### UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE DOCTORALE : Physique Chimie Sciences de la Terre, de

l'Univers et de l'Ingénieur (ED-PCSTUI)

F ACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2015 N° d'ordre 008 /2015

## THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Géosciences Option Géo-Ressources,

Environnement, Imagerie et Aménagement

présentée par :

# Abdoulaye NDOUR

# EVOLUTION MORPHO-SEDIMENTAIRE ET IMPACTS DES OUVRAGES DE PROTECTION SUR LE LITTORAL DE RUFISQUE, PETITE CÔTE, SENEGAL

Soutenue le 28 Mars 2015 devant le jury composé de:

Président	Raphaël SARR	Professeur, Université Cheikh Anta Diop Dakar/Géologie
Rapporteurs	Edward ANTHONY	Professeur, Université Aix- Marseille (CEREGE) France
	Amadou Tahirou DIAW	Professeur, Université Cheikh Anta Diop Dakar/Géographie
	Mouhamadoul Bachir	Maître de Conférences Université Cheikh Anta Diop
	DIOUF	Dakar/Géologie
Examinateurs	El Hadji SOW	Professeur, Université Cheikh Anta Diop Dakar/Géologie
	Soulèye WADE	Maître Assistant, Université Cheikh Anta Diop Dakar/ IST
Directrice de Thèse	Isabelle NIANG	Professeur, Université Cheikh Anta Diop Dakar/Géologie

A la mémoire de mon très cher père, de mon guide spirituel Sérigne Saliou Mbacké et de mon grand frère Ibrahima

AMa très chère famille, ainsi qu'à toute la famille élargie sans exception, qui m'ont soutenu sur tous les plans et à tous les moments. Votre compréhension a été sans faille; merci infiniment. Je n'oublierai jamais mes très chers parents à qui je dois tout.

#### REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, c'est avec plaisir que je profite de ces quelques lignes pour exprimer ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui, par leur collaboration, leurs conseils, leurs encouragements, ou d'une autre façon, ont contribué à sa réalisation.

#### Aux membres du jury

J'adresse mes sincères remerciements au Professeur Raphaël Sarr, pour avoir accepté de présider ce jury, et par sa parfaite collaboration en acceptant d'apporter une correction efficiente à ce document malgré son calendrier très chargé. Cher professeur soyez rassuré de ma profonde gratitude surtout pour vos conseils que j'ai pu bénéficier lors de la procédure du dépôt de mon dossier de soutenance, période où j'en avais vraiment besoin.

J'exprime ma profonde gratitude à ma directrice de thèse le Professeur Isabelle Niang. Madame, le parcours pour achever ce travail a été long, mais bref, scientifiquement rempli de bonnes leçons. Je vous remercie profondément du fond de mon cœur d'avoir accepté la lourde charge de diriger ce travail et tout en me permettant de travailler dans des conditions optimales, en me faisant bénéficier de moyens matériels et financiers depuis mon DEA, ainsi que pour la confiance que vous m'avez toujours manifestée. Vous m'avez accordé une attention à tous les instants tant au plan scientifique que sur le plan humain. Je ne vous dirai jamais assez ma reconnaissance. Votre exigence, votre rigueur, scientifique, m'ont toujours guidé à l'essentiel des problèmes dans un souci marqué sans cesse par la clarté et la simplicité. Madame, vous avez été au-delà du statut d'enseignant. Aucun mot ne saurait traduire fidèlement le sentiment qui m'anime.

J'adresse une mention spéciale au Professeur Amadou Tahirou Diaw, directeur du Laboratoire d'Etude et de Recherche en Géomatique (LERG) pour m'avoir ouvert les portes de son laboratoire. Les immenses qualités humaines que j'ai trouvées en lui, son temps ses compétences, et ses conseils depuis que j'ai fait sa connaissance, ne m'ont jamais été ménagés. Monsieur le professeur soyez rassuré de mes sincères remerciements. Ce fut un grand privilège pour moi d'être à vos côtés. Je profite l'occasion pour adresser mes remerciements à tous les étudiants qui ont fréquenté ce laboratoire durant cette période.

Je remercie également le Professeur Edward Anthony pour avoir accepté d'évaluer ce travail et ses conseils, son amitié et son expérience dont j'ai pu bénéficier durant le peu de temps passé avec lui sur le terrain à Joal.

Je remercie très sincèrement Monsieur Mouhamadoul Bachir Diouf, Maître de Conférences, pour les conseils très instructifs et pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Veuillez recevoir ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie profondément le Professeur El Hadji Sow, pour avoir accepté de participer à ce jury et pour les conseils et les encouragements qu'il m'a toujours prodigués, je tiens à lui témoigner ma gratitude.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à Monsieur Soulèye Wade, Maître Assistant et directeur du Laboratoire de Télédétection Appliquée de l'Institut des Sciences de la Terre (LTA/IST) pour m'avoir ouvert les portes de son laboratoire, pour ses conseils, et en sacrifiant parfois son propre temps de travail pour une parfaite collaboration et en fin pour sa participation à ce jury.

J'ai eu la chance d'être entouré de collègues et d'amis qui n'ont jamais ménagé leur peine et dont l'active collaboration ne m'a jamais fait défaut: Boubacar Fall, Kader Ba , Badara Diagne, Habib Ngom. Coumba Sy, Issa Sakho, Yves Birame Diadhiou, Mamadou Sadio, Pape Waly Bakhoum, Pierre Sambou, sans oublié Bathie Dabo, qui a été arraché à notre affection (Que Dieu l'accueille dans son Saint Paradis). Je m'incline très respectueusement devant sa mémoire.

J'exprime ma profonde gratitude à Ousmane Bocoum, Moussa Sall et Aliou Touré pour leurs encouragements et leur accueil très sympathique au Centre de Suivi Ecologique (CSE) lors de mon stage pour le traitement des images.

A tous les enseignants du département de Géologie ma reconnaissance et mes remerciements, les plus cordiaux, qu'ils acceptent de voir dans ce mémoire le résultat de leurs efforts collectifs.

Sommane	
REMERCIEMENTS	1
ABREVIATIONS	3
INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE 1: CADRE D'ETUDE	14
I. Cadre géographique	15
II. Cadre géologique	25
III. Le plateau continental : morphologie et sédimentologie	35
IV. Description géomorphologique du littoral de Rufisque	
V. Cadre hydrodynamique	40
VI. Caractéristiques anthropiques	
VII. Les causes de l'érosion côtière et les taux d'érosion des études antérieures du littoral de Rufisque	
VIII. Conclusion	66
CHAPITRE 2: METHODOLOGIES	68
I. Méthodes topographique et sédimentologique	69
II. Méthodes d'étude de l'évolution de la ligne de rivage	77
CHAPITRE 3:EVOLUTION MORPHO-SEDIMENTAIRE DU LITTORAL DE RUFISQUE	91
I. Analyse morpho-sédimentaire des plages	92
II. Synthèse et discussion des résultats	139
III. Les impacts physiques des structures de protections sur le littoral	156
IV. Conclusion	172
CHAPITRE 4 : EVOLUTION RETROSPECTIVE DE LA LIGNE DE RIVAGE DE RUFISQUE DE 1	954
A 2006	174
I. Impact des ouvrages de protection sur l'évolution de la ligne de rivage de 1954 à 2006	176
II. Conclusion	187
CHAPITRE 5 :CHANGEMENT CLIMATIQUE ET STRATEGIES D'ADAPTATION A L'EROS	ION
CÔTIERE AU SENEGAL: LES OBSTACLES	188
I. Changement climatique et stratégies d'adaptation	190
II. Les stratégies d'adaptation à l'érosion côtière	194
III. Les obstacles aux stratégies d'adaptation à l'érosion côtière au Sénégal	197
IV. Conclusion	203
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	205
BIBLIOGRAPHIE.	211
LISTE DES FIGURES	229
LISTE DES PHOTOS	234
ANNEXE :	235
TABLE DES MATIERES	237

### Sommaire

### ABREVIATIONS

**CCNUCC** : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques **COADS** : *Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* 

C.S.E : Centre de Suivi Ecologique

DEEC : Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés

DGTP: Direction Générale des Travaux Publics

**DPM** : Domaine Public, Maritime

**DSAS** : Digital Shoreline Analysis System

**EPR** : End Point Rate

**FIT** : Front Intertropical

GIEC : Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

**G.P.S** : Global Positioning System

**INTAC** : Intégration de l'Adaptation au Changement climatique dans le développement du Sénégal

**ONG** : Organisation Non Gouvernemental

**RMS** : erreur moyenne quadratique ((Root Mean Square).

SENELEC : Société Sénégalaise d'Electricité

UEMOA: Union Economique et Monétaire de l'Afrique de l'Ouest

**UTM** : Universal Transverse Mercator

**ZCIT** : Zone de Convergence Intertropicale

#### RESUME

Situé sur la Petite Côte à 25 km de Dakar, le littoral de Rufisque est l'un des segments de la côte sénégalaise les plus menacés par l'érosion côtière. Du fait de la menace croissante de l'érosion et la récurrence des inondations marines, le littoral s'est vu doter de véritables ouvrages de protection dès 1980. L'étude de la dynamique morpho-sédimentaire actuelle du littoral a mis en évidence une évolution saisonnière avec des profils convexes en saison sèche et des profils concaves en saison des pluies. La pression, causée par les ouvrages de protection se répercute sur la morphologie littorale par intensification des mouvements verticaux avec des bilans sédimentaires négatifs beaucoup plus accentués à leurs extrémités en aval de la dérive littoral. Ces profondes modifications n'ont pourtant pas encore d'effets significatifs sur les caractéristiques sédimentologiques des plages. Par ailleurs, l'étude de l'évolution de la ligne de rivage à partir des photographies aériennes de 1954, 1980, et 1997 et de l'image Spot 2006, montre que tout le littoral à une exception près, est soumis à l'érosion avec des taux de -0.4 à -1.5 m/an. Cette évolution a connu cependant une variation spatio-temporelle très importante, surtout après la construction de structures de protection sur la quasi-totalité du linéaire côtier. Ainsi, l'étude de l'évolution à long terme de la ligne de rivage a permis de connaitre les impacts préjudiciables des structures de protection en dur sur l'évolution du littoral. Au-delà de l'atténuation du recul du trait de côte juste après la période qui a suivi leur construction et la protection des riverains contre les fortes houles de l'hivernage, les murs de protection ont intensifié les taux de recul de la ligne de rivage, surtout à leur extrémité en aval de la dérive littorale et accéléré la disparition de certaines plages. Par ailleurs, la mise en place de bonnes stratégies d'adaptation à l'érosion côtière sur le littoral de Rufisque à l'instar des autres littoraux sénégalais est bloquée par des obstacles humains, scientifiques, technologiques, politiques, institutionnels etc.

**Mots clés**: Rufisque, ouvrages de protection, ligne de rivage, érosion côtière, profils obstacles stratégies d'adaptation.

#### ABSTRACT

The Rufisque's coast located 25 km southeast of Dakar is among the most threatened by coastal erosion in Senegal. Thus, with the increasing threat from erosion and recurrence of marine flooding, protective structures were built in 1980. The current morpho-sedimentary dynamics evaluated in a context of climate change has showed a seasonal pattern with convex profiles in the dry season and concave profiles rainy season. The diachronic study of beach profiles, before and after the seawalls construction showed that protective structures accentuated the coastal erosion, with more important sedimentary deficits at the ends of the structures. The pressure caused by protective structures affects the coastal morphology by incre6asing rates of erosion with retreat more important in the down drift end of the protective structures. These profound changes yet have no significant effects on the sedimentological characteristics of the beaches. Furthermore, the study of the evolution of the shoreline aerial photographs from 1954, 1980 and 1997 and image Spot 2006, shows that the entire coastline, with one exception is with erosion rates - 0.4 - 1.5 m / year. However, this development has had a spatio-temporal variation very important, especially after the construction of protective structures on almost all of the coastline. The study of the long-term evolution of the shoreline has enabled to known the prejudicial effects of these structures on the evolution of this coast. Indeed, beyond the mitigation of retreat of the coast just after the period following their construction and protection of residents against the heavy swells of the winter, protective walls have intensified the decline rate shoreline, especially at its down drift end, due to the end-effect and have accelerated the disappearance of some beaches in front of them. However, the choice of adequate adaptation strategies to coastal erosion, in general on the Senegalese coast is blocked by humans, scientific, technological, and institutional policies impediments.

**Key words :** Rufisque, protection structures, coastal erosion, shoreline, beach profiles, adaptation strategies, impediments

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le littoral est une zone de transition complexe entre l'hydrosphère, l'atmosphère, et la lithosphère en perpétuelle évolution. C'est un lieu privilégié d'échanges où convergent de plus en plus les activités humaines. C'est également :

- un domaine de convoitises à vocations multiples, à la fois économique (pêche, commerce, industries, exploitation minière, touristique) et militaire, présentant ainsi un intérêt pour l'installation humaine, collective ou individuelle ;

- un objet de menace en raison des nuisances diverses provoquées par l'amenuisement de l'espace naturel. Vanney (1991) soulignait déjà, le risque de rupture de l'équilibre entre les éléments du milieu et la production de modifications, lentes ou spectaculaires, parfois irréversibles et souvent dangereuses, risque lié aux constructions et aux rejets de toutes natures, urbaines et industrielles.

Pour Paskoff (1993), « les littoraux constituent des environnements fragiles dans lesquels se manifestent de multiples facteurs d'évolution aux actions, interactions et rétroactions complexes ».

Les littoraux sont les environnements les plus évolutifs à la surface de la planète (Bruun, 1962 ; Carter, 1988; Paskoff, 1993). L'érosion côtière, une des problématiques de ce milieu, est un phénomène très ancien (Paskoff, 1998a), qui affecte plus de 70% des plages du monde (Bird, 1985). C'est un processus qui résulte de facteurs à la fois naturels et anthropiques, ce qui concourt à une dominance des processus d'érosion des sédiments de la plage sur ceux d'accumulation, entraînant une avancée de la mer sur le continent, et qui intervient à des échelles spatio-temporelles par l'action des vents, des vagues, des marées et des houles.

Plusieurs causes sont évoquées pour expliquer ce recul : conditions hydrodynamiques, construction de barrages, aménagements côtiers, extractions de sable notamment l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique.

Beaucoup de travaux ont été menés de par le monde, notamment en Australie, aux Etats Unis (côtes sud et est), aux Pays Bas, etc. d'abord pour décrire la dynamique littorale (Wright & Short, 1984; Wright *et al.*, 1985; Masselink & Short, 1993), ensuite pour évaluer l'évolution du trait de côte et expliquer les causes et les conséquences du phénomène de régression généralisée des côtes. C'est ainsi que des méthodes de lutte ont été proposées : brise-lames, épis, murs de protection, alimentation artificielle en sable, etc. Cependant, il n'existe toujours pas de consensus au niveau mondial quant aux effets des ouvrages de protection contre l'érosion côtière bien qu'en zone intertidale la modification des conditions hydrodynamiques et du transport sédimentaire soit reconnue (Carter, 1988; Kraus, 1988).

Aussi, conscients de la dégradation continuelle de l'environnement, les membres de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) mentionnent en 1992 deux stratégies de lutte contre les impacts du changement climatique. D'une part, l'atténuation qui peut être définie par « la mise en œuvre de politiques destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à renforcer les puits » et, d'autre part, l'adaptation que sont « les initiatives et mesures prises pour réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets des changements climatiques réels ou prévus » (GIEC/IPCC, 2007).

C'est dans cette logique qu'en Afrique de l'Ouest, le problème de l'érosion des côtes est devenu au fil des années, une des principales préoccupations sociales, économiques et environnementales. Les travaux effectués en Afrique dans les dernières décennies (20<sup>e</sup> siècle et au début du 21<sup>e</sup>siècle) montrent que la quasi-totalité des côtes est sujette à l'érosion (Ibe & Quélennec, 1989 ; Sy, 1982; Diaw *et al.*, 1991 ; Niang-Diop, 1995 ; Blivi, 2001 et 2005 ; Blivi &Adjoussi, 2004 ; Faye, 2010; Touré *et al.*, 2012, Ba, 2013) et des structures de protection ont été construites pour lutter contre ce phénomène. Cependant, contrairement aux pays développés, les études d'impacts des ouvrages de protection sur l'évolution du littoral ne sont pas bien documentées dans la littérature de la région.

Au Sénégal, la zone côtière longue de 706,4 km (Diaw, 1984) se distingue par la richesse et la variété de ses ressources naturelles. Cette zone est composée de trois types de côtes (figure 1) - une côte rocheuse qui sépare la côte sableuse en deux ensembles, la Grande Côte au nord et la Petite Côte au sud avec quelques caps rocheux, et la côte vaseuse constituée d'estuaires à mangroves. Elle est caractérisée par : la présence d'écosystèmes particuliers, des conditions bioclimatiques favorables à l'installation de l'homme, la concentration de plus de la moitié de la population, des activités socio-économiques et des infrastructures (résidentielles, commerciales, industrielles, hôtelières, etc.). Cette occupation du littoral s'est faite sans prise en compte de la dynamique, des aléas côtiers et de l'héritage géologique ; alors qu'il est très vulnérable aux changements climatiques,



particulièrement à une élévation du niveau marin (Niang-Diop et al., 2005).

Figure 1: Principaux types de côtes au Sénégal (Sall, 1982, modifiée).

Sur la Petite Côte (côte sud de Dakar), le littoral de Rufisque, très tôt confronté à des problèmes d'érosion, a fait l'objet de plusieurs études (Diallo, 1982 ; Niang-Diop, 1995 ; Dièye, 2000). Il constitue le premier littoral de la côte sénégalaise où ont été érigés de véritables ouvrages de protection contre l'érosion côtière, dans la mesure où les structures construites sur la Grande Côte étaient destinées à lutter contre l'envahissement des dunes et la coupure de l'embouchure du fleuve Sénégal. Aujourd'hui, avec 3,47 km, le littoral de Rufisque dispose de la plus grande longueur de côte protégée au Sénégal. De ce fait, à l'image de Guilcher (1959) qui considérait l'archipel de la Molène comme un « *laboratoire intéressant pour l'étude de l'adaptation des accumulations littorales à la houle* », le littoral de Rufisque est un bon terrain pour l'étude des effets des structures de protection sur l'évolution des littoraux de la Petite Côte c'est à dire la réponse du littoral face à ces types d'action anthropiques.

Ces dernières années, l'occurrence de régression générale des côtes, liée surtout à une élévation du niveau de la mer induite par le changement climatique, a remis en cause l'efficacité de beaucoup de méthodes de lutte contre l'érosion côtière. Le littoral de Rufisque, malgré des méthodes de protection en dur est caractérisé par une érosion chronique, imputable à un déficit sédimentaire dû à sa position par rapport à la presqu'île de Dakar, à la présence du canyon de Kayar, de Dakar et au prélèvement de sables (Niang-Diop, 1995).

Avec l'élévation actuelle du niveau marin, l'érosion côtière constitue une menace sérieuse pour la zone côtière rufisquoise. Elle risque d'être plus grave si les stratégies d'atténuation restent vaines. Or dans ce contexte de changement climatique, cette augmentation du niveau de la mer s'accompagnera de l'établissement d'un nouvel équilibre, celui-ci ne pouvant se faire sans l'érosion des côtes sableuses, notamment des zones basses et des îles. D'après le Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC/IPCC, 2007), les effets du changement climatique vont se faire sentir tout au long du 21<sup>e</sup>siècle du fait de l'inertie du système climatique et l'adaptation est donc inévitable.

Par ailleurs, nous savons que les systèmes côtiers sont des entités en équilibre dynamique en regard des facteurs hydrodynamiques, sédimentaires et géomorphologiques (Carter, 1988). De surcroît, avec le coût prohibitif de construction et de suivi que nécessitent les aménagements de protection, il importe de préciser leur degré d'efficacité, notamment en rapport avec les effets produits et ceux réellement escomptés sur l'évolution du littoral de Rufisque. Pour comprendre l'évolution du littoral de Rufisque, il est donc nécessaire de faire une analyse spatio-temporelle des processus physiques, anthropiques et climatiques qui contrôlent la dynamique littorale et qui interviennent à diverses échelles (figure 2). Les évolutions spatiales et des processus sont largement dépendantes de l'échelle temporelle (Fenster *et al.*, 1993). Les changements enregistrés à l'échelle géologique résultent d'une évolution graduelle des processus physiques, climatiques et anthropiques qui agissent à l'échelle journalière, mensuelle, saisonnière, annuelle, et décennale (le moyen terme et le long terme) et d'événements brutaux qui opèrent dans le cours terme allant de quelques minutes, heures à quelques semaines.



Figure 2: Répartition spatio-temporelle des facteurs climatiques, hydrodynamiques, sédimentologiques et anthropiques de la dynamique sédimentaire des littoraux (d'après Fenster *et al.*, 1993, modifiée par Dehouck, 2006).

C'est dans ce contexte que cette thèse qui vise l'étude de l'évolution du littoral de Rufisque a été menée. Elle s'inscrit dans la suite des travaux menés à Rufisque par Niang-Diop (1995) pour mieux comprendre le fonctionnement géomorphologique de cette partie du littoral sénégalais. Elle tente d'apporter un meilleur éclairage sur les avantages et les inconvénients des structures de protection pour évaluer leur utilisation comme stratégies d'adaptation pour le reste des côtes sénégalaises, notamment la Petite Côte.

La thèse comprend quatre chapitres.

Le premier est consacré à la présentation générale de la zone d'étude. Il précise le cadre géographique et géologique et les facteurs hydrodynamiques à la base de la morphogenèse littorale. Il présente aussi les caractéristiques anthropiques du littoral, notamment les différents ouvrages de protection implantés.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude de l'évolution morpho-sédimentaire annuelle du littoral rufisquois. Il a pour objectif de déterminer l'évolution des caractéristiques morphologiques et sédimentologiques des plages. Une étude de même type ayant été réalisée par Niang-Diop (1995), nous permettra de comparer avec les résultats obtenus dans ce travail. Cette comparaison concerne les profils levés aux mêmes endroits avant et après l'implantation des ouvrages de protection. Elle permettra de préciser l'impact de ces aménagements sur l'évolution morpho-sédimentaire.

Le troisième chapitre étudie l'évolution à long terme de la ligne de rivage par l'analyse de photographies aériennes et d'images satellitaires. La méthodologie utilisée est différente de celle de Niang-Diop (1995) et Dièye (2000) qui ont tous les deux travaillé sur ce problème. Cette partie nous donne l'occasion d'étudier l'impact des ouvrages de protection sur l'évolution de la ligne de rivage.

Le quatrième chapitre étudie les obstacles aux stratégies d'adaptation à l'érosion côtière au Sénégal, dans un contexte d'élévation du niveau marin liée au changement climatique. C'est une réflexion qui repose sur un certain nombre d'observations, effectuées mensuellement de 2005 à 2014 sur la Petite Côte, d'enquêtes menées sur le littoral de Saint-Louis à Joal dans le cadre d'une étude d'inventaire des initiatives de protection (Dabo *et al.,* 2011), de visites avec des décideurs politiques en 2010 et 2012 ou à la suite de fortes houles intervenues sur des segments littoraux notamment en juillet 2007. L'objectif est de montrer la complexité de la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation et le mythe politique qui l'entoure au Sénégal.

### **CHAPITRE 1: CADRE D'ETUDE**

L'évolution des littoraux dépend de plusieurs facteurs qui peuvent agir à court et/ou à long termes. Les évolutions à court terme sont souvent liées aux conditions hydrodynamiques, notamment météorologiques qui influencent les caractéristiques de la houle, ou bien à d'éventuelles modifications des conditions d'apports sédimentaires. Les perturbations liées à un événement, (tempête) ou à des modifications lentes (réduction des apports sédimentaires fluviatiles, montée du niveau marin) induisent un ajustement du niveau de la côte, qui évolue vers un nouvel état d'équilibre, correspondant aux nouvelles conditions qui lui sont imposées. Ces facteurs d'ordre géomorphologiques, géologiques, climatiques et/ou hydrodynamiques ont fait l'objet de plusieurs études sur le littoral sénégalais. Ce chapitre précise l'état de considérations générales de ces caractéristiques, ce qui permet d'avoir une idée globale du cadre d'étude.

#### I. Cadre géographique

#### I.1. Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude est située à environ 25 km au Sud Est de Dakar (figure 3) entre les parallèles 14°41' et 14° 46''30'' N et les méridiens 17°15' et 17°20' W. Elle est située dans la baie de Gorée qui se termine au sud à Bargny et est localisée dans le domaine soudano sahélien. Cette région est caractérisée par la succession de deux saisons bien contrastées : une saison sèche et une saison pluvieuse.



Figure 3 : Localisation de la zone d'étude (Source Earth science)

### I.2. La circulation atmosphérique et les éléments du climat

### I.2.1. La circulation atmosphérique

La circulation atmosphérique contrôle les agents dynamiques naturels de l'évolution des littoraux. En Afrique de l'ouest, les flux d'alizé et de mousson sont les principales composantes de la circulation atmosphérique, du moins dans les basses couches de l'atmosphère (Leroux, 1996 et 2001). Cette circulation est déterminée par les hautes pressions tropicales et équatoriales. Le Sénégal, situé dans la zone intertropicale, possède un climat tropical caractérisé par l'alternance de deux saisons distinctes : une saison sèche de novembre à avril dominée par les alizés et une saison pluvieuse (hivernage) de mai à octobre, marquée par le régime de la mousson.

Selon Leroux (1977 et 1983), les vents, essentiels dans les phénomènes de transport des sédiments, d'upwellings, de génération de houles, etc. dans la zone côtière sénégalaise dépendent de trois champs de pression : les anticyclones des Açores et maghrébin (saharolibyen) dans l'hémisphère nord, et l'anticyclone de Sainte Hélène dans l'hémisphère sud issu des hautes pressions tropicales (Leroux, 2001). Ces champs de pressions sont issus des centres d'action que sont les hautes pressions subtropicales et les basses pressions équatoriales. La variabilité de l'intensité de chaque cellule anticyclonique assujettit le Front Intertropical (FIT) à des changements de position longitudinaux pendant l'année, position qui commande la prédominance de certains vents (Barbey, 1982 ; Guérin, 2003) (figure 4). Le FIT correspond ainsi, à une aire dépressionnaire entre les ceintures anticycloniques subtropicales, défini comme l'axe des basses pressions équatoriales. Le climat est fonction du déplacement de cette zone de convergence intertropicale (ZCIT), elle-même liée au balancement des maxima barométriques).

En zone intertropicale, les caractéristiques du vent découlent de la circulation atmosphérique générale.

L'alizé continental ou harmattan, issu de l'anticyclone saharo libyen (anticyclone maghrébin) est de direction nord-est/sud-ouest. C'est un vent semi-permanent, chaud et sec, souvent chargé de poussières qui souffle dans la partie continentale du pays de novembre à mai. Durant cette période, la ZCIT est dans sa position la plus méridionale (vers février - mars).



Figure 4 : Les masses d'air et le déplacement du F.I.T. (Front Inter Tropical) au cours de l'année (Michel, 1973 modifiée)

L'alizé maritime, permanent et de direction nord-ouest/sud-est, est issu de l'anticyclone des Açores. Son parcours océanique lui donne de la fraîcheur et une humidité qui peut apporter du brouillard et de la rosée. Cette période correspond à la migration de la ZCIT vers le sud, entraînant l'installation de l'alizé continental qui prédomine sur l'alizé maritime vers la fin de la saison sèche. Pendant la saison sèche (de novembre à avril), l'alizé maritime et l'alizé continental circulent en même temps, mais la zone littorale reste sous la dominance de l'alizé maritime qui remonte vers le nord.

La mousson, issue de l'anticyclone de Sainte Hélène est un vent chaud et humide centré dans l'Atlantique Sud. Elle pénètre au Sénégal au mois de mai après avoir pris une direction sud-ouest/nord-est au niveau de l'équateur géographique, d'où le début de l'hivernage dans le sud du pays. Elle favorise le développement des lignes de grains qui balaient le territoire d'est en ouest et qui apportent 90% du total des précipitations dans le domaine sahélien (Sagna, 1990). Pendant la saison des pluies (de mai à octobre), la ZCIT remonte progressivement vers le nord pour atteindre vers août – septembre son maximum septentrional.

#### I.2.2. Les éléments du climat

#### I.2.2.1. Les précipitations

Les données analysées ici proviennent de la station de Dakar Yoff. Ce choix est lié à trois raisons :

 les interruptions puis l'arrêt de fonctionnement depuis 1992 de la station pluviométrique de Rufisque, créée en 1887. Elle avait débuté ses enregistrements en 1919 (Laaroubi, 2009);

- l'ancienneté de la station de Dakar et sa proximité par rapport à notre zone d'étude ;

- les deux zones sont soumises au même régime pluviométrique et notre objectif n'est pas d'étudier en détail les précipitations.

La saison des pluies commence à partir du mois de juin dans la région de Dakar. Au début, les pluies sont faibles et espacées. L'essentiel des précipitations se concentre entre juillet et septembre, avec un paroxysme en août (figure 5), mois durant lequel les précipitations sont en général fréquentes et abondantes. Cette période est aussi caractérisée par des masses orageuses se déplaçant d'est en ouest : les lignes de grains (Mahé, 1993) qui peuvent être soit des intrusions du flux d'est dans le flux de mousson, soulevant l'air humide en un front mobile le long duquel se produisent orages et averses. Cependant, des pluies hors saison (pluies de *heug*) peuvent se produire en pleine saison sèche (décembre et janvier). Elles s'expliquent par la descente en milieu tropical des influences des anticyclones mobiles polaires (Leroux, 1996). L'hivernage se termine en octobre et parfois en novembre.



Figure 5 : Evolution de la pluviométrie moyenne mensuelle à Dakar (Station de Dakar Yoff 1900 - 2008)

Les pluies se caractérisent aussi par une très forte variabilité interannuelle (figure 6). La rupture qui s'est opérée en 1970 permet de distinguer deux séquences contrastées.

- une phase excédentaire 1900 - 1969.

- une phase déficitaire 1970 -2008 (baisse de la pluviométrie annuelle).

Cette baisse entraîne une diminution des apports sédimentaires fluviatiles, et par conséquent celle du transit sédimentaire du littoral.

L'évolution des précipitations montre une tendance générale à la baisse dans la région de Dakar. Cette baisse est un phénomène général sur l'ensemble du Sénégal (Malou, 2004). Les projections du GIEC/IPCC (2007) montrent l'apparition d'événements pluvieux extrêmes et le prolongement de la sécheresse qui seront induits par le changement climatique.



Figure 6 : Variabilité interannuelle des précipitations annuelles à Dakar (1900-2008) (Source : Direction de la Météorologie Nationale)

Sur la période de 1900 à 2008, les écarts par rapport à la moyenne (481 mm) des 107 années sont considérables. Les deux périodes, humide (1900-1969), et sèche (1970-2008), sont bien distinctes (figure 7).



Figure 7 : Ecarts pluviométriques par rapport à la moyenne (Source : station de Dakar Yoff 1900 -2008)

Facteur le plus déterminant dans l'évolution climatique, la pluviométrie est l'élément climatique qui varie le plus dans le temps et dans l'espace et qui définit les saisons sèche (s) et pluvieuse (s) » (Kimbata, 1993 ; *in* Sagna, 2005). Elle constitue aussi un paramètre important dans le budget sédimentaire littoral.

#### I.2.2.2. Les températures

Le long de la côte sénégalaise, les températures sont marquées par un gradient, de la côte vers l'intérieur et ceci sous l'influence de l'alizé maritime. Pour la période de 1951 à 2009, la température moyenne annuelle est 24,46°C (figure 8). Les températures indiquent d'importantes variations saisonnières: les moyennes mensuelles les plus élevées sont enregistrées en juillet, août, septembre et octobre, correspondant à la durée de la mousson (avec un maximum de 27,6°C en octobre). La température moyenne la plus basse est

#### enregistrée en février (21°C).



Figure 8 : Evolution inter-mensuelle de la température moyenne de la région de Dakar (1951-2009) (Source : Direction de la Météorologie Nationale)

#### I.2.2.3. Les vents

Les vents, en tant que forces génératrices de courant jouent un rôle important dans la zone côtière. Cependant, ce sont les vents locaux de basse altitude qui interviennent dans la dynamique côtière, car ils sont responsables des mers du vent locales et des upwellings mais aussi parce qu'ils sont les agents de transport des sables dans la zone côtière (Niang-Diop, 1995). Ils ne sont efficaces que lorsqu'ils atteignent des vitesses de l'ordre de 5,55 m/s (Gaye, 1999). Les vents sont variables en intensité et direction sur le littoral ouest africain. Ils subissent une variation saisonnière de plus en plus marquée vers le sud (figure 9) (Thomas, 2007). Leur direction et leur force sont directement dépendantes de la dynamique des champs de pression atmosphérique sur l'océan Atlantique.

Sur le littoral sénégalais, les vents du secteur nord-ouest à nord-est sont prédominants pendant la saison sèche entre novembre et mai, alors que pendant la saison des pluies entre juillet et septembre, les directions, bien que variables, sont essentiellement du sud-ouest surtout sur la Petite Côte. Les vitesses sont généralement comprises entre 1 et 6 m/s. Les maxima sont enregistrés pendant la saison sèche, leur action dynamique est prépondérante sur la Grande Côte où ils contribuent à la formation de dunes littorales. Pendant la saison des pluies, les vents de mousson, de secteur sud-ouest et de faible intensité, interviennent peu sur la morphologie du littoral.

A Dakar, les vitesses maximales sont observées entre novembre et avril, période pendant laquelle la région est sous l'influence de l'alizé maritime. La vitesse la plus importante est notée au mois d'avril avec une moyenne de 5,87 m/s et la vitesse minimale au mois de septembre avec 3,51 m/s (figure 10).



Figure 9 : Variation mensuelle de la direction et de la vitesse du vent en cm .s<sup>-1</sup> de 05/08/1991 – 31/12/2006 Données des satellites ERS-1 ERS-2 et QUIKSCAT ; résolution spatiale 1°x1°. (Thomas, 2007)



Figure 9 (suite) Variation mensuelle de la direction et de la vitesse du vent en cm .s<sup>-1</sup> de 05/08/1991 – 31/12/2006 Données des satellites ERS-1 ERS-2 et QUIKSCAT ; résolution spatiale 1°x1°. (Thomas, 2007)



Figure 10: Moyennes mensuelles de la vitesse du vent de 1951 à 2009 à Dakar (Source : Direction de la Météorologie Nationale)

Les vents représentent un agent dynamique important en zone littorale. Ils sont responsables de déplacements sédimentaires au niveau de la plage et sont également générateurs de houle et de courants côtiers de surface.

#### I.2.2.4. L'humidité relative

C'est le rapport en centièmes du poids en grammes de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air sur le poids en grammes de vapeur d'eau que ce même volume est capable de contenir au maximum, aux mêmes conditions de température et de pression. En rapport avec l'humidité du sol, l'humidité relative est maximale en août et septembre (81%) (figure 11), période correspondant aux mois les plus pluvieux. Cependant, la prédominance de l'alizé maritime en zone littorale a pour conséquence une diminution de l'humidité relative.



Figure 11: Evolution de l'humidité relative moyenne mensuelle à Dakar (1951-2003) (Source : Direction de la Météorologie Nationale)

#### II. Cadre géologique

#### II.1. Contexte géologique général

Située dans la région de Dakar, la zone d'étude comprise entre Mbao et Bargny correspond au graben de Rufisque. Son histoire géologique est liée à celle du bassin sénégalo-mauritanien-Guinéen dont la couverture sédimentaire est d'âge méso-cénozoïque et Quaternaire (figure 12).



Figure 12 : Le Bassin sédimentaire sénégalo-mauritano-guinéen dans son cadre régional (Roger *et al.*, 2009b)

D'après les travaux de Roger *et al.* (2009a) le bassin sénégalo-mauritanien-Guinéen s'étend de la Mauritanie au nord à la Guinée Bissau au sud. Cette façade atlantique est longue d'environ 1300 km et sa plus grande largeur (550 km) se situe à la latitude de Dakar (Bellion et Guiraud, 1982 ; Ponsard *et al.*, 1988 ; Roger, *et al.*, 2009a). Il constitue le plus occidental et le plus vaste bassin du littoral ouest africain, avec une

partie onshore qui couvre une superficie de plus 340 000 km<sup>2</sup>. Ouvert à l'ouest sur l'Océan Atlantique, il s'est individualisé à la suite de l'écartement des plaques africaine et américaine à la fin du Trias (Bellion, 1987). Il est limité à l'est et au sud-est par la chaîne des Mauritanides et au sud par le bassin paléozoïque de Bové (Guinée et Guinée Bissau), au nord par la dorsale Réguibat

La structure d'ensemble du bassin correspond à celle d'un bassin de marge passive avec des séries sédimentaires monoclinales à pendage ouest en direction du domaine océanique et un caractère transgressif des dépôts vers l'est au fur et à mesure de l'expansion océanique et de la subsidence du bassin.

Il est caractérisé par une tectonique de socle très complexe avec dominance d'un rejeu de failles verticales. De nombreuses failles verticales affectent le socle avec des directions majeures subméridiennes NNE-SSW. Elles sont responsables de la morphologie en horsts et grabens dans la partie occidentale (figure 13).



Figure 13 : Schéma structural de la presqu'île du Cap Vert (d'après Elouard, 1980, modifiée)

Ces accidents sont des failles de type marge, liées à l'ouverture de l'Atlantique (Villeneuve *et al.*, 1993). D'est en ouest, le horst de Diass est suivi du graben de Rufisque, avec des gradins successifs (Sébikotane, Bargny, de Pikine) puis du horst de Dakar. Dans le graben de Rufisque, ce sont des failles normales de direction WNW-

ESE et NNE-SSW à NE-SW qui dominent. Selon Lompo (1987), ces dernières pourraient être responsables du décrochement de la côte au niveau du Cap de Diokoul. La plupart de ces failles ont rejoué en failles normales à la fin du Crétacé et durant le Tertiaire. A la faveur de ces cassures, une intense activé volcanique a affecté la région du Cap Vert entre, le Miocène et le Quaternaire.

#### II.2. Lithostratigraphie de la région d'étude

L'histoire géologique du bassin a commencé avec son ouverture suivie de la première transgression au Jurassique moyen – supérieur, qui a été recoupé par le sondage DKM2 au sud de Dakar. Il correspond à des calcaires néritiques souvent biodétritiques, parfois oolithiques ou dolomitiques (Castelain 1965).

Au Crétacé Inférieur (du Berriasien à l'Aptien), la sédimentation carbonatée domine mais on note une arrivée de matériaux détritiques dans la partie ouest du bassin. Au centre, les dépôts essentiellement gréseux, alternent avec des argiles silteuses dont l'épaisseur s'amenuise vers l'est. C'est une séquence carbonatée constituée de calcaires micritiques avec intercalations de marnes dolomitiques et une séquence clastique silteuse et gréseuse à grains fins (Roger *et al.*, 2009d).

Dans la région de Dakar, on trouve une alternance d'argiles et de grès silteux azoïques. Dans la partie offshore, au large de la Guinée, ce sont des dépôts terrigènes (sables et grès) qui dominent (Ly, 1985).

Le passage du Crétacé inférieur au Crétacé supérieur qui correspond aux étages de l'Albien au Cénomanien est marqué par une sédimentation argileuse à l'ouest. Le sommet du Crétacé supérieur est représentée dans le horst de Diass par les séries campano-maastrichtiennes qui révèlent des variations eustatiques du niveau marin qui seraient liées à des épisodes tectoniques (Khatib *et al.*, 1990; Sow, 1992) et constituent les plus anciennes formations connues à l'affleurement (Sow, 2007) sous forme de sables fins, de grès et siltites argileuses observées sur le littoral (Sarr, 1998).

#### II.2.1. Le Tertiaire

#### II.2.1.1. L'Eocène inférieur à supérieur

L'Eocène inférieur et moyen est marqué par une importante transgression et une sédimentation biochimique à faciès alternants marno-calcaires riche en Discocyclines,

oursins et mollusques relayés à la fin de l'Eocène moyen par des calcaires à nummulites. Au cours de la transgression yprésienne la mer envahit tout le bassin. Les affleurements composés essentiellement d'argiles blanches feuilletées à attapulgite qui passent verticalement à des marno-calcaires à lentilles fossilifères sont limités à la falaise de Thiès et dans la presqu'île du Cap-Vert, s'observent dans la Formation de Reubeuss (Roger *et al.*, 2009d).

Entre le Cap des Biches et Rufisque, l'Eocène inférieur et moyen affleurent sous forme de calcaires, de marnes, d'une alternance marno-calcaire, riches en faunes littorales. Dans la région de Rufisque les affleurements de l'Eocène moyen sont représenté par la Formation de Bargny avec deux membres (figure 14) (Roger *et al.*, 2009d). : le Membre du Cap des Biches et le Membre de Rufisque.



Figure 14 : Coupe de la carrière de la cimenterie de Bargny (Roger et al., 2009d, modifiée)

- Le Membre du Cap des Biches représente la base du Lutétien. C'est une unité composée d'une alternance de bancs marno-calcaires et a livré une faune marine constituée de foraminifères planctoniques (*Acarinina* cf. *praetopilensis, A.collactea, Subbotina linaperta, S.* cf. *hagni, S. eocaena, S. roesnaesensis, Morozovelloides* cf. *crassatus,Guembelitrioides nuttali*)), associés à de fréquents foraminifères benthiques indicateurs de la biozone P10 (base du Lutétien). Elle est coiffée par une alternance de calcaires micritiques gris jaunâtres et de couches marneuses d'épaisseur pluri-décimétriques, qui s'enrichissent progressivement vers le haut en horizons silicifiés stratiformes qui affectent préférentiellement des horizons calcarénitiques à éléments phosphatés (clastes, coprolithes et pellets) et Discocyclines (*Discocyclina senegalensis*)

- Le Membre de Rufisque formé par 3 m d'alternance marno-calcaires à dominante marneuse. Il a été identifié dans la carrière de la cimenterie de Bargny. A cette endroit, il renferme des fossiles de poissons, de fréquents foraminifères planctoniques comme *Pseudoglobigerinella bolivariana, Morozovelloides,* et d'abondants foraminifères benthiques typique du Lutécien. Au nord de cette carrière, on note dans les marnes blanches feuilletées la présence de bancs de calcarénite/calcirudite à abondants pellets phosphatés et discocyclines et une microfaune à foraminifères planctoniques (*Morozovelloides crassatus...*) et benthiques.

