi distinguer des phénomènes d'érosions côtières à long terme qui se traduisent par un recul du littoral et des phénomènes d'érosions côtières à court terme, saisonniers qui sont temporaires, car généralement contrebalancés par des périodes d'engraissement. Ces dynamiques coexistent et se traduisent par une tendance généralisée au recul de la côte. Le suivi cartographique de la côte casamançaise a permis de comprendre la nature des contraintes environnementales, notamment celles liées à l'érosion côtière. Ainsi, cet article apporte une contribution à la compréhension du fonctionnement du système du littoral casamançais. Elle permet ainsi de connaître les types de dynamiques en cours dans ce littoral encore peu étudié afin de mieux définir les stratégies de protection de ses paysages côtiers, à la fois riches et fragiles.

BIBLIOGRAPHIE

- ARMAROLI C., CIAVOLA P. (2011). "Dynamics of a nearshore bar system in the Northern Adriatic: A video-based morphological classification". *Geomorphology*, vol. 126, n° 1, p. 201-216.
- BAULIG H. (1956). « Vocabulaire franco-anglo-allemand de géomorphologie ». Paris : Société d'édition Les Belles Lettres, 230 p.
- BIRD E.C.F., (1985). *Coastline changes. A global review*. New York : John Wiley & Sons, 219 p.
- BOAK, E.H., TURNER, I. L. (2005). "Shoreline Definition and Detection: A Review". *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n° 4, p. 688-703.
- 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), 103 p.
- COYNE M.A., FLETCHER C.H., RICHMOND B.M. (1999). "Mapping coastal erosion hazard areas in Hawaii: Observations and errors". *Journal of Coastal Research, Special Issue*, n° 28, p. 171-184.
- CROWELL M., LEATHERMAN S., BUCKLEY M.K. (1994). "Shoreline change rate analysis: long-term versus short term data". *Shore and Beach*, vol. 61, n° 2, p. 13-20.
- DALONGEVILLE R. (2005). « Formes de corrosion et de construction organogène des littoraux actuels calcaires de Méditerranée. Termes de comparaison pris en mer Rouge ». *Noréis*, n° 137, 136-137
- DJAGOUA E., VALÈRE M., BAKAYOKO F., KOUADIO M. J., KASSI A. J.-B., MOBIO A. B.-H., ADONIS K. K., TIEMÉLÉ J. A., YAVO P. (2016). « Cartographie de la dynamique du trait de côte à Grand-Lahou : Utilisation de l'outil Digital Shoreline Analysis, System (Dsas) ». *European Scientific Journal*, vol. 12, n° 36. En ligne : <http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n36p327>
- DOLAN R., HAYDEN B. P., HEYWOOD J. (1978). "A new photogrammetric method for determining shoreline erosion". *Coastal Engineering*, vol. 2, p. 21-39.
- DURAND P. (2002). « Approche méthodologique pour l'analyse de l'évolution de l'évolution des littoraux sableux par photo-interprétation, exemple des plages situées entre les embouchures de l'Aude et de l'Hérault (Languedoc, France) ». *Photo-Interprétation. European Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 38, n° 1-2. En ligne : <https://hal-paris1.archives-ouvertes.fr/hal-00420049/fr/>
- FAYE I. (2010). 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, 321 p.
- FAYE I. GIRAUDET E. GOURMELON F. HENAFF A. (2011). « Cartographie normalisée du trait de côte » *Mappemonde*, n° 104. En ligne : <http://mappemonde-archive.mgm.fr/num32/articles/art11404.html>
- FLETCHER C.H., ROONEY J.J., 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.
- GIBBS A.E., OHMAN K.A., RICHMOND B.M. (2015). National assessment of shoreline change. A GIS compilation of vector shorelines and associated shoreline change data for the north coast of Alaska, U.S.-Canadian border to Icy Cape. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2015-1030.

