

Modélisation de la dynamique littorale au Sud des Corniches Est et Ouest de Dakar, Sénégal

Habib NGOM^{1*}, Abdoulaye NDOUR², Yves Birame DIADHIOU³ et Pape Goumba LO⁴

¹ *Université Gaston Berger, UFR Science de l'Éducation de la Formation et du Sport, Département Formation, BP 234 Saint-Louis, Sénégal*

² *Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, BP 5005, Dakar-Fann, Sénégal*

³ *Université C Cheikh Anta Diop, Faculté des Lettres et Sciences humaines, Département de Géographie, BP 5005 Dakar-Fann*

⁴ *Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Institut des Sciences de la Terre, Laboratoire de Pétro-structurale et Métallogénie, BP5396 Dakar-Fann, Sénégal*

(Reçu le 12 Septembre 2022 ; Accepté le 14 Décembre 2022)

* Correspondance, courriel : habibngoms@yahoo.fr

Résumé

Cette contribution a pour but d'évaluer l'impact des structures de protection côtières sur l'évolution du littoral des Corniches Est et Ouest de Dakar. Celles-ci accueillent plusieurs aménagements littoraux protégés de l'attaque des houles par des murs, des épis ou des brise-lames. L'évolution historique de la ligne de rivage est déterminée à l'aide d'images aériennes et l'utilisation du DSAS et l'évolution future par le modèle ShorelineS développé par l'IHE Delft et Deltares. Les résultats montrent que les phénomènes d'érosion signalés de 1954 à 2020 sur le littoral de la Corniche Ouest se poursuivront jusqu'en 2040 sur les plages de Rebeusse et Des Madeleines. L'érosion est liée à un déficit sédimentaire et à la morphologie de la côte de cette Corniche plus exposée aux houles du Nord diffractées. Les modèles montrent aussi que des revêtements et des brise-lames associés à des épis préservent plus les plages des Corniches de Dakar.

Mots-clés : *ShorelineS, Corniches, Dakar, impact, modèle, structures côtières.*

Abstract

Modelling coastal dynamics in the south of the East and West Corniches of Dakar, Senegal

The objective of this contribution is to assess the impact of coastal defenses on the shoreline evolution of the East and West Corniches of Dakar. These coast host several facilities that are protected from swells attack by seawalls, groynes or breakwaters. The historical shoreline evolution is determined thanks to the use of aerial imagery and DSAS and the future changes by ShorelineS model, developed by IHE Delft and Deltares. Results show that the erosion reported from 1954 to 2020 on the West Corniche coast will continue until 2040 on the beaches of Rebeusse and Des Madeleines. Erosion is linked to a sediment deficit and the morphology of the

Corniche coast, which is more exposed to diffracted swells from the North. The models also show that revetments and breakwaters associated with groynes better protect the beaches of the Corniches of Dakar.

Keywords : *ShorelineS, Corniches, Dakar, impact, model, coastal defenses.*

1. Introduction

Les zones littorales ont toujours été l'objet de plusieurs convoitises en raison de leur position stratégique, des particularités climatiques et des potentialités économiques disponibles. Ces avantages ont presque partout poussé les hommes à s'installer d'abord sur le littoral ou à migrer vers celui-ci. La population côtière du Sénégal est estimée à 8 500 000 habitants dans un rayon de 60 km et représente plus de 65 % de la population totale du pays [1]. Dakar, la capitale du Sénégal, concentre sur un espace qui représente moins de 0,28 % de la superficie totale du pays 24 % de la population, 85 % des industries et services [2]. Si depuis les années 1960, la bande littorale située entre les Corniches Est ou Ouest et le rivage était relativement épargnée par les aménagements, celle-ci accueille à partir des années 2000 de nouvelles infrastructures en mesure d'accroître le recul du trait de côte. Pour l'ensemble des Corniches Est et Ouest, [3] indique, pour la période 1980-1997, des taux de recul du littoral, compris entre -0,45 et -2,7 m/an. L'imagerie aérienne et la modélisation littorale permettent de déterminer sur le littoral des zones stables, en érosion ou en accumulation et de prédire leur évolution. Le modèle ShorelineS simule l'impact des structures sur l'évolution du rivage. Des structures en dur peuvent être intégrées ou retirées des modèles et l'étude des modifications apportées sur le rivage permet d'identifier des causes de l'érosion et d'évaluer l'impact des structures côtières. Cette étude vise principalement à connaître les évolutions historique et future de la partie sud du littoral des Corniches Est et Ouest, à déterminer les causes de l'érosion, l'impact des constructions et de leurs ouvrages de protection et enfin à proposer des modèles de protection du littoral des Corniches. Ces dernières qui doivent accueillir de nouveaux aménagements verront ainsi leurs plages régénérées.

2. Méthodologie

2-1. Zone d'étude

2-1-1. Localisation des plages, falaises et structures

Dakar occupe l'extrémité de la presqu'île du Cap Vert, à l'ouest du Sénégal. La zone d'étude au Sud de Dakar est comprise entre 14°38 et 14°41 de latitude Nord et entre 17°25 et 18°28 de longitude Ouest. La côte est constituée de falaises de 10 à 20 m de hauteur délimitées par des pointes et adossées à des plages de fond de baies à extension limitée. Ces plages et falaises accueillent plusieurs infrastructures (*Figure 1*).

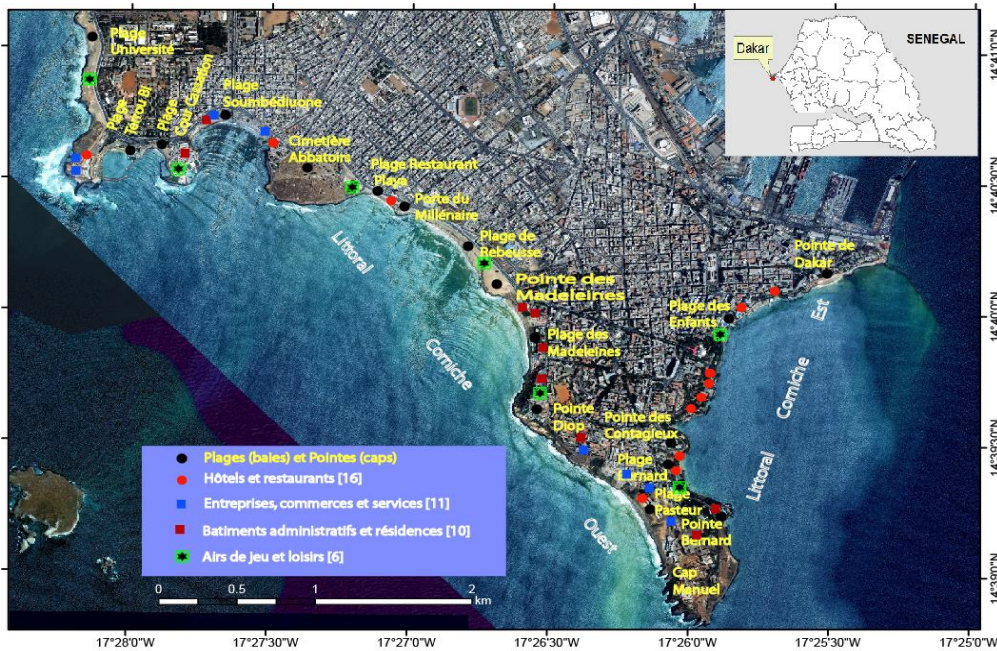


Figure 1 : Localisation des plages, pointes et infrastructures de la zone d'étude