A l'Eocène supérieur la mer se retire de l'ensemble du bassin mais persiste dans la presqu'île du Cap- Vert jusqu'à l'Oligocène. Non connu à l'affleurement, les dépôts sont constitués à Yoff par des argiles riches en foraminifères benthiques (*Siphonodosaria*, Bolivines, Uvigérines) (Castelain, 1965) et d'argiles contenant des foraminifères planctoniques sur le plateau de Thiès (Brancart et Flicoteaux, 1971; Flicoteaux, 1980).

#### II.2.1.1. L'Oligocène.

A l'Oligocène on enregistre les premières manifestations du volcanisme tertiaire de Dakar avec la mise en place du sill de pyroxénolite de l'Anse des Madeleines  $(30,7 \pm 2$  Ma) (Crévola *et al*, 1994). Inconnu à l'affleurement dans les autres régions du Sénégal, il correspond à Dakar à des calcaires à Lépidocyclines en blocs emballés dans les tufs volcaniques de l'Anse Bernard et de la Plage Pasteur.

#### II.2.1.2. Le Miocène

C'est une période qui a longtemps été interprété comme continental où s'est installé une sédimentation détritique sablo argileuse appelée Continental Terminal (Tessier *et al.*, 1975 ; Lappartient, 1985). L'interprétation du dépôt a été progressivement contesté à la suite d'une découverte de faunes marines (Gorodiski, 1958; Flicoteaux et Médus, 1980). Le Continental Terminal a été renommé Formation du Saloum et s'est mise en place à l'interface entre un milieu marin côtier et une frange laguno-lacustre sous influences continentales datée du Miocène moyen à supérieur (Burdigalien). (Roger *et al.*, 2009d).

A l'Oligocène-Miocène inférieur, le bassin sédimentaire sénégalais est largement exondé à l'exception du golfe de Casamance. La sédimentation marine continue au Miocène inférieur jusqu'au Miocène supérieur.

C'est à l'Oligocène-Miocène qu'est intervenu le volcanisme basique de type fissural qui a mis en place les affleurements observés sur le littoral, entre Mbao et Rufisque. Ils sont constitués, soit de laves d'ankaratrite (filon de Diokoul et îlots de Khoniet) datés respectivement  $20,9 \pm 0,6$  et  $13,5 \pm 0,2$  MA (Cantragrel *et al.*, 1976), soit de tufs bréchiques en pipes (Crévola, 1978) soit de sills (Cap des Biches) datés de 20,5. Ce volcanisme constituerait le haut fond présent au large du Cap des Biches appelé banc des Biches. Pour Roger *et al.*, (2009d), ce filon de Diokoul est une grande coulée de néphélinite mise en place il y a 21,5 Ma. Elle est représentée par un ensemble de dykes et de sills de basanite au Cap des Biches daté de 20,9 Ma ainsi que des brèches associées au réseau de failles nord-sud qui découpent la série sédimentaire. Un pointement volcanique a été daté à 23,74  $\pm$  0,50 Ma au Cap des Biches par Guillou (2008).

#### II.2.1.2. Le Pliocène

Il est caractérisé par un climat humide qui a mis en place une cuirasse ferrugineuse qui se présente sous forme d'un niveau gréseux très compacte, se fragmentant en gros blocs, ou bien argilo-gréseux induré par les oxydes de fer. Ces latéritiques s'observent au toit des coulées volcaniques (basanites) du Cap Manuel datée 5,30 + 0,30 Ma pour la plus récente. La cuirasse est recouverte par la plus ancienne des coulées volcaniques des Mamelles qui a été datée à 1,50 + 0,10 Ma (Cantagrel *et al.*, 1976).

#### II.2.2. Le Quaternaire

Le Quaternaire se caractérise par des variations glacio-eustatiques et climatiques, marquées par des transgressions et régressions sur la bordure littorale du bassin. Au cours de la dernière période glaciaire, le niveau marin avait descendu jusqu'à 100 à 120 m en dessous du niveau actuel, alors que lors des périodes interglaciaires il revenait plus ou moins au voisinage du zéro actuel et parfois le dépassait. La dernière transgression holocène enregistrée est celle du Nouakchottien où la mer a atteint +1 à +2 m au-dessus du zéro actuel.

Les formations marines, continentales et volcaniques du Quaternaire constituent l'essentiel des affleurements du bassin sénégalo-mauritanien. Le volcanisme quaternaire de Dakar est représenté par un appareil principal très complexe, le volcan des Mamelles et des appareils secondaires constitués de coulées de laves (dont les roches sont des dolérites, des basanites, des néphélinites et des pyroxénolites) ainsi que plusieurs ensembles de coulées et de tufs interstratifiés dans des sables. Des blocs de roches volcaniques non encore datés ont par ailleurs été observés en 2005 sur de la plage de la nouvelle cité SIPRES, au NW du Cap des Biches et en face de l'actuelle sécherie de Grand Mbao. Ce sont des affleurements visibles en marée basse à cause de l'érosion marine.

Le Quaternaire continental est représenté par les glacis cuirassés, les terrasses alluviales, les dépôts d'origine lacustre ou palustre (calcaires lacustres, tourbes) et les dépôts éoliens. Les principaux épisodes quaternaires ayant laissé des témoins le long du littoral sont décrits ci-après.

#### II.2.2.1. L'Eémien ou Aïoujien (125 000- à 100 000 BP).

C'est une période qui correspond à l'interglaciaire Riss-Würm. Dans la région de Mbao à Bargny, les dépôts quaternaires de cette transgréssion les plus anciens sont représentés par les grès de plage ou "beach rocks". Ils sont localisés entre le Cap des Biches et la centrale thermique de la Senelec et à la sortie de Bargny. Les beach rocks du Cap des Biches reposent en discordance sur les marnes yprésiennes.

Ils ont tout d'abord été attribués à l'Inchirien par Demoulin et Masse (1969). Cependant, les travaux de Diouf (1989), Diouf *et al.*, (1993) et de Giresse *et al.*, (1988) ont permis de donner un âge plus ancien : Eémien ou Aïoujien. L'âge présumé inchirien correspondrait en fait à la période de recristallisation des grès calcaires.

D'une épaisseur de 1 à 1,30 m, ces grès littoraux renferment une faune marine (Mollusques) vers le sommet et se présentent sous plusieurs faciès : grès calcaires à stratifications obliques, calcarénites grossières conglomératiques (Diouf, 1989)

#### II.2.2.2. L'Ogolien (20 000 B.P. à 15 000 B.P)

L'Ogolien est caractérisé par un épisode glaciaire se traduisant par climat aride et une intensification des alizés continentaux, ce qui a eu pour conséquence la formation de grands massifs (ergs) dunaires longitudinaux orientés NE-SW (Michel, 1973; Barbey, 1982). Le climat est passé d'un type tropical humide à saisons alternées à un type très aride. Il est caractérisé par une régression marine consécutive à la glaciation. Le niveau marin se situait aux environs de 120 m en dessous du zéro actuel. Entre les plateaux de Mbao et de Bargny, l'Erg de Pikine, constitué de dunes longitudinales, est le témoin de cette époque.

Entre 18 000 et 11 000 BP il y a une lacune sédimentaire. Au cours de cette période, il se produit cependant une remontée lente du niveau marin entre 15000 et 11000 BP

#### II.2.2.3. Le Tchadien (11000 à 6800 B.P)

C'est une période humide qui se situe au début de la transgression holocène suite à la première fusion des glaciers. Elle est caractérisée par un climat plus humide et la formation de lacs peu profonds dans les inter-dunes (Pinson-Mouillot, 1980). Au Sénégal, les dépôts de cette période correspondent à des tourbes dans les dépressions inter dunaires, à des profondeurs variables. C'est également au cours de cette période que les dunes ogoliennes sont démantelées par les eaux de ruissellement et colorées en rouge par des oxydes de fer à la faveur d'un climat aride à la fin du Tchadien (Elouard, 1967). Le niveau marin passe à la cote -5 m vers 7 000 ans BP puis à la cote 0 m vers 6 000 ans BP (Roger *et al.*, 2009a).

#### II.2.2.4. Le Nouakchottien (6800 à 4 200B.P) ou Flandrien

Il correspond à un climat humide qui a coïncidé avec le maximum de la transgression holocène, atteinte vers 5500 BP. La structure en synclinal a facilité le ruissellement et l'entaille du plateau de Mbao vers la mer (Elouard, 1980). La remontée de la mer crée

de nombreux golfes peu profonds dans lesquels se développe une faune marginolittorale où domine *Anadara senilis*. Le remaniement des ergs par les houles de tempête a entraîné le dépôt de sables dans les golfes. Ainsi se forment des étendues sabloargileuses d'altitude + 1 à + 2 m qui correspond à des terrasses nouakchottiennes. Ces terrasses à *Anadara* s'observent sur la Petite Côte. Dans le secteur étudié, on les observe dans les cours inférieurs des marigots de Mbao et de Bargny où elles sont constituées de sables vaseux (Lawson, 1970 ; Elouard, 1980).

#### II.2.2.5. Le Tafolien (4200 à 2000 B.P)

Il marque la fin de la transgression holocène. cette régression amorcée dès la fin du Nouakchottien s'accompagne d'une régularisation du littoral, déclenchée par l'installation d'une dérive littorale qui édifie des cordons littoraux riches en minéraux lourds (Bacou et Hebrard, 1958) traduisant un changement du régime de la mer (Pinson-Mouillot,1980). La mise en mouvement des sables du plateau continental, a contribué à la formation de ces longs cordons littoraux barrant parfois les anciennes dépressions et golfes qui finissent par se fermer.

#### II.2.2.6. Le Dakarien (3000 à 2000 B.P)

Il s'agit d'une oscillation positive du niveau qui a entrainé un comblement de lagunes. A cette période humide, sont attribuées les plages à *Patella safiana* du Cap Manuel, de la Pointe de Fann et des Almadies (Barbey et Descamps, 1967 ; Elouard *et al.*, 1976a), qui sont interprétées d'après Elouard (1967); Elouard *et al.* (1977) et Descamps et Demoulin (1969), comme des cordons de plage de tempête.

Les affleurements quaternaires sont constitués de grès de plage, de dépôts de sables azoïques ou riches aussi en faunes littorales (Brancart, 1975 et 1977 ; Elouard *et al.*, 1976a et b) (figure 15).

La côte entre Mbao et le Cap des Biches est une belle illustration de la géologie du graben de Rufisque (Brancart, 1975 et 1977 ; Elouard *et al.*, 1976a).



Figure 15 : Géologie de la région comprise entre Mbao et Bargny (d'après Elouard et *al.* ; 1976aet b, modifiée par Niang-Diop , 1995 et Ndour, 2013 Roger *et al.*, 2009)
#### III. Le plateau continental : morphologie et sédimentologie

Le plateau continental est par définition le prolongement naturel des terres émergées sous les océans. Sa profondeur, est comprise entre 0 et 200 m, cette dernière constituant l'isobathe conventionnel qui limite le plateau continental des grands fonds océaniques. Sa largeur est très variable et les pentes sont souvent homogènes. Les caractéristiques morphologiques et sédimentologiques de la zone côtière sont déterminées en grande partie par celles du plateau continental à savoir : la largeur, la nature des affleurements – produits d'une histoire géologique – la nature des pentes mais aussi les agents climatiques (notamment dans notre zone, les vents) et les facteurs hydrodynamiques (marées, courants et houles).

La description du plateau continental s'inspire des travaux de Domain (1977), Masse (1968), Riffault (1980) et Barusseau (1984).

Le plateau continental sénégalais est large en moyenne de 40 km. L'isobathe des 200 m, est dans l'ensemble parallèle à la côte mais dessine des sinuosités parfois très marquées qui entrainent des variations importantes de la largeur du plateau continental, de la Mauritanie au Nord à la Basse Casamance au Sud. La présence des canyons au large de la côte sénégalaise a permis à Meagher *et al* (1977) de subdiviser le plateau continental en trois grands secteurs (figure 16) :

- un plateau continental nord qui atteint 50 km au large de Saint Louis (Domain (1977) avec des pentes variant entre 0,2 et 0,4 % ;

- au droit de la région de Dakar, sa largeur varie de 1 à 15 km, entre les canyons de Kayar et de Dakar. Ce secteur présente les pentes les plus fortes (1 à 1,5%).

- un plateau continental sud qui s'élargit progressivement à partir de Dakar pour atteindre 70 km au droit de Joal et 100 km au large de la Casamance.

Dans la baie de Gorée, la largeur est d'environ 46 km et les pentes varient entre 0,3 et 0,6% au large de la baie de Rufisque.

Entre Rufisque et Mbour, la morphologie du plateau continental est marquée par l'existence de deux zones de pente et d'épaisseur sédimentaire différentes (Froidefond, 1975):

- une zone située entre zéro (0) et 15 m de profondeur caractérisée par de fortes pentes (> 0,5%) et par une couverture sédimentaire meuble, inférieure à 4 m d'épaisseur;  - une zone entre 15 et 35 m de profondeur où la couverture sédimentaire varie entre 4 et plus de 10 m d'épaisseur, caractérisée par des pentes < 0,5%.</li>

Dans cette partie sud, le littoral se distingue de la partie nord par son hétérogénéité topographique.



Figure 16 : Bathymétrie de la marge continentale sénégalo-gambienne (Meagher et al., 1977)

Les sédiments qui prédominent sur le plateau continental du Sénégal sont des sables (plus de 60%). Les sables fins, souvent carbonatés, constituent la majeure partie de ces dépôts. Ils renferment une phase terrigène relativement importante et des débris de coquilles. Les sables moyens, peu représentés, sont abondants sur certaines plages (Yenne, Anse Bernard) et se rencontrent généralement au voisinage des cordons de sables grossiers. La fraction grossière, avec une teneur en carbonates souvent supérieure à 50% s'observent localement sur la Petite Côte, entre la Somone et la Pointe de Sangomar. Entre Rufisque et Thiaroye, la présence d'accumulations coquillières sur les plages après les fortes houles résultent d'échanges sédimentaires de débris biogènes entre celles-ci et les hauts fonds (Masse, 1968).

Ces sédiments ne seraient pas en équilibre avec les conditions hydrodynamiques actuelles et s'expliqueraient selon Barusseau (1984) et Barusseau *et al* 1988) par une origine ogolienne, avec des remaniements marins et fluviatiles lors de la transgression du Nouakchottien.

# IV. Description géomorphologique du littoral de Rufisque

La côte au sud de Dakar jusqu'à Joal présente une alternance de zones basses et sableuses et de zones en falaises de calcaires ou de grès pouvant ou non être prolongées par une plate-forme d'abrasion. Les plages comportent souvent un cordon sableux isolant la mer d'une dépression humide (lagune ou marigot).

Le littoral de Rufisque est dans l'ensemble une côte basse et sableuse où l'on observe des formations essentiellement marines. Le secteur étudié comprend d'est en ouest : la zone de la falaise du Cap des Biches, la zone du Cap des Biches au cap de Diokoul, limitée par un cordon littoral et la partie urbanisée de la ville qui s'étend jusqu'à l'ancienne usine BATA.

Le cap rocheux de Diokoul divise ce littoral en deux secteurs : un secteur nord-ouest presque rectiligne, qui constitue l'extrémité de la baie de Hann et un secteur sud-est qui représente la baie de Rufisque.

Dans le premier secteur, la côte s'élève pour constituer une falaise : la falaise du Cap des Biches d'une altitude d'environ 13 m environ (Photo 1), taillée dans les calcaires de Bargny avec des structures en « drop stone ». Cette falaise, prolongée par une plate-forme d'abrasion, est bordée de part et d'autre d'une microfalaise (1 à 2 m). Cette micro falaise est constituée au nord-ouest par des marnes feuilletées à petites plaquettes calcitiques. Les marnes sont bordées du côté mer par des blocs plus ou moins arrondis de nature diverse: roches volcaniques et calcaires. Ces blocs constituent juste après la microfalaise le soubassement de la plage, et sont visibles en période d'érosion. La microfalaise disparaît sous un cordon dunaire à sables coquilliers. Plus au nord-ouest, vers la nouvelle cité SIPRES (vers Mbao) se trouve une microfalaise constituée d'une alternance de sables coquilliers et de minces lits de marnes altérées.

Au sud-est, on distingue, du Cap des Biches à la centrale thermique, une microfalaise

constituée d'une alternance de marnes grises jaunes et de calcaires. Puis, entre la centrale thermique et Diokoul, on trouve un cordon littoral d'une altitude moyenne de +2 à +2,5 m. Sa couverture végétale est essentiellement constituée de figuiers de Barbarie (*Opuntia tuna*) (Demoulin, 1967 ; Diallo, 1982) dont les restes étaient encore observables jusqu'en 2005 juste avant le cimetière musulman de Diokoul (Photo 2). Sur cette partie du littoral fortement menacée par l'érosion, des murs de protection en gabions de roches surmontés d'un mur en béton puis d'un mur en béton armé ont été construits.



Photo 1 : Falaise du Cap des Biches montrant la plate-forme d'abrasion (photo du 19 Octobre 2005)



Photo 2 : Végétation d'*Opuntia tuna* du cordon littoral de Rufisque à proximité du cimetière musulman de Diokoul (photo du 19 Octobre 2005)

L'extrémité de la baie de Hann (figure 17) (quartier de Diokoul) et la baie de Rufisque se caractérisent par une forte urbanisation et la présence d'ouvrages de protection, à l'exception du fond de la baie de Rufisque.

La plage sous-marine (l'avant côte) est caractérisée par la présence de bancs (la Résolue, Biches, Bargny) et les îlets de Khoniet ; et au large se trouve le haut-fond de Rufisque.





L'hydrologie est marquée par l'absence de cours d'eau permanents. Elle est principalement représentée par les marigots de Diokoul et de Bargny qui débouchent dans des lagunes semi permanentes, situées en arrière d'un cordon littoral qui peut être rompu en hivernage par les eaux pluviales. Le marigot de Diokoul est l'exutoire du bassin versant de Diokoul qui couvre une superficie de 1,17 km<sup>2</sup> (Laaroubi, 2009). Ce marigot est actuellement en voie de comblement, suite aux dépôts d'ordures ménagères et à l'urbanisation.

Les vents représentent un agent dynamique important en zone littorale. Ils sont responsables de déplacements sédimentaires au niveau de la plage et sont également générateurs de houle et de courants côtiers de surface.

L'hydrodynamisme littoral est conditionné par des agents dynamiques naturels qui sont sous l'influence des circulations atmosphérique et océanique. Ces agents sont les marées, les upwellings, le niveau marin mais surtout les houles et les courants de houle qui transportent la majeure partie des sédiments et façonnent en même temps les formations géologiques littorales. La dynamique littorale est aussi régie par la lithologie, l'héritage géologique, la disponibilité des sédiments et les facteurs anthropiques.

Sur la Petite Côte, particulièrement au niveau du littoral de Rufisque, la dynamique est également influencée par la morphologie du littoral de la presqu'ile du Cap Vert, les caractéristiques du plateau continental constitué de canyons sous-marins, l'action éolienne et les ouvrages de protection.

# V. Cadre hydrodynamique

#### V.1. L a circulation océanique

La circulation des masses d'eau océanique est déterminée en grande partie par la circulation atmosphérique. Sur le plateau continental sénégalais, la circulation océanique subit les influences des variations de la topographie, de l'orientation des segments côtiers et des variations climatiques saisonnières (Diara, 1999) telles les vents prédominants qui affectent la vitesse des courants. Cette circulation océanique est due aux courants généraux qui sont essentiellement :

 le courant nord équatorial qui est une branche du courant des Canaries qui se déplace vers le sud le long des côtes sénégalaises de décembre à avril. Il s'agit d'eaux froides liées aux alizés du secteur nord-est ;

 le courant sud équatorial vient de l'ouest et s'écoule vers l'est jusqu'à la côte ouest africaine où il prend le nom de courant guinéen. Ce courant transporte des eaux chaudes et salées. Il atteint les côtes sénégambiennes vers juin - juillet au moment du retrait des alizés.

Ces deux courants forment un système barométrique qui remonte vers le nord en période d'hivernage et descend vers le sud en saison sèche. Ils se rencontrent dans une zone où les températures varient très rapidement sur de courtes distances (thermocline).

#### V.2. Les marées

La marée résulte essentiellement de l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur les masses d'eau terrestre. Elle se traduit sur le plan d'eau par des variations journalières du niveau de la mer. Dans les embouchures et les détroits, le flot et le jusant sont les courants qui accompagnent respectivement la marée montante et la marée descendante. L'intensité de l'onde de marée est en général maximale en mi-marée et nulle aux étales. Dans ces environnements, l'hydrodynamisme est souvent dominé par la marée qui est, de ce fait, le principal agent du transport sédimentaire. Cependant, selon Sall (1982), les vitesses de ces courants varient en fonction des caractéristiques hydrologiques et morpho-sédimentaires des embouchures mais aussi des conditions météorologiques saisonnières.

Sur les côtes sénégalaises, la marée est de type semi-diurne. Le marnage moyen ou amplitude tidale moyenne est de l'ordre d'un mètre (figure 18). Il varie entre 1,2 et 1,6 m en marée de vives eaux et entre 0,4 et 0,6 m en marée de mortes eaux (figure 19); ce qui classe le littoral dans le régime des côtes microtidales (marnage moyen inférieur à 2 m) (Ruffman *et al.*, 1977). Sur les côtes sénégalaises, les courants de marée, avec des vitesses inférieures à 0,15 m.s-1 (Niang-Diop, 1995), n'interviennent pas dans le transport des sédiments (Domain, 1976; Rebert, 1983). Ils n'ont donc qu'un rôle mineur dans l'évolution morphologique du rivage.



Figure 18 : Profil annuel de la marée de 1960 à 2006 à Dakar (Source : Centre de Recherche Océanographique de Dakar Thiaroye CRODT)



Figure 19 : Variation du marnage à Dakar (2005-2006) durant la période d'étude (Source : Centre de Recherche Océanographique de Dakar Thiaroye CRODT)

#### V.3. La houle et les courants induits

### V.3.1. La houle

La houle lointaine est un mouvement oscillatoire des couches superficielles de l'eau dû au frottement du vent sur la surface. Plus le vent est fort et plus la distance de frottement sur l'eau est grande, plus la houle est forte. Par contre, les vagues (ou mers du vent), engendrées par les vents locaux, sont fonction de leur direction, de leur vitesse et de leur durée.

La houle, à la différence des mers du vent, est engendrée par les vents aux hautes latitudes. Elle est définie par son amplitude, sa période, sa longueur d'onde, sa célérité, et sa direction de propagation.

L'importance des mers du vent dans le façonnement du littoral suscite des controverses. Pour Masse (1968) et Dwars *et al.* (1979), elles ont une influence minime alors que pour Sogreah Ingénieurs Conseils (1981) et Nardari (1993), elles ne doivent pas être négligées, notamment pendant les périodes des alizés du Nord-Est.

Du point de vue de la dynamique littorale, l'énergie sur la côte est principalement fournie par les houles. Sur la côte sénégalaise, ces houles sont de trois catégories : nordouest (NW), sud-ouest (SW) et ouest (W) (figures 20 et 21). Elles sont décrites dans de nombreux travaux (Masse, 1968 ; Riffault, 1980 ; Sall, 1982; Nardari, 1993 ; Niang-Diop, 1995, Cesaraccio *et al.*, 2004 ). Les houles de NW et SW suivent une répartition saisonnière inversée entre la côte nord et la côte sud. En saison sèche, la houle nordouest, présente toute l'année devient plus forte que pendant l'hivernage, au même moment, la côte sud est soumise aux houles de beau temps et inversement.



Figure 20 : Direction et fréquence des houles dominantes (A) et des houles occasionnelles (B)le long des côtes sénégalaises (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set: COADS), *in* Guérin, 2003)A. Houles dominantes (*ech. Lineaire*)B. Houles occasionnelles (*ech. Logarithm*#µe)



Figure 21 : Modèles de propagation des houles le long de la côte sénégalaise (d'après Nardari, 1993)

Les houles de nord-ouest sont issues de l'Atlantique Nord. Elles représentent environ 79,3% des observations (Cesaraccio *et al.*, 2004) (tableau 1). Elles subissent des phénomènes de réfraction à l'approche de la côte et une série de diffractions au niveau de la Pointe des Almadies, du Cap Manuel et de la Pointe de Bel-Air (Riffault, 1980) (figure 22). Il résulte de ces différentes diffractions un ralentissement de la vitesse et une modification de la direction, et une perte la quasi-totalité de leur énergie dans le secteur sud de la presqu'île du Cap Vert.

A la différence de la Grande Côte, la Petite Côte, particulièrement la baie de Gorée, est relativement protégée de l'action de ces houles de nord-ouest, mais fortement exposée aux houles sud-ouest qui n'affectent que la côte sud et uniquement pendant la saison des pluies. Ces houles de sud-ouest (N180° à 200°E) sont issues de l'Atlantique Sud et classées dans la catégorie des houles longues. Elles représentent 5,9% des observations (Guérin, 2003; Cesaraccio *et al.*, 2004). Elles se caractérisent par une énergie d'environ 11 KW.m-1, une hauteur moyenne de 1,8 m, une période moyenne de 6,8 s et une longueur d'onde de 73 m (Nardari, 1993) (tableau 2). Elles viennent diminuer ou renforcer celles nord-ouest pouvant même inverser la dérive principale.

- Les houles exceptionnelles d'ouest (N 260° à 270°E) sont engendrées par des cyclones dans la Mer des Caraïbes. Elles se manifestent d'octobre à décembre et sont plus énergétiques que les autres. Elles seraient responsables du déplacement vers le large d'importantes quantités de sable entre Mbao et Bargny.

(C	omprenensiv		nosphere Data	i Set (COADS), in Cesaraccio ei ur., 2004)				
Houle NW (N320° à 20°E)				Houle SW (N180° à 200°E)				
,	79,3% des o	bservations	5		5,9 % des observations			
Direction	Hauteur	Période	Cambrure	Direction	Hauteur	Période	Cambrure	
320	1,52	7,35	0,0181	180	1,41	6,96	0,0187	
330	1,64	7,29	0,0197	190	1,46	7,10	0,0186	
340	1,69	7,17	0,0211	200	1,49	7,02	0,0192	
350	1,78	7,08	0,0228	Moyenne	1,45	7,02	0,0188	
360	1,75	7,00	0,0229	Houle W (N270°)				
10	1,73	6,96	0,0229	0,9% des observations			5	
20	1,65	6,99	0,0216	Direction	Hauteur	Période	Cambrure	
Moyenne	1,71	7,10	0,0213	Moyenne	1,31	6,96	0,0174	

Tableau 1: Caractéristiques des types de houles au large des côtes sénégalaises (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS) *in* Cesaraccio *et al.* 2004)



Figure 22 : Plans de houle et dérive littorale induite (houle de Nord-ouest) (Riffault, 1980)

Types de houles	Période	Hauteur moyenne	Longueur d'onde	Puissance avant
	moyenne		moyenne	déferlement
NW (N320 à 20°E)	6,3 s	1,67 s	62	18 KW.m <sup>-1</sup>
SW(N180 à 230°E)	5,7 s	1,49 s	51	11 KW.m <sup>-1</sup>
W (N260 à 270°E)	6,8 s	1,80 s	73	22,7 KW.m <sup>-1</sup>

 Tableau 2 : Caractéristiques en eau profonde des houles longues au large des côtes sénégalaises (Nardari, 1993)

La baie de Gorée est marquée par un déferlement de type plongeant « plunging breaker »: la houle s'enroule sur elle-même en volute pour constituer un rouleau qui s'effondre.

Les houles et les courants qu'elles induisent jouent un rôle très important dans la dynamique littorale. Ils constituent sur le littoral de Rufisque le moteur de l'érosion côtière.

#### V.3.2. Les courants de houle

Le littoral de Rufisque n'est pas à l'abri des courants associées aux houles. Les vents dominants sont du Nord et exercent une influence sur le régime des vagues qui frappent le littoral et les courants tels que la dérive littorale dominante, et les houles perpendiculaires à la côte.

Pendant la saison des pluies, des houles très fortes pouvant atteindre plus de 3 m, submergent partiellement les habitations immédiatement derrière les structures de protection. En effet, les différents courants associés à la houle et agissant sur la morphologie de la côte sont notamment les courants perpendiculaires au rivage et la dérive littorale.

#### V.3.2.1. Les courants de dérive littorale

Sur le littoral sénégalais, les houles et les vagues arrivent à la côte par avec une orientation oblique. Le déferlement et le jet de rive (swash) s'effectuent de ce fait avec un certain angle. Le courant de retour suit la plus grande pente qui elle est perpendiculaire au trait de côte. Selon Chamley (2002), la répétition de ces mouvements à chaque déferlement détermine un déplacement de l'eau parallèlement au littoral et un transport associé du sable charrié contre le fond ou en suspension: c'est la dérive littorale qui s'exerce sur la plage et dans les petits fonds marins.

Le long des côtes sénégalaises, la dérive littorale conditionne une part notable du modelé morphologique littoral, et sa direction dominante est nord-sud. Cette direction est attestée par l'allongement nord-sud des flèches sableuses (Langue de Barbarie, flèche de Mbodiène, flèches de Joal, de Sagomar) qui sont entretenues par un transport de sédiments du nord vers le sud (Riffault, 1980). Cette dérive littorale significative dans l'alimentation des plages est d'intensités et de sens variables suivant les saisons et les secteurs de côte.

Sur la presqu'ile du Cap Vert, sous l'effet de la sinuosité de la côte l'obliquité de la houle est très variable, ce qui entraine des évolutions contrastées au sein d'une même baie au cours d'une même période.

Sur le littoral de Rufisque, la dérive littorale est faible et elle subit une variation spatiotemporelle importante. Elle intervient à long terme et les transports sédimentaires seraient dus essentiellement aux courants perpendiculaires à la côte (Niang-Diop, 1995).

#### V.3.2.2. Les courants perpendiculaires à la côte

Ils sont intrinsèques aux houles, toujours présents, et comprennent deux composantes essentielles : les courants de surface et les courants de fond. Le sens du transport de sable "onshore-offshore" dépend des courants de fond. Ainsi, en période de beau temps, ces courants sont dirigés vers la côte et entraînent un engraissement de la plage alors qu'en régime de haute énergie (houle de forte cambrure), les courants de fond sont dirigés vers le large, ce qui entraîne un démaigrissement de la plage.

Les transports sédimentaires entre Mbao et Bargny seraient essentiellement dus aux courants perpendiculaires à la côte qui entrainent des départs de sédiments vers le large (Dwars *et al.*, 1979; Niang-Diop, 1995).

Par ailleurs, le littoral de Rufisque est soumis à l'action des houles fortes ou « houles de tempêtes ». Ce sont des événements météo marins aléatoires ou cycliques perpendiculaires au rivage. Elles provoquent une élévation du niveau de la mer et s'accompagnent de vents très violents. Dotées d'une puissance très forte, elles représentent un événement climatique destructeur pour le littoral de Rufisque. Elles

peuvent provoquer un important recul du rivage, voire irréversible, particulièrement pour les plages sous alimentées ou pour les côtes à falaise. Selon le GIEC/IPCC, (2007) l'action de facteurs externes peut induire des changements morphodynamiques qui dépassent l'état d'équilibre que la plage réalise en temps normal par rapport à son budget.

Sur le littoral de Rufisque, l'érosion se manifeste brutalement durant ces houles fortes, qualifiées de houles de tempête.

Ces événements se produisent pendant la saison des pluies au moment où la côte sud est soumise aux houles du sud-ouest. La houle est en général associée à une pleine mer de vives-eaux ou à des surcôtes météorologiques. Des cas particuliers de houles d'une hauteur supérieure à 3 m ont été notés le 7 juillet 1993 selon le Ministère de l'Environnement et le 01 juillet 2007 et tout récemment le 30 mai 2014 projetant les blocs de basalte derrière, inondant les maisons le long de la mer. On note aussi par endroit la destruction de la promenade du mur (photo 3).



Photo 3: Effets des fortes houles du 30 mai 2014 sur le nouveau mur de Thiawlène : A: projection des blocs de basaltes derrière le mur; B: inondation du quartier; C: destruction de la promenade du mur (photo du 01 juin 2014)

#### V.4. L'upwelling.

L'upwelling est un courant vertical défini comme étant un phénomène très distinctif, de remontée d'eaux profondes froides riches en sels minéraux sur les côtes ouest africaines. Ces eaux baignent les côtes sénégalaises pendant une bonne partie de l'année (décembre à mai). C'est un mécanisme hydroclimatique majeur de la circulation océanique du plateau continental sénégalais.

Les upwellings sont dus à l'action conjuguée des vents (alizés de nord-est), sensiblement parallèles à la côte (Sarnthein *et al.*, 1982) et de la force de Coriolis. Cette force, engendrée par la rotation de la Terre, varie avec la latitude et dévie les masses d'eaux vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. L'intensité de l'upwelling dépend de la force du vent mais aussi de son orientation par rapport à la côte.

Sur les côtes sénégalaises les maxima d'upwelling s'observent pendant les périodes de vents forts à dominante nord-nord-est, alors que les périodes de faibles upwelling sont liées à des vents faibles à dominante nord-ouest-nord (Roy, 1989). Selon Rebert (1983), l'upwelling côtier se manifeste par un gradient de température de la côte vers le large.

En plus d'être responsables des variations saisonnières des températures océaniques de surface ils induisent des variations du niveau marin (de l'ordre de 25 cm) (Niang-Diop, 1995).

# VI. Caractéristiques anthropiques

Les principaux facteurs anthropiques sur le littoral de Rufisque sont l'urbanisation, les extractions de sables, le canal d'alimentation en eau de refroidissement de la centrale thermique du Cap des Biches de la Société Sénégalaise d'Electricité (SENELEC) qui est une structure perpendiculaire au rivage et les murs de protection. Ces actions anthropiques qui se déroulent dans la zone côtière peuvent donc avoir une incidence sur la dynamique hydro-sédimentaire des plages.

#### VI.1. L'urbanisation

De par sa situation géographique et son climat favorable, la ville de Rufisque a été parmi les premières villes choisies par les colons. A ces caractéristiques, il faut noter parmi tant d'autres, sa protection quasi naturelle des vents du secteur nord-est, le chemin de fer qui traverse la ville et qui, jadis a joué un rôle de premier plan dans les échanges coloniaux. Cette position stratégique lui a valu d'être la première ville portuaire du Sénégal. Le port a joué un rôle important dans l'exportation de l'arachide convoyée depuis l'intérieur et stockée à Rufisque dans-les entrepôts, ce qui a entrainé très tôt la mise en place de structures d'accompagnement comme les magasins de stockage, et des structures perpendiculaires au rivage comme les wharfs (photo 4), témoins de la période coloniale. Cela a eu pour corollaire le développement de la zone industrielle du littoral. Il faut ajouter à ces facteurs une population composée de pêcheurs (les Lébous) qui tirent l'essentiel de leurs revenus de la pêche et, qui sont liés à la mer par leur culture et, donc ne vivaient que sur la côte. Plus récemment, on note un exode rural qui s'est surtout développé à partir des dernières décennies du 20<sup>e</sup> siècle et au début du 21<sup>e</sup> siècle, avec l'extension de quartiers comme Diokoul et de nouveaux quartiers à l'ouest et au nord. Cette artificialisation du littoral de Rufisque due à l'urbanisation, les extractions frauduleuses du sable marin et de la forte pression sur les terres, ont entrainé des impacts significatifs sur le littoral.



Photo 4 : La plage de Keuri Souf – Keuri Kao (le port de Rufisque) du temps de la colonisation (Archives du Sénégal)

#### VI.2. Les prélèvements de sables

Les problèmes d'érosion côtière peuvent être liés à ceux du déficit sédimentaire d'origine anthropique. Les extractions de sables, qu'elles soient effectuées dans la plage sous-marine ou sur le cordon littoral, auront pour conséquence à long terme un impact négatif sur le littoral.

Le littoral entre Mbao et Bargny a été depuis longtemps un site privilégié de prélèvement de sables et de coquilles, du fait de la richesse du cordon littoral en coquilles qui sont utilisées comme matériaux de construction. Les sites de prélèvement sont localisés principalement entre Mbao et Diokoul, et à la sortie de Rufisque, à proximité de l'usine BATA.

Par ailleurs, en dehors de ces extractions qui se font actuellement de manière frauduleuse, d'autres prélèvements de grande ampleur ont été notés. Ainsi, Niang-Diop (1995) avait estimé les prélèvements annuels de coquilles entre 1500 et 2400 m<sup>3</sup> par an pour la zone de Rufisque. Elle signale qu'entre 1927 et 1933, 47410 tonnes de sables ont été prélevés lors de l'extraction de l'ilménite sur les plages de Rufisque.

De nos jours, l'augmentation de la population dans la région a entrainé l'accroissement du bâti et, par conséquent un besoin croissant en matériaux de construction. Ainsi, la pénurie de sédiments liée en partie aux prélèvements de sables constitue jusqu'à présent un défi pour l'évolution de l'érosion côtière à Rufisque. Si aujourd'hui, le transport de sable marin est interdit à Dakar, l'extraction frauduleuse de coquilles et de sables est loin de s'être estompée.

#### VI.3. Le canal de la SENELEC

Il s'agit d'une structure perpendiculaire au rivage, d'une largeur de 10 m et qui s'étend sur environ 200 m depuis la côte. Construit en 1964, sa base se trouve à -3 m de profondeur et son sommet à +3 m au-dessus du niveau de la mer. Selon Sow (1994), il est constitué par deux rideaux de palplanches Larsen III ancrées à -5,5 m et, qui sont surmontées par deux poutres longitudinales de couronnement en béton armé. Ces poutres sont maintenues par des butons transversaux distants de 10 m, également en béton armé. Deux rails sont fixés sur les poutres de couronnement et permettent la circulation d'un chariot utilisé pour le dragage et l'entretien du canal. Dans la conduite principale du canal, le terrain naturel a été excavé jusqu'à la côte -3,70 m ; un radier en moellons de 10 à 30 kg est posé sur toute la longueur du canal sur une épaisseur de 0,7 m.

A l'extérieur, le canal est renforcé par du tout venant de carrière recouvert par des moellons de 10 à 30 kg protégés par des enrochements de 100 à 300 kg sur une épaisseur de 1 m, puis par des cubes de béton de 2,2 tonnes déposés en vrac sur une épaisseur de 2 m environ (photos 5 et 6). Le sommet de la digue se situe à + 5 m audessus du niveau de la mer.

La présence de ce canal à l'extrémité de la baie de Hann a pour conséquence une accélération de l'érosion sur la partie du littoral, entre la Centrale thermique et le cimetière de Diokoul.



Photo 5 : Photographie aérienne de 1997 montrant le canal d'alimentation en eau de refroidissement de la centrale du Cap des Biches.



Photo 6 : Canal de la centrale thermique du Cap des Biches (a: vue de face; b: vue de profil ).

#### VI.4. Les différentes méthodes de lutte contre l'érosion

Les méthodes de lutte contre l'érosion côtière peuvent être classées en deux catégories : les méthodes non structurales et les méthodes structurales. Les premières par opposition aux deuxièmes sont, selon la technologie de lutte contre l'érosion des côtes des Nations Unies (1983) « des outils de gestion utilisés essentiellement pour contrôler ou atténuer les problèmes causés par l'érosion plutôt que pour prévenir, arrêter ou retarder l'érosion ».

Les méthodes structurales sont des infrastructures de protection du littoral, parallèles au rivage servant à prévenir le recul des côtes, la submersion des terres ainsi que la perte de terrain engendrée par la submersion ou l'action des vagues (Kraus et McDougal, 1996) auxquelles s'ajoutent des structures perpendiculaires au trait de côte tels que les épis et les jetées.

Dans cette partie du mémoire, nous ferons une brève description des différentes méthodes structurales de protection avant la synthèse chronologique des ouvrages de protection présents sur le littoral de Rufisque.

#### VI.4.1. Les méthodes structurales

Les méthodes structurales peuvent être réparties en deux catégories d'ouvrages : les ouvrages longitudinaux et les ouvrages transversaux.

Les ouvrages longitudinaux regroupent les structures immergées ou de bas estran appelées brise-lames et celles implantés sur le haut estran ou sur la haute plage qui sont de plusieurs types : les revêtements, les murs de protection (digues en béton ou en enrochements) qui peuvent jouer un rôle de protection contre les vagues et/de maintien des terres situées en arrière.

- Les murs de protection sont des structures en dur qui ne luttent pas contre les causes de l'érosion côtière mais s'opposent à l'envahissement des vagues, au recul de la ligne de rivage sur le linéaire côtier qu'ils protègent. On distingue: les murs en enrochements, les gabions de roche les murs en béton ou en béton armé. Tout en protégeant les terres en retrait, ces structures portent atteinte aux échanges naturelles de sédiments qui se produisent sur la plage et elles augmentent la réflexion de la houle.

- Les revêtements sont des placages longitudinaux sur la plage de matériaux plus résistants à l'action des vagues. De dimensions variables, ils se différencient des murs de protection par leurs faibles pentes et hauteurs. Ils peuvent être souples ou rigides, à surface rugueuse ou lisse. Ils ne sont pas recommandés dans les mers ouvertes.

- Les brise-lames ont pour fonction principale de diminuer l'énergie des vagues avant leur arrivée sur la plage aérienne. En amortissant l'énergie de la houle, ils peuvent entraîner en même temps une rétention de sédiments derrière eux. Cette rétention de sédiments favorise l'engraissement du trait de côte et peut aboutir à la formation d'un tombolo.

Les ouvrages transversaux regroupent les épis et les jetées qui jouent le même rôle sur l'évolution géomorphologique du littoral.

- Les épis sont des structures perpendiculaires à la côte qui ne doivent être construits sur la côte que lorsque les transports sédimentaires dominants sont parallèles à la côte. Ils ont pour fonction principale d'intercepter tout ou une partie des sédiments transportés par la dérive littorale, entraînant leur dépôt du côté à l'amont par rapport au sens de la dérive littorale et une érosion du côté à l'aval de la structure. Cette érosion en aval dérive est d'autant plus grave que les transports littoraux et la longueur des ouvrages sont importants. Leur rôle morphologique sur la côte est donc souvent liés à leurs propriétés (tableau 3).

#### VI.4.2. Les méthodes non structurales

Il s'agit essentiellement de méthodes souples qui peuvent être: la réglementation de l'occupation du Domaine Public, Maritime (DPM), de l'extraction de sable marin, de matériaux de construction ; le déplacement ou relogement des populations et des infrastructures menacées ; le rechargement artificiel des plages et les méthodes végétatives sur les cordons non urbanisés.