- GOULD A I., KINSMAN N.E.M., HENDRICKS M.D. (2015). *Guide to Projected Shoreline Positions in the Alaska Shoreline Change Tool*. Department of natural resources, Division of Geological & Geophysical Surveys. En ligne : <https://dggs.alaska.gov/pubs/id/29504>
- HIMMELSTOSS E.A. (2009). "DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide". In THIELER E.R., HIMMELSTOSS E.A., ZICHICHI J.L., AYHAN E., *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0. An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. Updated for version 4.3.
- ISLA F.I., CORTIZO L., MERLOTTO A., BÉRTOLA G., PONTRELLI ALBISETTI M., FINOCCHIETTI C. (2018). "Erosion in Buenos Aires province: Coastal-management policy revisited". *Ocean & Coastal Management*, vol. 156, p. 107-116. En ligne : <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.09.008>
- JUIGNER M., ROBIN M., FATTAL P., MAANAN M., LE GUERN C., GOUGUET L., BAUDOUIN V., DEBAINE F. (2012). « Cinématique d'un trait de côte sableux en Vendée entre 1920 et 2010. Méthode et analyse ». *Dynamiques Environnementales. Journal international des géosciences et de l'environnement*, p. 29-39.
- JUIGNER M. (2017). « La géomatique au service de l'observation du trait de côte : contribution à l'analyse des aléas côtiers sur les littoraux dunaires de la région des Pays de la Loire ». Thèse de doctorat, université de Nantes, 232 p.
- LE BERRE I., HENAFF A., DEVOGELE T., MASCRET A., WENZEL F. (2016). « SPOT5 : un outil pertinent pour le suivi du trait de côte ? » *Noroi*, n° 196. En ligne : <https://journals.openedition.org/noroi/378>
- MATHIEU L. (2014). « Cartographie et analyse de l'aléa instabilité sur les falaises et talus rocheux du littoral vendéen ». Mémoire de Master, institut de géographie et d'aménagement régional de l'Université de Nantes, 109 p.
- MICALLEF S., MICALLEF A., GALTIER C. (2017): "Application of the Coastal Hazard Wheel to assess erosion on the Maltese Coast". *Ocean & Coastal Management*, vol. 156.
- MOORE L. J., GRIGGS G.B. (2002). "Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the Central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary". *Marine Geology*, vol. 181, n° 1-3, p. 265-283
- MOORE L. J. (2000). "Shoreline mapping techniques". *Journal of Coastal Research*, vol. 16, n° 1, p. 111-124.
- 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". *U.S. Geological Survey Open-file Report 2004-1043*, 45 p.
- NDOUR A., LAÏBI R. A., SADIO M., DEGBE 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 & Coastal Management*, vol. 156, p. 92-106.
- PENNOBER G. (1999). *Analyse spatiale de l'environnement côtier de l'archipel des Bijagos (Guinée Bissau)*. Thèse de Doctorat, université de Bretagne occidentale, 232 p.
- ROBIN M. (2002). « Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique ». In BARON YELLES N., GOELDNER-GIONELLA L., VELUT S., *Le littoral, regards, pratiques et savoirs ; études offertes à Fernand Verger*, Paris : éditions Rue d'Ulm, p. 95-115
- SADIO M. (2017). *Morphodynamique et aménagement des flèches littorales de la côte du Sénégal*. Thèse de doctorat, UCAD/Aix-Marseille Université, 375 p.

THIELER E.R., HIMMELSTOSS E.A., ZICHICHI J.L., ERGUL A. (2009). *The digital, Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. (ver. 4.3.4730, April 2012). US. Geological Survey Open-File Report 2008-1278, accessed June 2012. En ligne : <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20081278>

THIOR M., SANE T., DIEYE E.B., SY O., CISSOKHO D., BA B.D., DESCROIX L. (2019a). "Coastline dynamics of the northern Lower Casamance (Senegal) and southern Gambia littoral from 1968 to 2017". *Journal of African Earth Sciences*, vol. 160.