2-1-2. Particularités climatiques et socio-économiques

Sous l'influence des alizés maritimes, les températures sont plus basses sur les côtes. De 1951 à 2009, la température moyenne annuelle de la région de Dakar était de 24,46°C. La prédominance en zone littorale de l'alizé maritime de secteur Nord-Ouest à Nord-Est sur les vents de mousson du secteur Sud-Ouest entraîne une diminution de l'humidité relative. Celle-ci est maximale en août et septembre (81 %), période correspondant aux mois les plus pluvieux [4]. L'évolution interannuelle des précipitations montre une tendance générale à la baisse depuis 1970. Une conséquence majeure de cette sécheresse a été depuis lors un afflux massif des populations vers la région de Dakar. La croissance urbaine est extrêmement rapide sur la périphérie de la ville en particulier le long du littoral. A partir des années 2000, les constructions de haut standing se rapprochent de plus en plus du rivage et occupent même sur certains endroits des longueurs importantes des plages aériennes. On assiste à un bétonnage et une privatisation des littoraux des Corniches Est et Ouest (*Figure 1*).

2-1-3. Caractéristiques hydrodynamiques et géologiques

Deux principaux types de houles arrivent sur le littoral de Dakar. Des houles du Nord plus fréquentes, de directions N300 à N360. Elles sont présentes toute l'année avec des hauteurs moyennes significatives de 1,5 m. Des houles du Sud de directions N180 à N240, perceptibles pendant l'hivernage entre juillet et octobre avec des hauteurs de 1 m. Les périodes maximales respectives de ces houles sont de 10 et 16 s [5]. Durant les tempêtes, les hauteurs maximales des houles du Nord peuvent atteindre 3 m alors que celles des houles du Sud atteignent 2,5 m (*Figure 2A*). Les houles du Nord effectuent une rotation autour de la presqu'île du Cap Vert suite à des diffractions sur au moins trois pointes : la pointe des Almadies, le Cap Manuel et la pointe de Bel Air [6]. La diffraction est aussi liée à la projection vers l'Ouest de la tête de la presqu'île du Cap Vert (*Figure 2B*). Les courants de houles qui ont un rôle primordial dans le transport sédimentaire sont dirigés globalement le long du littoral de Dakar du Nord vers le Sud même si pendant l'hivernage peuvent intervenir des courants dirigés vers le Nord en relation avec les houles du Sud [7].

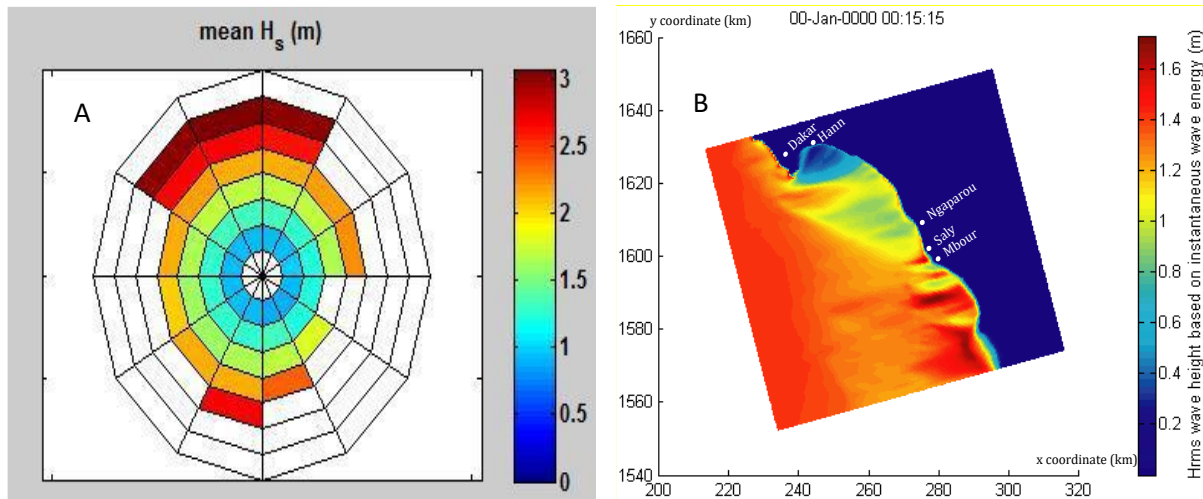


Figure 2 : (A) Hauteur moyenne significative des houles au large de la côte ; (B) Hauteurs moyennes des houles sur la côte à partir de houles au large de 1,6 m

Des formations volcano-sédimentaires essentiellement cénozoïques affleurent sur la côte rocheuse des Corniches. Les formations volcaniques sont constituées par des dolérites et des basanites au cap Manuel associées à des tufs à la plage Pasteur. Les formations sédimentaires sont représentées par des marnes aux plages Des Madeleines, Bernard et des Enfants puis par des argiles sur les pointes de Rebeusse, Des Madeleines, Diop, Bernard, Des Contagieux, de Dakar et sur la falaise de la plage de Rebeusse [8]. Ces formations sont parcourues par des failles (**Figure 3A**). La largeur du plateau continental est très faible à Dakar. Le canyon de Dakar entaille dans la zone le plateau continental qui présente de fortes pentes et une série de bancs rocheux sous-marins (**Figure 3B**). Ces caractéristiques morphologiques réduisent l'énergie des houles en les amortissant à proximité du rivage. Le canyon de Kayar au Nord et à la projection vers l'Ouest de la tête de la presqu'île du Cap Vert entraînent vers le large une grande partie des apports sédimentaires provenant des littoraux de la Côte nord créant ainsi un déficit sédimentaire aux environs de Dakar et sur la Côte sud [9].