	Commentaire
1 - Forte influence de l'angle d'incidence et de la hauteur des houles (sur le transport longshore des ouvrages)	Accepté: la houle va déterminer le transport longitudinal
2 - Importance de la longueur des ouvrages	Accepté: la longueur de l'ouvrage va dépendre de l'étendue de la zone de déferlement
3 -Importance du rapport espacement/longueur des ouvrages (batteries des épis)	Accepté: le ratio de l'espacement à la longueur des épis varie de 1 à 4. Il dépend du marnage, du régime des houles, de l'angle d'incidence des houles, du profil des plages et des caractéristiques des sédiments
4 - Meilleur rendement des épis perméables	Accepté: les épis perméables génèrent un fonctionnement dynamique moins turbulent et réduisent la formation des cellules à l'intérieur des casiers
5 - Meilleur fonctionnement des épis dans des environnements à forte dynamique longitudinale	Accepté: les épis agissent comme un piège pour les sédiments transitant longitudinalement
6 Nécessité de coupler épis rechargement notamment en aval de la dérive	Accepté: l'apport artificiel de sable permet d'éviter l'érosion en aval de la dérive par déficit sédimentaire
7 - Nécessité de la réduction progressive de la longueur des derniers ouvrages d'une batterie d'épis	Accepté: permet de réduire la formation des cellules en arrière des derniers épis et réduit donc la turbulence de l'érosion
8 - Construction doit débuter en aval de la dérive pour remonter en amont	Accepté: En tenant compte du balancement possible de la direction du transport sédimentaire
9 - Epis créent une accumulation en amont de la dérive et une érosion en aval	Accepté: les épis fonctionnement comme un piège à sédiments en amont, générant une arrivée moindre de sable en aval
10- L'implantation d'épis accentue l'érosion des fonds en mer au-delà des ouvrages	Non validé: aucune étude n'a permis de le démontrer de façon catégorique
11- L'implantation d'épis favorise les courants de retour transportant le sable loin en mer (érosion)	Accepté: les épis fonctionnent comme des canalisateurs de retour
12- Pour des secteurs avec prédominance de direction de propagation, les épis doivent être perpendiculaires aux crêtes des houles dominantes	En partie accepté: réduction possible des courants de retour

Tableau 3 : Propriétés fonctionnelles attribuées aux épis et leur évaluation critique acceptée ou non par la littérature scientifique (d'après Kraus *et al.*, 1994)

# VI.4.3. Les ouvrages de protection du littoral de Rufisque

Le littoral de Rufisque est l'un des plus artificialisés du Sénégal. La présence de structures de protection dans la ville de Rufisque remonte à plusieurs décennies. Au fil des années, l'érosion devenant de plus en plus grave et les phénomènes de submersion de plus en plus fréquents, on assiste graduellement à une mise en place de structures de protection jugées plus résistantes à l'attaque des vagues. Actuellement, le littoral est caractérisé par la présence de structures de protection dures qui ont entrainé la disparition de la quasi-totalité des plages. Elles ont mis en péril les conditions environnementales favorables à un tourisme balnéaire (photo 7). Leur importance est telle que Rufisque dispose actuellement de la plus grande longueur de côte protégée au Sénégal soit 3470 m (Seck, 1990 ; Guèye, 1997). Ces structures, représentées à la figure 24 sont constituées par :

- le champ d'épis à Diokoul (actuellement disparu);
- le mur en enrochements;
- le mur mixte en gabions de roches surmontés d'un mur en béton;
- le mur en béton armé nouveau;
- le mur en béton au fond de la baie de Rufisque, actuellement sous les eaux.

A ces ouvrages de protection, on peut ajouter le canal d'alimentation en eau de refroidissement de la centrale thermique du Cap des Biches, structure perpendiculaire au rivage et qui fonctionne comme un épi.



Photo 7 : Disparition complète de la plage sur la quasi-totalité du littoral en face du quartier de Thiawlène



Figure 23 : Carte de localisation de la zone d'étude montrant les ouvrages de protection contre l'érosion côtière

#### VI.4.3.1. Champ d'épis de Diokoul

A l'exception du petit mur en béton construit au fond de la baie vers 1957, les véritables ouvrages de protection à Rufisque étaient constitués du champ d'épis, implanté dans le cadre d'un projet d'aménagement du quartier de Diokoul, conduit par l'ONG ENDA TIERS MONDE, sur conception technique de l'Ecole Polytechnique de Lausanne (Freiburghaus *et al.*, 1981 ; Arecchi et Virtanen, 1984). Dans ce projet, il était prévu la construction de 12 épis de 47 m de long et d'une largeur qui devait varier entre 2 m au niveau de la plage aérienne et 4 m à l'extrémité en mer. La hauteur prévue était de 0,5 m à 2 m (figure 24). Les épis devaient être constitués de gabions en latérites et de basaltes.

Une première phase expérimentale a été menée entre mai et août 1983 au cours de laquelle, 3 épis furent construits et ont donné des résultats satisfaisants avec une sédimentation de 0,8 m de hauteur (Regamey, 1984; Murday, 1986). Ensuite, les travaux ont repris de manière intermittente et surtout désordonnée (non-respect de l'ordre de construction des épis). En 1987, 9 épis incomplets sur les 12 étaient en place. En 1990, la longueur restante des épis variait entre 2 et 27 m. Les épis ont été détruits



entre 1990 et 1992 lors de la construction du mur mixte en béton et gabions.

Figure 24 : Le champ d'épis de Diokoul (d'après Seck, 1990)

#### VI.4.3.2. Les murs de protection

Les murs de protection à Rufisque sont constitués de trois types : le mur en enrochements, le mur mixte en béton et en gabions et le mur en béton armé.

#### VI.4.3.2.1. Le mur en enrochements

Pour faire face à la menace de l'érosion côtière et lutter contre les inondations marines, la Direction Générale des Travaux Publics (DGTP) en relation avec le bureau d'études néerlandais, Dwars, Heederik et Verhey Ingénieurs Conseils (1979) ont proposé la construction d'un mur en enrochements naturels.

La structure est une digue trapézoïdale d'une largeur de 5 m au sommet et 12 m à la base. Son sommet se situe à 5 m au-dessus du zéro hydrographique et ses pentes sont de 45°. Elle repose sur un filtre géotextile « Bidym ». Le corps de l'ouvrage est constitué de moellons de calcaires de Bargny de 3 à 5 kg et il est protégé du côté mer par des enrochements en blocs de basalte de 1 à 2 tonnes (figure 25) (archives de la Direction Générale des Travaux Publics (DGTP), 1980-1990). Cependant, l'ouvrage tel que recommandé par Dwars, Heederik et Verhey Ingénieurs conseils (1979) a été modifié par la DGTP et est finalement différent de celui construit; ce qui peut par exemple entrainer la destruction du mur plutôt que prévue.

La digue en enrochements est construite de part et d'autre du cap de Diokoul. Elle

s'étend entre Keuri Souf et l'extrémité du cimetière de Thiawlène vers BATA, et sur les quartiers de Diokoul Ndiourène et une partie de Diokoul Ndiayène. Elle a été construite par l'entreprise Eiffage (ex Fougerolles), sous le contrôle du Ministère de l'Equipement en plusieurs tronçons : 937 m en 1983-1984, 510 m en 1987, 500 m en 1988-1989 et 900 m en 1990. La dernière partie d'une longueur de 623 m est édifiée à hauteur du quartier de Diokoul, soit une longueur totale de 3470 m (Seck, 1990 ; Guèye, 1997).



Figure 25 : Le mur de protection à Rufisque (d'après Seck, 1990)

Le long de la digue en enrochements, on assiste à un départ continu des sédiments par les phénomènes d'affouillement causés par une augmentation de la turbulence dans la zone de déferlement. Cet accroissement de la turbulence est le résultat de la réflexion des vagues sur le mur (photo 8). Les départs de sédiments créent des zones de faiblesse qui aboutissent à l'ouverture de brèches un peu partout le long du mur. Cette situation entraine aujourd'hui un franchissement très fréquent de la digue par les vagues, inondant les quartiers environnants surtout pendant les périodes de fortes énergies de houles.



Photo 8: Augmentation de la turbulence des eaux au niveau de la zone de déferlement liée à la rencontre de deux vagues: une vague déferlante et une vague réfléchie sur le mur (photo du 01 juin 2014)

#### VI.4.3.2.2. Le mur mixte en gabions surmontés d'un

#### mur en béton

En 1990, le champ d'épis n'ayant pas donné satisfaction, le Ministère de l'Equipement décida de construire à Diokoul un mur mixte en gabions surmontés d'un mur en béton. Cette structure est constituée de deux tronçons construits de part, et d'autre, du débarcadère de Diokoul : une partie en face du cimetière musulman de Diokoul, d'une longueur de 100 m et l'autre partie à Diokoul Ndiayène (photo 9). La structure est composée de gabions, constitués d'un grillage de fils de fer plastifiés, remplis de blocs de basaltes et de dolérites et ancré au sol, sur lesquels repose un mur en béton de forme trapézoïdale, d'une hauteur de 1,10 m, d'une largeur de 1,40 m à la base et de 1 m au sommet. La construction est été terminée entre 1991 et 1992. Quelques blocs de basaltes et de dolérites disposés devant une partie du mur pour briser l'énergie des vagues, protègent la base du mur de l'affouillement. Malgré cela, l'affouillement (photo 10) se produit mais plus accentué sur les parties ne disposant pas de ces blocs de roches. L'affouillement est plus visible devant le mur qui protège le cimetière. La partie située à Diokoul Ndiayène a cédé le 4 août 2004 à l'assaut des vagues, et les extrémités nord et sud respectivement en juillet 2005 et en 2007.



Photo 9: Le mur mixte du cimetière et du quartier Diokoul avant son renversement



Photo 10 : Affouillement de la base du mur de protection du cimetière musulman de Diokoul (Ndour, 2006)

#### VI.4.3.2.3. Le mur en béton armé

Il a été construit entre 2006 et 2007 devant la partie effondrée du mur mixte de Diokoul par Abagroup sous la direction de la Direction des Travaux Publics et de la Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés (DEEC).

L'ouvrage est un mur vertical en béton armé de 115 m de long et d'une hauteur de 4 m, avec une épaisseur finie de 50 cm (figure 26; photo 11). Il repose sur une semelle préfabriquée de 2,10 m de largeur, de 40 cm de hauteur, d'une profondeur d'ancrage de 1 m dans le sol et de pente 50 % pour éviter les phénomènes d'affouillement qui peuvent déséquilibrer le mur de protection. Pour éviter ces phénomènes, un dispositif rempli de gravillons et d'une inclinaison de 50 % devrait être réalisé à la base du mur.

Des joints de dilatation de 2 cm sont prévus sur la semelle, tous les 3 à 4 m, et le mur tous les 30 m

Le 01 juillet 2007, de fortes houles avaient affecté tout le littoral de Rufisque. Les dégâts ont été plus ressentis à hauteur du cimetière de Thiawlène ou on pouvait noter le départ d'ossements en mer. L'Etat du Sénégal, pour baisser la colère des populations, avait alors prolongé le mur en enrochements jusqu'à la hauteur de la clôture de l'usine Bata (Photo 12). En 2012, sur financement de l'Union Economique et Monétaire de l'Afrique de l'Ouest (UEMOA) et du Projet d'Intégration de l'Adaptation au Changement climatique dans le développement durable (INTAC), la réfection du mur en enrochements a été faite sur un linéaire de 730 m pour protéger le quartier de Thiawlène et le cimetière.



Figure 26 : Mur en béton armé de Diokoul (Direction des Travaux Publics)



Photo 11 : Le mur en béton armé de Diokoul durant et après la phase de construction



Photo 12: Réfection du mur en enrochements en face du quartier de Thiawlène

# VII. Les causes de l'érosion côtière et les taux d'érosion des études antérieures du littoral de Rufisque.

# VII.1. Les causes de l'érosion

Une plage est en équilibre si les mouvements d'érosion et d'accumulation se compensent mutuellement pendant une longue période. Dans le cas contraire elle est soit en érosion soit en accumulation.

Les causes de l'érosion sont de deux types : les causes naturelles et les causes anthropiques. Par ailleurs l'élévation du niveau marin lié au changement climatique est un facteur qui joue un rôle important sur la stabilité des littoraux. Elle est à la fois d'origine naturelle et anthropique, cependant, la part de l'action humaine n'est pas encore quantifiable.

# VII.1.1. Les causes naturelles

L'érosion côtière à la faveur d'un déficit sédimentaire, d'origine naturelle des plages du littoral sénégalais, peut avoir comme cause, la diminution des apports fluviatiles, consécutifs à la baisse des précipitations à partir de 1970, marquant le début de la sécheresse dans la sous-région. Pour rappel, les apports fluviatiles constituent la première source d'alimentation des océans et leur variation est fonction des conditions climatiques.

Un déficit sédimentaire lié à la configuration de la côte de la presqu'ile de Dakar et à la morphologie du plateau continental, est responsable en partie de l'érosion côtière sur certains segments côtiers le long de la baie de Gorée. Les canyons de Dakar et de Kayar notamment, captent une grande partie de la charge sédimentaire de la dérive littorale de la côte nord. Toutefois, le canyon de Kayar aurait une influence minime sur le littoral de Rufisque qui est protégé par la Presqu'île du Cap Vert.

L'érosion peut être aussi liée à des phénomènes de ruissellement surtout sur les côtes à falaise où ce processus est non négligeable. La structure en gradins favorise un ruissellement différentiel qui fragilise les zones fracturées et facilite l'infiltration, ce qui entraîne des variations de pressions très importantes en profondeur qui peuvent entrainer la dislocation des roches.

#### VII.1.2. Les causes anthropiques

Les apports sédimentaires vers la mer ou vers la plage sont négativement affectés par les actions anthropiques tels l'urbanisation du littoral, l'aménagement des grands fleuves, comme la construction de barrages, les extractions de sables, etc. Parmi ces actions anthropiques, figurent les ouvrages de protection tels les structures perpendiculaires et celles parallèles à la côte.

Le Sénégal, un pays côtier et sahélien de l'Afrique de l'Ouest occupe une superficie de 196 761 km2. Les sécheresses des années 1970, 1973, 1977 1983 etc. associées à la vulnérabilité climatique qui s'est nettement distinguée depuis les années 1970 sont principalement responsables de la fragilisation du secteur primaire, hypothéquant ainsi le développement du pays. D'une année à l'autre, l'insuffisance et la mauvaise répartition des précipitations dans le temps et dans l'espace, la dégradation des sols et de la végétation du fait d'une pression démographique de plus en plus forte pratiquant une agriculture pluviale extensive et un élevage extensif, compromettent la pérennisation des ressources naturelles dans l'intérieur du pays. Ces aléas constituent aussi la cause de l'exode rural vers les villes particulièrement celles côtières. Le résultat est une gestion anarchique de l'espace, une urbanisation non contrôlée causant et/ou accentuant les phénomène d'érosion, un gaspillage des ressources naturelles, bref la dégradation progressive de l'environnement côtier.

#### VII.1.3. Le niveau marin et ses variations

Au cours des dernières décennies du XX<sup>ème</sup> siècle et au début du XXI<sup>ème</sup> siècle, l'élévation du niveau marin liée au changement climatique est considérée comme la cause principale de la généralisation de l'érosion côtière (Paskoff, 2001). Cependant, l'important pour l'évolution d'une côte est le niveau marin relatif, qui résulte de l'interférence des mouvements eustatiques (mouvements d'affaissement ou de soulèvement des continents, et des variations du niveau des océans et mers) (Paskoff, 2001).

Les variations du niveau marin engendrées par d'autres facteurs comme les upwellings ou les variations thermique des océans, jouent un rôle déterminant sur la morphologie des littoraux parce qu'ils conditionnent le niveau d'attaque des houles à la côte (Niang-Diop, 1995; Samat, 2007). Ces variations sont à l'origine de la submersion des plages basses et du transport sédimentaire dans la zone submergée (Bruun, 1962 ; Bruzzi 1998). Au Sénégal, les phénomènes tectoniques sont relativement stables. L'élévation du niveau marin consécutive au recul des glaciers continentaux, à l'expansion thermique et à la fonte des calottes glaciaires serait essentiellement responsable de la généralisation et de l'intensification de l'érosion côtière.

Une enquête que nous avons menée en 2007 et en 2011 dans les quartiers bordant le littoral de Rufisque, Mbao, Bargny, Sindou Yoff, Ouakam et Saint Louis montre que les maisons de ces localités, jouxtant aujourd'hui la mer étaient distantes de celle-ci, il y a environ 50 ans, de plus de 200 m. Qu'elles soient abandonnées (Rufisque, Saint-Louis et Diakhanor par exemple) ou non, ces maisons sont, de nos jours, fréquemment soumises aux inondations marines du fait de l'avancée de la mer. Une visite de terrain menée récemment, le 23 novembre 2012, avec des membres de l'ONG Plan International, a permis d'en savoir plus : un habitant du quartier de Diokoul né vers 1946, confirme une avancée de la mer d'au moins 100 m en face du cimetière musulman et une augmentation de la profondeur de l'eau avant le haut fond, en face dudit cimetière (l'îlot de Khoniet). L'avancée de la mer qui résulte de l'élévation du niveau de la mer est donc une des principales causes de l'érosion côtière qui sévit sur cette bande côtière bien qu'elle soit tributaire de l'influence d'autres processus hydrodynamiques comme le vent, la houle, les courants de houle, la marée et les facteurs anthropiques.

Au Sénégal, les données du marégraphe de Dakar au cours des 11 années de mesure (1943-1965) ont pu déceler une augmentation moyenne du niveau de la mer de 1,4 mm par an (Elouard *et al.*, 1977 ; Emery et Aubrey, 1991). Cette valeur ne devrait pas baisser dans la mesure où, au niveau global, le niveau des mers s'est relevé en moyenne de 1.8 mm/an entre 1961 et 2003, mais aussi du fait que tous les facteurs qui contribuent à l'élévation du niveau marin ont connu une hausse au cours de cette dernière décennie (tableau 4) et parallèlement les problèmes d'érosion se sont aggravés.

A cette remontée du niveau de la mer, s'ajoutent les variations journalières et saisonnières du niveau marin moyen. Les variations saisonnières sont attestées par les variations du niveau moyen de la mer avec un minimum et un maximum qui correspondent respectivement à la période d'upwellings et à la saison des pluies (Niang-Diop, 1995). Sur la Petite Côte, ces maxima coïncident donc avec la période des houles

de haute énergie ; cela impacte souvent négativement sur la morphologie de la côte.

	Vitesse d'élévation du niveau de la mer (mm/an)			
Facteurs d'élévation du niveau marin	1961 - 2003	1993 - 2003		
Dilatation thermique	0,42±0,12 1,6±0,5			
Glaciers et calottes glacières	0,5±0,18	0,77±0,22		
Fonte du Groenland	0,5±1,2	2,1±0,7		
Fonte de l'Antarctique	1,4±4,1	2,1±3,5		
Somme des contributions liées au climat	1,1±0,5	2,8±0,7		
Elévation totale observée du niveau marin	1,8±0,5	3,1±0,7		
Différence (observation moins la somme des contributions du climat)	0,7±0,7	0,3±0,1		

Tableau 4 : Vitesse observée de l'élévation du niveau de la mer et estimation des contributions des différents facteurs (GIEC/IPCC, 2007).

#### VII.2. Les taux d'érosion des études antérieures du littoral de Rufisque.

Sur le littoral de Rufisque comme ailleurs au monde, l'érosion côtière est un phénomène historique. D'après les études antérieures, les taux moyens annuels de recul se situent entre 0,2 et 3,7 m/an (Diallo, 1982; Niang-Diop, 1995; Dièye, 2000). Cette érosion présente des variations spatio temporelles entre la partie sud-est et la partie nord qui se situent de part et d'autre du Cap de Diokoul. Niang-Diop (1995) en comparant des cartes topographiques, bathymétriques et des photographies aériennes, a déterminé l'évolution historique de la ligne de rivage du littoral de Rufisque entre 1917 et 1980. L'étude de Diallo (1982) antérieure à celle de Niang-Diop (1995) et Dièye (2000) a mis en évidence un taux moyen d'évolution de - 1,3 m/an.

Les travaux de Niang-Diop (1995) (tableau 5) notamment montre que la crise érosive des plages a débuté sur le littoral de Rufisque vers les années 1930 avec des taux de recul forts, Elle explique les taux obtenus entre 1917 et 1928 par la position erronée de la ligne de rivage sur la carte bathymétrique de 1928. Entre 1937 et 1980, c'est le secteur de Diokoul qui est le moins affecté par l'érosion. On note cependant, une variation spatio-temporelle de l'érosion entre les périodes étudiées.

Secteur	1917-1928	1928-1937	1937-1959	1959-1980	1917-1980	1937-1980
Diokoul		-3,7	-0,7	-0,7		-0,7
Escale	+ 3	-3,9	-1,4	-1,2	-0,9	-1,3
Mérina		-2,9	-0,6	-1,8		-1,1
Moyennes	+ 3	-3,7	-1,1	-1,2	-0,9	-1,0

Tableau 5: Taux moyens d'évolution du littoral à Rufisque entre 1917 et 1980 (en mètres par an) (Niang-Diop, 1995)

L'étude de Dièye (2000) (tableau 6) confirme cette évolution régressive du littoral, avec des taux moyens de recul de - 0,7 m/an pour le secteur de Cap des Biches-Cap de Diokoul et des taux variant entre -0,3 et 1,8 m/an pour le secteur de la baie de Rufisque.

Tableau 6 : Taux d'évolution de la ligne de rivage à Rufisque entre 1968 et 1997 (Dièye, 2000)

	Cap des Biches	Zone à cordon	Diokoul ouest	Diokoul est	Beppe	Fond ba	ie de Ru	fisque
Taux d'évolution (m/an)	- 0,3	- 0,8	- 1,3	- 0,6	+ 1,1	- 0,3	-0,4	-1,5
Moyennes	- 0,7				- 0,	3		

Taux d'évolution de la ligne de rivage à Rufisque entre 1968 et 1997 (Dièye, 2000) suite

	Keuri Kao	Keuri	Keuri Kao	Fin Keuri	Mérina	Thiawlène	Début	Bata
	1	Kao 2	3	Kao			cimetière	
Taux d'évolution	- 0,9	- 1,3	- 1,5	- 1,6	- 1,6	- 1,4	-1,6	-2,4
(m/an)								
Moyennes	- 1,3				- 1,8			

# **VIII.** Conclusion

La zone d'étude est soumise à un climat de type soudano-sahélien caractérisé par une alternance des deux saisons : une saison sèche (novembre à mai) et une saison pluvieuse (juin-octobre). Les températures sont soumises dans l'ensemble, à l'influence des masses d'air qui induisent une répartition saisonnière des vents à la côte. Pendant la saison sèche, les alizés maritimes prédominent alors qu'en saison des pluies, les vents

de mousson de secteur sud-ouest qui prédominent.

A la répartition saisonnière des masses d'air dominantes correspond deux régimes de houles dominantes : des houles de direction nord-ouest et des houles de direction sudouest. Les premières, malgré leur permanence et leur forte énergie en saison sèche, jouent à Rufisque un rôle morphogénétique moins important que les secondes.

Le littoral de Rufisque n'est cependant pas à l'abri des fortes houles ou (houles de tempête). Les vents dominants du nord exercent une influence sur le régime des vagues qui frappent le littoral et sur les courants comme la dérive littorale dominante, et les houles perpendiculaires à la côte. La dérive littorale nord-sud mise en évidence est parfois inversée de façon saisonnière mais surtout pendant la période des houles de sud-ouest. Des houles fortes semblent être cycliques et surviennent durant cette période, ce qui provoque une érosion très importante.

Sur le plan géologique, la zone d'étude est située dans la partie ouest du bassin sédimentaire sénégalo-mauritano-guinéen. Elle est constituée d'affleurements tertiaires et quaternaires ; les premières sont essentiellement marno-calcaires avec quelques pointements volcaniques alors que les deuxièmes sont représentées par des dépôts de sable, des grès de plage et des terrasses nouakchottiennes.

Sur ce littoral, les facteurs anthropiques sont essentiellement liés à l'urbanisation, au prélèvement de sables, mais surtout à la diversité des ouvrages de protection qui ne sont plus à négliger dans la morphogénèse littorale.

# **CHAPITRE 2: METHODOLOGIES**

La stratégie d'étude adoptée est fonction de l'échelle d'analyse. Deux échelles ont été retenues. Chaque échelle est conditionnée par les objectifs qui se sont fixés :

- l'échelle annuelle pour étudier l'évolution morpho-sédimentaire actuelle du littoral. Elle nous permet de comprendre quelles sont les différents changements ou modifications observées sur le profil de plage. Elle permet aussi d'avoir une idée sur comment les phénomènes d'érosion et d'accumulation se manifestent à une échelle fine. Le choix des profils est fonction des plages restantes et le matériel utilisé malgré l'existence actuelle d'une technologie plus adéquate pour une telle étude aux moyens financiers. Cependant la précision du matériel utilisé et la maîtrise de la méthodologie font que les données obtenus sont néanmoins de qualité. L'échantillonnage repose essentiellement dans le but de caractériser les sous-environnements du littoral.

- l'échelle pluriannuelle pour étudier l'évolution du littoral à long terme et déterminer l'impact des structures de protection sur l'évolution de la ligne de rivage. Cette échelle pluriannuelle repose sur l'étude diachronique des données de télédétection (photographies aériennes et images satellites) et l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Dans le cas du littoral de Rufisque, la période d'observation en fonction de la disponibilité des données est variable. les images Landsat n'ont pas été utilisées du fait d'une résolution spectrale et spatiale pas toujours adaptée à la zone d'étude. Cette échelle permet de savoir comment les résultats à l'échelle annuelle affecteront le littoral à long terme.

# I. Méthodes topographique et sédimentologique

# I.1. Méthode topographique

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer le comportement du littoral sous l'effet des agents dynamiques.

#### I.1.1. Levés topographiques

Pour étudier les caractéristiques morphologiques des plages du littoral, six profils perpendiculaires au trait de côte, ont été levés mensuellement de juin 2005 à juin 2006. Ces profils se répartissent entre le Cap des Biches et l'usine BATA (figure 27; tableau 7). Le profil P1 est situé sur le flanc nord-ouest de la falaise du cap des Biches; le profil P<sub>2</sub>, à hauteur de la centrale thermique du cap des Biches sur le canal de rejet des eaux

chaudes au nord-ouest juste près du canal d'alimentation en eau de refroidissement de la dite centrale. Les profils  $P_3$  et  $P_4$  sont situés respectivement aux extrémités nord-ouest et sud-est du mur mixte de gabions surmonté d'un mur en béton du cimetière musulman de Diokoul. Le profil  $P_5$  est situé à hauteur de la baie de Rufisque, à une dizaine de mètres de l'extrémité du mur en enrochements de Keuri Souf – Thiawlène et le profil  $P_6$ , au niveau de l'extrémité sud du cimetière de Thiawlène, à environ trente mètres de l'extrémité sud de ce même mur en enrochements de Keuri Souf –Thiawlène. Il est situé à quelques mètres du mur de clôture de l'usine BATA.



Figure 27 : Carte de localisation des profils de plage.

Profils de plage	Coordonnée X	Coordonnée Y	
P1	251579	1628778	
P2	252269	1628482	
Р3	253343	1628037	
P4	253444:	1627960	
Р5	254660	1627891	
P6	257104:	1626907	

Tablaan	7.	Coordonnáog	dag	profile de place
гареан	/	Coordonnees	des.	DIDITIS DE DIAGE

Le matériel topographique est constitué d'un niveau optique, d'une mire et d'un ruban. Le levé topographique consiste à mesurer la topographie de la plage, le long d'un profil,
du haut de plage jusqu'à la zone de déferlement. Les points de rupture, les points d'inflexion et les limites des différentes unités morphologiques de la plage sont minutieusement levés, de façon à ce que le profil mesuré s'ajuste le plus possible à la topographie observée.

Chaque profil est positionné grâce à trois repères : une borne fixe, un repère arrière fixe, situé sur l'arrière côte, à partir duquel commence le profil et un repère lointain stable (mur de clôture, maison, etc.) qui permet de contrôler la direction du profil grâce à une valeur d'angle de la tourelle du niveau (angle compris entre les deux repères). Le portemire se déplace dans l'axe du champ de visée du niveau sur les points remarquables des différentes unités morphologiques de la plage aérienne et sur une partie de la plage sous-marine au niveau du déferlement.

Les campagnes de mesure ont été toujours faites lors des périodes de marées basses de vives eaux, dans le but d'obtenir la totalité de la plage aérienne et d'accéder aisément à la zone de déferlement.

#### I.1.2. Analyse des profils de plage

Une échelle est préalablement choisie : 1 cm = 10 m pour les distances et 1 cm = 1 m pour les altitudes. Les profils sont tracés grâce à un programme informatique : le logiciel Adobe Illustrator 10, en utilisant une échelle relative. Le zéro, tant vertical (altitude) qu'horizontal (distance), est constitué par le repère arrière fixe de chaque profil. Ce logiciel a l'avantage de présenter une interface millimétrée et un outil qui permet de mesurer les caractéristiques du profil de plage.

Les différentes unités morphologiques de la plage ont été déterminées en utilisant la terminologie classique de Ottman (1965) (figure 28). Ainsi, nos profils sont relatifs à la plage aérienne et à une partie de la plage sous-marine.

Par ailleurs, la forme du tracé du profil est déterminée en utilisant la terminologie de Sonu et Van Beek (1971) qui distinguent trois grandes formes : concave, rectiligne, et convexe, avec ou sans berme.



Figure 28 : Principales unités morphologiques d'une plage sableuse et ses agents dynamiques (d'après Ottman, 1965).

- La haute plage est la partie du système sableux littoral qui n'est recouverte que lors des fortes houles (houles de tempête) et dépourvue de végétation. Sa limite inférieure, fluctuante selon l'état de la marée, correspond à la limite du jet de rive, généralement marquée par une rupture de pente ou des objets divers qui constituent la laisse de haute mer. Elle constitue, avec l'estran, la plage aérienne ;

- L'estran, ou zone intertidale des biologistes, est la partie alternativement recouverte et découverte par la mer suivant la marée. Sa largeur est fonction de l'amplitude de la marée et de la pente de la plage. Elle peut avoir une pente uniforme ou présenter une rupture de pente permettant de distinguer un haut estran et un bas estran. Il s'étend entre la limite du jet de rive et le début de la plage sous-marine. Cette limite inférieure correspond au niveau des basses mers maximum et peut parfois présenter un talus ;

- La plage sous-marine est située entre le niveau des plus basses mers (maximum) et la profondeur de fermeture du profil de plage, qui est égale à la demilongueur d'onde des houles de beau temps. En effet à partir de cette profondeur, le fond a une influence sur la propagation de la houle. Cependant, c'est dans la zone de déferlement que l'énergie générée par la houle influe de façon importante sur la morphologie côtière (BRGM, 2003). Au sens biogéographique, cet étage infralittoral, est peuplé d'organismes photophiles.

Toujours submergée, la plage sous-marine n'a pu être explorée que dans ses premiers mètres, précisément entre la limite inférieure de l'estran et la zone de déferlement.

Le suivi de l'évolution mensuelle des unités morphologiques des profils a été fait par la

mesure de leur largeur et de leur pente sous forme de tangente  $\beta$  et par la détermination de leur forme.

Afin de mettre en évidence l'évolution morphologique mensuelle des profils, ceux-ci ont été superposés deux à deux. D'un mois à l'autre, on a pu identifier les zones en érosion et/ou en accumulation. Les mouvements au sein des profils ont été quantifiés pour chaque unité morphologique (haute plage, estran, plage sous-marine). Le volume de sable érodé (-) ou accumulé (+) par mètre linéaire de plage est déterminé en calculant d'abord une surface (hauteur x longueur) qu'on multiplie par un (1m), en supposant qu'il n'y a pas de modifications à un mètre de part et d'autre du profil, ce qui permet d'estimer la quantité de mouvements sédimentaires entre deux mois. Puis, pour chaque profil, les cumuls ont été calculés par unité morphologique et pour l'ensemble du profil. Les méthodes de calcul utilisées ont bien sûr des limites, mais néanmoins permettent d'avoir une idée d'ensemble des mouvements verticaux affectant un profil donné.

#### I.2. Méthode sédimentologique

#### II.2.1. Echantillonnage

Pour faire l'analyse granulométrique des sables de la plage, des prélèvements ont été effectués une fois tous les deux mois (bimestriels) sur les différentes unités morphologiques : haute plage, limite du jet de rive ou « laisse de haute mer », mi-estran, bas estran (mer) et déferlement.

Le profil de la plage exprime une réponse aux houles ayant régné pendant un temps limite. Ainsi, un prélèvement en profondeur est composé de différentes laminés correspondant à des conditions de dépôt différentes, donc ne peut pas être utile pour obtenir des informations sur les variations récentes des plages (Chauhan, 1992). C'est pourquoi, tous les prélèvements ont été effectués par simple raclage à la main de la surface de l'unité considérée.

#### II.2.2. Analyse granulométrique

Au laboratoire, les sédiments prélevés sur le terrain sont soumis à un lavage suivi d'une décarbonatation et d'un tamisage.

Les échantillons sont lavés sur un tamis de cinquante microns (50 µm) et séchés à

l'étuve. Ce lavage a pour but d'enlever uniquement les sels et certaines impuretés. Ensuite, pour chaque échantillon cent cinquante grammes sont attaqués à froid, à l'acide chlorhydrique à 30%. Après plusieurs attaques, les sédiments décarbonatés sont lavés à plusieurs reprises et séchés à l'étuve. Les pourcentages de carbonates (CaCO<sub>3</sub>) sont calculés par la formule suivante :

$$\%CaCO3 = \frac{150 - \text{poids après attaque}}{150g} x100$$

Bien qu'il existe actuellement des logiciels de calcul automatique des indices granulométriques comme le logiciel *Granush* du SHOM, la méthode classique de Folk et Ward (1957) a été utilisée compte tenu de l'étude comparative que nous devrons faire avec les résultats de Niang-Diop (1995).

Le tamisage à sec des sédiments est effectué sur une colonne de 16 tamis (50 à 1600  $\mu$ m) de norme AFNOR (série de raison 10 $\sqrt{10}$ ) au Laboratoire de Sédimentologie et de Biostratigraphie du département de Géologie de l'Université Cheikh Anta Diop.

Le refus de chaque tamis est récupéré et pesé avec une balance de précision (au milligramme près). A partir d'un programme informatique, le logiciel "Origine 6. 0", on trace à partir des refus pondéraux, les courbes des pourcentages cumulés en fonction des diamètres des tamis, exprimés en unités phi ( $\Phi$ ). Ce logiciel permet aussi, à partir de ces courbes, de déterminer les quartiles (Q<sub>5</sub>, Q<sub>16</sub>, Q<sub>25</sub>, Q<sub>50</sub>, Q<sub>75</sub>, Q<sub>84</sub> et Q<sub>95</sub>) (figure 29) qui permettent de calculer les principaux indices granulométriques de Folk et Ward (1957).



Figure 29: Fenêtre du logiciel Origin 6.0 montrant le calcul des quartiles à partir d'une courbe cumulative

- La moyenne (Mz).

$$Mz = \frac{Q_{16} + Q_{50} + Q_{84}}{3}$$

Elle donne une idée sur l'énergie du milieu (Reineck et Singh, 1975). Appelée aussi grain moyen, elle reflète la taille moyenne des sédiments et permet d'apprécier les conditions de dépôt (Diaw, 1997). Cependant, elle est influencée par la granulométrie du sédiment source (Sahu, 1964 ; Folk, 1966). Elle permet de déterminer le type de sable en utilisant l'échelle de Wentworth (1922) (tableau 8).

Tableau 8 : Classification granulométrique de Wentworth

2000 µm	1000 µm	500 µm	250 µm	125 μm	63 µm
Sables très	Sables	Sables	Sables fins	Sables très	Silts
grossiers	grossiers	moyens		fins	

#### - L'indice de classement [sigma ( $\sigma_{\Phi}$ )], de Folk et Ward (1957)

Sig(
$$\sigma$$
) =  $\frac{Q_{84} - Q_{16}}{4} + \frac{Q_{95} - Q_5}{6,6}$ 

Il est aussi appelé l'indice de tri, ou coefficient de dispersion des sédiments ou écart type. Il permet de déterminer le degré de classement des sédiments en utilisant l'échelle suivante.

Classement	Valeurs de Sig( $\sigma$ )
Très bien classé	0.25
Bien classé	
	0,50
	0,71
Moyennement cla	ssé
	1
Mal classé	2
	2

#### - L'indice d'asymétrie ou skewness (SK)

SK = 
$$\frac{(Q_{16} + Q_{84}) - 2Q_{50}}{2(Q_{84} - Q_{16})} + \frac{(Q_5 + Q_{95}) - 2Q_{50}}{2(Q_{95} - Q_5)}$$

Il permet de voir l'abondance des particules fines ou grossières par rapport à la médiane, et de mesurer la symétrie de la distribution granulométrique. Il varie entre -1 et +1. Les courbes symétriques ont un skewness égal à zéro (0). Quand le skewness est négatif, on a une dominance des éléments grossiers et lorsque le skewness est positif, il y a une abondance des particules fines.

#### L'indice d'acuité ou kurtosis (K

$$K = \frac{Q_{95} - Q_5}{2,44 (Q_{75} - Q_5)}$$

Ce paramètre donne le rapport entre l'étendue de la partie centrale et l'étendue des extrémités de la distribution granulométrique. Il mesure l'acuité des courbes de fréquence. Suivant la valeur de K, on distingue trois cas :

- les sédiments mésokurtiques (0, 6 < K < 1, 5) qui ont des courbes moyennes ;

- les sédiments platykurtiques (K < 0,6) qui présentent des courbes de fréquence très aplaties ;

- les sédiments leptokurtiques (K > 1,5) qui ont des courbes de fréquence très aiguës.

Cet indice, peu utilisé, reflète également la présence ou non de plusieurs modes. Selon Folk (1966), deux modes d'importance égale et très espacés donnent des courbes très platykurtiques alors qu'un mode secondaire dans les grossiers ou dans les fins détermine une distribution leptokurtique.

Ces indices de Folk et de Ward (1957) ne s'appliquent qu'à des sédiments unimodaux. Pour les sédiments plurimodaux, on se limitera à donner les modes et les pourcentages.

#### II. Méthodes d'étude de l'évolution de la ligne de rivage

L'étude de l'évolution de la ligne de rivage nécessite au préalable la mise en place d'une méthodologie précise en fonction des approches suivantes : la détermination et la reconnaissance des formes témoins de paléo-rivage, et la comparaison des profils de plage ou celle des lignes de rivage extraites des photographies aériennes et/ou des images satellitaires. La méthode utilisée dans cette étude repose sur des techniques de photo interprétation assistée par ordinateur. Cette approche est de nos jours facilitée par l'utilisation de logiciels de traitement d'images. Elle comprend trois étapes (figure 30).



Figure 30: Etapes de l'étude de l'évolution de la ligne de rivage à Rufisque par le DSAS.

#### II.1. Acquisition des données

Les principales données disponibles sur la zone d'étude sont essentiellement constituées de documents cartographiques anciens, de photographies aériennes et d'images satellitaires. Dans notre travail, seules les photographies aériennes et les images satellitaires ont été utilisées car les documents anciens sont non seulement peu fiables et mal conservés mais restent d'exploitation très difficile. Les résultats qu'ils fournissent sont sujets à controverse. Ainsi, nous avons considéré les missions aériennes de 1954, 1980 et 1997 aux échelles respectives de 1/ 50 000, 1/ 20 000 et 1/20 000 (tableau 9). En plus de ces photographies, une image du satellite Spot 5, d'octobre 2006 et de résolution 2,5 m, issue de la base du de données Centre de Suivi Ecologique (C.S.E.), a été utilisée comme image de référence.

Année	Référence de	la	Echelle des	N° des	Date de	Heure de prise
	mission		clichés	clichés	prise de vue	de vue
				utilisés	_	
1954	IGN AOF 1954-079		1/50000	519, 520,	/	/
				521		
1980	IGN 1980		1/20000	/	/	/
	IGN 12-01-1997		1/20000	0077	12/01/97	12 h:41mn
1997	IGN 12-01 1997		1/20000	00116	17/01/97	11 h:17mn:08s
2006	Image Spot 5, résoluti	ion	2,5 m		26/10/2006	11 h:46mn:53s

Tableau 9 : Références des photographies aériennes et des images utilisées

#### II.2. Rectification géométrique des photographies aériennes

La reproduction conforme n'est pas de règle en télédétection. Lorsqu'une image est acquise par photographie aérienne, elle est entachée d'erreurs qu'il faut impérativement corriger pour son utilisation dans une étude d'évolution de la ligne de rivage.

L'objectif est de rectifier les déformations ou erreurs géométriques des images acquises par photographie aérienne afin que des images multi-dates puissent être enregistrées sous les mêmes références géographiques (datum : WGS 1984) et dans un système de projection unique (UTM Zone 28N). Dans le cas des photographies aériennes, la géométrie est essentiellement fonction des paramètres de vol, au moment de la prise de vue (mobilité sur les trois axes : roulis, tangage, lacet) et de l'altitude.

La correction géométrique consiste à modifier l'arrangement spatial des objets et leurs

relations géométriques sans changement substantiel du contenu des données (Samat, 2007). Elle nécessite des points de contrôle ou amers qui sont des points permanents, stables et connus au sol (longitude, latitude et altitude) : carrefours, angles de maisons, d'usines, croisements de route etc., à partir desquels se fait la correction. Les points de contrôle peuvent être obtenus sur le terrain par des relevés GPS ou directement sur les documents de référence. Leur qualité dépend, dans le cas des cartes topographiques, de la précision des relevés ayant permis l'établissement de la carte, de la qualité de la reprographie et, dans le cas des relevés GPS, de la précision du GPS.

La rectification est basée sur la substitution des homologues des amers, présentant des distorsions sur l'image à corriger par les points de contrôle. Les coordonnées cartésiennes de ces points de l'image non redressée (x, y) sont converties en coordonnées (X, Y) du système de référence (UTM ou Lambert). En d'autres termes, cela revient à géoréférencer l'image, c'est-à-dire à lui conférer un système de coordonnées compatibles avec les normes standard de cartographie, afin d'obtenir une homogénéité géométrique. La rectification permet une superposition satisfaisante des images avant l'extraction manuelle des lignes de référence à comparer.

Il existe plusieurs méthodes de rectification, les plus utilisées étant, la méthode « bilinear interpolation » ou par interpolation bilinéaire, la méthode « cubic convolution » ou par convolution cubique et la méthode du « nearest neighbour » ou plus proche voisin qui est la plus simple et la plus adaptée pour les côtes basses (Bannari *et al.*, 1995). C'est cette dernière qui a été utilisée dans cette étude. Ce sont des méthodes basées sur l'application d'un modèle mathématique de type polynomial de premier, de second ou de troisième ordre, développé par Thieler et Danforth (1994).