THIOR M., SANÉ T., SY O., DESCROIX L., NDIAYE L. G., SAMBOU A. K., CISSOKHO D., SOLLY B. (2019b). « Caractéristiques granulométriques et dynamique sédimentaire entre les différentes unités géomorphologiques du littoral de la Casamance (Sénégal) ». *Revue ivoirienne des Sciences et Technologie*, vol. 33, 22 p.

NOTES

1. Les morphologies en « poulier » et « musoir » sont typiques des unités morphologiques du type flèches sableuses soumises aux effets de la dérive littorale. Les embouchures qui se créent au niveau de ces flèches épousent un fonctionnement sédimentaire contradictoire. Le poulier subit une dynamique accumulative alors que le musoir s'érode. Cette dynamique d'ensemble fait que les flèches sableuses à embouchures sont très variables.

RÉSUMÉS

Cette étude propose une approche cartographique et statistique qui permet de calculer les taux de variation historique du trait de côte avec le *plug-in* DSAS dans la partie nord de l'estuaire de la Casamance au Sénégal. Pour ce faire, une méthode statistique d'extrapolation et de calcul de tendances est mise en place, basée sur le traitement des images satellitaires Landsat acquises entre 2004 et 2019. Cette méthode a permis d'obtenir une représentation cartographique et graphique des résultats statistiques sur l'évolution du trait de côte de l'estuaire nord de la Casamance.

This article offers a cartographical and statistical approach to calculating rate variance of coastlines over time using the DSAS plugin; using the northern part of Casamance estuary in Senegal as the case study. To do so, we established a method to stastically extrapolate and calculate trends, based on the analyis of Landsat satellite images taken between 2004 and 2019. We were thus able to obtain a cartographic and graphic representation of statistical results concerned with the changing coastline of the Casamance estuary.

Este trabajo estudia, mediante una aproximación cartográfica y estadística, la evolución de la línea costera en la parte norte del estuario de Casamance en Senegal utilizando el programa informático DSAS l. Para ello se usa un método estadístico de extrapolación y cálculo de tendencias procesando las imágenes satélite *Landsat* entre 2004 y 2019. Este procedimiento permitió representar gráfica y cartográficamente las estadísticas de la evolución litoral del estuario norte de Casamance.

INDEX

Palabras claves : aproximación cartográfica, Casamance, evolución, Senegal, estadística, línea de costa

Mots-clés : approche cartographique, Casamance, évolution, Sénégal, statistique, trait de côte

Keywords : cartographic approaches, Casamance, evolution, Senegal, statistics, coastline

AUTEURS

MAMADOU THIOR

Docteur, Université Assane Seck de Ziguinchor (Sénégal), Département de Géographie, UFR des Sciences et Technologies, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE)

AMADOU ABOU SY

Maître de conférences, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal), Faculté des Lettres et des Sciences humaines, Département de Géographie

IDRISSA CISSE

Docteur, Université Paris Nanterre (France), UMR LAVUE, équipe Mosaïques

EL HADJI BALLA DIEYE

Maître de conférences, Université Assane Seck de Ziguinchor (Sénégal), Département de Géographie, UFR des Sciences et Technologies, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE)

TIDIANE SANE

Maître de conférences, Université Assane Seck de Ziguinchor (Sénégal), Département de Géographie, UFR des Sciences et Technologies, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE)

BOUBACAR DEMBA BA

Docteur, Université Assane Seck de Ziguinchor (Sénégal). Département de Géographie, UFR des Sciences et Technologies, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE)

BOUBACAR SOLLY

Doctorant, Université Assane Seck de Ziguinchor (Sénégal), Département de Géographie, UFR des Sciences et Technologies, Laboratoire de Géomatique et d'Environnement (LGE)

LUC DESCROIX

Institut de Recherche pour le développement (IRD) UMR PALOC