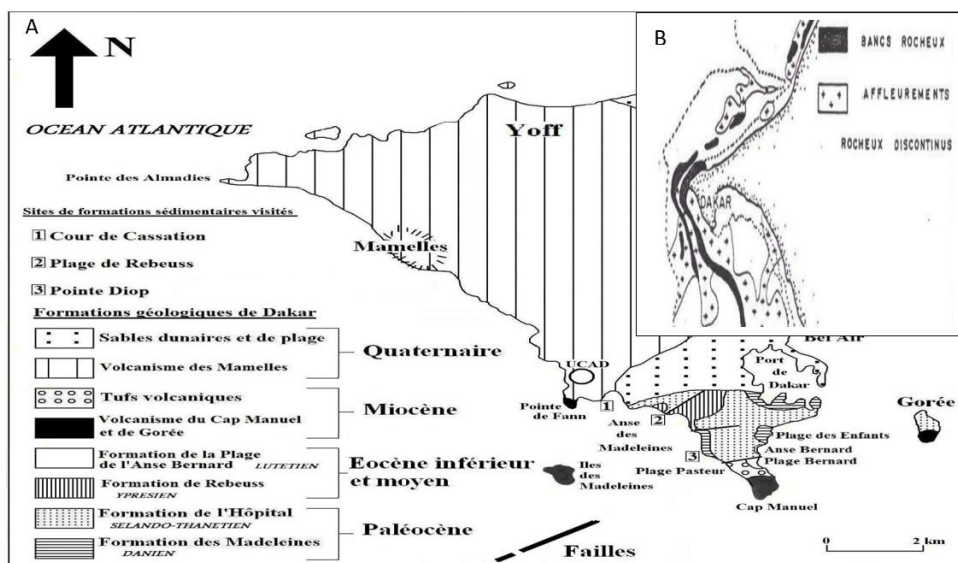


Figure 3 : (A) Formations géologiques de la région de Dakar [10] ; (B) Bancs et affleurements rocheux sur le plateau continental sénégalais [11]

2-2. Description de ShorelineS

Ce modèle littoral permet de reconstituer les instabilités importantes du rivage comme la formation de flèches littorales et de tombolos. Il abandonne l'approche de la ligne de côte fixe en faveur d'une description complètement libre où la côte est schématisée par des chaînes de points (polygones) qui peuvent se déplacer librement et interagir ensemble [12]. Le modèle utilise une grille flexible¹ permettant de représenter des polygones pouvant être ouvertes ou fermées. Les structures en dur ou les rivages rocheux sont aussi représentés par des polygones (**Figure 4**).

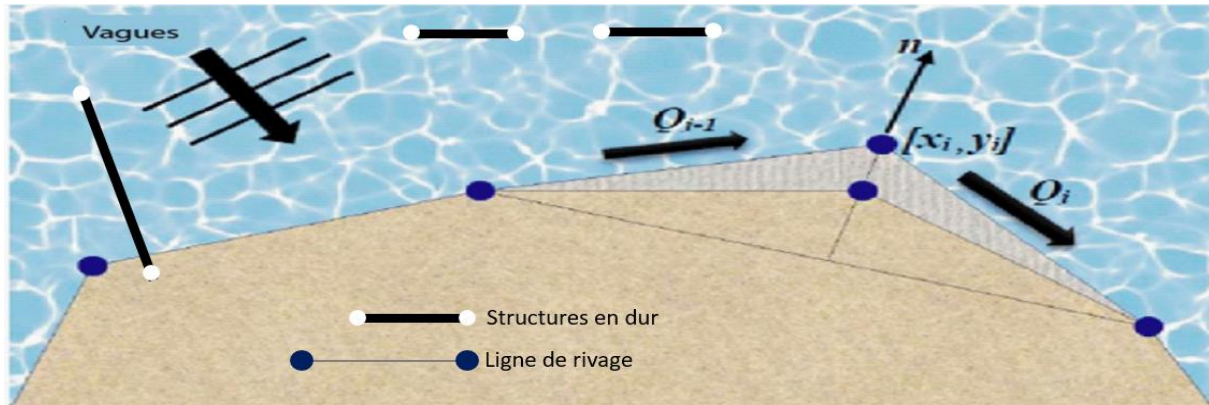


Figure 4 : Schémas illustrant des sections du rivage (trait bleu) et structures en dur (en noir) en polygones [13] modifié

Dans ce modèle, le transport des sédiments le long des côtes Q est calculé par une formule (A) du Coastal Engineering Research Center (CERC) qui dépend de l'angle d'incidence des houles et de leur hauteur au déferlement. La position (B) des points du trait de côte n dépendra surtout de la profondeur de fermeture du profil, du gradient de transport, de l'élévation locale du niveau marin, des apports et des départs de sédiments. Les **Formules** de calcul des gradients de transport tiennent compte de la diffraction, la submersion, les instabilités aux « grands angles² » et du transport littoral dans les « zones d'ombre³ ».

$$Q = k \frac{\rho \sqrt{g}}{16 \sqrt{\gamma(\rho_s - \rho)(1-n)}} H_b^{5/2} \cdot \sin 2\alpha_b \quad (1)$$

Avec : Q = transport littoral en $m^3 \cdot s^{-1}$; k = paramètre empirique (0,2) ; H_b = hauteur de la houle au déferlement ; α_b = angle d'incidence de la houle au déferlement ; γ = coefficient de déferlement (0,72) ; ρ_s = masse volumique du sable ($2650 \text{ kg} / m^3$) ; ρ = masse volumique de l'eau de mer ($1025 \text{ kg} / m^3$) et n = facteur de porosité (0,4)

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{D_c} \frac{\partial Q_s}{\partial s} - \frac{RSLR}{\tan \beta} + \frac{1}{D_c} \sum q_i \quad (2)$$

Avec : n est la coordonnée perpendiculaire au rivage, s est la coordonnée parallèle au rivage, t est le temps, D_c est la hauteur du profil actif, Q_s est le transport littoral (m^3 / an), $\tan \beta$ est la pente moyenne du profil entre crête de la dune ou de la barrière et la profondeur de fermeture, $RSLR$ est la valeur relative de l'élévation du niveau de la mer (m/an) et q_i est le terme source/puits ($m^3 / m/an$) en raison du transport sagittale, de la submersion, des rechargements de plage, de l'exploitation minière de sable et les échanges avec les rivières et les estuaires.