La correction de cette image SPOT (image référence) a d'abord été vérifiée par la collecte sur le terrain de points de contrôle GPS, facilement repérables sur l'image de référence et sur les photographies aériennes à corriger. En plus, un enregistrement de points GPS sur la route nationale N°1 entre Mbao et l'entrée de Bargny a été effectué ; pour maximiser les points de contrôle pour le géoréférencement des photos (figure 31). Cette vérification a permis de bien établir la correspondance entre le terrain et l'image, ce qui traduit le bon état de redressement de l'image de référence.



Figure 31 : Validation du géoréférencement de l'image de référence.

Le logiciel "Chips 4.5" a été utilisé pour le géoréférencement. La démarche est la suivante :

- création d'un projet qui va contenir l'image et les autres fichiers ;

 ouverture de l'image avec une origine « upperleft » (origine située dans le coin supérieur gauche de l'image);

- modification des positions des points de contrôle, effectuée avec une transformation polynomiale de premier ordre. Avec le logiciel Chips, cette modification commence dès la saisie du quatrième point de calage. C'est en ce moment que le modèle indique la précision de la transformation par erreur moyenne quadratique ou RMS (Root Mean Square).

Après la saisie d'un nombre élevé de points, l'erreur moyenne est minimisée autant que possible par un réajustement, un rajout ou une suppression de points jusqu'à obtenir une valeur de RMS inférieure ou égale à 0,5 (figure 32). Un minimum de 16 points a été utilisé.

+ 251754.8 1629125.8 0.0 ·141.2 316.0 ·0.4 ·0.1 0.4 + 253974.8 1627915.8 0.0 68.7 446.7 0.2 ·0.0 0.2 + 256834.8 1627405.8 0.0 359.7 505.7 ·0.0 ·0.1 0.1 + 258894.8 1629645.8 0.0 622.8 276.9 ·0.0 ·0.0 0.1 Current Point Accuracy New M 0.5 T 0.00 Mod						.gep	- LDT_1	itor	GCP Ed
Current Point Accuracy New   Image: Construction of the state of the s	× 11	>		0.4 0.2 0.1 0.1	16.0 -0.4 -0.1 6.7 0.2 -0.0 05.7 -0.0 -0.1 76.9 -0.0 -0.0	-141.2 68.7 359.7 622.8	125.8 0.0 915.8 0.0 405.8 0.0 645.8 0.0	1629 1627 1627 1629	251754.8 253974.8 256834.8 258894.8
	I→R B->I	New I Mod F	Accuracy M 0.5 T 0.00	=	669.296875	5	259334.7	nt Xr	Current Poir
C Exclude Yr 1629645.75 Yi 277.953125 Del   C Test Zr 0 1st 2nd	Auto 3rd	Del A 1st 2nd :			277.953125	75	1629645. 0	Yı Zı	Exclude Test

Figure 32 : Fenêtre du logiciel Chips montrant l'erreur moyenne quadratique ou (RMS).

- L'image est ensuite redressée avec une origine « lowerleft » (origine située dans le coin inférieur gauche de la photographie)

Pour les photographies des années 1954 et 1997, deux à trois clichés ont permis de couvrir la zone d'étude. Les clichés ont été corrigés deux à deux afin d'obtenir une mosaïque couvrant l'ensemble de la zone d'étude (figure 33). Les mosaïques de 1954 et de 1997, ainsi que la photographie de 1980 ont été ensuite corrigées par l'image de référence (figure 34).



Figure 33 : Mosaïquage de la photographie aérienne de 1954.



Figure 34 : Fenêtre du logiciel Chips montrant la rectification d'une mosaïque de la photographie aérienne de 1954.

Lors du redressement, la résolution de l'ensemble des photos est ramenée à 1 m. Les images ainsi redressées sont d'abord enregistrées sous format JPEG ou TIFF, puis superposées grâce au logiciel Arc-View 3.3a à l'image de référence pour vérification de la superposition des infrastructures remarquables de la ville telles que les routes, le chemin de fer, les canaux à ciel ouvert, etc. Le cas échéant, le redressement a été repris jusqu' à l'obtention d'une superposition satisfaisante.

#### II.3. Le choix d'une ligne de rivage de référence.

En géomorphologie, le suivi de la ligne qui sépare la mer et son rivage est le meilleur moyen utilisé pour apprécier l'évolution du littoral. Cette ligne de démarcation est désignée par la ligne de rivage ou le trait de côte. Les deux termes sont définis de manière différente. D'après Diaw (1997), la ligne de rivage désigne la ligne de position momentanée de l'eau à l'intérieur du rivage ou même parfois une ligne fixe, mais différente du trait de côte; alors que ce dernier désigne la ligne des plus hautes mers, véritable frontière, au moins théorique, entre le continent et la mer. Dans le cadre de notre travail, les deux termes seront employés comme synonymes.

Pour l'analyse de l'évolution historique de la ligne de rivage, le choix d'une ligne de référence est primordial pour une étude basée sur la photo-interprétation, dans la mesure où il existe plusieurs lignes de référence pouvant être prises pour représenter le trait de côte. Cette ligne est souvent matérialisée par le pied de dune (Stafford et Langfelder, 1971; Morton *et al.*, 1993), la ligne des plus hautes mers (Moore, 2000) la limite mouillée (Dolan *et al.*, 1978; Grenier et Dubois, 1992) et la limite côté terre des ouvrages de protection (Morton et Speed, 1998).

Sur le littoral de Rufisque, le choix de la ligne de rivage est guidé par plusieurs facteurs : la morphologie du littoral, l'absence de dune, la faible largeur de l'estran (ce qui exclut la présence de plusieurs lignes instantanées) et le faible marnage. La ligne de référence qui convient le mieux à Rufisque est la limite mouillée (limite des hautes mers maximale) parce qu'elle est visible sur toutes les photos disponibles. En plus, elle atténue l'importance du niveau de la marée au moment des prises de vues ; elle est visible quelle que soit la nature des estrans et elle permet de conserver le rapport de proportionnalité avec les estrans courts et très courts (Everts et Wilson, 1981; Lessard, 1982). La limite d'humectation correspond donc à Rufisque au niveau moyen des hautes mers. Ce niveau est continu le long du littoral et facilement reconnaissable, car situé à la limite entre les parties mouillées apparaissant en gris foncé et les parties sèches (apparaissant en gris clair à blanc) de la plage sur les photographies aériennes (figure 35). Il est peu variable horizontalement en fonction de la marée (Dolan *et al.*, 1978).



Figure 35 : Détermination de la ligne de rivage (extrait d'une photographie aérienne, mission IGN 1954)

Au fond de la baie de Rufisque, l'anthropisation de la plage et la présence de sable noir à ilménite rendent souvent très difficile la reconnaissance de la limite mouillée. A cette contrainte s'ajoute la difficulté de reconnaître cette limite là où sont implantés les ouvrages de protection. Ces difficultés ont été surmontées grâce à des missions fréquentes sur le terrain.

La résolution des images satellitaires est déterminante pour une bonne évaluation de l'évolution de la ligne de rivage, notamment sur le littoral étudié où les travaux antérieurs indiquent des taux d'érosion compris entre 0,2 et 3 m/an. Dans ce contexte, on mesure l'importance des données satellitaires à haute résolution. Cela conduit à déceler des évolutions entre des prises de vue chronologiquement rapprochées.

# II.4. Méthodes d'évaluation et de mesure des taux d'évolution de la ligne de rivage

Il existe deux méthodes pour la détermination des taux d'évolution de la ligne de rivage pour un intervalle de temps donné. Il s'agit des méthodes quantitatives et des méthodes qualitatives.

#### II.4.1. Méthodes quantitatives d'évaluation des taux d'évolution

Il existe plusieurs méthodes quantitatives pour évaluer les taux d'évolution de la ligne de rivage à partir des images aériennes (Dolan *et al.*, 1991 ; Fenster *et al.*,1993). Ces méthodes représentées à la figure 36 sont disponibles dans le programme Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 2.2.1 (Thieler *et al.*, 2004).

#### II.4.1.1. La méthode de « End Point Rate » ou des « Points

#### extrêmes »

Cette méthode permet de calculer les taux d'évolution par le rapport du déplacement linéaire entre les deux positions extrêmes de la ligne de rivage et le temps écoulé entre les deux dates. Le problème principal de la méthode est lié au nombre limité (de l'ordre de deux) des données, d'où le risque de ne pas déceler les changements de tendance ou d'avoir des résultats biaisés si les données de base sont entachées d'erreurs.



Figure 36 : Méthodes de détermination des taux d'évolution de la ligne de rivage (Dolan et al., 1991)

## II.4.1.2. La méthode de la moyenne des taux ou « Average of

#### Rates »

Développée par Foster et Savage (1989), cette méthode est basée sur la détermination d'une famille de droite, lorsqu'on dispose de plus de deux lignes de rivage.

Dans le cas où plus de deux positions de la ligne de rivage sont disponibles, on utilise toutes les positions pour définir une famille de droites qui permet de déterminer tous les taux d'évolution possibles. Les « End Point Rate » sont calculés pour tous les points deux à deux et le taux moyen est ensuite calculé pour l'ensemble de la zone d'étude.

Le temps minimum est une équation développée par ces auteurs pour déterminer la précision de mesure de deux positions respectives de la ligne de rivage et en déduire celle du taux d'évolution (Foster et Savage, 1989).

Tmin = 
$$\frac{(E_1)^2 + (E_2)^2}{R_1}$$

E<sub>1</sub> et E<sub>2</sub> sont les erreurs de mesure sur le premier et le second point,

R1 représente « le End Point Rate » de l'intervalle de temps le plus long pour les points sélectionnés.

Les « End Point Rate » qui répondent à ce critère de temps minimum sont considérés comme des taux à long terme. La moyenne de ces derniers va correspondre au taux actuel de changement de la ligne de rivage.

Cette méthode a été mise au point pour traiter des données de qualité variable Elle présente cependant deux inconvénients majeurs :

- il n'y a pas de norme de calcul pour déterminer le temps minimum c'est-à-dire qui dépend des valeurs introduites au numérateur et au dénominateur ;

- les résultats sont sensibles aux choix des valeurs sélectionnées pour représenter les erreurs de mesure E1 et E2.

Foster et Savage (1989) recommandent que cette méthode soit utilisée en combinaison avec les méthodes par « régression linéaire » et de «End Point Rate » en tant que moyen de vérification mais pas comme seule méthode de calcul.

#### II.4.1.3. La méthode par régression linéaire

La méthode par régression linéaire permet d'obtenir le taux d'évolution du littoral par la pente de la droite de régression linéaire dont l'équation peut ensuite être utilisée pour prédire des positions futures du rivage.

Les avantages de cette méthode sont d'abord qu'elle est purement mathématique et basée sur des concepts statistiques reconnus et faciles à utiliser, et que l'ensemble des données disponibles sont utilisées. Cependant, quand les positions de la ligne de rivage sont groupées, certaines données auront plus d'influence sur la régression que d'autres.

#### II.4.1.4. La méthode des ciseaux ou « jackknife »

C'est une adaptation de la régression linéaire utilisant toutes les combinaisons de régressions linéaires en excluant un point à chaque fois. Les pentes des différentes droites de régression sont moyennées pour donner une estimation de la tendance à long terme et prévoir l'évolution future.

Cette méthode présente les mêmes avantages que la méthode de régression linéaire, mais les résultats sont moins influencés par les groupes de données.

Les principaux inconvénients sont la multiplication des calculs à faire et le problème de la valeur statistique des résultats quand on utilise un faible nombre de données.

Les résultats obtenus peuvent être représentés sous forme cartographique, graphique ou de tableau.

Le problème fondamental de ces différentes méthodes reste celui de la signification des taux de changement ainsi obtenus, car elles sont basées sur les hypothèses d'uniformité et de linéarité du mouvement de la ligne de rivage (Morton, 1991). La première hypothèse suppose que les mouvements sont de même nature, qu'il n'y a pas eu d'inversion dans les tendances au cours de la période de temps considérée ; la deuxième admet que les mouvements se font de manière régulière, sans modification des taux. Ces hypothèses sont rarement satisfaites. Aussi, certains auteurs préconisent l'utilisation de la méthode non linéaire alors que d'autres suggèrent les méthodes linéaires par intervalles de temps caractérisés par la même évolution (Fenster *et al.*, 1993).

#### II.4.2. Mesure des évolutions et détermination des taux d'évolution

La mesure des évolutions (variation de distances entre deux dates) pour la période d'étude a été effectuée par la méthode automatique, grâce au programme DSAS (Digital Shoreline Analysis System) version 2.2.1 (Thieler *et al.*, 2004), suivant des transects perpendiculaires aux deux lignes de rivage à comparer (figure 37).



Figure 37 : Transects générés par le DSAS pour la mesure de l'évolution du trait de côte.

Ces transects, espacés dans notre étude de 10 m, sont générés à partir d'une ligne de base située du côté continent. Le DSAS mesure, pour chaque transect, la distance (évolution) entre les points d'intersection des transects et des traits de côte, calcule les taux d'évolution le long de chaque transect et restitue les résultats sous forme de tableaux attributaires (Faye *et al.*, 2008).

L'estimation de la cinématique du trait de côte est basée sur l'analyse des tableaux attributaires générés automatiquement et exportés sur Excel. Pour appréhender l'évolution temporelle de la position de la ligne de rivage, nous avons choisi deux indices proposés par le DSAS : l'indice EPR (End Point Rate) pour évaluer l'évolution entre les deux traits de côte successifs (entre deux années) et le LRR (Linear Regression) pour estimer les taux d'évolution par régression linéaire de chaque transect sur l'ensemble de la période d'étude (Faye, 2010). Pour rappel, la régression linéaire, d'usage très répandu dans la littérature, est considérée comme la meilleure méthode pour estimer les tendances évolutives du littoral sur le long terme (Dolan et al., 1991 ; Fenster et al., 1993). Ensuite, les zones qui présentaient la même tendance évolutive ont été regroupées en secteurs. Pour chaque secteur, les mesures de distance et les taux d'évolution des segments de côte ont été moyennés (Faye, et al., 2008); ce regroupement suit parfois une ségrégation naturelle du rivage en segments (Byrnes et Hiland, 1994). Les taux moyens d'évolution de la largeur des plages et de la ligne de rivage exprimés en m/an peuvent cacher des valeurs extrêmes. C'est pourquoi, il peut arriver qu'un secteur présentant la même tendance évolutive soit divisé en sous-secteurs présentant des différences nettes d'évolutions.

#### II.5. Les sources d'erreurs et leur estimation

Au cours d'une étude d'évolution de la ligne de rivage, les principales sources d'incertitude estimables sont essentiellement fonction de cinq paramètres : précision des documents de référence, précision du repérage des amers sur les photographies, erreurs liées aux modèles polynomiaux utilisés par le logiciel, erreurs sur la position exacte du trait de côte lors de l'extraction manuelle et erreurs liées aux fluctuations saisonnières du trait de côte (Dolan *et al.*, 1991 ; Durand, 1999). Lors du géoréférencement, les erreurs liées à la résolution du scannage, à la précision des documents de référence, et au repérage des amers sur les photographies aériennes sont prises en compte par le

programme et exprimées par une erreur moyenne quadratique (RMS). Cette erreur multipliée par la résolution donne l'incertitude liée à la correction géométrique en mètres (Samat, 2007) qui est ramenée à  $\pm 1$  pixel (Dolan *et al.*, 1991; Durand, 2000). Elle est égale à 2 pixels si l'on compare deux images calées l'une par rapport à l'autre (Faye, 2010). Pour notre étude, les photographies aériennes ont été redressées avec un RMS égal à 0,5 et leur résolution fixée à 1. Toutefois, la résolution de l'image SPOT de référence a été considérée pour le calcul d'erreur, afin de tenir compte des facteurs ciaprès.

Les photographies aériennes traitées dans cette étude ont été obtenues en saison sèche en dehors d'événements exceptionnels comme les tempêtes, les périodes de fortes houles, etc. De plus, les côtes sénégalaises sont des côtes micro-tidales à marnage faible (inférieur à 2 m). Au niveau de la Petite Côte, les houles ne sont pas fortes en saison sèche. Ce qui nous a autorisé à négliger l'effet de la marée, compte tenu de l'échelle des images. La marge d'erreur est également fonction de la précision de la digitalisation du trait de côte qui elle-même est fonction de l'expérience du photo-interprète et de son appréciation de la ligne de rivage considérée, laquelle est aussi conditionnée par la résolution et la qualité radiométrique des images (Moore, 2000 ; Faye, 2010) et la connaissance du terrain.

Finalement, deux erreurs ont été évaluées : l'erreur liée au géoréférencement et celle liée à la digitalisation de la ligne de rivage. Cette dernière a été estimée à  $\pm 4$  m pour la photographie aérienne de 1980 et à  $\pm 3$  m pour les autres images dont le contraste est meilleur, et ceci après une reprise de la digitalisation plusieurs fois (Coyne *et al.*, 1999). Il en résulte une marge d'erreur de  $\pm 17$  m pour la période 1954-1980 et 1980-1997, soit respectivement  $\pm 0,65$  m/an et  $\pm 1$  m/an. Cette marge d'erreur passe à  $\pm 8$  m ( $\pm 0,88$ m/an) pour 1997-2006 et à  $\pm 28$  m pour l'ensemble la période d'étude (1954-2006), soit  $\pm 0,54$  m/an (tableau 10).

Vu le faible pourcentage des taux moyens compris dans la marge d'erreur dans chaque période, ces taux ont été utilisés dans le calcul des taux moyens par secteur dans la mesure où leur influence était minime voire nulle.

Période	Source d'erreur		Marge d'erreur (m)
	Redressement des images (Erreur RMS)	1954	± 5
1954-1980		1980	± 5
1951 1960	Digitalisation de la ligne de rivage	1954	± 3
		1980	± 4
	Marge d'erreur		± 17
	Redressement des images (Erreur RMS)	1980	± 5
1980-1997		1997	± 5
	Digitalisation de la ligne de rivage	1980	± 4
		1997	± 3
	Marge d'erreur	± 17	
	Redressement des images (Erreur RMS)	1997	± 2
1997-2006	Digitalisation de la ligne de rivage	1997	± 3
		2006	± 3
	Marge d'erreur		± 8
1954-2006	Marge d'erreur (régression linéaire)		± 28

Tableau 10 : Estimation de la marge d'erreur globale de chaque période d'étude

### **CHAPITRE 3:**

### EVOLUTION MORPHO-SEDIMENTAIRE DU LITTORAL DE RUFISQUE

Pour comprendre la morpho-dynamique des plages du littoral rufisquois, il est nécessaire de connaître les processus physiques qui contrôlent la dynamique des courants et, par conséquent, le transport sédimentaire. L'étude de ces mécanismes est actuellement très avancée dans les pays développés. Au Sénégal notamment, il reste encore très difficile de les appréhender à cause d'une non réactualisation des études antérieures (caractéristiques des facteurs hydrodynamique) et/ou d'une absence de données *in situ* dans de nombreux secteurs même précaires. Cela, d'autant plus que la dynamique littorale est complexe, de par la multitude des processus en jeu et de par leur variabilité spatio-temporelle, surtout dans un contexte d'élévation du niveau marin. Cependant, les caractéristiques morpho sédimentaires de ce littoral ayant fait l'objet de travaux antérieurs, la présente étude devra nous renseigner sur une évolution de ces caractéristiques.

Ce chapitre présente les résultats obtenus dans le cadre du suivi morpho sédimentaire annuel à partir de la méthodologie décrite ci-dessous. Il présente les résultats d'analyse des levés topographiques des profils de plage effectués durant l'année 2005-2006, avec une description de l'analyse volumétrique des mouvements verticaux et d'une analyse des sédiments de plage basée sur des paramètres décrits dans la méthodologie.

Trois objectifs sont visés dans ce travail :

- mieux cerner les caractéristiques et déterminer les tendances générales de l'évolution saisonnière ou non des mouvements verticaux des sédiments de plage ;

- mettre en évidence le caractère évolutif ou non des caractéristiques morpho sédimentaires des plages ;

- procéder à une étude comparative avec les travaux de Niang Diop (1995), notamment sur l'impact des ouvrages de protection sur l'évolution morpho sédimentaire.

#### I. Analyse morpho-sédimentaire des plages

#### **I.1. Profil 1 (P<sub>1</sub>)**

Le profil P1 est situé à une centaine de mètres au Nord-Ouest de la falaise du Cap des Biches en allant vers Mbao. A cet endroit, la falaise est constituée de marnes feuilletées

92

de l'Yprésien, d'une hauteur de 2 m.

#### I.1.1. Analyse des données morphologiques

#### I.1.1.1. Caractéristiques morphologiques

Cette plage est marquée par l'absence de haute plage durant toute la période d'étude sauf au mois de février. L'estran, limité par une falaise d'une hauteur moyenne de 2 m, a une largeur moyenne de 26 m et sa pente, peu variable, est de 0,07 en moyenne (tableau 11).

La plage sous-marine a une largeur moyenne de 15 m et sa pente moyenne est de 0,03, plus faible que celle de l'estran et peu variable. Le profil présente une allure généralement concave à rectiligne (figure 38). Cette concavité est généralement le fait d'une encoche présente à la base de la falaise qui matérialise son recul. Cette érosion de la falaise est accentuée par une intensification de la réflexion des vagues sur celle-ci, intensification lié à l'élévation du niveau de la mer.

De juillet à octobre, on a trouvé des blocs de basaltes et de calcaires à la base de la falaise (photo 13) et des algues en janvier 2006.

L(m) = largeur en mètres ; P = pente sous forme tanß et H = hauteur de la falaise									
	Falaise	Est	ran	Plage sous-marine		Forme du profil			
Mois	H (m)	L (m)	P (tanß)	L (m)	P (tanß)				
juin-2005	2,9	22	0,06	19	0,02	Concave- rectiligne			
juillet	2,4	30	0,04	14	0,02	Concave- rectiligne			
août	1,7	13	0,13	2	0,04	Concave			
septembre	2	31	0,05	11	0,03	Concave- rectiligne			
octobre	1,9	27	0,04	20	0,03	Rectiligne			
novembre	1,94	29	0,05	15	0,03	Rectiligne -concave			
décembre	1,6	27	0,06	12	0,05	Rectiligne -concave			
janvier 2006	1,6	13	0,07	17	0,04	Concave- rectiligne			
février	2	37	0,05	14	0,04	Rectiligne			
mars	1,6	32	0,06	12	0,05	Rectiligne			
avril	1,4	23	0,08	14	0,04	Rectiligne			
mai	1,7	36	0,06	20	0,03	Concave-rectiligne			
juin 2006	1,7	16	0,10	21	0,02	Rectiligne -concave			
Moyenne	2	26	0,07	15	0,03	Concave- rectiligne			

Tableau 11 : Principales caractéristiques morphologiques du profil P1





H (m) =hauteur en mètres; L (m) = longueur en mètres ; F = Falaise ; E = estran ; Psm = plage sous-marine



Photo 13 : Vue du profil  $P_1$  montrant la présence de blocs de calcaires et de basaltes au pied de la falaise du Cap des Biches en période d'érosion (photo du 19 octobre 2005)

#### I.1.1.2. Evolution des mouvements verticaux

Les mouvements verticaux de ce profil sont caractérisés par l'alternance de deux grandes périodes : une période d'accumulation qui va de juin 2005 à janvier 2006 suivie d'une période d'érosion située entre février et juin 2006 (tableau 12; figure 39). Durant ces périodes, l'ensemble du profil est affecté par deux mouvements de grande ampleur.

Périodes	Estran = plage	Plage sous-
	aérienne	marine
juin -juillet 2005	+2,39	+3,14
juillet –août	-3,90	/
août –septembre	+4,73	/
septembre –octobre	+9,15	+4,45
octobre –novembre	-12,85	-3,04
novembre –décembre	+5,77	-0,89
décembre –janvier	+2,23	+0,49
janvier –février	-5,36	/
février –mars	-1,74	-1,07
mars –avril	-3,96	-0,28
avril –mai	+7,34	/
mai- juin	-14,93	/
juin 2005-juin 2006	-6,64	-7,41

Tableau 12 : Evolution morphologique mensuelle du profil  $P_1$ (Mouvements verticaux exprimés en m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage)



Figure 39 : P<sub>1</sub>- Comparaison des profils mensuels de plage H (m) =hauteur en mètres; L (m) = longueur en mètres ; F = falaise ; E = estran ; Psm = plage sous-marine

- La période d'accumulation, établie de juin 2005 à janvier 2006, est interrompue, entre octobre et novembre, par une érosion modérée (- 3,90 m<sup>3</sup>.m<sup>-1</sup>) à forte (- 12,85 m<sup>3</sup>.m<sup>-1</sup>). L'accumulation la plus importante a été notée entre septembre et octobre 2005 avec un taux de + 9,15 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup>sur l'estran.

- La période d'érosion, de janvier à juin 2006 fait apparaître au pied de la falaise, des blocs de calcaires mélangés à des blocs de basalte (photo 13). La plus forte érosion est enregistrée entre mai et juin 2006 (- 14,93 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage). L'accumulation notée entre avril et mai (+ 7,34 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage), résulterait d'une arrivée massive de coquilles de mollusques sur l'estran, objet d'une exploitation particulière le long du littoral, entre Mbao et Diokoul. Donc il ne devait pas y avoir accumulation. Cependant, il faut noter que ces accumulations issues de processus naturels et dynamiques offrent au littoral une protection efficace contre les agents d'érosion tels que les vagues, le vent et les eaux de ruissellement. Mais, leur exploitation comme matériaux de construction ou à d'autres fins, fragilise la plage et constitue ainsi un facteur d'érosion.

Le profil  $P_1$  montre un bilan annuel négatif, avec des taux de - 6,64 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage sur l'estran et de -7,41 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage sur la plage sous-marine.

#### I.1.2. Analyse des paramètres sédimentologiques

Les sédiments de cette plage sont des sables fins à très fins  $(106 < Mz < 229 \ \mu m)$  (tableau 13) à l'exception des sables moyens notés sur la haute plage en juin 2006. Ils sont bien à très bien classés (0,24< Sig < 0,49), mésokurtiques, sauf en octobre où on trouve des sédiments leptokurtiques sur le bas estran.

Ce sont des sédiments dont les pourcentages de carbonates sont compris entre 9,8 et 32,53 % (annexe). Leur skewness peut être positif ou négatif. Des sédiments bimodaux ont été trouvés sur la plage sous-marine en décembre avec un mode fin principal de 125  $\mu$ m et un mode secondaire grossier de 1000  $\mu$ m.

En général, l'augmentation de la granulométrie s'accompagne d'une détérioration du classement alors qu'une diminution accompagne son amélioration. Le grain moyen est très variable entre juin et décembre 2005. A partir de février, on observe une

augmentation régulière de celui-ci corrélativement à la détérioration du classement, moment qui correspond à la période d'érosion.

			Plage sous-marine						
Mois	Hau	ite plage	Haut	Haut estran		Bas Estran		Déferlement	
	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	
juin 2005			0,31	157	0,30	152	0,3	149	
août			0,38	200	0,42	196	0,36	192	
octobre			0,34	141	0,49	138	0,3	106	
décembre			0,36	182	0,30	152	Sédiments bin	ıodaux	
Février 2006	0,33	188	0,30	152	0,24	129	0,27	110	
avril			0,34	185	0,30	162	0,28	144	
juin 2006			0,38	229	0,43	171	0,36 153		
Moyenne		/	0,33	178	0,35	157	0,31	142	

Tableau 13 : Variations de la moyenne Mz (en  $\mu$ m) et de l'indice de classement Sig du Profil P<sub>1</sub> selon les unités morphologiques

Sur le bas estran, le grain moyen est peu variable pendant la saison sèche. Durant la période d'étude, la granulométrie maximale (266  $\mu$ m) est enregistrée à la limite estran - plage aérienne (correspondant à la limite du jet de rive) au mois de juin 2006 durant la période d'accumulation. Le grain moyen minimal est noté en février sur la zone de déferlement (tableau 14).

La granulométrie moyenne le long du profil diminue de l'estran vers la zone de déferlement (figure 40). La granulométrie du bas estran subit une variation saisonnière importante mais s'affine en saison sèche. Sur cette unité, le grain moyen est maximal au mois d'août (figure 41)



Figure 40 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil P1

#### HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

Tableau 14 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil  $P_1$  Avec  $P_1$  et  $P_2$ pourcentages principal et secondaire et  $M_1$  et  $M_2$  modes principal et secondaire

Indices	juin 2005	août	octobre	décembre	février	avril	juin 2006					
		2 <b>2 0 0 0</b>		$199 \cdot 9^{2} - 9^{2}$	2006	$\mathbf{N} \cdot \mathbf{V} = 0 \cdot 0$						
Haute plage levrier 2000 MZ ( $\mu$ m) = 188; Sig = 0.55; Sk; = 0.09; K = 0.96												
Laisse de haute mer												
Mz (µm)	171	209	158	193	181	202	266					
Sig	0,30	0,37	0,30	0,37	0,32	0,32	0,34					
Sk	0,09	1,13	0,1	0,07	0,08	0,13	0,06					
K	1,02	1,12	0,99	1,05	0,87	1,03	1,12					
			Mi-e	estran								
Mz (µm)	142	190	123	171	123	167	192					
Sig	0,31	0,38	0,37	0,34	0,27	0,35	0,41					
Sk	0,08	- 0,02	0,03	0,03	0,08	0,05	0,07					
K	1,14	1,11	1,16	0,99	0,92	1	0,97					
			Bas e	estran								
Mz (µm)	152	196	138	152	129	162	171					
Sig	0,3	0,42	0,49	0,30	0,24	0,30	0,43					
Sk	0,15	0,04	- 0,19	- 0,08	0,21	0,05	- 0,18					
K	0,9	1,04	1,74	1,06	0,83	1,01	1,01					
			Défer	lement								
Mz (µm)	149	192	106	Sédiments	110	144	153					
Sig	0,3	0,36	0,30	bimodaux; $M_1=125$ µm	0,27	0,28	0,36					
Sk	0,05	0,08	0,17	P <sub>2</sub> =48,65%	0,12	- 0,02	- 0,11					
K	0,96	1,02	1,25	$M_2 = 1000$	1,59	1,23	1,12					
				P <sub>1</sub> =0,02%								



Figure 41 : Evolution de la moyenne Mz (en  $\mu$ m) au niveau du bas estran de P<sub>1</sub>

Le diagramme de dispersion Mz-sigma permet de distinguer (figure 42) :

- les sables du haut estran sont les plus grossiers et restent bien à très bien classés. Leur pourcentage de carbonates varie entre 10,33 et 21,8% et le classement

s'améliore avec la diminution de la granulométrie ;

- les sables de la zone de déferlement sont les mieux classés et les plus fins. Leur pourcentage en  $CaCO_3$  varie entre 9,8 et 25,33% ;

- les sables du bas estran, subissent le plus de variation mais sont aussi les moins bien classés. Leur pourcentage en  $CaCO_3$  varie entre 15,53 et 32,66%.



Figure 42 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques du profil P<sub>1</sub> HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

#### **I.2. Profil 2 (P<sub>2</sub>)**

L'implantation de ce profil sur le canal ne nous a pas permis d'analyser les caractéristiques morphologiques de la haute plage, cependant, l'analyse des caractéristiques sédimentologiques a pu être réalisée.

#### I.2.1 Analyse des données morphologiques

#### I.2.1.1. Caractéristiques morphologiques

Ce profil présente une plage aérienne très large, de l'ordre de 52 m de moyenne, avec une pente de faible valeur 0,03 et presque invariable durant toute la durée de notre étude (tableau 15). Le jet de rive ne dépasse l'extrémité du canal qu'au moment des périodes de fortes houles (mois de juin, août et octobre), avec un dépassement de cette extrémité de 2,6 m en juin et de 4 m en octobre.

Maia	Es	stran	Plage sou	is-marine	Forme du profil
IVIOIS	L (m)	P (tanß)	L (m)	P (tanß)	
juin 2005	58	0,03	11	0,05	Convexe
juillet	60	0,03	14	0,04	Rectiligne
août	51	0,02	11	0,04	Conc-convexe
septembre	36	0,04	32	0,01	Conv-concave
octobre	48	0,03	11	0,05	Rectiligne
novembre	48	0,03	16	0,05	Rect-conv
décembre	51	0,02	/	/	Rectiligne
janvier 2006	50	0,03	18	0,05	Concav-convexe
février	57	0,03	14	0,05	Concav-convexe
ars	75	0,03	7	0,06	Concav-convexe
avril	40	0,03	31	0,03	Convexe
mai	52	0,03	20	0,04	Convexe
juin 2006	52	0,03	12	0,03	Convexe
Moyenne	52	0,03	16	0,05	Convexe

Tableau 15 : Principales caractéristiques morphologiques du profil P2

L(m) = largeur en mètres ; P = pente sous forme tanß

La largeur de la plage sous-marine est en moyenne de 16 m et sa pente moyenne (0,05) est supérieure à celle de l'estran.

Des minéraux lourds ont été observés sur cette plage en novembre et décembre et des croissants de plage en octobre et décembre, à environ 100 m du canal au nord-ouest.

La forme générale du profil de plage est convexe à rectiligne, avec des profils souvent composites (figure 43).



Figure 43 : P<sub>2</sub>. Profils mensuels de plage H (m) =hauteur en mètres; L (m) = longueur en mètres ; C = canal ; E = estran ; Psm = plage sous-marine

#### I.2.1.2. Evolution des mouvements verticaux

En termes d'évolution verticale mensuelle, ce profil est en accumulation. La sédimentation y a été interrompue par deux phases d'érosion. La première, de juillet à septembre culmine sur la plage aérienne entre août et septembre avec un taux d'érosion  $de - 7,2 \text{ m}^3$ . m<sup>-1</sup> (tableau 16, figure 44). La deuxième, entre décembre et janvier, a un

taux plus important de - 15,84 m<sup>3</sup>. m<sup>-1</sup>. L'accumulation a atteint son maximum entre mars et avril 2006 avec un taux de + 10,73 m<sup>3</sup>. m<sup>-1</sup>sur l'estran et un taux de + 5,62 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage sur la plage sous-marine.

Cependant, le rejet de l'eau de refroidissement de la centrale sur la plage aérienne a des effets sur l'évolution de la sédimentation de l'estran. En effet, elle accentue le démaigrissement en cas d'érosion et diminue l'amplitude de l'accumulation dans le cas inverse par érosion.

Ce profil P<sub>2</sub> présente un bilan annuel positif avec un taux de + 1,26 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> sur l'estran et de + 0,29 m<sup>3</sup>. m<sup>-1</sup> sur la zone de déferlement.

-			
Périodes	Estran	Plage sous-marine	Total
juin -juillet 2005	+ 0,28	+ 0,77	+ 1,05
juillet –août	- 2,51	/	/
août –septembre	- 7,2	- 4,24	- 11,44
septembre –octobre	+ 0,23	+ 4,97	+ 5,2
octobre –novembre	+ 1,37	+ 0,76	+ 2,13
novembre -décembre	+ 8,39	+ 1,41	+ 9,8
décembre –janvier	- 15,84	/	- 15,84
janvier –février	+ 2,01	- 1,9	+ 0,11
février –mars	0	0	0
mars –avril	+ 10,73	+ 5,62	+ 16,35
avril –mai	+ 4,59	- 3,23	+ 1,36
mai- juin	+ 6,62	+ 1,81	+ 8,43
juin 2005-juin 2006	+ 1,26	+ 0,29	+ 1,55

Tableau 16 : Evolution morphologique mensuelle du profil  $P_2$ (Mouvements verticaux exprimés en m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage)



Figure 44 : P<sub>2</sub>-Comparaison des profils mensuels de plage H (m) =hauteur en mètres;

L (m) = longueur en mètres ; C = canal ; E = estran ; Psm = plage sous-marine

#### I.2.2. Analyse des données sédimentologiques

Les résultats des analyses granulométriques montrent que les sédiments prélevés sur l'ensemble des unités morphologiques sont des sables fins ; le grain moyen variant entre 131  $\mu$ m et 229  $\mu$ m. Ces sédiments sont dans l'ensemble moyennement bien à très bien classés (0,32 < Sig < 0,62) mésokurtiques, à skewness positif sur la plage aérienne (tableau 17). Le pourcentage de carbonates varie entre 6,93 et 24 % (annexe).

Cette plage se caractérise par l'homogénéité des sédiments, surtout aux mois d'août et de décembre, où nous avons la même classe modale (200  $\mu$ m) pour toutes les unités morphologiques. Des sédiments bimodaux ont été notés sur le bas estran et la plage sous-marine en décembre 2005, avec un mode principal fin de 200  $\mu$ m et un mode secondaire grossier de 1000  $\mu$ m (tableau 18).

Mois			Plage so	ous-marine					
101015	Haute	e plage	Haut	Haut estran		Bas Estran		Déferlement	
	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	
juin 2005	0,38	213	0,37	185	0,62	206	0,53	131	
Août	0,53	172	0,39	194	0,35	183	0,38	222	
Octobre	0,33	193	0,36	181	0,43	210	0,47	163	
Décembre	0,37	196	0,38	211	1	nd		nd	
février 2006	0,41	218	0,40	194	0,42	187	0,34	177	
Avril	0,41	210	0,41	193	0,28	133	0,42	229	
Juin	0,38	195	0,36	202	0,44	229	0,40	186	
Moyenne	0,40	200	0,38	194	0,42	192	0,42	184	

Tableau 17 : Variations de la moyenne Mz (en  $\mu$ m) et de l'indice de classement Sig du profil P<sub>2</sub> selon les unités morphologiques nd = non défini

L'évolution de la granulométrie moyenne le long du profil montre une diminution, de la haute plage vers la plage sous-marine (figure 45), avec une très faible variation entre le haut estran et le bas estran. Même si c'est la haute plage qui enregistre la granulométrie la plus grossière, la variation de celle-ci par rapport aux autres unités, à l'exception de la zone du déferlement, reste faible. L'évolution bimensuelle de la moyenne Mz du bas estran montre que celle-ci atteint son maximum en juin et son minimum au mois d'avril

(figure 46), évolution comparable à celle de  $P_1$ .

Les valeurs du coefficient d'asymétrie sont supérieures à 0 (zéro) sur la plage aérienne sauf au mois de février où elles sont négatives sur l'estran. Elles le sont également sur la zone de déferlement en juin et octobre 2005. Les valeurs de K varient entre 0,82 et 1,23 ; cette variation étant maximale sur le bas estran.



Figure 45 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil  $P_2$ HP = haute plage HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement



Figure 46 : Evolution de la moyenne Mz (en  $\mu$ m) du bas estran de P<sub>2</sub>

Le diagramme de dispersion Mz-sigma, ne permet pas de différencier les sédiments des différentes unités morphologiques (figure 47), ce qui confirme une fois de plus leur caractère homogène; l'élément de distinction est ici l'indice de classement.
Indices	juin 2005	août	octobre	décembre	février 2006	avril	juin 2006
	2005		Haute	e plage	2000		2000
Mz(µm)	213	172	193	196	218	210	195
Sig	0,38	0,53	0,33	0,37	0,41	0,41	0,38
Sk	0,1	0,35	0,16	0,19	0,07	0,12	0,15
K	1,12	1,08	1	1,02	0,98	0,98	1,00
			Laisse de	haute mer			-
Mz(µm)	183	200	182	229	224	198	210
Sig	0,41	0,45	0,36	0,37	0,42	0,39	0,37
Sk	0,05	0,28	0,1	0,07	0,11	0,15	0,14
K	1	1,23	0,92	1,09	1,23	1,03	1,04
			Mi-	estran			
Mz(µm)	187	188	179	193	164	187	193
Sig	0,32	0,33	0,35	0,39	0,38	0,44	0,35
Sk	0,2	0,24	0,15	0,24	- 0,06	0,12	0,20
K	0,85	0,86	0,9	0,98	1,01	0,98	1,00
			Bas	estran			
Mz(µm)	206	183	210	Sédiments	187	133	229
Sig	0,62	0,35	0,43	bimodaux	0,42	0,28	0,42
Sk	0,08	0,22	0,20	$M_1 = 200$	0,11	0,25	0,07
K	0,92	0,82	1,04	P <sub>1</sub> =30,03%	0, 93	1,22	1,11
				$M_2 = 1000$			
				P <sub>2</sub> =0,03%			
	1	1	Défer	lement	l.	1	I
Mz(µm)	131	222	163	Sédiments	177	229	186
Sig	0,53	0,38	0,47	bimodaux	0,34	0,42	0,40
Sk	- 0,08	0,16	- 0,01	$M_1 = 200 \ \mu m$	n 0,09	0,07	0,04
K	1,13	0,98	1,06	P <sub>1</sub> =28,88%	0,93	1,11	1,01
				$M_2 = 1000 \mu m$	n		
				$P_2=0,01\%$			

Tableau 18 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil P2

Avec P1 et P2 pourcentages principal et secondaire et M1 et M2 modes principal et secondaire



Figure 47 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques du profil P<sub>2</sub> HP = haute plage ; HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

## **I.3. Profil 3 (P<sub>3</sub>)**

Il est situé à l'extrémité nord-ouest du mur mixte en gabions surmonté d'un mur en béton qui protège le cimetière musulman de Diokoul, juste en face du mur de clôture du cimetière.

# I.3.1. Analyse des données morphologiques

# I.3.1.1. Caractéristiques morphologiques

La plage aérienne est relativement courte, sa largeur moyenne est de 38 m et sa pente peu (0,4 à 0,10). Elle est de 0,06 en moyenne. Elle est principalement constituée d'un estran, large en moyenne de 34 m, avec une pente moyenne de 0,06 peu variable (tableau 19).