- les modèles avancés utilisent une grille régulière de points ou de cellules carrées pour représenter la morphologie du littoral. Les cellules peuvent être isolément émergées ou immergées en fonction des quantités de sédiments reçues et ceci permet de déterminer une ligne de rivage plus mobile et donc de représenter sur le littoral des formes complexes ;
- Si l'angle d'incidence des houles est supérieure à 45° , des instabilités numériques peuvent se produire lors de la simulation matérialisées sur les modèles littoraux par des formes irrégulières (flèches, caps, etc.). Dans ce cas, le transport littoral est réglé sur sa valeur maximale pour éviter ces instabilités ;
- Le calcul des transports sédimentaires justes derrière les structures perpendiculaires au rivages est aussi réajusté par des formules particulières du fait du blocage d'une partie des sédiments en amont de celles-ci.

2-3. Configuration des modèles ShorelineS

Les modèles ShorelineS sont configurés dans Matlab à l'aide d'une collection de fichiers contenant des informations sur une ligne de rivage initiale (2020), les structures en dur, la bathymétrie, l'hydrodynamisme et les conditions aux limites. Ces fichiers en format Text avec des coordonnées cartésiennes XY sont constitués à l'aide de plusieurs scripts puis regroupés dans le répertoire d'exécution des modèles. Des fichiers Xbeach simulent la propagation des vagues en eaux peu profondes puis précisent les hauteurs et les angles d'incidences des houles au déferlement. Enfin, l'exécutable `curvi_coast_Saly_wave` permet aux fonctions ShorelineS d'utiliser tous ces fichiers pour calculer les déplacements des points du trait de côte et déterminer ainsi une nouvelle position du rivage, élaborer des modèles littoraux et enregistrer leur sortie dans le même répertoire.

2-4. Détermination des taux d'évolution de la ligne de rivage

Les modèles ShorelineS (2020, 2030 et 2040), les images satellitaires (2006 et 2020) et les photos aériennes (1954 et 1997) utilisées sont géoréférencées dans le même système de coordonnées (WGS 84 UTM 28N). Les lignes de rivage des modèles, des images et des photos sont digitalisées à l'aide d'ArcGIS. La ligne de rivage considérée est celle de la limite des hautes mers moyennes car elle est très nette, continue et facilement reconnaissable. Une ligne de base (baseline) est créée Onshore et l'extension d'ArcGIS le Digital Shoreline Analysis System (DSAS) permet de générer des transects distants de 10 m et ensuite de calculer les taux d'évolution de la ligne de rivage en utilisant la méthode EPR (End Point Rate) qui nécessite deux lignes de rivage pour faire le calcul des taux. Les estimations d'erreurs tiennent compte des incertitudes de géoréférencement, de digitalisation, et des variations moyennes de la marée [14].

3. Résultats

Les résultats d'un modèle doivent être validés et lorsqu'ils sont en bon accord avec les observations, le modèle peut alors servir à des applications concrètes [15]. ShorelineS a été validé et appliqué dans plusieurs pays depuis sa création en 2017 par Dano Roelvink et Bas Huisman de l'Institut for Water Education (IHE) et Deltares, Delft, Pays bas [12]. Au Sénégal, les modèles ShorelineS ont permis de suivre l'évolution de la ligne de rivage de Saly entre 2003 et 2016 et de prédire jusqu'en 2035 ce qu'elle pourrait être [5]. Étant conçus pour étudier des littoraux sableux, les taux d'évolution de la ligne de rivage au niveau des falaises ne seront pas déterminés sur les modèles ShorelineS. Cette étude se focalise surtout sur l'évolution des plages de la partie sud des Corniches Est et Ouest.

3-1. Évolution historique du littoral

Cette évolution est étudiée pour une première période comprise entre 1954 et 1997 puis pour une deuxième période qui s'étend de 1997 à 2020. Les taux d'évolution des plages de fond de baie sont présentés. Les taux d'évolution EPR de la ligne de rivage entre 1954 et 1997 montrent que le littoral de la Corniche Ouest est en érosion au cours de cette période. Les taux d'érosion moyens sont élevés aux plages de Terrou Bi, de Rebeusse et Pasteur. La Corniche Est par contre est relativement stable et connaît même une faible accumulation à la plage Bernard. Entre 1997 et 2020, les mêmes tendances se poursuivent, le littoral de la Corniche Ouest est toujours en érosion. Cependant les taux d'érosion moyens sont dans l'ensemble plus faibles. Une stabilité est notée à la plage de l'Université. Sur la Corniche Est, la plage des enfants est relativement stable alors que la plage Bernard présente de faibles taux d'érosion. Pour l'ensemble de la période 1954-2020, les taux d'érosion moyens sont plus élevés aux plages de Rebeusse (-1,12 m/an), Des Madeleines (-0,72 m/an) et Pasteur (-0,87 m/an). Ces plages de Rebeusse, Des Madeleines et Pasteur sont donc les secteurs de la partie sud des Corniches Est et Ouest les plus affectées par l'érosion (*Figures 5 et 6, Tableau 1*).

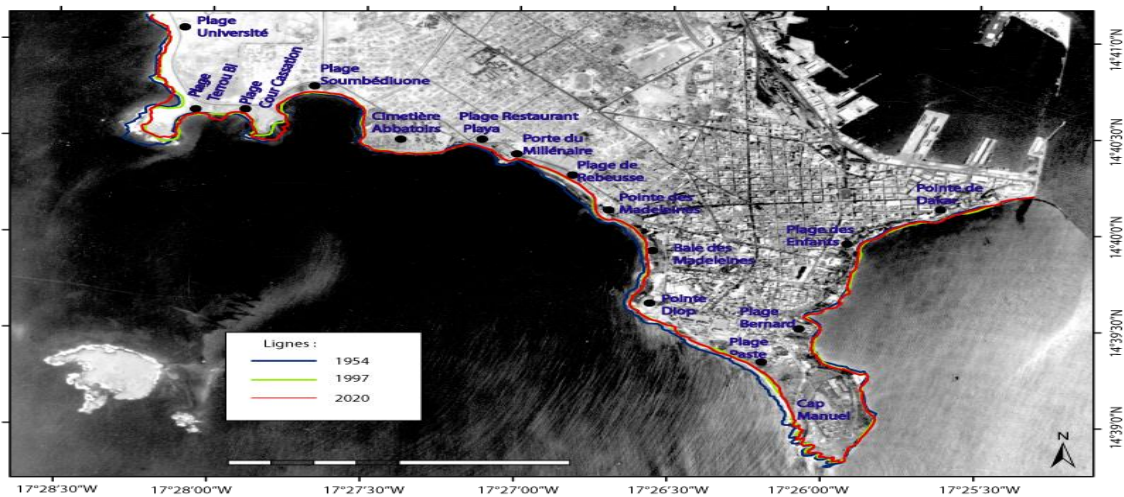


Figure 5 : Évolution de la ligne de rivage des Corniches Est et Ouest de 1954 à 2020

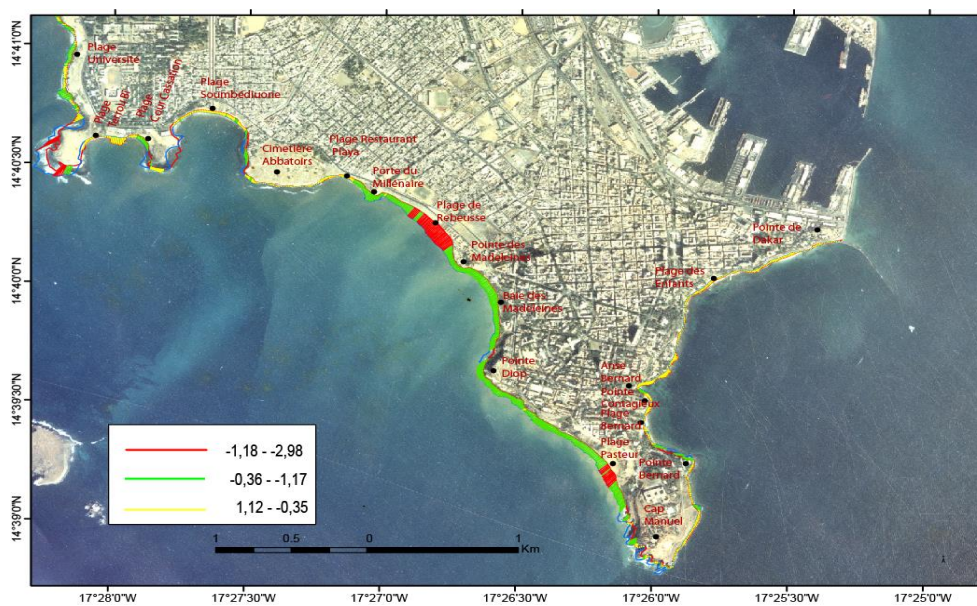


Figure 6 : Évolution des taux d'érosion des Corniches Est et Ouest entre 1954 à 2020

Tableau 1 : Taux d'évolution des plages des Corniches Est et Ouest pour les périodes 1954-1997 ; 1997-2020 et 1954-2020

PLAGES	1954-1997	1997-2020	1954-2020
Université	0,07	0,07	-0,38
Terrou Bi	-1,21	0,17	-0,49
Soumbédioune	-0,28	-0,28	-0,25
Restaurant Playa	-0,42	0,028	-0,31
Rebeusse	-1,23	-0,14	-1,12
Madeleines	-0,46	-0,16	-0,72
Pasteur	-0,61	0,07	-0,87
Bernard	0,18	-0,21	0,07
Des Enfants	-0,13	-0,063	0,07

Le recul est important sur les plages adossées à des falaises de roches volcano-sédimentaires ou sédimentaires particulièrement tendres comme les argiles de la plage de Rebeusse, les marno-calcaires de la baie des Madeleines et les tufs de la plage Pasteur (*Photo 1a, 1b et 2a*). De faibles accumulations sont notées sur les plages Bernard en amont d'un épi (*Photo 2b*) qui retient des sédiments sans pour autant induire une avancée notable de la ligne de rivage. Les actions anthropiques peuvent aussi accentuer l'érosion sur certains secteurs du littoral (*Photo 3a*). C'est le cas à la plage de Soumbédioune mais aussi sur les falaises de roches sédimentaires de la Corniche Est. En effet, sur ces dernières, les constructions sont renforcées par des murs de soutènement en béton, en enrochements ou en gabions qui peuvent céder sous le poids des bâtiments, des remblais, de l'action des eaux de ruissellement et de la végétation. Des affaissements peuvent se produire comme ce qui est arrivé en octobre 2020 en face des maisons qui surplombent l'hôtel Lagon 2 (*Photo 3b*).

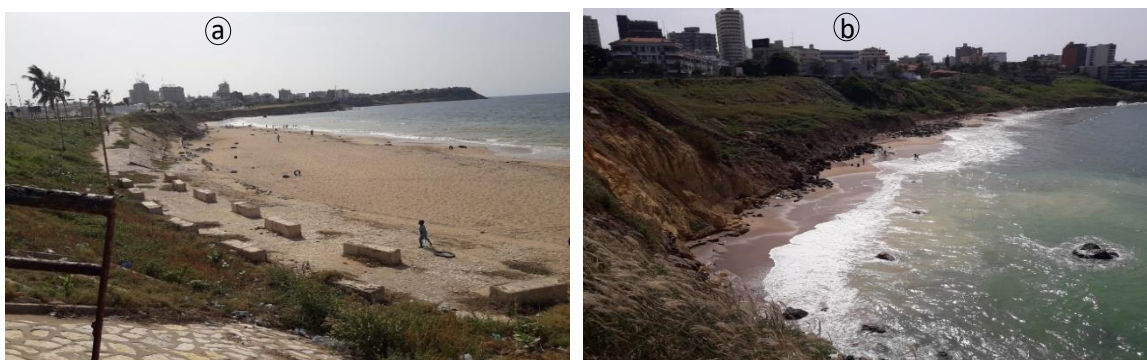
**Photo 1** : Plages de la Corniche Ouest en érosion : a) Rebeusse ; b) Des Madeleines



Photo 2 : (a) Plage Pasteur de la Corniche Ouest en érosion et (b) Plage Bernard de la Corniche Est stable



Photo 3 : (a) Conduit d'évacuation d'eau déstabilisant la falaise d'argiles de la plage de Rebeusse et (b) affaissement de la falaise qui surplomb l'hôtel Lagon 2 sur la Corniche Est

3-2. Évolution future littoral

L'évolution future de la ligne de rivage des Corniches Est et Ouest est étudiée sur deux périodes : 2020-2030 et 2020-2040. Les taux d'évolution des secteurs les plus affectés sont présentés (plages de Rebeusse, Des Madeleines et Pasteur) (**Figure 7, Tableau 2**). De 2020 à 2030, les secteurs du littoral de la Corniche Ouest montrent aussi des phénomènes d'érosion sur les modèles (M1) comme sur les images. Les modèles M1 représentent l'évolution de la ligne de rivage avec les structures présentes sur le littoral en 2020. Toutefois les taux d'érosion sont légèrement moins élevés sur la plage de Rebeusse et plus élevées sur la plage Des Madeleines. De 2020 à 2040, les taux d'érosion diminueront sur ces deux plages. Les modèles montrent que la plage Pasteur reste relativement stable.