Mois	Haute	plage	Es	tran	Plage	aérienne	Plage	e sous- rine	Forme du profil
	L (m)	P (tanß)	Concave						
juin 2005	4	0,24	24	0,06	28	0,09	13	0,03	Concave
Juillet	2	0,15	33	0,06	36	0,06	16	0,07	Concave
Août	2	0,13	54	0,04	56	0,04	2	0,18	Concave
Septembre	3	0,12	41	0,05	46	0,06	13	0,04	Concave
Octobre	5	0,10	31	0,06	36	0,06	16	0,03	Concave
Novembre	3	0,29	29	0,06	32	0,04	17	0,04	Concave
Décembre	4	0,18	33	0,06	37	0,05	15	0,04	Concave
janvier 2006	7	0,14	39	0,04	46	0,06	4	0,15	Concave
Février	7	0,15	35	0,05	42	0,06	13	0,04	Concave
Mars	3	0,21	42	0,05	45	0,06	10	0,04	Concave
Avril	3	0,13	30	0,05	33	0,07	18	0,05	Concave
Mai	4	0,21	27	0,06	31	0,08	19	0,04	Concave
juin 2006	2	0,26	23	0,09	25	0,10	17	0,02	Concave
Moyenne	4	0,19	34	0,06	38	0,06	13	0,06	Concave

Tableau 19 : Principales caractéristiques morphologiques du profil  $P_3$ L (m) = largeur en mètres ; P = pente sous forme tanß

La haute plage, très étroite, mesure 4 m en moyenne (figure 48), mais sa pente moyenne (0,19) est plus forte que celle de l'estran. Cette haute plage s'adosse à un cordon littoral

couvert d'une végétation de figuiers de Barbarie par l'intermédiaire d'une microfalaise. Les fortes pentes observées en novembre (0,29) et décembre (0,18) sont consécutives respectivement à une forte érosion et à une forte accumulation. Au cours de la période maximale d'érosion notée en fin juillet et août, on peut observer des blocs de calcaires et surtout de basaltes bien arrondis, à la limite supérieure de la haute plage, au contact du cordon littoral.



Figure 48 :  $P_3$  Profils mensuels de plage H (m) =hauteur en mètres; L (m) = longueur en mètres ; HP = haute plage ; E = estran ; Psm = plage sous-marine

La plage sous-marine est caractérisée par une faible pente (0,06), identique à celle de la plage aérienne et, par une largeur moyenne de 13 m.

La forme générale des profils est concave avec un talus à la limite située entre l'estran et la plage sous-marine en août

# I.3.1.2. Evolution des mouvements verticaux

Les mouvements verticaux de la plage aérienne se traduisent par deux déplacements importants : une érosion maximale entre juillet et août avec -  $16,81 \text{ m}^3$  par mètre linéaire de plage et une accumulation maximale de + 9,95 m3 par mètre linéaire de plage entre janvier et février (tableau 20, figure 49)

En outre, une érosion généralisée sur tout le profil est enregistrée entre avril et juin 2006.

Périodes	Haute plage	Estran	Plage	Plage sous-
			aérienne	marine
juin -juillet 2005	+ 0,42	+ 7,02	+ 7,44	+ 1,80
juillet –août	- 1,4	- 15,41	- 16,81	/
août- septembre	/	+ 9,7	+ 9,7	- 0,59
septembre- octobre	/	+ 5,21	+ 5,21	+ 1
octobre –novembre	- 0,03	+ 2,53	+ 2,5	+ 0,47
novembre –décembre	+ 0,17	- 1,16	- 0,99	0
décembre – janvier 2006	- 1,16	- 9,74	- 10,9	- 0,74
janvier –février	/	+ 9,95	+ 9,95	/
février –mars	0	0	0	0
mars –avril	+ 0,53	+ 2,71	+ 3,24	- 0,69
avril –mai	- 0,65	- 6,53	- 7,18	- 2,32
mai- juin	- 0,4	- 4,97	- 5,37	- 1,49
Bilan	- 0,39	- 2,85	- 3,24	- 2,03

Tableau 20 : Evolution morphologique mensuelle du profil P<sub>3</sub> Mouvements verticaux exprimés en m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage

De septembre à avril, nous avons une phase d'accumulation, interrompue entre décembre et janvier par une forte érosion. Les deux faits permettent de conclure à

l'existence de deux grandes périodes sur la plage aérienne :

- une phase d'érosion qui va de mai à août qui coïncide avec l'hivernage ;
  - H (m) 1 m HP 10 m THE OWNER OF THE OWNER OF juin 2005 - juillet Juillet ō juillet - août and the second - septembre Psm août Ó HP Ē Psm septembre - octobre HP 0 E octobre - novembre 0 novembre - décembre Psm 0 embre janvier 0 Gilling Street P Psm HP janvier - février  $\infty$ Ó février - mars E Psm mars - avril 0 E Psm avril - mai HIP 0 E Psm mai - juin o HIP juin 2005 - juin 2006 Erosion Sédimentation 1111 HP = Haute plage = Estan Psm = Plage sous marine E
- une période d'accumulation, de septembre à avril, coïncidant avec la saison sèche.

Figure 49 : P<sub>3</sub>-Comparaison des profils mensuels de plage H (m) =hauteur en mètres; L (m) = longueur en mètres ; HP = haute plage ; E = estran ; Psm = plage sous-marine Au cours de cette période de sédimentation qui a culminé entre janvier et février 2005, nous avons noté une phase d'accalmie entre février et mars. Cette accumulation a été interrompue entre décembre et janvier par une phase d'érosion de -10,9 m3 par mètre linéaire de plage.

Le bilan annuel des mouvements verticaux est négatif sur toutes les unités morphologiques. La forme concave du profil résulterait de la prédominance de l'érosion sur l'estran qui enregistre le bilan négatif le plus important.

#### I.3.2. Analyse des données sédimentologiques

Les sédiments, constitués de sables fins à très fins (102  $\mu$ m < Mz < 264  $\mu$ m), sont moyennement bien à très bien classés (0,24 <Sig < 0,67), mésokurtiques et à skewness. très variables mais à dominante positive (tableaux 21 et 22).

Les pourcentages de carbonates sont compris entre 10,46 et 39,6 % (tableau annexe). Des sédiments bimodaux ont été enregistrés sur le bas estran et la plage sous-marine en octobre, avec un mode principal fin de 125  $\mu$ m et un mode secondaire grossier, de 500  $\mu$ m sur le bas estran et de 1250  $\mu$ m sur la plage sous-marine.

L'évolution de la granulométrie le long du profil montre une baisse de celle-ci, de la haute plage à la plage sous-marine (figure 50). La granulométrie la plus fine a été notée en décembre sur la plage sous-marine et en février sur la plage aérienne durant la période d'accumulation.

En août, octobre, décembre 2005 et avril 2006, le sorting index croît du haut de plage vers la zone de déferlement. Pour les autres mois, notamment février et juin 2006, il diminue vers le bas estran pour ensuite croître vers la zone de déferlement. En juin 2005, cet accroissement commence sur le bas de plage.

Les valeurs de SK varient entre - 0,02 et + 0, 28 mais sont rarement négatives. Cependant, on note une symétrie (SK=0) sur la haute plage au mois de juin 2005, sur la laisse de haute mer en août et décembre et sur le bas estran en août.

			Plage	aérienne			Plage sou	is-marine	
Mois									
	Haute plag	Haute plage Haut estran			Bas Estran		Déferlem	Déferlement	
	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	
juin 2005	0,48	264	0,28	145	0,34	143	0,36	123	
Août	0,47	218	0,37	205	0,47	186	0,67	219	
Octobre	0,37	184	0,31	152	Sédiments	bimodaux	0,3	102	
Décembre	0,52	238	0,32	156	0,26	137	Sédimen	ts bimodaux	
Février	0,35	186	0,34	138	0,24	130	0,31	117	
Avril	0,37	195	0,30	159	0,30	163	0,28	133	
juin 2006	0,38	196	0,36	162	0,33	143	0,34	130	
Moyenne	0,42	212	0,32	160	0,32	150	0,37	137	

Tableau 21 : Variations de la moyenne Mz (en  $\mu$ m) et de l'indice de classement (sig) du profil P<sub>3</sub> selon les unités morphologiques

Tableau 22 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil  $P_3$  Avec  $P_1$  et  $P_2$ pourcentages principal et secondaire et  $M_1$  et  $M_2$  modes principal et secondaire

Indices	juin	août	octobre	décembre	Février	avril	juin
	2005				2006		2006
	-		Haute	plage		-	-
Mz(µm)	264	218	184	238	186	195	196
Sig	0,48	0,47	0,37	0,52	0,35	0,37	0,38
Sk	0	0,02	- 0,06	0,06	0,02	0,04	- 0,03
K	1,24	1,23	1,15	1,07	1,03	1,06	1,07
			Laisse de h	aute mer			
Mz(µm)	158	225	159	179	147	168	192
Sig	0,27	0,42	0,29	0,36	0,42	0,34	0,43
Sk	0,23	0	0,11	0	- 0,05	- 0,02	0,06
K	0,89	1,14	0,99	1,05	0,98	0,98	0,99
			Mi-es	tran			
Mz(µm)	132	184	144	132	128	150	132
Sig	0,28	0,31	0,33	0,28	0,26	0,27	0,30
Sk	0,18	0,11	0,09	0,08	0,28	- 0,07	0,15
K	1,13	0,98	1,35	1,02	0,90	1,11	1,13
			Bas es	stran			
Mz(µm)	143	186	Sédiments	137	130	163	143
Sig	0,34	0,47	bimodaux	0,26	0,24	0,30	0,33
Sk	0,1	0	$M_1 = 125 \mu m$	0,09	0,29	0,01	- 0,02
K	1,24	1,04	$P_1=26,6\%$ ; M =500µm	1,29	0,96	1,00	1,45
			$P_2=0.65\%$				
			Déferle	ement			
Mz(µm)	123	219	Sédiments	102	117	133	130
Sig	0,36	0,67	bimodaux	0,3	0,38	0,28	0,34
Sk	0,18	- 0,11	$M_1 = 125 \mu m$	0,25	0,11	0,25	0,11
Κ	0,99	0,93	$P_1=64,17\%;$	1,09	1,05	1,22	1,14
			P = 0.07%		-		
			12-0,0770,				

L'évolution mensuelle de la moyenne Mz du bas estran montre un maximum en août et un minimum en octobre (figure 51)

Le diagramme de dispersion Mz- sigma permet de distinguer trois ensembles (figure 52):

- les sables fins à très fins qui sont bien à très bien classés, majoritairement composés des sables de l'estran et de la zone de déferlement ;

- les sables moyens à fins de la haute plage qui sont dans l'ensemble bien classés et une partie des sables de la haute plage ;

- les sables les plus grossiers de la haute plage et du bas estran qui sont moyennement bien classés.



Figure 50 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil  $P_3$ HP= haute plage HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement



Figure 51 : Evolution de la moyenne Mz (en  $\mu m)$  du bas estran de  $P_3$ 



Figure 52 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques du profil  $P_3 HP$  = haute plage HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

# I.4. Profil 4 (P<sub>4</sub>)

Il est situé juste à l'extrémité sud du mur mixte qui protège le cimetière musulman de Diokoul (du côté du débarcadère). P3 et P4 encadrent le cimetière musulman de Diokoul. Au large, se trouvent les îlots de Khoniet.

#### I.4.1. Analyse des données morphologiques

#### I.4.1.1. Caractéristiques morphologiques

La largeur de la plage aérienne mesure 40 m en moyenne et sa pente moyenne est de 0,06. La haute plage, très courte (4 m en moyenne), disparaît aux mois d'août et de septembre. La pente de la haute plage est très variable, de l'ordre de 0,15 en moyenne (tableau 23).

L'estran constitue l'essentiel de la plage aérienne et présente, comme pour  $P_3$ , une pente faible, de 0,05 de moyenne. Il atteint sa largeur maximale au mois d'août. A noter que les fortes pluies qui se sont abattues au mois d'août avaient rompu le cordon sableux séparant le marigot de Diokoul de la mer.

La plage sous-marine est peu variable, tant en largeur qu'en pente. La largeur moyenne est de 15 m et sa pente moyenne de 0,04, est comparable à celle de la plage aérienne. Un talus a été observé à la limite entre l'estran et la zone de déferlement en juillet. La forme générale prédominante des profils de plage est concave. Les profils présentent souvent une convexité à hauteur du mur en béton (figure 53).

	L(m) = largeur en mètres; P = pente sous forme tanß;									
Mois	Haute pla	ge	Estran		Plage aé	rienne	Plage	sous-	Forme du profil	
							marine			
	L (m)	Р	L (m)	Р	L (m)	Р	L (m)	Р		
		(tanß)		(tanß)		(tanß)		(tanß)		
juin 2005	7	0,07	34	0,04	41	0,05	12	0,03	Conc-conv-con	
Juillet	3	0,03	27	0,07	30	0,06	18	0,04	Concav-conve	
Août	/	/	52	0,04	52	0,04	10	0,02	Concave	
Septembr	/	/	47	0,05	47	0,05	18	0,02	Concave	
e										
Octobre	2	0,13	41	0,05	43	0,05	20	0,02	Concave	
Novembre	3	0,05	37	0,05	40	0,05	21	0,03	Conc-conv-conc	
Décembre	3	0,09	38	0,04	41	0,05	18	0,03	Conc-conv-conc	
Janvier	7	0,14	39	0,04	46	0,06	4	0,15	Concave	
Février	7	0,15	35	0,05	42	0,06	13	0,036	Conv-conc-conv	
Mars	4	0,2	42	0,05	45	0,06	10	0,04	Conc-conv-conc	
Avril	3	0,30	30	0,05	33	0,07	18	0,05	Conv-concave	
Mai	4	0,21	27	0,06	31	0,08	19	0,04	Concave	
Juin	3	0,26	23	0,09	25	0,10	17	0,02	Conv-concave	
Moyenne	4	0,15	36	0,05	40	0,06	15	0,04	Concave	

Tableau 23 : Principales caractéristiques morphologiques du profil  $\mathrm{P}_4$ 





H (m) =hauteur en mètres; L (m) = longueur en mètres ; HP = haute plage ; E = estran ; Psm = plage sous-marine

### I.4.1.2. Evolution des mouvements verticaux

Il faut d'emblée noter l'importance des mouvements avec deux phases remarquables juin -juillet et octobre – novembre 2005.

L'évolution mensuelle des mouvements verticaux de ce profil se caractérise comme pour  $P_3$ , par une succession de deux périodes (figure 54; tableau 24):

- une période d'érosion, de mars à octobre 2005 au cours de laquelle, l'érosion maximale est notée entre juin et juillet 2005 avec un taux de - 13,16 m<sup>3</sup>. m<sup>-1</sup> par mètre linéaire de plage. Cette forte érosion expliquerait le basculement de l'extrémité du mur qui s'est produit durant le mois de juillet 2005. Cette période est interrompue entre août et septembre par une accumulation de + 5,21 m<sup>3</sup>. m<sup>-1</sup>.

- une période d'accumulation qui s'étend d'octobre à mars. Elle atteint un maximum de + 16,67 m<sup>3</sup>. m<sup>-1</sup> sur la plage aérienne entre octobre et novembre. Cette période a été elle aussi interrompue par une érosion entre décembre et janvier avec un taux de - 7,34 m<sup>3</sup>. m<sup>-1</sup> par mètre linéaire de plage sur la plage aérienne.

Périodes	Haute plage	Estran	Plage	Plage sous-
			aérienne	marine
juin -juillet 2005	- 3,08	- 12,08	- 13,16	- 9,25
juillet –août	- 0,66	+ 3,55	+ 2,89	+ 6,51
août- septembre	/	+ 5,21	+ 5,21	+1
septembre- octobre	/	- 2,54	- 1,54	- 2,13
octobre -novembre	+ 4,3	+ 12,37	+ 16,67	+ 10
novembre -décembre	- 0,15	- 1,65	- 1,8	- 1,62
décembre -janvier	- 0,29	- 7,05	- 7,34	- 2,6
janvier –février	+ 1,06	+ 8,78	+ 8,78	+ 2,26
février –mars	+ 1,31	+ 3,49	+ 4,8	+ 6,80
mars –avril	- 0,89	- 7,04	- 7,93	- 30,84
avril –mai	- 0,68	- 12,65	- 7,78	- 5,04
mai- juin	-1,08	- 10,6	- 11,68	- 3,85
Bilan	- 5,35	- 16,8	- 22,15	- 6,6

Tableau 24 : Evolution morphologique mensuelle du profil P<sub>4</sub> Mouvements verticaux exprimés en m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage)



Figure 54 : Comparaison des profils mensuels de plage (P<sub>4</sub>)

## I.4.2. Analyse des données sédimentologiques.

Les sédiments de cette plage sont des sables fins à très fins (96  $\mu$ m < Mz < 219  $\mu$ m) et mésokurtiques. Ils sont moyennement bien à très bien classés (0,25 <Sig < 0,55), à skewness variables (tableaux 25 et 26).

Mz décroît de la haute plage vers la zone de déferlement en juillet et décembre 2005 alors qu'aux mois d'août 2005 et juin 2006, on note un pic sur la haute plage et un deuxième sur le bas de plage.

Le Sk est négatif sur la haute plage sauf au mois d'août 2005, il l'est également sur la limite du jet de rive en octobre et de février à juin 2006. Sur la zone de déferlement, il varie peu, mais reste négatif en juin et août 2005.

Les pourcentages de carbonates varient entre 7,4 % et 35,13% (tableau annexe). Des sédiments bimodaux sont apparus sur le bas estran en octobre et décembre avec un mode principal très fin de 100  $\mu$ m et un mode secondaire grossier de 1000  $\mu$ m.

	1		united	norphorogra	aco						
Mois		Plage aérienne									
111015	Haute	e plage	Haut	estran	Bas	Estran	Déferlement				
	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz			
juin 2005	0,49	219	0,29	149	0,32	116	0,25	96			
Août	0,38	191	0,41	182	0,39	203	0,46	188			
octobre	0,43	187	0,41	137	Non	Sédiments	0,56	134			
					défini	bimodaux					
décembre	0,37	173	0,3	143	Non	Sédiments	0,33	101			
					défini	bimodaux					
février	0,36	174	0,33	136	0,37	116	0,54	205			
2006											
Avril	0,45	200	0,33	155	0,27	130	0,39	120			
juin 2006	0,43	179	0,41	160	0,37	344	0,43	276			
Moyenne	0,41	189	0,35	152	0,34	182	0,42	160			

Tableau 25 : Variations de la moyenne Mz (en µm) et de l'indice de classement sig du profil P<sub>4</sub> selon les unités morphologiques

Indices	juin 2005	août	octobre	décembre	février 2006	avril	juin 2006
			Haute	plage			
Mz(µm)	219	191	187	173	174	200	179
Sig	0,49	0,38	0,43	0,37	0,36	0,45	0,43
Sk	- 0,11	0,1	- 0,08	- 0,07	0,10	- 0,10	- 0,07
K	1,09	1,11	1,06	1,1	1,01	1,04	1,04
	1		Laisse de	haute mer			
Mz(µm)	163	187	176	159	165	174	183
Sig	0,3	0,43	0,45	0,32	0,36	0,38	0,47
Sk	0,1	0,04	- 0,13	0,01	- 0,02	- 0,10	- 0,13
K	1,03	0,92	1,18	1,06	1,10	1,29	1,11
			Mi-e	stran			1
Mz(µm)	124	176	97	126	106	135	137
Sig	0,28	0,38	0,36	0,28	0,31	0,29	0,36
Sk	0,16	0,1	- 0,07	0,18	0,16	0,14	0,06
K	0,91	0,95	1,02	0,93	1,29	0,17	1,14
			Bas e	estran			1
Mz(µm)	116	203	Sédiments bimodaux	Sédiments bimodaux	116	130	344
Sig	0,32	0,39	$M_1 = 100$	$M_1 = 100$	0,37	0,27	0,37
Sk	0,07	0,11	P <sub>1</sub> =32,22%;	$P_1 =$	0,23	0,01	0,08
K	0,94	1,05	$M_2 = 1000$	43,45%;	1,16	0,91	1,06
			$P_2=0,02\%$ ;	$M_2 = 1000$ $R_2 = 0.629/3$			
			Dáfarl	$F_2 = 0,0370,$			
Mz (µm)	96	188	134	101	205	120	276
Sig	0,25	0,46	0,55	0,33	0,54	0,39	0,43
Sk	- 0,07	- 0,06	0,02	0,06	0,04	0,01	0,03
K	1,04	1,07	1,22	1,12	0,97	1,10	1,03

 $Tableau\ 26: Variations\ moyennes\ des\ principaux\ indices\ granulométriques\ du\ profil\ P_4\ avec\ M_1\ et\ M_2\\ modes\ principal\ et\ secondaire\ (en\ \mu m)\ ;\ P_1et\ P_2\ pourcentages\ des\ modes\ principal\ et\ secondaire$ 

L'évolution de la granulométrie moyenne le long du profil montre que c'est sur la haute plage et le bas estran qu'on retrouve les sables les plus grossiers. L'estran est occupé par des sables très fins (figure 55). Au mois de juin 2005, le grain moyen croît de la plage aérienne vers le bas estran.



Figure 55 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil  $P_4$ HP = haute plage ; HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

L'évolution mensuelle de la moyenne Mz sur le bas estran montre deux pics granulométriques en août 2005 et en juin 2006 mais les sédiments les plus grossiers sont notés au cours de la période d'érosion. La granulométrie des sédiments en saison sèche est pratiquement invariante (figure 56).



Figure 56 : Evolution de la moyenne Mz (en  $\mu$ m) du bas estran de P<sub>4</sub>

Le diagramme de dispersion Mz-sigma (figure 57) comparativement à celui du profil  $P_1$  ne permet pas de distinguer les différentes unités morphologiques. On note un recouvrement de ces dernières, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que les sédiments ont la même origine et ont évolué dans les mêmes conditions de transport.



Figure 57 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques du profil  $P_4$ HP = haute plage ; HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

#### **I.5. Profil 5 (P<sub>5</sub>)**

Il est situé au fond de la baie de Rufisque, à une dizaine de mètres avant le début du mur en enrochements de Keuri Souf à Thiawlène.

## I.5.1. Analyse des données morphologiques

## I.5.1.1. Caractéristiques morphologiques

La plage aérienne mesure 51 m en moyenne et sa pente, peu variable, est de 0,06 en moyenne. Elle comprend une haute plage de 27 m de large en moyenne avec une pente moyenne de 0,04 et un estran de 24 m de large en moyenne (tableau 27). L'estran, avec une pente moyenne de 0,09, est généralement séparé de la haute plage par une rupture de pente. La haute plage présente toujours une berme (figure 58).

La plage sous-marine mesure en moyenne 13 m de large et dispose d'une pente assez faible, de 0,06. Quand elle est fortement érodée, une rupture de pente (talus) la sépare de l'estran, comme c'est le cas au mois de septembre.

La forme du profil de plage est soit concave (en période d'érosion), soit convexe (en période d'accumulation) mais la forme générale prédominante est convexe. On note constamment la présence d'ilménite sur l'estran.

		L (m)	= largeu	r en mètr	es; $P = p$	ente sous	forme t	anß	
Mois	Haute	e plage	Estran		Plage a	érienne	Plage	e sous-	Forme du profil
								rine	
	L (m)	Р	L (m)	Р	L (m)	P (tanß)	L (m)	Р	
		(tanß)		(tanß)				(tanß)	
juin 2005	32	0,04	15	0,10	47	0,06	8	0,08	Convexe
Juillet	30	0,03	13	0,12	43	0,05	7	0,10	Convexe
Août	27	0,05	28	0,06	55	0,05	12	0,03	Convexe-concave
Septembre	19	0,02	23	0,13	42	0,06	20	0,02	Convexe-concave
Octobre	28	0,03	21	0,10	49	0,06	15	0,06	Convexe
Novembre	28	0,05	23	0,07	51	0,06	13	0,07	Convexe
Décembre	27	0,05	23	0,08	50	0,06	12	0,07	Convexe
janvier 2006	36	0,05	20	0,08	56	0,06	13	0,05	Concave-convexe
Février	26	0,05	33	0,07	59	0,06	11	0,03	Convexe-rectiligne
Mars	26	0,05	33	0,07	59	0,06	11	0,03	Convexe-rectiligne
Avril	24	0,05	28	0,10	52	0,07	12	0,08	Concave-convexe
Mai	27	0,04	26	0,08	53	0,06	12	0,05	Convexe-rectiligne
juin 2006	16	0,04	28	0,06	44	0,05	24	0,05	Convexe-rectiligne
Moyenne	27	0,04	24	0,09	51	0,06	13	0,06	Convexe

Tableau 27 : Principales caractéristiques morphologiques du profil  $\mathrm{P}_5$ 





#### I.5.1.2. Evolution des mouvements verticaux

L'analyse des mouvements verticaux du profil  $P_5$  montre un bilan sédimentaire négatif sur la plage aérienne avec un taux de - 9,45 m<sup>3</sup> .m<sup>-1</sup> et positif dans la zone de déferlement (+ 1,97 m<sup>3</sup> .m<sup>-1</sup>) (tableau 28). Le taux maximum d'érosion est noté sur la haute plage avec un taux de - 6,45 m<sup>3</sup> .m<sup>-1</sup>. La plage se caractérise par l'alternance de périodes d'accumulation et d'érosion et des mouvements de compensation qui sont des mouvements combinés d'érosion et d'accumulation le long du profil (figure 59). D'une manière générale, la partie supérieure de la haute plage « bouge » peu.

La plage aérienne présente une prédominance des mouvements d'érosion, interrompus entre juin et juillet puis entre août et septembre, par de nets mouvements accrétionnels, avec des taux respectifs de + 6,17 m<sup>3</sup>.m<sup>-1</sup> et + 5,5 m<sup>3</sup> .m<sup>-1</sup>. On enregistre deux mouvements de très forte érosion : l'un entre juillet et août avec un maximum de - 11,15 m<sup>3</sup>.m<sup>-1</sup> et l'autre entre mars et avril avec un taux de - 17,39 m<sup>3</sup>.m<sup>-1</sup>.

Les mouvements de compensation expliquent le faible taux moyen observé sur l'estran entre septembre et octobre (+  $0,6 \text{ m}^3.\text{m}^{-1}$ ) alors qu'on a un mouvement d'érosion de la plage sous-marine. La forte pente observée (0,13) en septembre correspond à une accumulation.

(mouv	ements verticaux ex	primés en m <sup>°</sup> par r	nètre linéaire de plage	).
Périodes	Haute plage	Estran	Plage aérienne	Psm
juin -juillet 2005	+ 3,43	+ 2,74	+ 6,17	+ 0,25
juillet -août	- 4,43	- 6,67	- 11,1	+ 0,33
août- septembre	+ 2,28	+ 3,22	+ 5,5	- 1,39
septembre- octobre	- 1,78	+ 0,6	- 1,18	- 3,19
octobre -novembre	- 2,78	- 3,06	- 5,84	+ 1,18
novembre -décembre	0	- 3,17	- 3,17	- 0,62
décembre -janvier	- 0,76	+ 1,02	+ 0,26	+ 1,25
janvier -février	0	- 1,01	- 1,01	- 1,81
février -mars	0	0	0	0
mars -avril	- 1,01	- 16,38	- 17,39	- 4,45
avril -mai	0	+ 9,82	+ 9,82	+ 11,05
mai- juin	- 3,10	+ 5,3	+ 6,3	+ 4,4
Bilan	- 6,45	- 3	- 9,45	+ 1,97

Tableau 28 : Evolution morphologique mensuelle du profil  $P_5$ 



Figure 59 : Comparaison des profils mensuels de plage (P<sub>5</sub>)

# I.5.2. Analyse des données sédimentologiques

Les sables sont fins à moyens (165  $\mu$ m < Mz < 356  $\mu$ m), bien à moyennement classés (0,39 < Sig < 0,81), mésokurtiques (tableau 29) et à pourcentage de carbonates variant entre 9,73 et 39,2 % (tableau annexe) et à skewness particulièrement négatif sur la zone de déferlement (tableau 30), ce qui montre que nous avons des conditions hydrodynamiques agitées dans la baie.

Mois				Plage sous-marine					
	Haute	Haute plage		Haut estran		Bas Estran		Déferlement	
	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	
juin 05	0,53	257	0,62	260	0,75	356	0,40	183	
Août	0,59	323	0,5	276	0,81	351	Sédiment	s bimodaux	
Octobre	0,62	299	0,5	206	0,62	277	0,64	165	
Décembre	0,71	285	0,58	226	0,65	329	0,57	167	
Février	0,68	285	0,32	174	0,61	330	0,50	149	
Avril	0,41	261	0,43	213	0,54	346	0,58	171	
Juin	0,72	297	0,54	285	0,69	215	0,39	134	
Moyenne	0,60	287	0,50	280	0,67	313	0,51	162	

Tableau 29 : Variations de la moyenne Mz (en µm) et de l'indice de classement du profil P<sub>5</sub> selon les unités morphologiques

Ce profil comparativement aux autres, présente des indices de classement beaucoup plus élevés. Des sédiments bimodaux sont notés en août sur la plage sous-marine avec un mode principal fin de 250 µm et un mode secondaire grossier de 1000 µm.

Globalement, nous notons une faible variation de la granulométrie des sables entre la haute plage et le bas estran (figure 60), une forte variation entre ces unités et la zone de déferlement, caractérisée par des sables fins et moyennement bien classés. C'est sur le bas estran qu'on trouve les sables les plus grossiers. On observe une augmentation de la moyenne Mz de la haute plage au bas estran puis une forte diminution entre le bas estran et la plage sous marine.

Indices	juin 2005	août	octobre	décembre	février 2006	avril	juin 2006				
	•	•	Haute	e plage	•	•	•				
Mz(µm)	257	323	299	285	285	210	297				
Sig	0,53	0,59	0,62	0,71	0,68	0,41	0,72				
Sk	0	0,05	0,06	0,07	0,06	0,12	0,09				
K	1,06	1,02	1,04	0,96	0,96	0,98	0,97				
Laisse de haute mer											
Mz(µm)	250	276	199	270	254	264	279				
Sig	0,62	0,49	0,57	0,72	0,63	0,70	0,70				
Sk	- 0,14	0,13	- 0,04	0,08	0,34	0,07	0,09				
K	0,96	1,05	1,02	0,9	0,75	0,88	0,93				
Mi-estran											
Mz(µm)	270	276	213	182	174	213	285				
Sig	0,51	0,5	0,42	0,44	0,32	0,43	0,54				
Sk	0,1	0,18	0,13	- 0,14	0,07	0,13	0,11				
K	0,98	0,97	0,9	1	1,15	0,94	0,95				
			Bas e	estran							
Mz(µm)	356	351	277	319	330	346	215				
Sig	0,75	0,81	0,62	0,65	0,61	0,54	0,69				
Sk	0,11	0,11	0,07	0,18	0,16	0,19	- 0,35				
K	1,09	1	1,03	1,02	1,23	1,12	0,97				
			Défer	lement							
	183	Sédiments	165	167	149	171	134				
Sig	0,4	bimodaux	0,64	0,57	0,50	0,58	0,39				
Sk	- 0,14	$M_1 = 150 \ \mu m$	- 0,26	- 0,2	- 0,23	- 0,38	- 0,11				
K	1,32	$P_1 = 17,82\%$ $M_2 = 1000$ $P_2 = 3,61\%$ ;	1,28	1,22	1,61	1,39	0,32				

Tableau 30 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil  $P_5$  avec  $P_1$  et  $P_2$ pourcentages principal et secondaire et  $M_1$  et  $M_2$  modes principale et secondaire



Figure 60 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil  $P_5$ HP = haute plage ; HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

L'évolution de la moyenne Mz sur le bas estran (figure 61) montre une variation croissante de la granulométrie, d'octobre à avril. Mz atteint un maximum en juin 2005. Toutefois, le bas estran reste l'unité où la granulométrie est la plus grossière, malgré la diminution notée au mois d'octobre.



Figure 61 : Evolution de la moyenne Mz (en  $\mu$ m) au niveau du bas estran de P<sub>5</sub>

Le diagramme de dispersion Mz-sigma (figure 62) ne permet pas de distinguer à l'instar des profils P<sub>1</sub>, et P<sub>3</sub> les caractéristiques des différentes unités morphologiques.



Figure 62 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques du profil  $P_5$ . HP = haute plage, HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

## **I.6. Profil 6 (P<sub>6</sub>)**

Le profil  $P_6$  est situé à environ 50 m après le mur en enrochements de Keuri Souf -Thiawlène juste à 15 m de la clôture du cimetière musulman de Thiawlène, près de l'usine BATA.

#### I.6.1. Analyse des données morphologiques

#### I.6.1.1. Caractéristiques morphologiques

La plage aérienne du profil  $P_6$ , large en moyenne de 32 m, dispose d'une pente moyenne de 0,09 (tableau 31). Elle est constituée d'une haute plage et d'un estran à largeurs moyennes à peu près égales (respectivement 19 et 18 m) mais la pente moyenne de

l'estran est plus forte que celle de la haute plage (0,13 contre 0,06). Cette plage aérienne se caractérise particulièrement par la diversité de ses pentes. De juin à octobre 2005 on observe de faibles pentes, la forte pente notée en juillet (0,12) étant due à la présence d'une micro falaise sur le haut estran produite par l'érosion de la côte constituée à sédiments sablo-argileux. C'est au mois de septembre que nous avons la pente la plus faible sur l'ensemble du profil (0,05). Ce mois peut être considéré comme une transition entre la période d'érosion et la période d'accumulation. A partir de novembre, apparaissent de fortes pentes (0,14). L'estran et la haute plage sont séparés par une rupture de pente à partir de septembre, début de la période d'accumulation.

Mois		С	Haute	e plage	Estran		Plage aérienne		Déferlement		Forme
	L	Р	L (m)	Р	L (m)	Р	L (m)	Р	L (m)	Р	
	(m)	(tanß)		(tanß)		(tanß)		(tanß)		(tanß)	
juin 2005	27	0,01	15	0,05	9	0,10	24	0,05	6	0,12	Convexe
Juillet	29	0,01	10	0,07	13	0,13	23	0,12	4	0,08	Convexe
Août	29	0,01	6	0,02	14	0,09	20	0,07	nd	nd	Convexe
Septembre	28	0,01	9	0,01	28	0,05	37	0 ,05	14	0,08	Conv-conc-
											convex
Octobre	27	0,01	19	0,01	18	0,11	37	0,06	6	0,12	Convexe
Novembre	27	0,01	23	0,14	18	0,13	41	0,14	13	0,06	Convexe
Décembre	24	0,01	25	0,14	18	0,14	43	0,14	9	0,10	Convexe
janv-2006	24	0,01	32	0,02	14	0,21	46	0,14	8	0,08	Conv-concave
Février	24	0,01	27	0,14	17	0,17	44	0,14	8	0,09	Convexe
Mars	24	0,01	23	0,11	20	0,10	43	0,14	4	0,13	Convexe
Avril	26	0,01	27	0,01	18	0,22	45	0,14	9	0,08	Convexe
Mai	28	0,01	15	0,01	16	0,17	31	0,08	8	0,11	Convexe
juin 2006	17	0,01	17	0,02	17	0,19	34	0,1	9	0,05	Convexe
Moyenne	26	0,01	19	0,06	18	0,13	37	0,12	8	0,09	Convexe

Tableau 31 : Principales caractéristiques morphologiques du profil  $\mathsf{P}_6$ 

C = cimetière, L(m) =	largeur en mètres ; P =	pente sous forme tanß

La partie de la plage sous-marine explorée a une largeur moyenne de 8 m et présente une pente moyenne de 0,09. La pente est ici fortement influencée par la présence de blocs de basalte éparpillés sur le profil et dont les bases sont très souvent fortement affouillées. C'est d'ailleurs ce qui nous a empêchés de prendre des mesures au mois d'août. Les profils sont de forme variable avec l'apparition dès septembre d'une berme et à partir du mois d'octobre de formes convexes (figure 63). Cependant, il est à noter que la forme du profil et la valeur de la pente en juillet et août sont dues à des actions anthropiques. En effet, l'accentuation de l'érosion en juillet a justifié le prolongement du mur en enrochements par des blocs de calcaires de cette extrémité du mur de protection, ce qui a fortement influencé la forme du profil.

Les minéraux lourds (ilménite) sont fréquents de juin à octobre alors que des croissants de plage s'observent en septembre et octobre.

Ce profil se caractérise surtout par une grande différence de forme entre les profils de la saison des pluies (irréguliers et parfois concaves) et ceux de la saison sèche (convexes). Mais la forme dominante reste convexe.





#### I.6.1.2. Evolution des mouvements verticaux

La dominance des phases d'érosion sur celles d'accumulation le long du profil au cours de l'année a abouti à un bilan annuel négatif de - 12,11 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage sur la plage aérienne (figure 64, tableau 32). Nous notons ici une grande variabilité des mouvements verticaux.

Sur la plage aérienne, on peut distinguer principalement deux périodes :

- deux périodes d'érosion, de juin à octobre 2005 puis de mars à juin 2006 au cours desquelles la forte érosion a été à l'origine d'un essai de protection du cimetière, par prolongement du mur en enrochements par des moellons de calcaire déposés sur l'estran (photo 14); ce qui fait que les taux d'érosion obtenus sont minimes. Cette période a été interrompue entre août et septembre par une phase d'accumulation (+ 4,48 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage). Durant cette période, le long de la plage on pouvait observer le soubassement sablo argileux du cordon littoral.

L'érosion la plus importante a été enregistrée entre mars et avril 2006 (- 29,6 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage) puis entre mai et juin (- 14,27 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage).

- une période d'accumulation qui s'étend d'octobre à mars avec un engraissement très important de l'estran faisant apparaître une pente raide. Elle culmine sur la plage aérienne entre février et mars avec un taux de  $+ 21,95 \text{ m}^3$  par mètre linéaire de plage. Cette période a été interrompue par un mouvement d'érosion entre décembre et février dont le taux le plus important est de  $- 9,39 \text{ m}^3$  par mètre linéaire de plage. C'est durant cette période d'accumulation qu'on a enregistré les plus fortes pentes (0,22).

La plage sous-marine se distingue par ses faibles taux d'évolution, certainement en rapport avec la faible largeur explorée. On y retrouve les mêmes évolutions que sur la plage aérienne.

On aurait globalement un transfert de sédiments depuis la haute plage vers la plage sous-marine.

Périodes	Haute plage	Estran	Plage	Plage sous-
			aérienne	marine
juin -juillet 2005	- 1,58	- 1,25	- 2,83	- 1,89
juillet –août	- 1,77	- 1,26	- 3,03	/
août- septembre	+ 0,84	+ 3,64	+ 4,48	/
septembre- octobre	- 2,32	- 3,76	- 6,08	- 5,82
octobre –novembre	+ 11,7	+ 3,73	+ 15,42	+ 0,66
novembre –décembre	+ 2,91	+ 7,23	+ 10,14	+ 1,62
décembre –janvier	- 1,20	- 8,19	- 9,39	- 4,39
janvier –février	- 3,17	- 0,74	- 3,91	+ 2,13
février –mars	+ 2,93	+ 19,02	+ 21,95	+ 4,51
mars –avril	- 3,60	-26	- 29,60	- 4,46
avril –mai	- 0,82	- 5,78	- 6,6	- 0,36
mai- juin	- 6	- 10,27	- 14,27	- 5,23
juin 2005-juin 2006	- 5,81	- 6,30	- 12,11	/

Tableau 32 : Evolution morphologique mensuelle du profil  $P_6$ (mouvements verticaux exprimés en m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage)



Photo 14: Prolongement du mur par des moellons de calcaires par les populations en juin 2005 (photo du 21 juin 2005.



Figure 64 : Comparaison des profils mensuels de plage (P<sub>6</sub>)

#### I.6.2. Analyse des données sédimentologiques.

Les sédiments sont dans l'ensemble des sables fins à moyens (210  $\mu$ m < Mz < 443  $\mu$ m), moyennement bien à très bien classés (0,3 < Sig < 0,57) (tableaux 33 et 34).

Ils sont tous mésokurtiques. Des sédiments bimodaux ont été enregistrés sur la plage sous-marine au mois d'août, avec un mode fin principal de 250  $\mu$ m et un mode grossier secondaire de 1000  $\mu$ m. Le skewness est variable et centré autour de zéro.

Sur la haute plage, on note une augmentation de la granulométrie de juin à décembre, tandis que le classement s'améliore. Sur le haut estran, la granulométrie augmente aussi de juin à décembre, corrélativement à une péjoration du classement. Durant cette période, on note sur la plage aérienne un développement de pentes très raides (0,14 en novembre et décembre). Sur le bas estran, on remarque que quand la granulométrie diminue, le classement se détériore.

Les sables de la plage sous-marine n'évoluent presque pas (Mz subit une faible variation) mais leur classement se détériore pendant la période d'accumulation (saison sèche).

			unites	morpholog	iques				
Mois			Plage sous-marine						
	Haute	e plage	Haut	estran	Bas I	Estran	Déferlement		
	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	Sig	Mz	
juin 2005	0,45	328	0,38	292	0,46	319	0,3	279	
Août	0,42	342	0,39	351	0,5	215	Sédiments	bimodaux	
octobre	0,41	349	0,43	306	0,53	351	0,56	276	
décembre	0,38	403	0,4	325	0,56	210	0,45	279	
février 2006	0,41	403	0,38	325	0,42	441	0,58	254	
Avril	0,42	382	0,45	317	0,38	321	0,52	268	
juin 2006	0,45	342	0,46	326	0,37	346	0,43	276	
Moyenne	0,42	364	0,42	320	0,46	315	0,47	272	

Tableau 33 : Variations de la moyenne Mz (en  $\mu$ m) et de l'indice de classement du profil P<sub>6</sub> selon les unités morphologiques

Indices	juin 2005	août	octobre	décembre	février 2006	avril	juin 2006				
			Haute	plage							
Mz (µm)	328	342	349	403	403	382	342				
Sig	0,45	0,42	0,41	0,38	0,41	0,42	0,45				
Sk	0,11	0,2	0,17	0,04	0,10	0,13	0,13				
К	1,16	1,2	0,97	1,05	1,12	1,09	1,11				
Laisse de haute mer											
Mz (µm)	302		281	330	330	349	319				
Sig	0,41		0,49	0,43	0,43	0,45	0,57				
Sk	- 0,02		0,13	0,16	- 0,02	0,13	0,24				
К	1		1,07	1,1	0,98	1,09	1,19				
			Mi-e	stran							
Mz (µm)	281	351	330	319	319	285	332				
Sig	0,35	0,39	0,37	0,36	0,33	0,45	0,36				
Sk	0,05	0,22	0,26	- 0,01	0,13	0,23	0,10				
K	0,85	0,9	1,08	1,01	1,02	1,21	1,11				
		L	Bas e	estran			1				
Mz (µm)	319	215	351	210	441	321	346				
Sig	0,46	0,5	0,53	0,56	0,42	0,38	0,37				
Sk	- 0,14	- 0,08	0,15	0,04	0,20	0,02	0,06				
К	1,06	0,92	1,06	1,1	0,95	0,90	1,06				
	1	1	Déferl	ement	<b>I</b>		1				
Mz (µm)	279	Sédiments	276	279	254	268	276				
Sig	0,3	$M_1=150 (\mu m)$	0,56	0,45	0,58	0,52	0,43				
Sk	- 0,12	$P_1 = 30,57\%;$ $M_2 = 1000$	0,28	- 0,03	0,16	0,11	0,01				
К	1,09	$\mu m_2 = 1000$ ( $\mu m$ ) $P_2 = 0.08\%;$	0,95	1,07	0,97	1,09	1,10				

Tableau 34 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil  $P_6$ Avec  $P_1$  et  $P_2$  pourcentages principal et secondaire et  $M_1$  et  $M_2$  modes principal et secondaire

La granulométrie moyenne diminue de la haute plage à la plage sous-marine (figure 65) avec une faible variation d'une unité à l'autre.



Figure 65 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil  $P_6$ HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

L'évolution de la granulométrie du bas estran est très irrégulière contrairement aux autres profils qui ont tous suivis une évolution similaire. Cette évolution est caractérisée par deux minima respectivement en août et en décembre pendant les périodes d'érosion maximales. Le diamètre des grains est maximal au mois de février (figure 66) au cours de la période d'accumulation alors que les faibles granulométries sont notées en août et décembre 2005.

Cette évolution en dents de scie obtenue à Thiawlène ( $P_6$ ) rend compte de l'hydrodynamisme très fort de cette zone durant toute l'année et qui se renforce pendant la saison des pluies comme le confirme la forte variation de la forme des profils de plage dans ce secteur.



Figure 66 : Evolution de la moyenne Mz (en  $\mu$ m) du bas estran de P<sub>6</sub>

Le diagramme de dispersion Mz-sigma (figure 67) permet de distinguer :

les sables moyens qui sont les mieux classés (bien à très bien classés)
constitués des sables de la haute plage, du haut estran et d'une partie des sables de la plage sous-marine ;

- les sables fins à moyens, moyennement bien à bien classés, composés des sables du bas estran et d'une partie des sables de la zone de déferlement.



Figure 67 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques du profil  $P_6$ ; HP = haute plage, HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

## II. Synthèse et discussion des résultats

## II.1. Les résultats morphologiques

L'analyse des caractéristiques morphologiques des profils de plage du littoral de Rufisque montre une plage aérienne étroite (41 m de largeur en moyenne) avec une pente moyenne de 0,06 (tableau 35). La forme des profils est variable. Elle permet de distinguer le secteur du Cap des Biches à Diokoul du secteur de la baie de Rufisque. D'un secteur à l'autre, les variations de pente et de largeur peuvent être importantes, tout comme les variations de la forme du profil d'une saison à l'autre. La haute plage, quand elle existe, disparait pendant la saison des pluies.

Profils	Р	1	F	2	P	<b>b</b> <sub>3</sub>	P	4	P <sub>5</sub>		P <sub>6</sub>		Moyenne	
Largeur	HP	Е	HP	Е	HP	Е	HP	Е	HP	Е	HP	Е	HP	Е
moyenne	n.d	26	n.d.	52	4	34	4	36	27	24	19	18		31,
	20	6	52		38		40		51		37		41	
Pente	0,0	)7	0,	03	0,	06	0,	06	0,06		0,12		0,06	
moyenne														
Forme	Conc	cave	Convexe		Concave		Concave		Convexe		Convexe			
dominante	à	à												
	Recti	ligne												

Tableau 35 : Caractéristiques morphologiques des profils des plages aériennes

Les caractéristiques morphologiques des profils de plage de part et d'autre du Cap de Diokoul mettent ainsi en évidence deux milieux à morphologie différente (figure 68). On distingue : le secteur Cap des Biches-cap de Diokoul, divisé en deux sous-secteurs et le secteur cap de Diokoul-Bata.

Le sous-secteur Cap des Biches : au Cap des Biches la plage aérienne, limitée par une microfalaise est constituée uniquement par l'estran d'une largeur moyenne de 26 m. Il n'existe plus de haute plage, la falaise est à tout instant battue par les vagues. La largeur de la plage aérienne (estran) de ce profil  $P_1$  est plus courte que la moyenne de l'ensemble des profils, ce qui s'expliquerait par une avancée de la mer et un recul très lent de la falaise. Entre la falaise du Cap des Biches et la centrale thermique, l'estran s'élargit pour atteindre une largeur moyenne de 52 m en amont de la dérive littorale du canal de la centrale thermique (profil  $P_2$ ). La pente moyenne de cette plage est très faible, 0,03 en moyenne, comparée aux autres profils et à la plage en aval de la dérive littorale du citorale de ce même canal.



Figure 68 : Comparaison de la forme des profils de plage des deux secteurs (P3 et P6)

Le sous-secteur de Diokoul (centrale thermique nouveau mur en béton armé) est caractérisé par une plage aérienne étroite. Cette zone représentée par les profils P<sub>3</sub> et P<sub>4</sub>, situés aux extrémités du mur en béton du cimetière musulman, se caractérise par la faible largeur de la haute plage, 4 m en moyenne qui disparaît pendant les périodes de très haute marée. La largeur moyenne de la plage aérienne varie entre 38 et 40 m. Cependant, la pente faible (0,06 en moyenne), associée à l'uniformité du profil de forme concave, facilite la montée du jet de rive sur les parties hautes de la plage surtout lors des périodes de haute énergie de houles. Celles-ci se produisent pendant l'hivernage d'où une attaque à ce niveau du cordon littoral. Aux deux extrémités du mur, on note souvent une accentuation de l'érosion ou de l'accumulation. Cela confère au profil une convexité en période d'accumulation ou une augmentation de la concavité en période d'érosion. Ces changements de forme qui se traduisent soit par un dépôt, soit par un affouillement, participent au déséquilibre du mur. Les mouvements d'érosion qui se produisent sur ces plages sont renforcés aux extrémités du mur par les contournements des vagues et ont finalement contribué au basculement des deux extrémités : l'extrémité sud en juillet 2005 et l'extrémité nord en 2007.

Le deuxième secteur, du Cap de Diokoul jusqu'à BATA (baie de Rufisque), est caractérisé par la présence d'un mur en enrochements, à l'origine de la disparition de la plage aérienne sauf en quelques endroits où celle-ci n'est visible qu'en période de marée très basse. Les seules plages existantes sont celles du fond de la baie ( $P_5$ ) (là où débute la digue en enrochements) et de l'extrémité du cimetière de Thiawlène ( $P_6$ ) (plage en face de l'usine BATA).

Les profils  $P_5$  et  $P_6$ , situés respectivement avant et après le mur en enrochements de Keuri Souf -Thiawlène, ont subi les plus importantes variations de forme et enregistré les plus fortes pentes, (0,17 en février et 0,22 en mars pour le profil  $P_6$ ). Ce secteur se caractérise par une très forte variation de la largeur de l'estran par rapport aux autres profils à l'exception de  $P_2$ .

La plage du cimetière de Thiawlène se distingue par son estran avec des pentes raides, d'où une diminution de sa largeur durant la saison sèche. Les profils de cette plage tendent à avoir une convexité proche du trait de côte et une partie concave au déferlement. Ces profils de type terrasse s'observent dans les environnements dominés
par la houle (Wright & Short, 1984).

La forme dominante des profils de plage varie selon les zones. Dans le premier secteur, elle est, soit concave ( $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_4$ ), soit rectiligne ( $P_2$ ) alors que dans le deuxième secteur la forme dominante est convexe et la forme concave, caractéristique des profils de la saison des pluies. La particularité du secteur est la forte variation de la forme des profils qui serait due à un probable changement des caractéristiques (énergie) de la houle et à l'influence des murs de protection.

Les autres caractéristiques des plages de Rufisque sont : la présence des minéraux lourds (ilménite), souvent dans le deuxième secteur et, rarement dans le premier et les croissants de plage, caractéristiques des plages de BATA.

#### II.2. Les mouvements verticaux mensuels

Avec un bilan annuel négatif sur l'ensemble des profils, à l'exception de  $P_2$  qui présente un bilan légèrement positif, le littoral de Rufisque est en situation d'érosion généralisée (tableau 36. figure 69).

Périodes	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>
juin -juillet 2005	+ 2,39	+ 0,28	+ 7,44	- 13,16	+ 6,17	- 2,83
juillet –août	- 3,90	- 2,51	- 16,81	+ 2,89	- 11,1	- 3,03
août- septembre	+ 4,73	- 7,2	+ 9,7	+ 5,21	+ 5,5	+ 4,48
septembre- octobre	+ 9,15	+ 0,23	+ 5,21	- 1,54	- 1,18	- 6,08
octobre –novembre	- 12,85	+ 1,37	+ 2,5	+ 16,67	- 5,84	+ 15,42
novembre –décembre	+ 5,77	+ 8,39	- 0,99	- 1,8	- 3,17	+ 10,14
décembre –janvier	+ 2,23	- 15,84	- 10,9	- 7,34	+ 0,26	- 9,39
janvier -février	- 5,36	+ 2,01	+ 9,95	+ 8,78	- 1,01	- 3,91
février –mars	- 1,74	0	0	+ 4,8	0	+ 21,95
mars –avril	- 3,96	+ 10,73	+ 3,24	- 7,93	- 17,39	- 29,60
avril –mai	+ 7,34	+ 4,59	- 7,18	- 7,78	+ 9,82	- 6,6
mai- juin	- 14,93	+ 6,62	- 5,37	- 11,68	+ 6,3	- 14,27
Cumul	- 11,13	+ 8,67	- 3,21	- 12,88	- 11,64	- 23,72
Bilan	- 7	+ 1,3	- 3,24	- 22,20	- 9,45	- 12,11

Tableau 36 : Les mouvements verticaux des différents profils de la plage aérienne (en m<sup>3</sup> par m linéaire de plage).



Figure 69 : Bilan annuel des mouvements verticaux des plages de Rufisque.

Les mouvements verticaux mensuels des plages du littoral de Rufisque sont très variables dans l'espace et dans le temps. Malgré cette forte variabilité des taux d'un profil à l'autre et/ou bien d'un secteur à l'autre, deux grandes périodes peuvent être distinguées :

- une période d'érosion généralisée sur le littoral rufisquois, d'avril à août : c'est durant cette période que tous les profils ont enregistré les taux d'érosion maxima. Ce taux est de - 14,93 m<sup>3</sup> par m linéaire de plage entre mai et juin 2006 pour P<sub>1</sub>, -16,81 m3 et -13,16 m<sup>3</sup> par m linéaire de plage obtenus respectivement entre juillet et août 2005 pour P<sub>3</sub> et entre juin et juillet 2005 pour P<sub>4</sub>. Les profils P<sub>5</sub> et P<sub>6</sub> enregistrent entre mars et avril respectivement - 17,39 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage et - 29,60 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage.

- une période d'accumulation qui s'étend de septembre à mars. Cette sédimentation est maximale entre septembre et octobre pour P1 avec un taux de + 9,15 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage.

#### II. 2.1. Le secteur 1 : Cap des Biches - Cap de Diokoul

La plage de la centrale électrique fait encore exception. Sur ce profil, la tendance est en accumulation et les mouvements les plus importants sont enregistrés entre mars et avril, avec un taux de + 10,73 m<sup>3</sup>. m<sup>-1</sup>. Ce secteur bénéficie d'une part, de la présence du banc des Biches qui atténue les vagues et, d'autre part, du chenal d'alimentation en eau de la centrale thermique qui joue le rôle d'épi mais qui semble atteindre son profil d'équilibre du fait de la faiblesse des mouvements verticaux et de la forme assez constante des profils. Après le chenal, on note une érosion verticale importante. Sur cette plage (P<sub>2</sub>), l'érosion maximale est obtenue entre décembre et janvier, avec un taux de - 15,84 m<sup>3</sup> par mètre linéaire de plage aérienne.

Dans le secteur de Diokoul ( $P_3$ , et  $P_4$ ), l'érosion prédomine, avec des cumuls négatifs. L'érosion est maximale entre juin et août. Cela s'expliquerait par sa situation dans une zone de divergence de la dérive littorale (Niang-Diop, 1995). Cette érosion très accentuée serait aussi le résultat des phénomènes de réflexion des houles et de contournement des vagues à hauteur des extrémités du mur en béton de Diokoul. Ces actions sont facilitées par des pentes faibles et souvent uniformes. Cette zone subirait aussi les contrecoups du chenal de la centrale thermique

#### II.2.1. Le secteur 2 : la baie de Rufisque (P5 et P6)

Au fond de la baie de Rufisque, le profil ( $P_5$ ) montre un bilan négatif. Pour ce profil, le bilan a été établi par comparaison avec les mois de mai 2005 et de juin 2006, à cause d'un changement de direction entre le profil initial de juin 2005 et les profils des autres mois. Ici, la tendance générale négative serait le résultat de plusieurs actions parmi lesquelles : un déferlement de type plongeant qui favorise un transport de sédiments vers le large, le mur en enrochements et le quai qui entraînent des phénomènes de réflexion des houles et une accentuation de la turbulence du jet de rive par les effets de contournement de ces aménagements sur cette plage. La situation de la plage en arrière du cap pourrait être un obstacle à la dérive littorale et probablement un foyer de naissance d'une nouvelle dérive. En outre, la baie serait à la recherche d'un nouvel équilibre suite à l'élévation du niveau marin.

A l'extrémité sud du mur en enrochements de Keuri Souf-Thiawlène (secteur des plages de BATA), on a une succession d'érosion pendant l'hivernage et d'accumulation au cours de la saison sèche.

Pendant la saison sèche, c'est une dérive littorale nord-ouest sud-est qui est dominante. Elle dépose sa charge sédimentaire à cette extrémité du mur. Cette situation vient interférer, à Thiawlène, avec la zone de convergence de la dérive littorale signalée par Niang-Diop (1995), et qui probablement se situerait dans le secteur des plages de BATA. Pendant cette saison, et du fait de l'absence de houles de fortes énergies, ces plages constituent une zone de dépôt. La présence de moules sur les rochers de l'extrémité du mur en novembre et décembre indique un milieu peu agité, donc favorable au dépôt. C'est durant cette période d'accalmie que s'est formée la berme observée sur le profil  $P_6$  en septembre 2005.

Durant la saison des pluies, la côte sud étant très agitée, les houles perpendiculaires, dotées d'un pouvoir érosif, dominent sur la dérive littorale à charge sédimentaire naturellement faible. Il existerait aussi une dérive littorale en sens inverse au début de la saison des pluies qui coïncide avec le maximum des upwellings et, à l'augmentation de l'énergie des houles de la côte sud. Il se produit des réflexions plus importants que ceux de la saison sèche. Il semblerait aussi que le recul du rivage observé se produit juste après le passage des conditions de faible énergie de houle, à des conditions de forte énergie de houle soit entre fin mai et juin.

Cependant, si nous comparons le cumul annuel des mouvements verticaux et le bilan annuel obtenu par la comparaison du profil de juin 2005 et de juin 2006, on remarque que le cumul montre des taux en général beaucoup plus importants. Cela pourrait être dû à l'importance des courants perpendiculaires à la côte à Rufisque. Le bilan, influencé par les variations temporelles des conditions hydrodynamiques, reflète mieux les tendances à long terme.

Aussi, contrairement aux résultats de Niang-Diop (1995), nous avons une coïncidence nette entre les périodes d'érosion ou d'accumulation et les saisons. Cela nous permet de conclure à un fonctionnement saisonnier des plages du littoral de Rufisque. Cela concorde parfaitement avec le régime des houles de la Petite Côte. Dans l'ensemble, on peut dire que le caractère cyclique des mouvements d'érosion et d'accumulation est associé aux caractéristiques hydrodynamiques. L'augmentation de la hauteur de la houle pendant la saison des pluies entraine souvent un départ irréversible de sédiments et une modification de la morphologie de la plage. La côte sud, en particulier la baie de Gorée, est bien protégée des houles du secteur nord-ouest par la presqu'île du Cap Vert. Ces houles, très énergétiques, perdent non seulement une grande partie de leur énergie en rapport avec cette diffraction et la perte de la quasi-totalité de leur charge sédimentaire captée par les canyons de Kayar et de Dakar notamment.

On peut cependant voir à l'intérieur d'une période déterminée des mouvements mineurs d'engraissement et de démaigrissement qui sont des mouvements normaux rythmant la vie d'une plage. Les périodes d'érosion sont en général moins altérées que les périodes d'accumulation, c'est-à-dire que l'érosion affecte généralement l'ensemble des unités morphologiques du profil au cours de la période.

Ce fonctionnement saisonnier pourrait être une des causes de l'intensification et de l'amplification des mouvements verticaux aussi bien d'érosion que d'accumulation pour plusieurs raisons :

 pendant la saison des pluies, on assiste à une augmentation de l'agressivité des vagues due à l'arrivée d'eaux tropicales chaudes corrélative à l'augmentation du niveau marin ; ce qui renforce la hausse généralisée du niveau marin attribuable au changement climatique et qui a pour conséquence une avancée de la mer et un recul du trait de côte. Ces actions associées à la prédominance des courants perpendiculaires à la côte concourent au déferlement d'une masse d'eau importante sur des estrans de très faible largeur, ce qui se traduit par une érosion importante ;

- pendant la saison sèche, la diminution de l'énergie des vagues, l'apparition de l'upwelling et la remontée des eaux de surface vers le large entraînent une baisse du niveau marin. La dérive littorale domine sur les courants perpendiculaires et quel que soit son sens favorise le dépôt de sédiments. Cependant, au cours de cette saison les houles exceptionnelles d'ouest très énergétiques et perpendiculaires à la côte peuvent entraîner le départ d'une quantité importante de sédiments vers le large. Ces houles qui se manifestent entre octobre et décembre, malgré leur effet dévastateur, ont une action moindre que les houles sud-ouest de la saison des pluies sur le recul du trait de côte car intervenant en période d'accumulation.

A ce fonctionnement saisonnier, s'ajoutent les conséquences des ouvrages de protection qui seraient des «corps étrangers» qui entraineraient une modification ou une perturbation du fonctionnement du littoral. Ils provoquent ainsi des phénomènes de réflexion et de contournement à leur extrémité. Ce qui fait qu'en période de fortes houles, les plages situées aux extrémités des murs de protection subissent un démaigrissement qui peut être irréversible. De surcroît, ces ouvrages ayant dépassé leur durée de fonctionnement projeté, en l'occurrence 10 ans, voient leur efficacité de protection réduite ou inexistante, d'où l'intensification des effets érosifs sur la côte.

Les observations notées lors de nos fréquentes visites de terrain, entre juin 2005 et juillet 2008, confirment ce fonctionnement saisonnier.

- sur la plage du cimetière de Thiawlène (plage de BATA), le profil présente une forme convexe pendant la saison sèche (au cours de la période d'accumulation) et une forme concave en saison des pluies durant la période d'érosion. Ce passage des formes convexes aux formes concaves est net à partir du mois de juin (début de l'hivernage à Dakar).

- à cela s'ajoute les fortes houles (houles de tempête) qui se produisent pendant la saison des pluies et qui transportent la quasi-totalité des apports sédimentaires de la saison sèche. Elles seraient des houles cycliques d'une hauteur supérieure ou égale à 3 m. Elles provoquent des démaigrissements irréversibles et des éboulements aux extrémités des ouvrages de protection. Cela est illustré les fortes houles du 01 juillet 2007 causant l'érosion des cimetières de Thiawlène et des dégâts importants sur les habitations : apparition des vestiges de la route en latérite qui bordait le littoral, preuve d'un recul important de la côte à ce niveau (photo 15), ossements humains en mer entraînant un soulèvement populaire. Il convient de noter d'ailleurs que ces fortes houles ont affecté tout le littoral de Rufisque. Du nord-ouest de la falaise du Cap des Biches jusqu'à Bargny, on pouvait observer le long de la côte des sédiments sablo-argileux et galets de roches volcaniques, qui étaient profondément enfouis et servant de soubassement à la plage aérienne.



Photo 15 : Effets des fortes houles du 01 juillet 2007 montrant l'apparition de la route en latérites entre le cimetière de Thiawlène de Rufisque et la mer (photo du 03 juillet 2007

Les nombreux aménagements perpendiculaires au rivage comme l'épi de la sécherie de Thiaroye, le canal des ICS (Industries Chimiques du Sénégal) et de la centrale du Cap des Biches ont négativement impacté le bilan sédimentaire des plages du littoral de Rufisque par rétention des sédiments à leur partie à l'amont de la dérive littorale. Ce déficit sédimentaire est renforcé au niveau du littoral par des murs de protection dont l'influence sur les processus hydro-sédimentaires de l'avant côte a été démontrée par de nombreux auteurs (Kraus, 1988; Kraus et McDougal, 1996...).

#### II.3. Synthèse des résultats sédimentologiques

#### II.3.1 .Caractères généraux des sédiments

La caractérisation des sables du littoral de Rufisque a été faite en utilisant les indices granulométriques de Folk et Ward, exprimés en unités Phi. L'analyse des sables prélevés le long de ce littoral entre 2005 et 2006 montre des sédiments constitués de sables très fins à moyens, mésokurtiques, répartis de part et d'autre du Cap de Diokoul (figure 70). Les sables sont très bien classés à moyennement classés avec généralement une asymétrie négative dans le secteur Cap des Biches-Diokoul, indiquant une dominance de la fraction fine et une asymétrie positive dans le secteur Keuri Souf – BATA. Ce secteur Nord-ouest qui représente l'extrémité de la baie de Hann constituerait la dernière étape du parcours (milieu de dépôt) des sédiments, essentiellement constitué de fins. Le secteur sud formé de sables moyens, plutôt plus exposé à l'action des vagues du large, subit une forte érosion et un vannage des sables fins. De telles différences granulométriques de part et d'autre d'un cap, ici le cap de Diokoul, sont caractéristiques d'un fonctionnement en cellules distinctes (Peterson *et al.*, 1990 ; Niang-Diop, 1995).



Figure 70 : La différenciation sédimentologique des deux secteurs du littoral de Rufisque

En outre, chaque secteur se caractérise aussi par une forte variation de la granulométrie pendant la saison pluvieuse et une faible variation en saison sèche sur de chaque unité morphologique par exemple ici, le mi-estran (figure 71). Cette variation est plus





Figure 71 : Variations saisonnière de la granulométrie au niveau du mi-estran

# II.3.2. Analyse des variations longitudinales de la moyenne et de l'indice de classement (sig) au niveau du bas estran

Les études précédentes sur le littoral sénégalais ont montré l'existence d'une dérive littorale dirigée du nord vers le sud (Sall, 1982 ; Niang-Diop, 1995) mais très instable et pouvant changer de sens et d'intensité.

Sur le littoral de Rufisque, une dérive littorale dominante dirigée du nord-ouest au sudest a été mise en évidence par Niang-Diop (1995) et fondée sur la méthode de McLaren (1981), basée sur le sens de variation longitudinale de la moyenne Mz et de l'indice de classement sur le bas estran. Selon cet auteur, le classement s'améliore dans le sens du transport qui, selon McLaren et Bowles (1985) doit être un facteur essentiel sur la texture.

Par ailleurs, Sall (1982) évoquait déjà dans ses travaux sur la Petite Côte qu'un tri

granulométrique a peu de chance de s'opérer à cause de l'instabilité de la dérive littorale. Même si cette méthode de McLaren (1981), est controversée, Niang-Diop (1995) indique qu'elle peut être prise en compte si elle est confirmée par d'autres résultats. En effet, l'analyse des variations de ces deux indices du bas estran des plages du littoral de Rufisque par cette méthode pour la période de juin 2005 à juin 2006, a permis d'avoir les résultats suivants (tableaux 37 et 38).

Mois	<b>P</b> <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>
Juin 2005	0,30	0,62	0,34	0,32	0,75	0,46
Août	0,42	0,35	0,47	0,39	0,81	0,50
Octobre	0,49	0,43	/	/	0,62	0,53
Décembre	0,30	/	0,26	/	0,65	0,56
Février 2006	0,24	0,42	0,24	0,37	0,61	0,42
Avril	0,30	0,28	0,34	0,27	0,54	0,38
Juin	0,43	0,44	0,33	0,37	0,69	0,37
Moyenne	0,35	0,42	0,33	0,34	0,67	0,46

Tableau 37 : Variation annuelle de l'indice de classement (sig) des profils du bas estran

Tableau 38 : Variation annuelle de la moyenne Mz des profils du bas estran

Mois	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>
Juin 2005	156	206	143	116	356	319
Août	196	183	186	203	351	215
Octobre	138	210	/	/	277	351
Décembre	152	/	137	/	319	210
Février 2006	129	187	130	116	330	441
Avril	162	133	163	130	346	321
Juin	171	229	143	344	215	346
Moyenne	158	191	153	149	313	315

Dans le secteur du Cap des Biches-Cap de Diokoul, l'indice de classement et la moyenne Mz montrent une diminution de P1 vers P4. Cela confirme une fois de plus les résultats des études précédentes mais avec un rôle majeur (rôle d'épi) joué par le canal de la centrale thermique.

Dans le secteur de la baie de Rufisque (Keuri Souf -Thiawlène-BATA), les deux indices évoluent en sens inverse. Cependant, l'indice de classement contrairement à la moyenne

Mz ne subit pas de variations temporelles de sens. Dans ce secteur, l'indice de classement permet de mettre en évidence une dérive littorale dirigée du NW vers le SE tout au long de l'année. Par contre, la variation de sens de la diminution de Mz traduit son instabilité mais le sens NW vers le SE reste prépondérante. L'existence d'une zone de convergence permanente de la dérive littorale a été notée par Niang-Diop (1995). Nous déduisons de nos résultats que celle-ci se situe au niveau de la plage de BATA sans pour autant pouvoir le confirmer, en l'absence de données entre Bata et Bargny. Cette convergence de la dérive littorale sur cette plage semble confirmée par la forte dynamique observée (forte accumulation pendant la saison sèche et érosion intense au cours de l'hivernage).

La spécificité du profil  $P_2$  serait due à un vannage des sédiments qui s'effectue à hauteur du musoir du canal (extrémité en mer), ce qui entrainerait les sédiments les plus fins dans le canal et nécessiterait souvent des dragages. Ceci expliquerait aussi la même classe modale observée dans les différentes unités morphologiques de la plage.

En outre, l'évolution des mouvements verticaux des profils de plage situés aux extrémités des ouvrages de protection, montre des bilans sédimentaires négatifs, beaucoup plus importants aux extrémités sud-est (en aval de la dérive) ( $P_4$  et  $P_6$ ) (figure 72) et une sédimentation sur la partie amont dérive du canal ( $P_2$ ).

On note aussi une amélioration du classement de Keuri Souf (P<sub>5</sub>) vers BATA (P<sub>6</sub>).

Ces résultats montrent l'existence d'une dérive littorale dominante dirigée du nord-ouest vers le sud-est, en conformité avec Niang-Diop (1995).



Figure 72 : Bilan et cumul annuels des mouvements verticaux des profils de plage

Les évolutions de la granulométrie sur l'ensemble des profils du bas estran, excepté le

profil  $P_6$ , quoique variable d'un profil à l'autre, sont comparables. Cette variation reste faible pendant la saison sèche et devient forte en saison des pluies, période au cours de laquelle le bas estran enregistre la granulométrie la plus grossière. Dans cette évolution, on peut distinguer trois groupes (figure 73):

- le groupe P1, P3 et P4 du secteur Cap des Biches - Cap de Diokoul

- le profil P2 de la centrale thermique du Cap des Biches

- le groupe P<sub>5</sub>, P<sub>6</sub> du secteur de la baie de Rufisque.



Figure 73 : Evolution de la moyenne Mz de l'ensemble des profils du bas estran

#### II.3.3. Analyse des variations transversales de la moyenne (Mz)

L'analyse des variations transversales de la moyenne (Mz) des profils montre, pour l'ensemble des profils, une diminution de la haute plage vers la plage sous-marine. A la centrale thermique, on note une certaine homogénéité des sédiments qui se caractérisent par la même classe modale au niveau des différentes unités morphologiques pendant toute l'année. Or, la granulométrie des sédiments conditionne la pente du profil de plage qui, selon Migniot et Bouloc (1981), est d'autant plus raide que les sédiments sont grossiers.

Il faut noter aussi l'arrivée de quantités importantes de coquilles de mollusques sur l'estran ; en avril-mai. Cette période correspond au début de la phase érosive du littoral.

## II.3.4. Variation de la moyenne Mz au cours de l'année par profil et selon les unités morphologiques

Les variations granulométriques les plus importantes de la moyenne Mz, obtenues en faisant la différence entre les valeurs extrêmes de la moyenne mensuelle par unité morphologique, sont notées sur le bas estran pour les profils  $P_2$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  et  $P_6$  et la zone déferlement pour les profils  $P_1$  et  $P_3$  (tableau 39).

	(v  an action - w  z max - w  z min)					
Unité morphologique	<b>P</b> <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>
Haute plage	/	46	90	46	113	75
Laisse de haute mer	51	47	78	28	80	68
Mi-estran	69	29	56	79	111	70
Bas estran	63	96	73	228	141	251
Déferlement	86	91	117	180	49	25

Tableau 39 : Variations de la moyenne Mz en µm au cours de l'année selon les unités morphologiques (Variation =Mz max - Mz mini)

Ces fortes variations s'expliqueraient par l'importance des forces hydrodynamiques du littoral de Rufisque, plus particulièrement à Diokoul (P<sub>4</sub>) et à l'extrémité du mur en enrochements de Keuri Souf - Bata (P<sub>6</sub>). Cela s'expliquerait aussi en partie l'érosion notée dans ces zones. Ces résultats corroborent les résultats de l'étude des mouvements verticaux dont les bilans annuels les plus importants sont également notés sur les profils P<sub>4</sub> (Diokoul) et P<sub>6</sub> (extrémité du cimetière de Thiawlène) avec respectivement – 22,15 m<sup>3</sup> par mètre linéaire et – 12,11 m<sup>3</sup> par mètre linéaire. De plus, les mouvements les plus importants du profil s'observent à ces deux endroits. La zone du Cap des Biches à la centrale thermique enregistre les variations les plus faibles.

La relation entre la morphologie et la sédimentation est souvent très difficile à établir. Nous savons que le premier terme répond en général plus vite aux modifications de l'environnement alors que le second réagit à plus long terme aux conditions environnementales (Niang-Diop, 1995). Toutefois, sur le littoral de Rufisque, la différenciation sédimentologique entre les deux secteurs est plus marquée.

#### III. Les impacts physiques des structures de protections sur le littoral

#### III.1. Généralités sur les impacts des structures de protection

Des précisions ont été faites dans de nombreux travaux sur les influences des ouvrages de protection. La synthèse faite ici est tirée de nombreux auteurs (Pilkey et Wright, 1988; Plant et Griggs, 1992; Paskoff, 1993; Bernatchez et Dubois, 2004).

La littérature met l'accent sur les impacts sur le milieu physique. C'est ainsi que Pilkey et Wright, (1988) distinguent l'érosion active qui se déroule devant la structure, de l'érosion passive qui est attribuable au contexte naturel régional et non lié à la structure. Ce qui permet de dire que les plages situées devant les ouvrages devraient subir une érosion plus intense que les plages adjacentes. Cette érosion s'accompagne de l'affouillement de l'ouvrage, phénomène conduisant à la modification du profil de plage (Kraus, 1988; Plant et Griggs, 1992; Bematchez et Dubois, 2004). Dans le cas des murs verticaux, cela s'accompagne d'une augmentation de la réflexion des vagues. La vague au contact du mur se réfléchit et le jet de rive qui en découle se heurte souvent à la vague suivante dans la zone de déferlement ou sur le bas estran avant que celle-ci ne s'effondre, provoquant le shoaling, qui entraine les sédiments vers le large.

Pour Paskoff (1993), les structures longitudinales accélèrent l'érosion des plages (figure 74), réduisent la largeur de l'estran et rompent l'équilibre sédimentaire entre la plage et la dune. Cependant, pour Griggs et Tait (1988), les plages situées immédiatement en aval de sites artificialisés, peuvent subir un déficit sédimentaire et ce, jusqu'à une distance de 150 m de la structure de protection.



Figure 74 : Effets nocifs d'un mur de protection sur une plage (les flèches symbolisent la dérive littorale) (Paskoff, 1993)

Dans le cas qui nous intéresse, ici le littoral de Rufisque, les ouvrages étant fréquemment battus par les vagues, l'affouillement conduit au basculement des murs verticaux et au dislocation des enrochements.

Les ouvrages perpendiculaires au rivage entrainent une rétention d'une partie de la charge sédimentaire transportée par la dérive littorale et permettent un rehaussement de la plage et une augmentation de la largeur de celle-ci. Ces avantages pour la partie en amont de la dérive se font au détriment de la partie en aval de la dérive qui s'érode (figure 75).



Figure 75 : Effets dommageables des épis sur le trait de côte (Paskoff, 1985, 2003 modifié)

Le dysfonctionnement créé par ces structures sur la dynamique hydro-sédimentaire à la côte a été mis en évidence en Mauritanie après la construction de la jetée du port de Nouakchott (Faye *et al.*, 2008) (figure 76), sur le littoral d'Oceanside en Californie (Dolan *et al.*, 1987), et en Haute Normandie (Costa et Davidson, 2004).



Figure 76: Evolution de la ligne de rivage aux abords du port de Nouakchott (Mauritanie) entre 1980 et 2005 (d'après Faye *et al.*, 2008)

Une enquête que nous avons menée en 2007 et en 2011 dans les quartiers bordant le littoral de Rufisque, Mbao, Bargny, Sindou Yoff, Ouakam et Saint Louis montre que les maisons de ces localités, jouxtant aujourd'hui la mer étaient distantes de celle-ci, il y a environ 50 ans, de plus de 200 m. Qu'elles soient abandonnées (Rufisque, Saint-Louis et Diakhanor par exemple) ou non, ces maisons sont, de nos jours, fréquemment soumises aux inondations marines du fait de l'avancée de la mer. Une visite de terrain menée récemment, le 23 novembre 2012, avec des membres de l'ONG Plan International, a permis d'en savoir plus : un habitant du quartier de Diokoul né vers 1946, confirme une avancée de la mer d'au moins 100 m en face du cimetière musulman et une augmentation de la profondeur de l'eau avant le haut fond, en face dudit cimetière (l'îlot de Khoniet). L'avancée de la mer qui résulte de l'élévation du niveau de la mer est donc une des principales causes de l'érosion côtière qui sévit sur cette bande côtière bien qu'elle soit tributaire de l'influence d'autres processus hydrodynamiques comme le vent, la houle, les courants de houle, la marée et les facteurs anthropiques.

#### III.2. Impacts des ouvrages de protection sur l'évolution morphosédimentaire du littoral de Rufisque

La zone côtière de la Petite Côte est très convoitée du fait de la richesse et de la variété de son écosystème ainsi que de son rôle dans l'économie du pays. Elle concentre l'essentiel des installations touristiques, industrielles et portuaires et ne cesse de subir des pressions naturelles et/ou anthropiques qui ne sont pas sans conséquences sur son évolution. Le littoral de Rufisque, premier segment de cette zone côtière où s'est manifesté très tôt l'érosion côtière, a connu plusieurs phases de construction d'ouvrages de protection. A la pression naturelle et anthropique en partie à l'origine de la pénurie de sédiments (Niang-Diop, 1995 s'ajoutent l'augmentation de la fréquence des houles fortes et l'élévation du niveau marin. Celle-ci est estimée à 13-15 cm en moyenne d'ici 2050 (GIEC/IPCC, 2001), suite au réchauffement climatique. Ainsi, à l'instar de l'Australie, des Pays Bas et des Etats Unis qui ont très tôt opté pour l'étude de la dynamique côtière pour mieux comprendre l'évolution morpho-sédimentaire de leurs plages, des travaux ont été menés sur le littoral sénégalais, en particulier à Rufisque (Diallo, 1982; Niang-Diop, 1995). Cependant, des dizaines d'années après le fonctionnement de ces ouvrages de protection construits pour la plupart après le travail de Niang-Diop (1995), nous avons jugé nécessaire d'évaluer l'impact de ces structures de protection sur l'évolution morpho-sédimentaire du littoral dans un contexte généralisé d'élévation du niveau marin.

Pour évaluer l'impact des ouvrages de protection sur l'évolution morpho sédimentaire du littoral de Rufisque, une comparaison a été faite avec les caractéristiques des profils de Niang-Diop (1995) et celles de nos profils qui sont levés sur les mêmes plages. Cependant, sur les plages dont les repères fixes de Niang-Diop (1995) ont été retrouvés (correspondant à nos profils  $P_2$  et  $P_3$ ), une comparaison des profils levés aux mêmes mois a été faite après un retraçage et une mise à l'échelle des profils de l'étude de Niang-Diop (1995)<sup>1</sup>.avec le logiciel Adobe illustrator. Les autres profils n'ont pas été levés avec les mêmes repères mais néanmoins permettent de faire une comparaison des caractéristiques de la plage concernée entre les deux périodes.

L'accrétion ou l'érosion des plages exprimées en volume de sédiments entre deux mois ont été déterminées par la superposition des profils mensuels consécutifs grâce au

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Le profils de Niang Diop (1995) ont été levés entre 1987-1988 et/ou entre 1989-1990

PROFILER. Ensuite, une comparaison des caractéristiques granulométriques des sédiments prélevés au niveau des profils comparés a été effectuée.

#### III.2.1. Comparaison des résultats

Les résultats issus de la comparaison de ces profils levés aux mêmes endroits, notamment en amont et/ou en aval dérive des ouvrages de protection durant les deux périodes d'étude sont reportés sur les tableaux 40, 41, 42 et 43. Les pages suivantes présentent l'analyse des résultats tirée de cette comparaison.

 Tableau 40 : Comparaison des données morpho-sédimentologiques des profils de plage en amont dérive

 de la centrale thermique du Cap des Biches

 Caractéristiques de la plage aérienne
 Pc (89-90)
 P2 (2005-2006)

Caractéristiques de la plage aérienne	P <sub>c</sub> (89-90)	P <sub>2</sub> (2005-2006)
Largeur moyenne (m)	25,30	52
Pente moyenne	0,04	0,03
Pente maximum	0,06	0,04
Forme dominante	Convexe	Convexe
Croissants de plage	Rarement	Rarement
Bilan annuel des mouvements verticaux (m/m linéaire)	- 0,23	+ 1,30
Amplitude des mouvements (m/m linéaire)	- 0,24 à + 0,11	- 15,84 à + 10,73
Erosion maximale mensuelle	Décembre-mars	décembre- janvier
Accumulation maximale mensuelle	octobre - décembre	mars - avril
Variations de Mz (BE) (en µm)	145 à 215	133 à 229
Mz minimum (BE)	décembre	avril
Mz maximum (BE)	octobre	juin

nord du mai en o	eton du ennetiere ma	Suman de Diokour	
Caractéristiques de la plage aérienne	P <sub>5</sub> (87-88)	P <sub>D</sub> (89-90)	P <sub>3</sub> (2005-2006)
Largeur moyenne(m)	28	19	38
Pente moyenne	0,08	0,07	0,06
Pente maximum	0,12	0,08	0,10
Forme dominante	Rectiligne	Rectiligne	Concave
Croissants de plage	Présents	Pas bien représentés	Très rarement
Bilan annuel des mouvements verticaux (m/mètre linéaire)	- 0,40	- 0,16	- 3,24
Amplitude des mouvements (m/mètre linéaire)	- 0,79 à + 0,60	-0,22 à $+0,15$	– 16,81 à + 9,95
Erosion maximale mensuelle	février – mars	mars – mai	juillet – août
Accumulation maximale mensuelle	mars – avril	juillet – août	janvier – février
Variations de Mz (BE) (µm)	112 à 166	120 à 200	130 à 186
Mz minimum (BE)	janvier	décembre	février
Mz maximum (BE)	septembre –juillet	août	août

Tableau 41 : Comparaison des données morpho-sédimentologiques des profils de plage de l'extrémité nord du mur en béton du cimetière musulman de Diokoul

 

 Tableau 42: Comparaison des données morpho-sédimentologiques des profils de plage de l'extrémité sud du mur en béton du cimetière musulman de Diokoul

Caractéristiques de la plage aérienne	P <sub>G</sub> (89-90)	P <sub>4</sub> (2005-2006)
Largeur moyenne (m)	21	40 m
Pente moyenne	0,06	0,06
Pente maximum	0,08	0,10
Forme dominante	Rectiligne	Concave
Croissants de plage	Rarement	Absents
Bilan annuel des mouvements verticaux (m <sup>3</sup> /mètre linéaire)	- 0,70	- 22,2
Amplitude des mouvements(m/mètre linéaire)	- 0,46 à 0	– 13,16 à 16,67
Erosion maximale mensuelle	octobre- décembre	juin - juillet
Accumulation maximale mensuelle	/	octobre – novembre
Variation de Mz (BE) (µm)	92 à 156	116 à 344
Mz minimum (BE)	décembre	juin et décembre
Mz maximum (BE)	juillet	juin

Caractéristiques de la plage aérienne	P <sub>10</sub> (87-88)	P <sub>J</sub> (89-90)	P <sub>6</sub> (2005-2006)
Largeur moyenne (m)	27	24	37
Pente moyenne	0,10	0,08	0,12
Pente maximum	0,13	0,10	0,22
Forme dominante	Variable	Concave	Convexe
Croissants de plage	Toujours présents	Toujours présents	Toujours présents
Bilan annuel des mouvements verticaux (m <sup>3</sup> /mètre linéaire)	- 0,18	- 0,26	- 12,11
Amplitude des mouvements (m/mètre linéaire)	-0,54 à $+0,77$	- 0,25 à + 0,11	- 29,60 à + 21,95
Erosion maximale mensuelle	février – mars	octobre – décembre	mars – avril
Accumulation maximale mensuelle	mars – avril	décembre – mars	février – mars
Variation de Mz (BE) (µm)	182 à 302	215 à 395	210 à 441
Mz minimum (BE)	novembre	décembre	décembre
Mz maximum (BE)	juillet	juillet	février

Tableau 43 : Comparaison des données morpho-sédimentologiques des profils de plage de l'extrémité sud du cimetière musulman de Thiawlène

#### **III.2.2.** Discussion

D'une manière générale, on note :

-une augmentation de la largeur moyenne des estrans et une plus grande importance des mouvements verticaux;

-une inversion des périodes d'érosion et d'accumulation maximale.

Au plan morphologique, il y a une évolution profonde des caractéristiques des profils de plage entre les deux périodes considérées. L'étude de Niang-Diop (1995) montre des profils de plage, à plage aérienne étroite avec une haute plage qui disparaît pendant la saison des pluies. Cette haute plage est absente sur le profil  $P_4$  ou subit une réduction très importante de sa largeur moyenne pour les autres profils. Cette disparition de la haute plage se traduit par l'augmentation de la largeur de l'estran, ou par la translation de la haute plage du côté continent ( $P_6$ ) traduisant un recul du trait de côte.