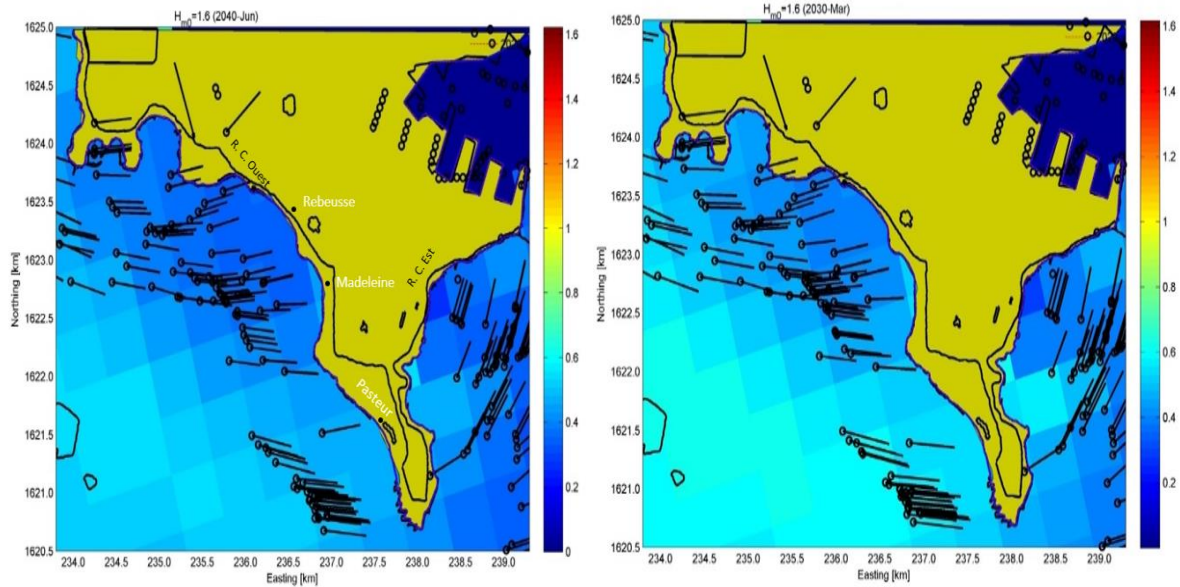


Figure 7 : Modèles d'évolution (M1) de 2020 à 2040 du littoral des Corniches Est et Ouest (R.C : route Corniche)

Tableau 2 : Taux d'évolution des plages vulnérables de la Corniches Ouest pour les périodes 1997-2020 ; 2020-2030 et 2020-2040

PÉRIODES	1997 - 2020	2020 - 2030	2020 - 2040
PLAGES	Images	M1	M1
Rebeusse	-0,14	-0,94	-0,18
Des Madeleines	-0,16	-0,54	-0,34
Pasteur	0,07	0,071	0,071

3-3. Modèles de protection des Corniches

L'analyse des résultats obtenus avec les modèles (M1) a permis de proposer deux modèles de protection des plages de Rebeusse et Des Madeleines plus affectées par les phénomènes d'érosion : (M2) avec des brise-lames au large ; (M3) avec ces brise-lames et des épis. Les structures de protection sont planifiées en se basant sur les processus hydrodynamiques, la dynamique littorale et le mode fonctionnement de chaque type de protection. Les brise-lames du modèle M2 protègent bien la plage de Rebeusse mais moins bien la plage Des Madeleines. Des pertes de sédiments sont signalées sur certaines zones de cette plage. Les épis et les brise-lames du modèle M3 protègent bien les plages de Rebeusse et Des Madeleines. Le nombre plus élevé de structures à mettre en place est un inconvénient pour ce modèle M3 (*Figure 8*).

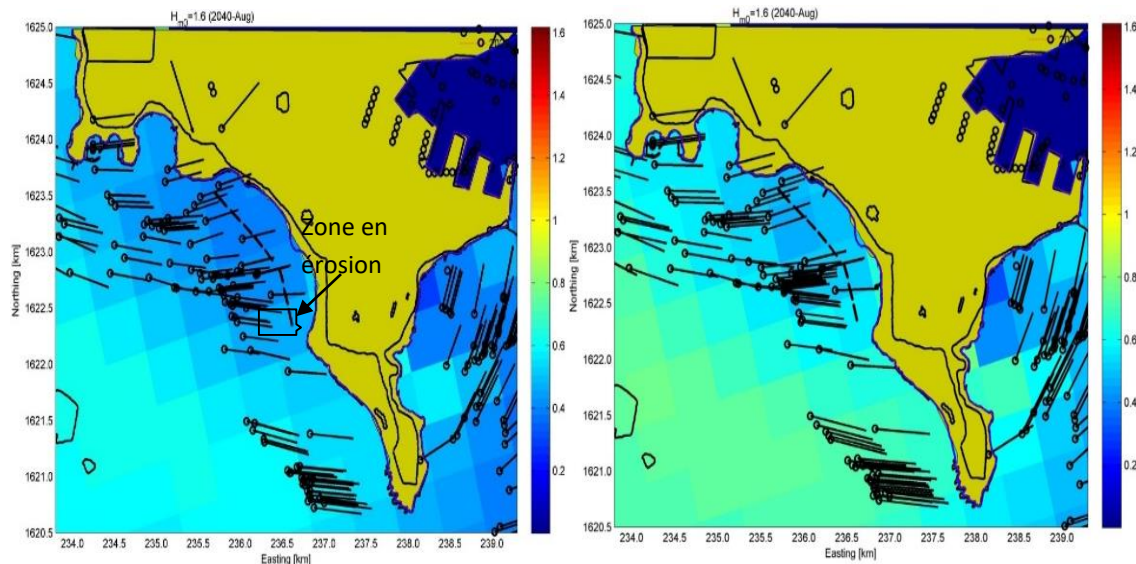


Figure 8 : *Modèle de protection des plages vulnérables de la Corniche Ouest avec des brise-lames (M2); des épis et des brise-lames (M3)*

4. Discussion

L'érosion des plages de la Corniche Ouest entre 1954 et 1997 peut être liée au déficit sédimentaire signalé aux environs de Dakar. La Corniche Ouest est aussi plus exposée aux houles du Nord-Ouest plus fortes et plus fréquentes que sur la Corniche Est. Les houles sont des agents dynamiques importants du littoral surtout lorsqu'elles sont exceptionnellement fortes [5]. Les houles du Nord-Ouest comme le souligne [6] subissent une diffraction sur la pointe du cap Manuel. Ceci induit une modification de leur direction qui devient Sud-Ouest mais surtout leur amortissement le long de la Corniche Est. La réduction de l'énergie des houles est une des causes de la stabilité notée sur la Corniche Est. Les houles du nord qui frappent la Corniche Ouest atteignent des hauteurs maximales de 3 m supérieures à celles du sud qui arrivent sur la Corniche Est qui sont de 2,5 m. La Corniche Est, du fait de sa position géographique est une zone à l'abri des fortes houles du nord. Pour la période 1997-2020, les phénomènes d'érosion se poursuivent pour les mêmes raisons que celles indiquées un peu plus haut. La stabilité de la pointe du Monument de la Porte du Millénaire est due la construction d'un revêtement sur le site qui réduit le phénomène d'érosion. Le revêtement, démarré en 2006, a permis de protéger une petite portion de la plage de Rebeusse (l'extrémité nord-ouest) sur une longueur d'environ 50 m (*Photo 2a*). Cette protection consiste en un revêtement du talus avec des dalles de calcaire cimentées d'un diamètre d'environ 30 à 40 cm, soutenu par deux murs en béton coulés sur place du côté de la plage et du côté du continent. A la base de la porte du millénaire sont disposés de gros blocs de basalte et de latérite [9]. Les taux d'érosion plus faibles de la Corniche Est et Ouest pour cette deuxième période s'expliquent par la réduction des plages au bas des falaises. Les roches sédimentaires et surtout volcaniques des falaises sont plus difficiles à mobiliser par les agents hydrodynamiques. C'est le cas de la plage Pasteur. Les taux d'érosion significatifs à Soubédioune seraient liés à des actions anthropiques. Les modèles ShorelineS mettent aussi en évidence l'érosion des plages de la Corniche Ouest entre 2020 et 2040. Les taux de recul plus importants à la plage Des Madeleines s'expliqueraient par une accentuation sur la zone de l'action de la houle. Des études sur l'hydrodynamisme de la zone permettront d'étayer cette hypothèse. L'action érosive disparate de la houle s'atténue avec le temps, entre 2030 et 2040, avec l'arrivée sur les zones fortement affectées par l'érosion de quantités de plus en plus importantes de sédiments qui contribueront ainsi à rééquilibrer les bilans sédimentaires. De nouvelles structures de protection adaptées et bien conçues permettraient de stabiliser plus rapidement les plages vulnérables de la Corniche Ouest, en l'occurrence

celles de Rebeusse et Des Madeleines. Les épis ont réussi à constituer de faibles accumulations sur la Corniche Est, les murs et les revêtements stabilisent la ligne de rivage. Ces types de protection peuvent être utiles sur la côte rocheuse de Dakar. Sur la zone d'étude, les brise-lames sont moins utilisés que les épis et les structures qui durcissent la ligne de rivage. Des épis et quelques brise-lames ont eu des effets positifs à Terrou Bi où ils ont réussi à reconstituer les plages. Les taux d'érosion passent de -1,21 à 0,17 m/an entre la période 1954 -1997 et 1997-2020 sur l'ensemble du secteur de Terrou Bi. Ce dernier taux est aussi à lier au remblai mis en place sur les pointes de Terrou Bi lors de la construction de l'hôtel au début des années 2000. En effet, ce remblai crée artificiellement une avancée locale de la terre sur la mer. Les revêtements sont des structures de protection qui consolident les falaises argileuses sur lesquelles sont adossées les plages du littoral de la Corniche Ouest. Lorsque la protection des plages par des brise-lames est associée à de petits épis bien positionnés, la protection des plages est accrue. C'est ce que montrent les modèles ShorelineS M3 de 2020 à 2040 avec des plages plus stables. Les brise-lames à eux seuls, sont par contre les structures de protection qui donnent des résultats moins satisfaisants, c'est le cas des modèles M2. Pour arriver à stabiliser les plages des Corniches avec des brise-lames, une bonne compréhension des caractéristiques hydrodynamiques de la zone est encore nécessaire pour une meilleure optimisation de la position et des dimensions des structures à mettre en place.

Les résultats obtenus permettent de connaître l'évolution historique de la ligne de rivage des Corniches Est et Ouest et de prévoir son évolution future. L'érosion des plages de la Corniche Ouest est liée à un déficit d'apports sédimentaires et à son exposition aux houles du Nord. Dans un contexte de changements climatiques, lorsque les processus d'adaptation ne sont pas fondés sur de bonnes informations ou l'attention prêtée à la planification et la conception des ouvrages de protection est insuffisante, la conséquence peut être l'inadaptation, c'est-à-dire des mesures possiblement coûteuses et inadéquates à plus long terme qui, en fin de compte, accentuent les vulnérabilités aux changements climatiques [16 - 20]. Ces travaux sont utiles à la gestion du littoral des Corniches fortement anthropisées. Ils ont aussi permis de déterminer l'efficacité des épis, des brise-lames et des revêtements sur la protection du littoral des corniches. De nombreuses installations côtières, y compris les ports, les usines, les aménagements touristiques, les habitations et les ouvrages de protection du littoral par exemple, les épis, les jetées, les murs, etc., ont été construits sans planification suffisante et sans aucune étude sur les agents physiques et climatiques à l'œuvre dans les secteurs [21, 22], notamment l'hydrodynamique et les processus de redistribution des sédiments qui façonnent les côtes [23 - 25]. Le modèle ShorelineS apporte beaucoup à l'étude de l'évolution des littoraux et à la recherche de solutions de protection côtière. Il peut être appliqué aux côtes qui présentent des modifications rapides et importantes car il simule un grand nombre de formes littorales grâce à une grille plus flexible. Il pourrait aider à simuler l'évolution de la ligne de rivage d'une plage protégée par des épis, des revêtements, des murs, des brise-lames et un rechargement en sable.

5. Conclusion

De 1954 à 2020, des plages de la Corniche Ouest sont en érosion alors que la Corniche Est, connaît plus de stabilité. Les taux d'érosion moyens sont plutôt élevés aux plages de Rebeusse, Des Madeleines et Pasteur. Les modèles ShorelineS indiquent une poursuite des phénomènes d'érosion entre 2020 et 2040. L'érosion de la Corniche Ouest est liée à un déficit d'apports sédimentaires, à la forme morphologique en falaise du littoral et surtout à son exposition aux houles du Nord. Ses plages doivent bénéficier de mesures de protection contre l'érosion côtière ou d'un renforcement et allongement des ouvrages de protection qui y sont déjà présents. Celles-ci permettront de régénérer les plages des Corniches qui d'autant plus doivent accueillir de nouveaux aménagements dans le cadre du projet de réhabilitation des Corniches en cours d'exécution.