La plage de la centrale thermique ( $P_2$  et Pc) (tableau 40; figure 77) a maintenu sa pente mais sa largeur moyenne passe de 25,3 m à 52 m. Cependant, en aval de la dérive

littorale du canal (côté vers Diokoul), la plage est affectée par une érosion verticale très intense, attestée par une différence de niveau très nette de part et d'autre du canal. Ainsi, la partie située entre le canal et le cimetière musulman de Diokoul (profil P<sub>3</sub>) reçoit à la fois les contrecoups du chenal et les effets de contournement de l'extrémité du mur mixte.



Figure 77 : Comparaison des profils de plage en amont dérive du canal de la centrale thermique du Cap des Biches.

Les profils  $P_3$  et  $P_4$  du cimetière musulman de Diokoul (tableau 41 et 42; figures 78 et 79) ont maintenu leurs pentes faibles ; par contre on passe de profils rectilignes à des profils concaves. Cela serait témoin de l'intensification de l'érosion, accentuée par les effets de contournement induits par le mur (photo 16).



Figure 78: Comparaison des profils de plage à l'extrémité nord-ouest du cimetière musulman de Diokoul.



Figure 79: Comparaison des profils de plage à l'extrémité sud est du cimetière musulman de Diokoul.



Photo 16 : Contournement des vagues à l'extrémité du cimetière de Diokoul

Les profils  $P_D$  et  $P_G$  de Niang-Diop (1995) ont été levés au moment où des épis ont été construits sur cette plage. On peut donc conclure que le mur mixte a eu un effet négatif et que l'érosion observée à Diokoul est aggravée par le contournement des houles aux extrémités des murs de protection, au fonctionnement de ces murs pendant au moins 10 ans sans un suivi.

Par contre, la plage du cimetière de Thiawlène (et des plages de BATA) (tableau 43; figure 80) a subi un raidissement de sa pente avec cependant une variation considérable de la forme des profils de la saison sèche à la saison des pluies. Les profils de cette plage présentent une forme convexe pendant la saison sèche (au cours de la période d'accumulation) et une forme concave en saison des pluies (durant la période d'érosion). Ce passage des formes convexes aux formes concaves est visible sur le terrain dès le mois de juin avec une disparition total du stock sédimentaire de la saison sèche à l'origine de la concavité souvent notée sur l'estran.

Les profils passent de formes rectilignes ou convexes à des formes concaves sauf sur la plage de la centrale thermique qui est restée convexe à rectiligne. Seule la plage du cimetière de Thiawlène passe d'une forme variable à concave à une forme convexe. Cette forme convexe était très nette et bien visible sur le terrain lors de la saison sèche. Cela permet de dire que la forme d'un profil de plage ne peut pas être considérée comme un indicateur fiable de l'évolution du trait de côte parce que la zone était et reste affectée par un recul sans précédent de la ligne de rivage.



Figure 80: Comparaison des profils de plage du cimetière musulman de Thiawlène

Les changements de forme des profils les plus visibles du littoral de Rufisque s'observent sur la zone située entre le cimetière de Thiawlène et BATA, entre le canal de la centrale thermique et le profil  $P_3$ . Cette situation résulterait du durcissement de la plage le long du littoral compris entre le fond de la baie et la fin du cimetière de Thiawlène où il n'y a plus de plage devant la digue en enrochements. Ces changements seraient en rapport avec les impacts du mur en enrochements.

Toutefois, on peut dire qu'il n'y a pas de différence entre la pente d'une plage protégée par un mur en béton et celle d'une plage non protégée (Jaramillo *et al.*, 2002) mais à la différence de ces auteurs, on peut noter une différence de la largeur des deux sites sur le littoral de Rufisque. La différence de pente notée sur la plage du cimetière de Thiawlène (profil  $P_6$ ), entre les deux études serait liée à un effet de bout, plus accentué à l'extrémité en aval de la dérive littorale du mur en enrochements. Cela expliquerait en plus de l'affouillement, les chutes des extrémités sud du mur mixte survenu respectivement en 2004 (photo 17) à Diokoul Ndiayène et en juillet 2005 au cimetière musulman de Diokoul (photo 18).



Photo 17 : Effondrement de l'ouvrage mixte en gabions surmonté d'un mur en béton de Diokoul en 2004 (Ndour, 2006)



Photo 18 : Basculement de l'extrémité Sud du mur mixte en gabions surmontés de mur en béton du cimetière musulman de Diokoul survenu en Juillet 2005 (Ndour, 2006).

Concernant l'évolution des mouvements verticaux, des différences fondamentales ont été notées tant pour l'amplitude que pour l'intensité. La comparaison de ces mouvements transversaux montrent que le profil (P<sub>2</sub>) de la centrale thermique du Cap des Biches est passé d'un bilan négatif à un bilan positif (avec un cumul – 0,23 m/mètre linéaire en 1989- 1990 à + 1,3 m/mètre linéaire en 2005- 2006) avec un dédoublement de la largeur de la plage aérienne. L'ampleur des mouvements reste toutefois faible, comparée à ce qui est observé sur les autres profils.

Par ailleurs, cette évolution des mouvements verticaux est confirmée par la comparaison de deux de nos profils ( $P_2$  et  $P_{3}$ ) avec les profils des travaux de Niang-Diop (1995) (figure 81).



Figure 81: Comparaison de deux profils des deux périodes d'études; A: plage en amont dérive du canal de la centrale du Cap des Biches et B: Extrémité nord-ouest du mur du cimetière de Diokoul (Ndour *et al.*, 20014)

Niang-Diop (1995) a précisé que le taux légèrement positif sur la plage aérienne est compensé par des mouvements d'accumulation dans la zone de surf. Ce même cumul positif a été obtenu dans la zone en 1988. En fait, les prises de vue aériennes montrent que le canal d'alimentation en eau de refroidissement a pour effet de bloquer le transit sédimentaire, ce qui entraine une accumulation des sédiments en amont dérive. Le blocage de la dérive littorale a cependant influé sur l'évolution de la morphologie du segment de côte, situé entre la centrale thermique et le cimetière musulman de Diokoul. Cette partie du littoral est actuellement en érosion intense parce qu'elle reçoit à la fois les influences néfastes du canal et de l'érosion due aux effets de contournement de l'extrémité nord du mur mixte en gabions et en béton qui protège le cimetière. Cette plage se situe aussi à l'extrémité nord du haut fond de Diokoul.

Tous les autres profils sont passés d'une érosion faible ou modérée à une intensification du phénomène. Il s'agit des plages ou sont situés les profils  $P_3$ ,  $P_4$  et  $P_6$  avec

respectivement des cumuls de -0,4; -0,7 et -0,26 m<sup>3</sup> / m linéaire en 1987-1988 ou 1989-1990 contre des bilans annuels de -3,24, -22,20 et -12,11 m<sup>3</sup> /m linéaire en 2005-2006.

Il faut noter à ce niveau que des facteurs locaux, propres au littoral de Rufisque comme le déficit sédimentaire - dû en partie à sa position par rapport à la presqu'ile du Cap Vert, - la présence du canyon de Kayar et de Dakar, la situation de la région au centre du graben de Rufisque et la perpendicularité de la quasi-totalité des houles arrivant à la côte, sont autant de facteurs qui peuvent influer sur la sévérité de l'érosion verticale.

Les périodes d'érosion lors des levés de 1987/88 ou de 1989/90 sont situées entre octobre et mars et la période d'accumulation entre mars et juillet. Par contre, au cours de notre étude, elles sont situées respectivement entre mai et août, pendant la saison des pluies et, entre septembre et avril, au cours de la saison sèche. Nous avons donc durant la période d'étude une correspondance entre les périodes d'érosion et d'accumulation et le régime des houles sur la côte sud, notamment sur le littoral rufisquois. Pour rappel, la côte sud se caractérise par des houles très énergétiques (érosives) pendant la saison des pluies et des houles de beau temps pendant la saison sèche. Ainsi, contrairement aux résultats de Niang-Diop (1995), on a une coïncidence entre les périodes d'érosion ou d'accumulation et les saisons. Cela permet de conclure à un fonctionnement saisonnier des plages du littoral de Rufisque entre 2005 et 2006.

Les observations ci-dessous faites au cours de nos visites de terrain, entre juin 2005 et juillet 2008 ont permis de confirmer ce fonctionnement. On peut ainsi citer :

- les houles exceptionnelles (fortes houles) qui se produisent pendant la saison des pluies et qui provoquent en général des démaigrissements irréversibles.

- Des éboulements de l'extrémité du mur en enrochements s'observent en face du cimetière de Thiawlène (photo 19). Cela a été aussi le cas lors des fortes houles du 01 juillet 2007 avec d'énormes effets au niveau du cimetière de Thiawlène correspondant à l'extrémité du mur en enrochements de Keuri Souf-Thiawlène. A cet endroit on peut signaler la destruction du mur de clôture du cimetière et le départ d'ossements humains en mer. Ainsi, des événements de courte durée mais de forte intensité peuvent créer des discontinuités dans les tendances observées, donnant ainsi des évolutions à l'allure bien plus chaotique que linéaire (Cowell et Thom, 1994; Suanez, 2009).



Photo 19 : Microfalaise due aux effets de contournement de la digue en enrochements de Keuri Souf – Thiawlène (extrémité en face du cimetière de Thiawlène en octobre 2005)

Des houles très fortes ont été également notées dans la zone les 15 et 16 février 2010, et en février 2013 provoquant ainsi des démaigrissements très importants, notamment entre Bargny et Sindou . Elles pourraient être qualifiées de houles exceptionnelles, leur forte énergie serait due à une probable modification des caractéristiques (puissance, et période d'apparition) des processus hydrodynamiques.

L'érosion due aux effets de contournement entre la centrale thermique et le mur du cimetière musulman de Diokoul et, entre ce dernier et le nouveau mur en béton armé a pour conséquences un abaissement du profil de plage et la chute des extrémités de ces structures. Cela confirme les conclusions de Plant et Griggs (1992) sur les plages naturelles situées immédiatement en aval des structures artificielles qui subissent l'effet de courants de dérive littorale plus intenses ; cette situation est liée à la réflexion des vagues sur les structures rigides.

Ces données issues de levés de terrain sont très limitées dans le temps mais extrêmement précises pour quantifier la cinématique de la ligne de rivage à court terme (Dolan *et al.*, 1978 et 1979 ; Smith et Zarillo, 1990; Morton *et al.*, 1993 ). Cette étude comparative des caractéristiques morphologiques des profils de plage a permis de calculer les taux d'évolution de la ligne de rivage entre 1987 ou 1989 et 2005. Ces taux sont de : + 1,67 m / an au nord-ouest du canal de la centrale thermique, pour la période 1989-2005, - 0,55 m/ an et - 1,19 m / an respectivement au nord-ouest et au sud-est du cimetière musulman de Diokoul pour les périodes 1987-2005 et 1989-2005 et de - 0,55

m / an à l'extrémité sud du cimetière musulman de Thiawlène entre 1987 et 2005.

La comparaison des profils a donc mis en évidence une tendance généralisée de l'érosion des plages du littoral. Cela est conforme à l'évolution observée des profils.

La comparaison des caractéristiques sédimentologiques ne montre pas de différences remarquables de la granulométrie des sédiments entre les deux études. On trouve les mêmes types de sédiments, c'est-à-dire des sables très fins à fins et des sables moyens mésokurtiques et rarement bimodaux, répartis de part et d'autre du Cap de Diokoul comme l'a également noté Niang-Diop (1995) : sédiments fins du Cap des Biches à Diokoul et moyens dans la baie de Rufisque et de l'usine BATA (figure 82).



Figure 82: Comparaison des courbes granulométriques des sables de mi-estran des deux secteurs identifiés, de part et d'autre du Cap de Diokoul (Ndour *et al.*, 2014)

Cette différence sédimentologique pourrait résulter d'un fonctionnement de deux cellules distinctes (Niang-Diop, 1995). Dans les sédiments bimodaux, très rares, Flemming (2007) note que la comparaison des indices n'a pas de sens puisque les centiles utilisés appartiennent à des populations différentes. Ces sables de plage contiennent en effet des sédiments ferrugineux qui seraient issus, soit de l'altération des roches volcaniques, soit des cuirasses latéritiques et n'ont pas la même histoire géologique (Barusseau, 2011).

On note cependant, la forte augmentation de la taille des sédiments sur le bas estran de l'extrémité sud du mur mixte du cimetière de Diokoul et à l'extrémité de Bata, de 100 à 150 µm.

Les maxima et les minima de la moyenne (Mz) sur le bas estran sont enregistrés presque à la même période, à l'exception du profil P<sub>6</sub> où Mz est maximum au cours de la phase d'accumulation (saison sèche). Notre étude montre une différence fondamentale dans les courbes de Mz du bas estran des deux secteurs. Cette évolution permet d'isoler aussi les deux secteurs comme précédemment indiqué. Dans le secteur de Diokoul, la granulométrie s'affine au cours de la période d'accumulation où Mz enregistre son minimum sur le bas estran et devient plus grossière pendant la période d'érosion (saison des pluies). La situation s'inverse dans le deuxième secteur (baie de Rufisque, de Keuri Souf, Thiawlène et Bata), où Mz est maximum pendant l'accumulation (maximale en février), avec une courbe très irrégulière. Les courbes d'évolution de Mz du bas estran indiquent toutes la même évolution. Cela confirme la présence d'un cycle sédimentaire saisonnier bien établi du bas estran.

#### **IV.** Conclusion

Les études topographiques et sédimentologiques ont permis de mettre en évidence deux secteurs : un secteur nord-ouest séparé d'un secteur sud est par le cap de Diokoul. Les profils de plage effectués avant et après la construction d'ouvrages de protection ont également mis en évidence de profondes modifications de la forme des profils de plage et une intensification de l'érosion verticale après la construction des ouvrages de protection.

La présence du canal de refroidissement de la SENELEC dans le secteur nord-ouest a permis l'élargissement et la surélévation de la plage dans la partie amont par rapport à la dérive littorale. Entre la centrale thermique et le cimetière, la côte prend la forme d'une plage en poche suite à l'érosion intense qui entraine un recul du cordon littoral. Ce recul résulte d'une action plus intense des vagues avec l'augmentation d'intensité, produite par la concentration (convergence) des eaux qui se jettent sur un cordon littoral déjà affaibli par les extractions de sable et de coquilles, et la destruction de la végétation. A cela situation s'ajoutent les effets conjugués des contre coups du canal de refroidissement de la centrale thermique et des contournements du mur mixte du cimetière musulman de Diokoul.

Le secteur sud-est (plage de BATA), exposé à l'action des houles, est caractérisé par une forte amplification et la convergence des vagues à l'extrémité du mur en enrochements. Il correspond à une zone à très forte érosion, Un recul sans précédent du trait de côte est alors noté, alors que sur tout le rivage à l'amont, la ligne de rivage est stabilisée par le mur en enrochements.

La situation de pénurie sédimentaire qui prévaut sur le littoral de Rufisque résulterait d'un fonctionnement saisonnier caractérisé d'une part par une accumulation en saison sèche, et d'autre part par une période d'érosion hivernale renforcée par des événements (houles) de forte intensité dans un contexte d'élévation du niveau marin.

Actuellement, l'érosion s'accentue avec l'avancée de la mer. Les modifications de la morphologie de la côte s'opèrent et résulteraient de l'impact des ouvrages de protection. Ces mutations sont à corréler avec la recherche d'un nouvel équilibre, lié à l'élévation du niveau marin et au durcissement de la quasi-totalité des plages par les ouvrages de protection. Toutefois, même si ces aménagements n'ont pas ou pas encore eu d'effets significatifs sur la granulométrie des sables, l'étude comparative entre les deux périodes prouve que l'action anthropique joue un rôle dans le dysfonctionnement hydrosédimentaire littoral.

### **CHAPITRE 4:**

### **EVOLUTION RETROSPECTIVE DE LA LIGNE DE RIVAGE DE RUFISQUE DE 1954 À 2006**

L'analyse de la variabilité morpho-sédimentaire et celle de l'évolution historique de la ligne de rivage constituent des étapes fondamentales dans la connaissance des milieux côtiers. Elles aident à déterminer les tendances à long terme de l'évolution des littoraux (Niang-Diop, 1995) et permettent d'appréhender le contexte morpho-dynamique de réalisation des observations à court et moyen termes (Dehouck, 2006). Leur importance réside dans l'évaluation des travaux de génie côtier, de détermination des volumes de sables pour l'alimentation artificielle des plages et dans l'estimation des changements futurs de la ligne de rivage.

En ce début du 21<sup>e</sup>siècle, l'étude de la ligne de rivage du littoral de Rufisque ne peut se faire sans tenir compte des périodes marquantes de l'évolution de son histoire, au nombre de deux : la période antérieure et postérieure à la construction des ouvrages de protection, surtout dans le double contexte d'élévation du niveau marin et de leur utilisation comme moyen de lutte contre l'érosion côtière. Trois phases d'évolution s'observent pour la période allant de 1954 à 2006 : la première (1954-1980); est marquée par l'évolution du rivage en l'absence d'ouvrages de protection sur les plages ; la seconde (1980 - 1990); est caractérisée par la construction d'ouvrages de protection et la troisième, (1990 à 2006) correspond aux actions conjuguées de l'impact des ouvrages et de celles en rapport avec l'augmentation du niveau marin.

Les principales études menées sur l'évolution de la ligne de rivage dans la région et sur la base d'une méthodologie précise sont celles de Dièye (2000) et Niang-Diop (1995). Les autres travaux, notamment ceux de Sall (1982) et de Diallo (1982) ont porté sur ce littoral, mais sans préciser de manière explicite la méthodologie adoptée; ce qui ne permet pas une comparaison avec notre étude.

Sur le littoral de Rufisque, les travaux de Niang-Diop (1995) s'étaient focalisés sur la compréhension du fonctionnement morpho-sédimentaire et l'évolution historique de la ligne de rivage dans un contexte où l'influence des ouvrages de protection n'était pas aussi manifeste qu'elle l'est actuellement et qu'on pouvait être qualifiée de « naturelle ».

## I. Impact des ouvrages de protection sur l'évolution de la ligne de rivage de 1954 à 2006.

L'analyse de l'évolution à long terme des plages permet d'appréhender le contexte morpho-dynamique dans lequel se situent les observations à court et moyen termes (Dehouck, 2006).

#### I.1. La phase d'évolution naturelle 1954 à 1980

Pendant cette période datant d'avant la construction des ouvrages de protection, l'évolution des plages du littoral de Rufisque est considérée comme « naturelle », donc sans lien avec ces structures de protection.

En considérant le secteur d'étude dans son ensemble, nous obtenons un taux de recul global de - 0,45 m/an pour 796 transects. Mais en fait, on peut distinguer deux segments du littoral évoluant différemment : un secteur nord-ouest en progradation, avec un taux moyen de progradation de + 0,69 m/an et un secteur sud-est en érosion, avec un taux moyen d'érosion de - 1,38 m/an (figure 83).

Le premier secteur est caractérisé par une avancée moyenne du rivage de + 18 m. Dans ce secteur, les évolutions sont très variables. La zone du chenal de la centrale thermique du Cap des Biches se caractérise par une très forte accumulation, avec une avancée de 30 à 70 m du littoral sur la période considérée, alors que, de part et d'autre de cette zone, les avancées sont moindres, en général inférieures à 30 m sur la période. Durant cette phase, l'évolution observée est en relation, d'une part, avec la localisation de la zone à l'extrémité de la baie de Hann et, d'autre part, avec le canal d'alimentation en eau de refroidissement de la centrale thermique construit en 1966 et qui fonctionne comme une structure perpendiculaire au rivage. Elle se traduit par une progradation dans la partie à l'amont par rapport à la dérive littorale et une érosion dans la partie à l'aval.

Au niveau du deuxième secteur, sur les 465 transects étudiés, l'évolution moyenne calculée correspond à un recul de - 36 m des plages ; ce qui équivaut à une vitesse moyenne de recul de - 1,38 m/an. Ce secteur qui commence après le Cap de Diokoul est caractérisé par une érosion assez importante notamment au fond de la baie et dans la zone de l'usine BATA.

Globalement, cette érosion augmente vers le sud, avec deux zones de moindre érosion, juste après le fond de la baie de Rufisque puis dans la zone de Thiawlène-BATA. Après,

on enregistre un recul de presque 70 m du trait de côte, ce qui correspond à un taux de recul de - 2,6 m/ an sur la période considérée.

Cette diminution de l'érosion juste après le fond de la baie serait due à la présence d'une structure de protection rudimentaire mise en place vers 1957 et qui aurait probablement atténué l'érosion souvent observée en arrière d'un cap (Niang-Diop, 1995).



Figure 83 : Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1954 à 1980.
## I.2. La phase de construction des ouvrages (1980 à 1997)

Tout le littoral est en érosion au cours de cette période. Comme la période précédente, deux secteurs sont individualisés (figure 84). Dans le secteur nord-ouest, l'érosion est très intense, avec un recul moyen de - 28 m (maximum de 30 à 50 m), soit une vitesse moyenne de recul de -1,64 m/an pour un total de 290 transects. Toutefois, dans ce secteur, les évolutions les plus faibles sont notées au niveau de la plage de la centrale thermique du Cap des Biches, avec des reculs dépassant rarement 20 m sur la période. Le secteur sud-est est soumis à une érosion plus modérée (maximum de recul en général inférieur à 30 m au niveau de BATA), avec une évolution moyenne de la largeur de la plage d'environ - 20 m ; ce qui correspond à une vitesse moyenne de recul de - 1,17 m/an. Cependant, l'extrémité du mur en enrochements, située au niveau du cimetière de Thiawlène, se distingue par de forts reculs (près de 40 m) comparables aux reculs observés dans le secteur nord-ouest. A noter que le fond de la baie de Rufisque enregistre les taux d'érosion les plus élevés, avec un taux moyen annuel de recul de - 2 m/an.

La comparaison des deux phases dans le secteur sud-est (plage de Bata) montre une diminution des taux d'érosion moyens qui passent de -1,38 m/an à - 1,17 m/an. Les taux d'érosion les plus importants s'observent à l'extrémité du mur en enrochements, en face du cimetière de Thiawlène. On note une évolution moyenne de 40 m, correspondant à un recul de - 2,35 m/an ; ceci s'expliquerait par un effet de bout, lié sans doute à l'absence de "bras de raccordement". Cette structure aurait un effet d'atténuation du contournement de l'extrémité du mur par les houles. De même, le taux élevé observé au fond de la baie (- 2 m/an) serait lié au même phénomène dû à la présence du mur de protection.



Figure 84: Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1980 à 1997

#### I.3. La phase post-construction (1997 à 2006)

Cette période la plus récente et la plus courte est caractérisée par une évolution moyenne globale de - 1,55 m/an pour les 635 transects étudiés (figure 85). Hormis le fond de la baie de Rufisque qui s'individualise avec un taux moyen d'accrétion de + 3 m/an (4,72 % de l'ensemble des transects), tout le littoral de Rufisque est en érosion. On note cependant une très grande variation spatiale du phénomène. Globalement, on a une inversion des rythmes d'érosion, la zone sud du mur s'érodant plus vite que la zone nord-ouest (respectivement - 2,6 m/an et - 1,3 m/an). Le secteur nord-ouest, de Mbao à l'extrémité du cimetière musulman de Diokoul, se caractérise par un recul moyen de 12 m (taux de recul de - 1,3 m/an), alors qu'au sud-est du chenal de la centrale thermique les reculs atteignent plus de 40 m (taux de recul de - 4,44 m /an). Cette forte érosion serait liée à l'impact négatif du canal d'alimentation en eau de refroidissement de la centrale thermique. Le long du mur en enrochements de Keuri Souf-Thiawlène, le trait de côte s'est stabilisé à la base de l'enrochement durant toute cette phase.

Au niveau du secteur de Thiawlène-BATA, la moyenne du recul calculée est de - 24 m, soit - 2,66 m/an. On note ainsi une accentuation du phénomène d'érosion depuis le début de cette période. Celui-ci est imputable à plusieurs causes : la localisation dans une zone de convergence de la dérive littorale (Niang-Diop, 1995), le phénomène de réflexion des houles dû aux ouvrages de protection qui ne permettent pas d'atténuer l'énergie des houles réfléchies et l'effet de contournement du mur aggravé par l'augmentation du niveau marin dont le taux moyen d'élévation a été établi à 1,4 mm/an (Elouard *et al.*, 1977).

Ainsi, les fortes houles du 01 juillet 2007 ont conduit à la destruction du mur de clôture du cimetière, ce qui a provoqué son envahissement par les vagues et entraîné de vives protestations des populations. Le mur en enrochements avait été prolongé dans la même semaine. Ces forts taux de recul pourraient aussi s'expliquer par la recherche d'un nouvel équilibre des plages, lié sans doute à la perturbation qu'auraient provoqué les ouvrages de protection sur leur fonctionnement naturel et à l'augmentation du niveau marin. De telles houles sont susceptibles d'engendrer des transferts transversaux notables, capables d'influencer de manière durable l'évolution d'un littoral (Durand, 2001; El Abdellaoui et Ozer, 2007).



Figure 85 : Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1997 à 2006

## I.4. La période d'étude de 1954 à 2006

L'analyse des taux obtenus par régression linéaire pour la période de 1954 à 2006 montre que tout le littoral de Mbao à Rufisque est en érosion généralisée (figures 86 et 87), à l'exception de la plage de la centrale thermique du Cap des Biches caractérisée par une très faible accumulation avec un taux de + 0,15 m/an. Le taux global de recul est donc de - 0,81 m/an mais le recul du trait de côte augmente du nord au sud de - 0,4 m/an à - 1,5 m/an. On peut distinguer un secteur nord-ouest, où le taux global de recul est de - 0,39 m/an et un secteur sud-est où le taux de recul global est de - 1,42 m/an. Les taux d'évolution obtenus sont cependant très variables et permettent de distinguer au total cinq sous-secteurs :

- le sous-secteur de Mbao à la falaise du Cap des Biches, avec un taux moyen de recul de 0,40 m/an. Toutefois, il faut noter la très forte variabilité des taux d'érosion le long de ce sous-secteur. Ici, le cordon littoral laisse souvent apparaître par endroits une microfalaise constituée, en général, de marnes altérées alternant avec des sables coquilliers et qui borde la haute plage. Cette zone a d'abord connu une accumulation avant de subir une très forte érosion qui se manifeste par l'apparition de formations rocheuses précédemment enfouies. Dans ce sous-secteur, l'érosion la plus faible s'observe sur la falaise du Cap des Biches qui recule moins vite que les autres plages. Au droit de cette falaise, les taux de recul sont très faibles mais augmentent de part et d'autre, surtout au nord-ouest où ils peuvent atteindre 1 m/an. Toutefois comme l'indiquent Brunsden (2001) et Eurosion (2004) le recul des falaises en roches tendres est souvent épisodique avec des périodes de recul brutal suivies de périodes tranquilles.
- la plage de la centrale thermique du Cap des Biches de la Société Sénégalaise d'Electricité (SENELEC) est caractérisée par la présence du canal d'alimentation en eau de refroidissement de ladite usine qui joue le rôle d'épi et a pour avantage de freiner le recul de la côte. Ceci expliquerait la stabilité de cette plage, voire sa progradation (+ 0,15 m/an), dans un contexte d'érosion généralisée du littoral (photo 20);
- la zone comprise entre la centrale thermique et Diokoul a un taux moyen de recul de - 0,5 m/an, presque comparable au premier secteur. Le recul noté dans cette zone serait influencé par le canal qui crée un déséquilibre sédimentaire par

rétention d'une partie au moins des sédiments transportés par la dérive littorale, entraînant ainsi un déficit en aval de la structure. De plus, cette zone comprise entre Mbao et le Cap des Biches est soumise à une exploitation artisanale des sables coquilliers du cordon littoral estimée entre 10 et 15 tonnes par jour (Diallo, 1982). Même si cette exploitation a diminué, sa poursuite influe négativement sur le rôle protecteur du cordon littoral ;

- le fond de la baie de Rufisque se distingue par un taux de recul moyen du rivage de - 0,95 m/an. C'est à cet endroit de la baie que les taux d'érosion les plus faibles sont notés. En fait, cette zone a connu une érosion entre 1954 et 1997, suivie d'une période d'accumulation entre 1997 et 2006. Le cap joue bien son rôle protecteur mais empêche le dépôt de sédiments transportés par la dérive littorale. Par ailleurs, la partie située juste après le cap a été stabilisée entre 1992 et 1993, sans compter le détournement du canal de Beppé (canal central d'évacuation des eaux usées et de pluie de la ville) qui constituait une source d'apports sédimentaires pour la baie ;
- le secteur de la plage de BATA, situé après le mur en enrochements de Keuri Souf-Thiawlène, est celui qui est le plus menacé par l'érosion du littoral de Rufisque. Soumis à un recul qui n'a cessé de s'intensifier depuis le début de la période 1954-1980, il présente un taux moyen de recul de - 1,5 m/an, ce qui correspond, au cours de ce demi-siècle, à un recul moyen du rivage de - 78 m. Dans ce secteur, les auteurs antérieurs ont obtenu des taux légèrement supérieurs : - 1,8 m/an (Dièye, 2000) et - 1,7 m/an (Niang-Diop, 1995), les résultats que nous avons obtenus sont comparables aux leurs. Par contre, la méthode que nous avons utilisé est plus précise, le maillage de nos transects plus dense et la période d'étude beaucoup plus longue.



Photo 20: Effets bénéfique et dommageable du canal de la centrale thermique du Cap des Biches sur la sédimentation A:accumulation en amont de la dérive ; B : érosion en aval de la dérive (photo du 19/10/2005)



Figure 86 : Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1954 à 2006.



Figure 87 : Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1954 à 2006.

## **II.** Conclusion

La comparaison des résultats de l'étude des images aériennes et spatiales avec la situation actuelle de la région (toujours en érosion) montre que même si les ouvrages de protection longitudinaux en dur ou en enrochements peuvent atténuer l'érosion côtière, ils ne sont pas une solution adéquate à long terme. L'étude de l'évolution de la ligne de rivage à Rufisque par photo-interprétation d'images aériennes et spatiales de la période 1954 - 2006 a montré que le littoral est soumis à une érosion généralisée, à l'exception de la plage de la centrale thermique du Cap des Biches qui est en équilibre, voire en progradation. Cette érosion est fortement influencée par les structures de protection parallèles à la côte.

Avec l'élévation du niveau marin, la recherche d'un nouvel équilibre s'impose. Il ne peut se faire sans l'érosion des côtes basses et sableuses, particulièrement celles soumises à un déficit sédimentaire d'origine naturelle, éventuellement accentué par les extractions locales. D'où la nécessité de penser à d'autres stratégies d'adaptation planifiées à long terme, comme par exemple le retrait planifié des populations, pour un développement durable de la zone côtière du Sénégal en général, de la Petite Côte en particulier.

# CHAPITRE 5 :

## CHANGEMENT CLIMATIQUE ET STRATEGIES D'ADAPTATION À L'EROSION CÔTIERE AU SENEGAL: LES OBSTACLES

Le développement durable intègre actuellement les stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. L'arrimage de la connaissance scientifique, en constante mutation, et du processus de concertation indispensable à une prise de décision à la fois équitable, durable et efficace demeure un problème, objet de nombreuses études (Füssel, 2007). C'est ainsi qu'au Sénégal, plusieurs études, projets et programmes sont mis en œuvre dans le contexte des changements climatiques avec orientations stratégiques. Il s'agit principalement entre autres:

les études de vulnérabilités des côtes sénégalaises face aux changements climatiques (Dennis *et al.*, 1990 ; Misdorp *et al.*, 1990 ; Hoozemans *et al.*, 1993 ; Niang-Diop *et al* 2005).

- les communications nationales élaborées respectivement en 1997 et 2010.

- la Stratégie initiale nationale de mise en œuvre de la CCNUCC en 1999

 le Plan d'Action National d'Adaptation élaboré en 2006 pour les secteurs de l'agriculture, de l'eau et des zones côtières pour identifier les besoins dans le cours terme en matière d'adaptation.

- la gestion intégrée des zones côtières entre 20012 et 2013 visant à relever les défis actuels et futures dans le contexte des changements climatiques.

Cependant, s'inscrire dans cette dynamique internationale de développement durable dans le contexte du changement climatique, notamment dans le cadre de l'élévation du niveau marin, nécessite de faire face à un certain nombre de réalités internes (obstacles) à la zone côtière et parfois spécifiques à chaque pays. Ces obstacles sont à la fois d'ordre scientifique, technologique, socio-économique et politique.

Pour le Sénégal, le problème des stratégies d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer se pose avec acuité du fait des difficultés qu'elles engendrent dans la lutte contre les causes du phénomène (stratégies d'atténuation), et par l'existence de certains d'obstacles à surmonter au préalable face au changement climatique. D'où l'importance ou la nécessité de s'interroger sur les obstacles qui entravent la mise en place de stratégies d'adaptation à l'érosion côtière dans la dynamique internationale d'intégration des effets du changement climatique dans les politiques de développement durable.

Dans ce chapitre, nous essayons de passer en revue les différentes barrières qui, sans être exhaustives, permettront d'avoir une idée de la complexité de mise en œuvre des stratégies d'adaptation à l'érosion côtière dans un pays en développement.

## I. Changement climatique et stratégies d'adaptation

## I.1. Le Changement climatique

Le climat peut être défini comme étant l'état moyen de l'atmosphère sur une période de temps donnée en un lieu géographique particulier (OMM, 2003), alors que le changement climatique correspond à un changement de cet état moyen. Pour le GIEC/IPCC (2007) le changement climatique se définit comme étant « une variation de l'état du climat que l'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et /ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Il se rapporte à tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine » Cependant, la CCNUCC, définit « les changements climatiques » comme étant des «changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.» Ces variations climatiques naturelles sont influencées principalement par trois paramètres qui sont l'excentricité, l'obliquité et la précession.

Lors des changements climatiques les plus remarquables de l'histoire de la Terre se succédaient des périodes glaciaires et des périodes interglaciaires qui se traduisaient sur le continent par des phases de régression et de transgression marines qui ont laissé des traces sur le littoral. Ces phénomènes figurent avec la disparition d'écosystèmes ou d'espèces, parmi les manifestations les plus remarquables des changements climatiques. L'augmentation de la température agit à la fois sur le niveau des océans, soit par la dilatation entrainant l'augmentation du volume des eaux (réchauffement des eaux océaniques appelé expansion thermique), soit indirectement en occasionnant la fonte des glaciers continentaux et calottes glaciaires qui provoquent une hausse du niveau marin. En effet, l'élévation de la température et la diminution de la couverture neigeuse qui en résulte vont dans le sens d'une élévation du niveau marin (figure 88).



Figure 88 : Variations des températures, du niveau moyen de la mer et de la couverture neigeuse dans l'Hémisphère Nord (GIEC/IPCC, 2007)

D'après le GIEC/IPCC (2007), l'élévation du niveau de la mer est depuis 1993 imputable pour 57 % environ à la dilatation thermique des océans, pour 28 % environ à la fonte des glaciers et des calottes glaciaires et, pour le reste, à la rétraction des nappes glaciaires polaires. Ainsi les craintes qu'on avait dans les années 1990, sur une possible augmentation du niveau marin en cas de poursuite d'émission de gaz à effet de serre sont vérifiées de nos jours. Or les conséquences d'une élévation du niveau marin sur le littoral sont connues depuis longtemps (Bruun, 1962). En effet, avec la péjoration climatique et les projections pessimistes des scénarios d'évolution des températures (figure 89), et de l'inertie du système climatique, il faut s'attendre à l'aggravation de l'érosion côtière.



Figure 89 : Prévisions du réchauffement climatique au 21ème siècle selon les scénarios d'émissions du rapport du GIEC/ I.P.C.C (2001)- Scénarios d'émissions IS92e à sensibilité climatique élevée, IS92a à sensibilité climatique moyenne et IS92c à sensibilité climatique faible

Le Sénégal est concerné par les impacts du changement climatique car son caractère de côte sableuse basse le rend très vulnérable à une élévation du niveau de la mer (Niang-Diop *et al.*, 2005). Il est donc très exposé à l'érosion côtière si l'on définit l'exposition comme étant la présence de personnes, de moyens de subsistance, de ressources et de services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans un lieu susceptible de subir les dommages (GIEC/IPCC, 2012). Pour lutter contre ce fléau qui menace actuellement le devenir de la quasi-totalité du littoral, les populations côtières ont mis en place des initiatives de protection dont le nombre et la variété rendent compte du degré de la menace, et de leur exposition au risque d'érosion. C'est pourquoi il faut une adaptation planifiée aux effets inhérents à cette élévation.

## I.2. Les stratégies d'adaptation au changement climatique

Dès sa création en 1992, la Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique (CCNUCC) recommandait deux types de stratégies de lutte contre le changement climatique : d'une part, l'atténuation qui peut être définie par « la mise en œuvre de politiques destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à renforcer les puits » et, d'autre part, l'adaptation constituée par « les initiatives et mesures prises pour réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets des changements climatiques réels ou prévus » (GIEC/IPCC, 2007). Le puits est définit ici comme un processus, une activité ou un mécanisme qui enlève de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur d'un gaz à effet de serre ou d'un aérosol (PNUE, 2009)

A l'origine, l'atténuation était réservée aux pays développés qui sont les principaux émetteurs de gaz à effet de serre et l'adaptation aux pays en développement sous prétexte que le développement économique était le principal moteur de la capacité d'adaptation et ces dernières n'ont aucune obligation de diminuer les leurs. Si cela est vrai dans une certaine mesure, il faut savoir aussi que le changement climatique et ses effets sont foncièrement l'affaire de tous (Kirby, 2009). En plus de l'atténuation et de l'adaptation, nous avons la gestion intégrée de la zone côtière (GIZC). C'est une stratégie d'adaptation qui a pour ambition de faciliter le développement durable (Billé (2009). Selon l'OMM, (2006), c'est un processus de planification et de coordination de la gestion de l'aménagement et des ressources côtières et qui privilégie l'interface terre/eau.

Au Sénégal, même si le gouvernement reconnaît la nécessité de développer des politiques d'atténuation, ces dernières constituent souvent des problématiques qui ne nécessitent pas de mesures politiques supplémentaires parce que le niveau d'émission des gaz à effet de serre est faible comparé à celui des pays développés. De surcroît, l'accessibilité des fonds alloués à l'atténuation n'est pas facile au contraire du développement de stratégies d'adaptation. Cette position sur les stratégies d'atténuation se comprend dans la mesure où les efforts faits au niveau international n'ont pas encore permis d'espérer une diminution des émissions des gaz à effets de serre. Ainsi, les stratégies de lutte contre les changements climatiques sont plus tournées vers l'adaptation et le resteront pendant longtemps. Dès lors, se pose un problème de bonnes ou de mauvaises stratégies d'adaptation. Les stratégies d'adaptation au changement climatique doivent faire l'objet d'une réflexion approfondie pour que l'option choisie ne produise pas des impacts négatifs, plus préjudiciables à l'environnement. Il faut donc éviter ce que Adejuwon *et al.* (2001) appellent la maladaptation. Dans le cas de l'érosion côtière pour éviter cette maladaptation et œuvrer dans la durabilité (le long terme)

plusieurs obstacles devraient être surmontés avant la mise en place de stratégies.

## II. Les stratégies d'adaptation à l'érosion côtière

Le terme impact peut être perçu de deux manières différentes (positive ou négative). Cependant, s'adapter à l'érosion côtière signifie ici développer un ensemble de stratégies visant à atténuer les impacts négatifs de l'élévation du niveau de la mer (en particulier). Les stratégies d'adaptation des régions littorales à l'érosion côtière, à l'élévation du niveau de la mer suite au changement climatique et aux ondes de tempête peuvent être regroupées en trois grandes options (Nicholls et Mimura, 1998; Nicholls, 2003) (figure 90) ; chaque option à des avantages et des inconvénients (tableau 44).

1990	-
Retrait	-
Accommodation	i
Protection *	

Figure 90: Stratégies d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer (GIEC/IPCC, 1990)

la mer (Carreno et al., 2008)			
Types de stratégies	Avantages	Inconvénients	
Protection	Efficacité dans la résolution	Coûts importants déplacement	
Figer le trait de côte (digues,	des problèmes locaux	du phénomène érosif vers	
enrochements, ou agir sur les	Forte acceptabilité sociale	d'autres secteurs	
causes de l'érosion		Perturbation du fonctionnement	
(brise-lames, épis,		sédimentologique	
rechargement en sable)			
"Accommodation"	Gain d'espace et préservation	Mesures locales non uniformes	
(ajustement des systèmes	de l'état naturel du rivage	Mesures ne répondant pas à un	
naturels et humains à un		impératif de long terme	
environnement nouveau ou	Politique locale		
changeant)			
S'adapter au phénomène en	Faible coût		
édictant des règles de	Indemnisation et surcoûts des		
construction (zonage,	ouvrages de protection évités		
rehaussement des			
fondations)			
Recul stratégique	Plus grande efficacité à court	Besoin d'espace à l'arrière, et de	
Déplacer les objets d'enjeux	et long termes	terrains d'accueil pour déplacer	
vers l'intérieur		les infrastructures et activités	
	Pas d'entretien	S'applique difficilement dans	
		des zones à fort enjeu socio-	
	Pas d'impact sur le	économique ou pour des	
	fonctionnement sédimentaire	infrastructures et une	
		urbanisation lourde.	
		Faible acceptabilité sociale	
Non-action	Respect du fonctionnement	Application limitée aux espaces	
Prendre la décision de ne pas	naturel	naturels à très faibles enjeux	
agir			

Tableau 44: Avantages et inconvénients de différentes options d'adaptation face à l'élévation du niveau de

Dans le retrait planifié, on reconnaît que l'érosion des côtes est inévitable, et qu'il vaut mieux abandonner les zones situées trop près du rivage, ou n'y installer que des structures temporaires qui peuvent être sacrifiées.

Dans le cas de l'accommodation, on choisit des techniques de construction qui visent à réduire les dommages au minimum (en installant les bâtiments sur des pilotis), ou on adopte des plans d'affectation des terres ou d'aménagement qui ne permettent que des structures qui doivent nécessairement être situées sur le rivage (port ou usines de transformation du poisson) et interdire les autres types de construction (résidences

privées). On peut aussi choisir des plantes adaptées au sel.

Pour l'option de protection, on choisit de consolider le rivage, soit par des solutions d'ingénierie lourdes (enrochements, épis) ou légères (dunes couvertes de végétaux comme l'ammophile).