Références

- [1] - CENTRE DE SUIVI ECOLOGIQUE (CSE), Rapport sur l'état de l'environnement au Sénégal, (2015) 198 p.
- [2] - WORLD BANK, "Pollution Prevention and Abatement : Tanning and Leather Finishing." Draft Technical Background Document. Environment Department, Washington, D.C., (1996)
- [3] - S. DIOP, Contexte géologique et risques naturels : déterminants structuraux de l'instabilité des Corniches de la partie sud de Dakar. Mémoire. Ingénieur. Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Institut des Sciences de Terre (IST), (2000) 100 p.
- [4] - A. NDOUR, Evolution morpho-sédimentaire et impacts des ouvrages de protection sur le littoral de Rufisque, Petite Côte, Sénégal. Thèse unique de doctorat en géoscience, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, (2015) 242 p.
- [5] - H. NGOM, Evolution morphosédimentaire et modèles de protection ShorelineS du littoral sableux de Saly, Petite Côte, Sénégal. Thèse unique de doctorat en Dynamique, Environnement et Ressources des bassins sédimentaires, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, (2020) 226 p.
- [6] - A. RIFFAULT, Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais (Sud de la presqu'île du Cap-Vert). Thèse 3^{ème} cycle, Université Bordeaux 1, (1980) 145 p.
- [7] - I. NIANG-DIOP, Erosion côtière sur la Petite Côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque. Passé, présent, futur. Thèse de Doctorat Géologie, Université d'Angers, Angers, (1995) 475 p.
- [8] - D. H. GAYE, Inventaire morphologique de la tête de la presqu'île du Cap Vert. Mémoire DEA, Université Cheikh Anta Diop, Département de Géologie, (1999) 71 p.
- [9] - H. NGOM, Expérience du Sénégal en matière d'ouvrages de protection des côtes. Mémoire, DEA géologie, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, (2012) 100 p.
- [10] - G. CREVOLA J-M. CANTAGREL, C. MOREAU, Le volcanisme cénozoïque de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal) : cadre chronologique et géodynamique. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 165, (5) (1994) 437 - 446
- [11] - F. DOMAIN, Carte sédimentologique du plateau continental sénégalais. Extension à une partie du plateau continental de la Mauritanie et de la Guinée Bissau ORSTOM, Paris, Notice explicative, (1977) 17 p.
- [12] - D. ROELVINK, B. HUISMAN, A. ELGHANDOUR, Efficient modelling of complex coastal evolution at monthly to century time scales. *Frontiers. Marine. Science*, 7 : 535 (2020). Doi : 10.3389/fmars.2020.00535
- [13] - E. M. GHONIM, Recent Developments in Numerical Modelling of Coastline Evolution Advanced Development and Evaluation of ShorelineS Coastline Model. Delft: IHE Delft Institute for Water Education, (2019) 110 p.
- [14] - H. NGOM, A. NDOUR, I. NIANG, Impacts of protective structures on sandy beaches: Example of the Saly balnear station, Petite Côte, Senegal. In: Almar, R.; Almeida, L.P.; Trung Viet, N., and Sall, M. (eds.), Tropical Coastal and Estuarine Dynamics. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, N° 81 (2018) 114 - 121. <https://doi.org/10.2112/SI81-015.1>
- [15] - Y. LEREDDE, Contributions de l'océanographie physique côtière à la caractérisation des risques côtiers. HDR, Université Montpellier 2, (2011) 122 p.
- [16] - P. BERNATCHEZ, J.-M. M. DUBOIS, Seasonal quantification of coastal processes and cliff erosion on fine sediment shorelines in a cold temperate climate, north shore of the St. Lawrence maritime estuary, Quebec; *Journal of Coastal Research*, Vol. 24, N° 1A (2008) 69 - 180
- [17] - S. BROWN, R. NICHOLLS, A. VAFEIDIS, J. HINKEL, P. WATKISS, Sea-level rise : the impacts and economic costs of sea-level rise on coastal zones in the EU and the costs and benefits of adaptation; Climate Cost Project, Technical Policy Briefing Note 2, (2011) 43 p.
- [18] - P. BERNATCHEZ, C. FRASER, Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width *Journal of Coastal Research*, Vol. 28, N° 6 (2012) 1550 - 1566. doi :10.2112/JCOASTRES-D-10-00189

- [19] - GIEC [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat] - Glossaire; dans Changements climatiques 2013: les éléments scientifiques; contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Migdley (éd.); Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, (2013) 1447 - 1465
- [20] - GIEC [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat] Résumé à l'intention des décideurs; dans Changements climatiques 2014: conséquences, adaptation et vulnérabilité; contribution du Groupe de travail II au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M.D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L. L. White (éd.), (2014) 1 - 32
- [21] - M. A. DELGADILLO-CALZADILLA, E. MENDOZA, R. SILVA, J. A. GONZALEZ-VAZQUEZ, and D. INFANTE-MATA, Beach erosion in San Benito Chiapas, Mexico: Assessment and possible solution. In: Silva, R. and Strusińska-Correia, A. (eds.), Coastal Erosion and Management along Developing Coasts: Selected Cases. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, N° 71 (2014) 114 - 121
- [22] - F. E. JONAH, D. MENSAH, E. A. EDZIYIE, R. E. AGBO, and D. A. BOATENG, Coastal erosion in Ghana: causes, policies, and management. *Coastal Management*, 44 (2) (2016) 116 - 130
- [23] - C. J. CROSSLAND, H. H. KREMER, H. J. LINDEBOOM, J. I. MARSHALL CROSSLAND, and M. D. A. Le TISSIER, Coastal Fluxes in the Anthropocene. Berlin, Germany : *Springer*, (2016) 231 p.
- [24] - M. SADIO, E. J. ANTHONY, A. T. DIAW, P. DUSSOUILLEZ, J. T. FIEURY, A. KANE, R. ALMAR, and E. KESTENARE, Shoreline changes on the wave-influenced Senegal river delta, West Africa: The roles of natural processes and human interventions. *Water*, 9 (5) 357 (2017) 1 - 17
- [25] - L. C. VAN RIJN, Coastal erosion and control. *Ocean Coastal Management*, 54 (2011) 867 - 887