Ces stratégies d'adaptation sont conditionnées par l'importance des terres en retrait ou «enjeu», c'est-à-dire l'ensemble de la population, des actifs et du patrimoine (habitations, bâtiments, usines, réseaux ferrés, réseaux électriques, réseaux d'eau, etc.) qui pourrait être affecté par un aléa (événement dont l'occurrence engendre des dommages humains ou économiques) (Hallégatte, 2009). Elles dépendent aussi de l'état de développement technologique du pays, des facteurs socioculturels propres aux populations littorales et de l'écosystème côtier. Il faut noter que les écosystèmes sont dotés de propriétés qui leur sont propres et peuvent réagir à un *stimulus* positivement ou négativement. Cette capacité d'adaptation peut dépendre du système lui-même et se traduit par sa résilience. Dans le cas du changement climatique, l'objectif reste la gestion du risque (figure 91).



Figure 91: Stratégies d'adaptation et de gestion des risques et de catastrophes face au changement climatique (GIEC/IPCC, 2012).

## III. Les obstacles aux stratégies d'adaptation à l'érosion côtière au Sénégal

La lutte contre les impacts de l'élévation du niveau de la mer se heurte à un certain nombre de barrières qu'il est important de connaître pour les franchir ou les contourner et mettre en place une bonne stratégie d'adaptation. Celle-ci doit permettre dans le pire des cas de maintenir l'état actuel de la zone menacée. Ainsi, la connaissance des obstacles est un révélateur pour la mise en œuvre des stratégies d'adaptation à l'érosion côtière au Sénégal. Le révélateur est défini comme étant un «ensemble de processus clairement identifiables, porteurs d'enjeux forts et susceptibles d'éclairer les pratiques, les stratégies et les intérêts des différents acteurs qui interviennent dans le champ étudié» (Piermay, 2003).

Les zones côtières sont particulièrement complexes du point de vue de leur dynamique: elles sont influencées par de multitudes pressions et des forces interdépendantes, parmi lesquelles les systèmes hydrologiques, les facteurs hydrodynamiques, géomorphologiques, socio-économiques, administratifs, institutionnels et culturels. Faute de prendre en compte l'ensemble de ces facteurs dont l'impact sur la dynamique littorale s'avère déterminant, toute tentative de gestion durable du littoral est vouée à l'échec.

Cependant, si on analyse les relations entre causes des changements climatiques et développement durable, on note une contradiction entre les objectifs de croissance économique et ceux de réduction des GES et entre aussi les questions liés aux financements sur l'adaptation dans la zone côtières et les problèmes socio-économiques dans ce milieu. A ces barrières fondamentales dans la gestion de l'environnement côtier sénégalais, s'ajoutent :

- la difficulté de proposer des solutions d'adaptation fiables vu l'état actuel de la connaissance sur la dynamique littorale

- les incertitudes liées aux changements climatiques et au phénomènes extrêmes

- Les politiques publiques actuelles à l'échelle internationale sont plus orientées vers la réduction des GES et nous pays en voie de développement nous souffrons plus de la variabilité climatique c'est à dire des impacts négatifs. Ce qui pourrait diminuer l'importance qu'on devrait accorder à l'adaptation.

l'appropriation de l'espace littoral (DPM) qui est essentiellement à mettre sur le compte de l'étalement urbain et de la croissance des infrastructures industrielles, de la position géographique du Sénégal et de son rôle historique (capitale de l'Afrique Occidentale Française (AOF) dans la sous région. Et même si la législation (Loi Littorale) permettra de réguler l'occupation de la zone côtière, des superficies importantes à valeur économique élevée sont déjà dévolues au bâti (résidentiel, industriel, touristique etc.).

L'adaptation des communautés côtières et d'une manière générale des États côtiers aux changements climatiques se heurte ainsi à plusieurs obstacles d'ordres scientifiques et techniques, financiers, humains et socioculturels, politiques, institutionnels et législatifs.

#### **III.1.** Les processus hydrodynamiques

Les facteurs hydrodynamiques demeurent les plus essentiels pour la dynamique côtière et, par conséquent, pour la gestion de l'érosion côtière. Ceci est particulièrement vrai pour la Petite Côte du Sénégal, où ils assurent principalement l'alimentation des plages. Or si un de ces facteurs hydrodynamiques évolue naturellement, le littoral va tendre à s'adapter à cette nouvelle condition.

Le changement climatique peut modifier potentiellement les climats de vents (cyclones, tempêtes, alizés) qui induisent des évolutions des vagues (orientations, fréquence Hs...) qui modifient l'énergie des vagues à la côte en temps normales et durant les chocs (événements extrêmes). Cette énergie influe beaucoup sur les courants *cross-shore*, la dérive littorale etc. Ces paramètres contrôlent les niveaux d'aléas (érosion et submersion marine) et l'évolution de la côte (stabilité, accrétion et érosion) auxquels chaque segment côtier est exposé. Le changement climatique, peut donc entrainer une modification des caractéristiques de la dérive littorale et des courants associés qui sont en grande partie les paramètres de contrôle de l'érosion côtière.

De cette connaissance des facteurs hydrodynamiques, dépend celle des bilans et cellules sédimentaires. Selon le GIEC/IPCC (2007) chaque système côtier a ses seuils qui dépendent de ses caractéristiques hydrodynamiques et sédimentaires. Il est important de connaître ces seuils pour mieux pouvoir gérer et aménager les zones côtières.

Dans le cas des stratégies d'adaptation, les facteurs hydrodynamiques sont aussi déterminants dans le dimensionnement des ouvrages. Les travaux de protection réalisés sur le littoral, sont jusqu'à présent basés sur des caractéristiques définies par les études

antérieures, L'avancée de la technologie permet aujourd'hui de connaitre d'autres paramètres, avec plus de précision. Une fois cet obstacle franchi, les résultats aideront à bien définir ou choisir l'option d'adaptation et de faire un découpage du linéaire côtier qui ne peut, actuellement, s'appuyer que sur des considérations géomorphologiques et/ou administratives. La connaissance de ces facteurs (hydrodynamiques et cellules sédimentaires) permettra de s'inscrire dans une dynamique de gestion intégrée de la zone côtière à l'échelle locale à partir d'unités cohérentes de gestion, ce qui pourra déterminer le type de stratégie d'adaptation et réduire dans le cas de la protection, les effets néfastes sur les zones avoisinantes.

#### **III.2.** Les obstacles techniques

Avec le changement climatique et le temps écoulé depuis les premières études sur le littoral sénégalais, les études sur les facteurs hydrodynamiques n'ont pas été réactualisés et on note l'absence d'études sectorielles *in situ*. L'augmentation du niveau marin peut s'accompagner d'une modification des caractéristiques hydrodynamiques. Le développement de la technologie a permis une amélioration des connaissances sur les caractéristiques des processus côtiers, moteurs de la dynamique littorale. Les stratégies d'adaptation et la gestion des côtes ne peuvent pas toujours être analysées avec clairvoyance à cause d'un manque d'études de pointe. Les nouvelles technologies sont loin d'être accessible ou même inconnues. Les actions faites sur le littoral ne s'appuient que sur des connaissances très limitées et précaires des anciennes études. Cela peut biaiser et même porter préjudice aux résultats de plusieurs stratégies d'adaptation et de gestion du littoral. L'indisponibilité de technologies adéquates et le manque de techniciens en génie côtier rend donc toute étude de la dynamique partielle et peut conduire à une option d'adaptation très risquée.

En effet, la morphologie du littoral, la non maitrise de la dynamique, la forte vulnérabilité du milieu, les stratégies d'adaptation très limitées, une gestion planifiée et concertée et la mobilisation de tous les acteurs devrait aider à réduire et stopper les agressions et infractions de l'environnement côtier ; ce qui aiderait à mieux définir de nouvelles et politiques appropriées d'adaptation.

#### **III.3.** Les obstacles humains

Comme le note Hulme (2009) « c'est à l'intérieur même de nos sociétés que se trouvent les obstacles majeurs à l'adaptation, notamment dans la façon dont elles sont organisées, les valeurs qu'elles véhiculent, les connaissances qu'elles construisent, les relations qui existent entre les individus, les institutions et l'Etat ». Parmi les populations littorales sénégalaises, acteurs directement concernés par l'érosion côtière, figurent les villages traditionnels qui tirent leur subsistance de la pêche et des activités connexes. Le cas de ces populations reste un obstacle déterminant dans la mise en place des stratégies d'adaptation et de gestion intégrée. Aux relations qu'elles entretiennent avec la zone côtière, s'ajoute leur force sociale et politique qu'on doit prendre en compte dans le choix de stratégie plus réaliste. De plus, le fonctionnement historique et complexe de ces villages traditionnels, n'est pas facile à décrypter, surtout dans la région de Dakar où leur influence est manifeste sur la gestion des terres: le droit coutumier par exemple reste toujours problématique et l'Etat y exerce un contrôle limité. Dans le cas du relogement par exemple, les populations traditionnelles acceptent souvent la proposition. Cependant, les promesses faites souvent par des acteurs politiques à la recherche d'un électorat sont sans suite. Il faut ajouter à cela la complexité de ces sociétés qui fait que les conditions qu'elles posent sont difficiles et parfois même elles ne sont pas d'accord entre elles.

Par ailleurs, le patrimoine cultuel et culturel des populations joue un rôle important aussi bien pour la gestion intégrée du littoral que pour les stratégies d'adaptation. Même si ce patrimoine reste légitime, il constitue un obstacle pour la stratégie de recul du fait de son statut dans la population sénégalaise. La stratégie de recul n'est pas acceptable pour la plupart des populations côtières pour des raisons à la fois économiques et culturelles. En effet les croyances socioculturelles, combinées à la valeur économique des terres et l'importance de la population (enjeux) font que la stratégie de recul sera difficilement admissible, alors que l'accommodation nécessitera la restructuration d'un important linéaire côtier et n'empêchera pas par exemple le risque de submersion.

Par ailleurs, il est donc évident que vouloir maintenir la durabilité environnementale du littoral sur certains secteurs risque d'être une source de conflit entre acteurs pour la maintien de certains moyens d'existence des populations (activités, culture etc.).

En effet, le risque d'érosion semble peu inquiéter les populations parce que même connu, il est souvent négligé ou placé dans la croyance divine (la volonté de Dieu). En outre, le risque n'est pas perçu de façon assez forte par l'ensemble de la population, mais essentiellement par les acteurs scientifiques, pour qu'il déclenche la nécessité de l'action ou une réelle mobilisation dans la société civile (Weber 2006). Les manifestations souvent notées sont le fait des populations directement menacées et/ou ayant subi des dommages (cas des fortes houles ayant provoqué des submersions par exemple). Il y a aussi, certains acteurs politiques et ONGs qui ne font que de la propagande en faisant croire aux populations qu'ils ont des solutions alors qu'ils ne connaissent rien du problème et des enjeux. Au niveau de ces populations littorales, les problèmes sociaux comme la pauvreté, la santé sont plus perceptibles. Le niveau de vie de ces populations, ne leur permettant pas un accès aux adaptations technologiques adéquates à l'option de protection.

En outre, les ressources humaines sont très limitées en nombre et surtout en qualité et ne disposent pas de conditions de travail adéquates. Ces obstacles font qu'au cours des prises de décision on ne fait qu'épiloguer sur le problème d'érosion côtière.

## **III.4.** Les obstacles financiers

Ces obstacles se situent principalement à deux niveaux:

- pour la recherche scientifique, le manque de moyens financiers et/ou la difficulté à accéder au financement constitue pour les spécialistes un obstacle pour mener à bien des études de haut niveau. Cette barrière a pour conséquence la non réactualisation des études antérieures à partir des nouvelles technologies par exemple, pour la maitrise des processus hydrodynamiques. Par ailleurs, l'érosion côtière est aujourd'hui une problématique pour laquelle le financement est un enjeu énorme. Cela entraîne une reconversion de spécialistes d'autres domaines.
- pour les options protection, accommodation et recul stratégique, les coûts sont énormes et ne sont pas toujours à la portée des populations. De plus, certaines options comme la stratégie de recul se heurtent dans plusieurs cas à des problèmes socio-économiques. A cela, il faut ajouter le financement de la protection qui reste une équation de premier ordre pour l'Etat et les ONGs.

## III.5. Les obstacles politiques, institutionnels et législatifs

Ils sont nombreux, et sont en rapport avec la diversité des acteurs qui interviennent sur le littoral. Dans le cas de l'érosion côtière, les stratégies des politiques publiques restent ambigües. Si la lutte contre l'érosion "figure" dans l'agenda politique, les actions concrètes sont laissées sous le contrôle de politiques non publiques (financements extérieurs, ONGs, etc.) qui 'interviennent que quand le problème est aigu ou a déjà fait des dégâts. L'Etat, au même titre que ces dernières, intervient parfois lorsque l'enjeu politique et/ou économique est énorme. Une insuffisance de la prise de conscience des décideurs politiques est aussi notée sur les questions environnementales liées à la gestion côtière. Les principales ministères : environnement, pêche, infrastructure, économie, finance, tourisme, urbanisme, habitat, culture, etc. concernés par la question côtière n'ont pas la même vision sur la gestion du littoral. Les conséquences de certaines autorisations d'occupation du littoral ne sont pas bien cernées par les pouvoirs publics.

Dans la plupart des zones menacées à faibles enjeux économiques ou politiques, les intérêts à court terme de mise en œuvre d'une option d'adaptation à l'érosion ne sont pas visibles et en plus le rapport coûts-bénéfices des options d'adaptation n'est pas favorable à l'action publique (ECA, 2009) et les populations sont laissées à elles-mêmes. Associé au sous-développement et à la demande sociale pressante, sur les minimums vitaux, l'existence d'un problème environnemental dont les enjeux politiques sont faibles ne mène pas nécessairement à la mise en œuvre de mesures politiques supplémentaires. De telles problèmes se trouvent donc très vite écarté du champ des politiques publiques (Knoepfel *et al.*, 2010, 2011) (figure 92).

Le cadre législatif environnemental sénégalais présente un paradoxe où les lois dans le domaine de la gestion de l'environnement sont mort-nées et ignorées par ceux qui sont censés les appliquer. A cela s'ajoute la lenteur des procédures législatives quand il s'agit de questions environnementales (lois rarement modifiées ou prennent du temps pour l'être).

Ce qui précède fait ressortir l'urgence de l'établissement d'une loi sur le domaine littoral et sur le Domaine Public Maritime (DPM) en particulier. Cette loi devra unifier les divers codes existants (code de l'urbanisme, code de l'environnement, loi sur le domaine public maritime...) pour mettre fin à l'embrouillement juridique actuel, ou, à tout le moins corriger les incompatibilités entre les projets d'aménagement et les dispositions juridiques en vigueur, à moins qu'elle ne soit comme les précédentes pour meubler les tiroirs. La lenteur de la promulgation de cette dite loi pose la question de la complexité de la gestion juridique du milieu. Quoiqu'il soit, l'importance de cette loi réside dans la gestion de l'environnement côtier dans le contexte du changement climatique. Cette gestion ne s'agit pas d'une action ponctuelle mais d'un processus continu.



Figure 92: Mécanisme de filtrage dans le processus de d'élaboration des politiques publiques (Knoepfel *et al* 2010).

#### **IV.** Conclusion

La lutte contre l'érosion doit être le procédé par lequel plusieurs stratégies sont traitées, analysées, en vue de trouver la plus satisfaisante. En Afrique de l'ouest en particulier, les côtes souffrent d'une carence ou de l'insuffisance de données qui étaient le plus souvent obsolètes car trop anciennes parfois peu fiables, ou d'un manque de précision lié aux techniques de mesures et traitements de l'époque (Suanez, 2009). Les littoraux africains sont assujettis à des réponses morphologiques complexes notamment négatives face à des changements naturels et anthropiques comme l'élévation du niveau et l'urbanisation parce leur vulnérabilité est liée à la faible capacité de la population à s'adapter. L'analyse de l'évolution de la situation actuelle qui prévaut dans les différentes parties du littoral sénégalais, nécessite de percevoir le problème de la gestion

de la zone côtière sous plusieurs angles de vue. Cela permettra de trouver des solutions appropriées. La réponse de l'écosystème côtier, à l'élévation du niveau marin est un processus très dynamique, elle change en fonction de plusieurs facteurs (processus hydrodynamiques en cours et facteurs anthropiques etc.). Elle change aussi en fonction du temps et diffère d'un secteur à un autre. Cette dynamique ou ce cycle qui n'est pas encore bien connu et, qui est très variable, explique les évolutions contrastées qui s'observent sur les différentes parties du littoral en particulier sur la Petite Côte où la sinuosité du littoral est la plus marquée. Les expériences positives ou négatives acquises jusque là dans la lutte contre l'érosion côtière doivent, soit permettre de faire face à des situations imprévues, soit de changer de méthode de lutte.

Il faut admettre aussi que dans la gestion du littoral les "meilleures intentions" des stratégies d'adaptation ne peuvent donner de bons résultats que lorsqu'elles sont soustendues et suivies par des connaissances scientifiques, fiables du littoral en question et appuyées par de bonnes politiques de gestion. Des d'études et/ou des connaissances fiables découleront les bonnes solutions qui nécessiteront, après une bonne analyse, une action efficace et efficiente. Le littoral est un système, les stratégies doivent être rationnelles, il doit y avoir une cohérence dans les réponses visés. Au Sénégal, la lutte contre l'érosion côtière tout comme celle contre les obstacles des stratégies d'adaptation est un ensemble de processus dont chacune aura un prix à payer. **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES** 

L'analyse de l'évolution du littoral de Rufisque sur deux échelles temporelles : le pluriannuelle et l'annuel a permis de mieux comprendre les facteurs responsable de la dynamique actuelle du littoral. Aujourd'hui, la question de la défense du littoral visant à stopper l'érosion du rivage et/ou se protéger de la submersion marine fait l'objet de multiples controverses entre les partisans de la « politique de repli », et ceux qui pensent que la politique d'enrochements doit se poursuivre (Paskoff, 1998). Au terme de ces travaux sur l'impact des structures de protection sur la dynamique côtière des conclusions ont été notées. Par ailleurs, l'influence de la zonalité sur les dynamiques morphosédimentaires des littoraux meubles est à l'origine de situations tellement différentes qu'il est impossible de faire des généralités (Ruz, 2005, Suanez, 2009).

## Morphologie des plages

Sur le plan morphologique, les résultats du suivi des profils de plage ont montré que les plages du littoral de Rufisque sont très étroites, avec une largeur moyenne 41 m. Les profils levés indiquent une variabilité spatio-temporelle de forme, entre le secteur nordouest (cap des Biches - cap de Diokoul) correspondant à l'extrémité de la baie de Hann et le secteur sud-est abritant la baie de Rufisque. Ces deux secteurs se caractérisent respectivement par des profils concaves et convexo-concaves avec une prédominance de la forme concave en la saison des pluies et convexe en saison sèche. Dans le premier secteur, la plage en amont de la dérive littorale du canal de la centrale thermique a des profils rectilignes ; celui-ci jouerait actuellement le rôle d'épi avec une accumulation dans la partie en amont de la dérive littorale et l'érosion dans la partie à l'aval.

Les caractéristiques comme la faible largeur des plages, le talus du bas estran et les croissants de plage sont mieux marqués et plus fréquents sur les plages de la baie de Rufisque. Par contre, les pentes des profils de plages sont plus fortes et plus variables sur les plages de BATA.

Cette variation de la forme des profils au cours de l'année peut être corrélée à la dynamique sédimentaire des plages. Les mouvements d'accumulation se produisent en saison sèche, à la faveur des houles du NW. L'érosion se produit essentiellement en saison pluvieuse, sous l'action conjuguée des houles du SW et des houles perpendiculaires à la côte, souvent responsables des phénomènes de submersion. Cette dynamique sédimentaire traduit un cycle saisonnier dans les plages du littoral de

Rufisque avec l'alternance de période d'érosion en saison des pluies et de période d'accumulation en saison sèche. Cette situation est à mettre en relation avec le régime des houles de la Petite Côte.

Le bilan de mouvements d'érosion et d'accumulation des profils montre une généralisation de l'érosion des plages, à l'exception de la plage en amont de la dérive littorale du canal d'alimentation en eau de refroidissement de la centrale thermique du Cap des Biches ( $P_2$ ) qui est en équilibre voire en légère progradation.

## \* Sédimentologie

Sur le plan sédimentologique, le cap de Diokoul sépare le secteur Cap des Biches - Cap de Diokoul à sables fins du secteur sud est (baie de Rufisque) à sables moyens.

Les variations transversales de la moyenne Mz des deux secteurs montrent une diminution de la granulométrie de la haute plage vers la plage sous-marine. Sur la plage en amont du canal, on a une certaine homogénéité des sédiments. Cette variation de la moyenne Mz le long du profil est sans doute facilitée par la faible largeur de la plage aérienne, ce qui permet au jet de rive d'atteindre à chaque vague les différentes unités morphologiques.

Par ailleurs, la comparaison des profils de plage de notre travail avec ceux de Niang-Diop (1995) a mis en évidence une évolution géomorphologique du littoral caractérisée par une modification de la forme des profils de plage et une amplification de l'érosion verticale. Ces changements sont attribuables aux impacts des ouvrages de protection et à l'élévation du niveau marin. Cette étude comparative a en outre mis en évidence un effet de bout, nettement plus accentué aux extrémités en aval de la dérive littorale des ouvrages de protection.

## **\*** Evolution de la ligne de rivage

L'étude rétrospective à long terme de la ligne de rivage entre 1954 et 2006, scindée en phases antérieure et postérieure à la construction des ouvrages de protection, a permis de mettre en évidence l'érosion généralisée du littoral de Rufisque, avec un taux global de recul de -0,81 m/an. Cela est conforme à l'évolution des profils et à la situation actuelle du littoral. A la séparation naturelle du littoral rufisquois en deux segments ou cellules hydro-sédimentaires, s'ajoute le découpage de chaque cellule par les ouvrages

de protection qui ont fini par imposer à la côte une autre morphologie. Cette fragmentation des cellules se caractérise par une variation spatio-temporelle marquée par de forts taux d'érosion d'un secteur à un autre mais aussi au sein du même secteur. Le secteur nord-ouest avec un taux global de -0,39 m/an recule moins vite que le secteur sud-est dont le taux global de recul est de -1,42 m/an pour la période 1954-2006.

A la lumière de ces résultats on peut dire que les murs de protection du littoral de Rufisque, construits sur une côte déjà en érosion ont provoqué la modification des caractéristiques morpho-dynamiques du littoral. Cependant, on ne peut pas préciser leur degré d'implication dans l'érosion du littoral. On peut cependant confirmer leur rôle dans l'intensification de l'érosion dans les zones non protégées, les transports sédimentaires onshore-offshore, les modifications du profil de plage et la disparition des plages en face de ces structures. Ces conclusions ont été déjà attestées par de nombreuses travaux sur les effets des murs de protections sur d'autres littoraux (Kraus, 1988). Ces effets s'accompagnent de la dégradation du cadre environnemental de la bande littorale située derrière les structures et font perdre au littoral non seulement ses qualités esthétiques, et également son identité très marquée par la culture lébou. De même on peut dire que ces structures de protection en dur ont participé à l'intensification des processus hydrodynamiques déterminants dans l'évolution du littoral. De plus, ils ont permis de mieux caractériser les deux cellules composant le littoral de Rufisque.

Cependant si ces ouvrages n'ont pas encore d'effets sur les caractéristiques sédimentologiques, ils ont néanmoins confirmé l'intensification des processus sédimentaires surtout sur les zones en aval de la dérive littorale des ouvrages longitudinaux et transversaux.

De cette étude il apparait donc que la mise en place des ouvrages durs longitudinaux sur des littoraux bas et sableux en érosion, perturbent la dynamique littorale en dépit de leur rôle protecteur des terres en retrait.

Les manifestations citoyennes des populations autochtones des villages traditionnels et des habitants des quartiers récents pour exprimer leur mécontentement face aux pouvoirs publics soulignent bien le niveau de conscience local sur les problèmes liés aux stratégies d'adaptation à l'érosion côtière, à la protection de l'environnement et au développement durable des côtes. Il faut aussi souligner dans ces mécontentements une

grande ignorance et des manipulations politiciennes.

## Perspectives

Il ressort de cette étude sur l'évolution du littoral de Rufisque et d'une manière générale celui du Sénégal, que la situation est loin d'être maitrisée et des perspectives de recherche se dégagent sur le fonctionnement morpho-sédimentaire. Elles concernent la question des cellules hydro-sédimentaires, des processus hydrodynamiques. Si l'on admet bien sûr qu'une *cellule hydro-sédimentaire*, telle que définie par Stapor (1971, 1973); Davies (1974), est toujours constituée d'une zone de départ, de transit et d'accumulation, et que ce fonctionnement intéresse aussi bien le profil longitudinal que transversal du cordon littoral (Suanez, 2009).

L'érosion, le transport et le dépôt des sédiments sont fonction des paramètres morphologiques et géologiques du littoral. Le type, la direction de transport et les quantités de sédiments charriés sont autant de facteurs qu'il importe de connaître pour une meilleure compréhension des modifications de l'équilibre du littoral. A cet égard, la fragilité de l'équilibre du littoral de la Petite Côte, conjuguée aux effets des ouvrages de protection devraient conduire à prendre des précautions dans le choix des sites d'implantation des structures de protection contre l'érosion côtière.

Il est également insuffisant que dans une côte basse et sableuse caractérisée par une forte dynamique, les relevés de terrain (profils) ne soient exécutés que sur l'arrière côte. De plus, les données sédimentaires sur la dynamique de cette partie du littoral sont actuellement trop partielles, très limitées et ne suffisent pas pour qu'on puisse identifier l'aboutissement et l'origine des sables arrachés ou déposés sur les plages. Une meilleure compréhension de l'influence des processus hydro-sédimentaires et de la bathymétrie sur l'évolution de l'avant côte s'impose.

C'est donc véritablement en affinant la recherche dans les domaines de l'hydrodynamisme littoral, de la sédimentologie et de la bathymétrie, avec les nouvelles technologies qu'on pourra identifier les stratégies adaptatives adéquates car les réponses apportées jusqu'ici restent très ambiguës et mal appropriées. Or, dans le cas de l'érosion côtière, il ne s'agit pas de traiter le problème pour un segment de côte donné mais plutôt opter pour une vision d'ensemble du système littoral. En effet, c'est en empruntant à Péguy (1989) « l'identification et la caractérisation des hydro systèmes, notamment

dans leurs trois dimensions, dans leur hydrodynamique et dans leurs relations » que nous pourrons connaître de façon scientifique et comprendre le fonctionnement des différentes cellules hydro-sédimentaires qui composent le littoral sénégalais. Ainsi, la compréhension et la connaissance de ces cellules et les modifications probables des caractéristiques des agents hydrodynamiques, sont des obstacles pour définir des stratégies d'adaptation et de gestion dans la durée sur les secteurs du littoral où la protection est inévitable. Ces obstacles, pas seulement hydro-sédimentaire (politique, socio-économique etc.) sont en même temps un défi pour tout aménagement côtier et toute mise en place d'un outil d'alerte précoce pour le suivi du littoral. Enfin, c'est en considérant tous ces facteurs qu'on peut prendre en compte de manière efficiente les paramètres anthropiques dans l'évolution spatio-temporelle des plages. Cela demeure indispensable pour l'aménagement du littoral tout en sachant que pour le système côtier, il n'y a pas de solutions adaptatives définitives, mais des solutions et des décisions satisfaisantes du moment.

#### **BIBLIOGRAPHIE.**

- Adejuwon, J., Azar, C., Baethgen, W., Hope, C., Moss, R., Leary, N., Richels, R., Ypersele, v. J.-P., 2001. Overview of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change. Chapiter 2, *Climate Change* 2001. IPCC, 30 p.
- Arecchi, A., Virtanen, P., **1984**. Aménagement urbain anticipé. Diokoul face à la mer. ENDA ed., Dakar, 217, 18 p.
- Ba, K. 2013. Apport de la télédétection et des SIG dans l'étude de l'évolution de la langue de Barbarie et de l'estuaire du fleuve Sénégal. Thèse de Doctorat unique Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 223 p.
- Bacou S., Hebrard L., 1958. Rapport sur les indices de minerai de titane et de zircon de la région littorale du Sénégal, entre Dakar et Saint-Louis, de Cayar à Lompoul. Haut commissariat de la république de L'A.O.F., Serv. Géol. Prospect. Min., rapport DV 152.
- Bannari, A., Morin, D., Benie, G.B., Bonn F.J. 1995 A theoretical review of different mathematical models of geometric corrections applied to remote sensing images. Remote sensing reviews, vol. 13, p. 27 - 47.
- Barbey, C., **1982**. Les ergs du Sud-Ouest de la Mauritanie et du Nord du Sénégal. Thèse Etat Lettres, Univ.Paris VII, 2 tomes, 454 p.
- Barbey, C., Descamps, C., **1967**. Note sur les formations quaternaires de la pointe de Fann (Dakar). *Notes. Afr.*, Dakar, **114**, 48-54.
- Barusseau, J-P., 1984. Analyse sédimentologique des fonds marins de la "PetiteCôte" (Sénégal). Doc.Scient., C.R.O.D.T./I.S.R.A., Dakar, 94, 22 p.
- Barusseau, J. P. 2011. Influence of mixtures of grain size populations on the parametric and modal characteristics of coastal sands (Hérault, Mediterranean sea, France) Journal of Sedimentary Research, 81, 611–629.
- Barusseau, J.P. Giresse, P., Faure, H., Lezine, A.M., Masse, J.P., 1988. Marine sedimentary environments on some parts of the tropical and equatorial Atlantic margins of Africa during the Late Quaternary. *Cont. Shelf Res.*, Londres, 8, 1-21.
- Bellion, Y, J-C. **1987**. Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemmeden, Tchad).

Thèse Etat Sciences, Univ. Avignon et Pays du Vaucluse, Avignon, 302 p.,

- Bellion, Y. et Guiraud, R., 1982. Les coupures (lacunes, discordance) dans la série sédimentaire post-paléozoique du bassin Sénégalais - In: 10è Ann Sci Terre (Paris), p. 40 livre en dépôt à la Soc. Géol. France.
- Bernatchez, P. et Dubois, J.-M.M. 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. Géographie physique et Quaternaire, 58, 1, 45-71.
- Billé, R., 2009. La gestion intégrée des zones côtières comme instrument d'adaptation ? Le cas de la Méditerranée. Adaptation au changement climatique Liaison Energie-Francophonie, n° 85, 4<sup>e</sup>, 72-76
- Bird E.C.F., 1985. Coastline changes. A global review. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 219 p.
- Blivi A., 2001. Impact de l'érosion côtière et éléments d'étude de vulnérabilité : exemple du Togo (Golfe de Guinée). *Revue de l'Université de Moncton*, vol. 32, n°1-2, p. 289 - 308.
- Blivi A., 2005. Erosion côtière dans le golfe de Guinée en Afrique de l'Ouest : exemple du Togo. Document électronique, <u>www.nesda.kabissa.org/Rapports/Erosion.pdf.</u> consulté le jeudi 17 avril 2008
- Blivi A., Adjoussi, P., 2004. La cinématique du trait de côte au Togo vue par télédétection. Geo-Eco-Trop, 28, 1-2; 27 - 38.
- Brancart, R. Y., 1975. Etude micropaléontologique des feuilles au 1/20 000<sup>e</sup> de la presqu'île du Cap Vert : Rufisque – Bargny (Sénégal Occidental). D. E. S., Labo. Sédimentologie Continentale, Univ.Aix – Marseille III.
- Brancart, R. Y., 1977. Etude micropaléontologique et stratigraphique du Paléogène sur le flanc occidental du horst de Ndiass et dans la région de Taïba. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. Provence, 1, 89 p.
- Brancart, R. Y. Flicoteaux R. 1971. Age des formations phosphatées de Lam Lam et de Taïba (Sénégal occidental). Bull. Soc. géol. Fr., 3-4, p. 399-408
- BRGM, (Bureau de Recherche Géologique et Minière), 2003. Evolution du littoral Aquitain Impact des ouvrages de protection. Secteurs de Biscarrosse, Mimizan et Capbreton. BRGM/RP-51877-FR 193 p.

- Bruun, P., **1962**. Sea level rise as a cause of shore erosion. J. Waterways and Harbors Div., ASCE, New York, 88, 117 130.
- Brunsden, D., 2001: A critical assessment of the sensitivity concept in geomorphology. *Catena*, 42, 99-123.
- Bruzzi, C., 1998. Les tempêtes et l'évolution morphosédimentaire des plages orientales du delta du Rhône, Thèse Université de Provence, UFR des Sciences Géographiques et de l'Aménagement, Aix-en-Provence, 325 p.
- Byrnes M. R, Hiland, M.W., 1994. Shoreline position and nearshore bathymetric change. In (KRAUS N.C.GORMAN L.T., POPE J., Eds) Kings Bay coastal and estuarine monitoring and evaluation program. Army Corps of Engineers Technical Report, CERC-94- 9, 61 - 143.
- Cantagrel, J. M., Lappartient J. R., Tessier F., **1976**. Nouvelles données géochronologiques sur le volcanisme ouest africain. 4<sup>ème</sup> R. A. S. T., Paris, 13 16 Avril 1976, 93p.
- Carreno, M.; Belair, C., Romani, M., **2008**. Répondre à l'élévation du niveau de la mer en Languedoc-Roussillon. La lettre des Langues, Hors-série n°1
- Carter, R.W.G., 1988. Coastal Environments, Academic Press, 617 p.
- Castelain, J. 1965. Aperçu stratigraphique et micropaléontologique du bassin du Sénégal occidental. Historique de la découverte paléontologique. In : « Colloque International de Micropaléontologie » (Dakar). Mémoire BRGM, 32, 135-159.
- Cesaraccio, M.;Thomas, Y. F; Diaw, A. T; Ouegnimaoua, L., **2004.** Impact des activités humaines sur la dynamique littorale : prélèvements de sables sur le site de Pointe Sarène, Sénégal. *Géomorphologie :relief, processus, environnement.* 1, 55-63.
- Chamley, H. **2002**. *Environnements géologiques et activités humaines*. (Ed). Vuibert, Paris 196 p.
- Chauhan, O.S., **1992**. Laminae and grain-size measures in beach sediments, East Coast Beaches, India. J. *Coastal Research*, **8**, 172-182,
- Costa S., Davidson R. **2004.** Ouvrages transversaux portuaires et impacts hydro-sédimentaires : le cas du port de Dieppe (Haute-Normandie), *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 3, 321-333.

- Cowell P.J., Thom B.G. 1994. Morphodynamic of coastal evolution, In Carter R.W.G. et Woodroffe C.D. (Eds), Coastal evolution: late quaternary shoreline, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 33-86.
- 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 28, 171 -184.
- Crevola, G., **1978**. Sills, dykes et pipes de tufs volcaniques bréchiques fluidifiés dans la presqu'île du Cap Vert, (Sénégal). *C. R. Somm. Soc. Géol. France*, Paris, 3, 135 139.
- Dabo B. Ba, K. Ndour A. Diagne B. Diédhiou, C. 2011. Rapport d'inventaire des initiatives de protection du littoral de Saint-Louis à Joal. Projet d'intégration de l'adaptation aux changements climatiques dans le développement durable du Sénégal (INTAC), 95 p.
- Davies, J.L. **1974**. The coastal sediment compartment, *Australian Geological Studies*, 12, 2, 139-151.
- Dehouck, A., **2006**. Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère). Thèse de Doctorat nouveau régime de Géographie, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 262 p.
- Demoulin D., 1967. Etude de la morphologie littorale de la Petite Côte de Bargny au marigot de la Nougouna (Sénégal). La côte basse de Bargny Guèdj à Yène Tode. Mémoire Diplôme d'Etudes Supérieures, Université de Dakar, Dakar, 122 p.
- Demoulin D., Masse J.P. **1969.** Grès de plage de la presqu'île du cap vert (Sénégal). Bull. I.F.A.N., Dakar, Ser.A, XXXI, 3, 721-738.
- Dennis, K.C., Niang-Diop, I., Nicholls, R.J. **1995**. Sea-level rise and Senegal : Potential impacts and consequences. J.Coastal Res., Fort Lauderdale, Sp.Issue n°14, 243-261.
- Descamps, C., et Demoulin, D., **1969**. Stratigraphie du gisement préhistorique du Cap Manuel (Dakar). *Bull. I.F.A.N.*, Dakar, Ser.A, XXXI, 3, 739-751.
- Diallo, S., 1982. Evolution géomorphologique du littoral sur la Petite Côte à Rufisque. Mém. Maîtr., Dpt. Géogr., Fac Lettres Sci. Hum., Dakar, 124 p.,
- Diara, M., **1999**. Formation et évolution fini-holocène et dynamique actuelle du delta Saloum-Gambie (Sénégal-Afrique de l'ouest). Thèse Sci. Nat., Université de Perpignan, 161 p.
- Diaw. A.T. **1984**. Morphométrie du littoral sénégalais et gambien. *Notes Africaines*, Dakar, 183, 58-63.
- Diaw, A.T. 1997. Evolution des milieux littoraux du Sénégal. Géomorphologie et Télédétection.
  Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université de Paris I / Panthéon Sorbonne, Paris, 270 p
- Diaw. A.T., Diop N., Thiam M.D., Thomas Y.-F., 1991. Remote sensing of spit development: a case study of Sangomar spit, Sénégal. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement Band 81, 115 - 124.
- Dièye, A., 2000. Traitement informatique de photographies aériennes combiné à l'utilisation de systèmes d'information géographique pour l'étude de la ligne de rivage entre Rufisque et Bel Air durant la période 1968 -1997. Mémoire de D.E.A en Géosciences, Option : Environnements sédimentaires, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 64 p.
- Diouf M. B., **1989**. Sédimentologie, minéralogie, et géochimie des grés carbonatés quaternaires du littoral sénégalo-mauritanien. Thèse Océanologie, Univ. Perpignan, 237 p.
- Diouf, M.B., Giresse, P., Ochietti, S., Causse, C.,1993. La limite méridionale des grès calcaires du Pléistocène marin ouest – africain : étude pétrologique et géochimique d'après l'exemple du cap des Biches (Sénégal). In : Evolution côtière au Quaternaire, Réunion Intern. PIGC 274, O. R. S. T. O. M., Dakar, 6 -7
- Dolan R., Hayden B. P., Heywood J., 1978. A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, 2, 21 - 39
- Dolan, R., Hayden, B., Rea, C., Heywood, J. **1979**. Shoreline erosion rates along the middle Atlantic coast of the United States. *Geology*, 7, 12, p. 602 606.
- Dolan, R., Fenster, M.S., Holme, S. J., **1991**. Temporal analysis of shoreline recession and accretion, *Journal of Coastal Research*, *7*, 723-744.
- Dolan T.J., Castens P.G., Sonu C.J., Egense A.K. 1987. Review of sediment budget methodology: Oceanside littoral cell, California, *Coastal Sediment '87*, ASCE, 1289-1304.

- Domain, F., **1976**. Les fonds de pêche du plateau continental ouest africain entre 17°N et 12°N. *Doc. CRODT IISRA.*, Dakar; 61, 20 p.
- Domain, F., **1977.** Carte sédimentologique du plateau continental sénégambien. Extension à une partie du plateau continental de la Mauritanie et de la Guinée Bissau. ORSTOM ed. Paris, Notice explicative, 68, 17p.
- Dupuis, J. Knoepfel, P. **2011**. Les barrières à la mise en œuvre des politiques d'adaptation au changement climatique : le cas de la Suisse. *Swiss Political Science Review*, 32 p.
- Durand P., **1999**. L'évolution des plages de l'ouest du golfe du Lion au XX<sup>e</sup> siècle. Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire, analyse prévisionnelle. Thèse de Doctorat, Université Lyon II, 2, 461 p.
- Durand, P. **2000**. Approche méthodologique pour l'analyse de l'évolution des littoraux sableux par photo-interprétation. *Photo-Interprétation*, 2000/1-2, 3 18.
- Durand P., **2001**. Érosion et protection du littoral de Valras-Plage (Languedoc, France). Un exemple de déstabilisation anthropique d'un système sableux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement.* 1, 55-68.
- Dwars, Heederik et Verhey Ingenieurs Conseils., **1979**. Rapport sur l'étude de la protection du rivage de la Petite Côte. Ministère Equipement, Rép. Sénégal, 92 p.
- ECA 2009. Shaping Cilamate Resilient developpement : A framewort for décision making.
- El Abdellaoui, J.E., Ozer, A. **2007**. Etude diachronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc). Revue Télédétection, 7, 157-171.
- Elouard, P., **1967**. Eléments pour une définition des principaux niveaux du Quaternaire sénégalo-mauritanien. *Bull. I.F.A.N*, Dakar, t. 29, sér. A, 2, 882-836.
- Elouard, P., **1980**. Géomorphologie structurale, lithologique et climatique de la presqu'île du Cap Vert (Sénégal). Notes Africaines, Dakar, 167, 1-68.
- Elouard, P., Brancart, R., Hebrard, L., 1976a. Notice explicative de la carte géologique de la presqu'île du Cap Vert au 1/20 000. Rufisque. Dir. Mines et Géologie, Min. Dév. Industr. Environ., Dakar, 35 p.
- Elouard, P., Brancart, R., Hebrard, L., 1976b. Notice explicative de la carte géologique de la

presqu'île du Cap Vert au 1/20 000. Bargny. Dir. Mines et Géologie, Min. Dév. Industr. Environ., Dakar, 43 p.

- Elouard, P., Faure, H., Hebrard, L., 1977. Variations du niveau de la mer au cours des 15 000 dernières années autour dela presqu'île du Cap Vert. Dakar-Sénégal. *Bull. liaison Ass.Sénég.Et.Quatern.Afr.*, Dakar, 50, 29-49,
- Emery K.O. Aubrey D.G., **1991.**Sea levels, land levels and tide gauges. Springer Verlag. New York, 237p.
- Eurosion, 2004: Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability. Part-1 Major Findings and Policy Recommendations of the EUROSION Project. Guidelines for implementing local information systems dedicated to coastal erosion management. Service contract B4-3301/2001/329175/MAR/B3 "Coastal erosion – Evaluation of the need for action". Directorate General Environment, European Commission, 54 pp.
- Everts, C.H. and D.C. Wilson., **1981.** Base maps analysis of coastal changes using aerial photography. Coastal Engineering Research Center, Technical paper. 81-4, 15p.
- Faye, I.B.ND., 2010. Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photointerprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 393 p.
- Faye, I.B.ND., Henaff, A., Gourmelon, F., Diaw, A.T., 2008. Evolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation. *Norois*, 208, 2008/3, 11-27.
- Fenster, M.S., Dolan, R., Elder, J.F., **1993**. A new method for predicting shoreline positions from historical data. *Journal of Coastal Research*, 9, 147-171.
- Flemming, B.W., 2007. The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: implications for sediment trend analysis: *Sedimentary Geology*, 202, 425–435.
- Flicoteaux, R. **1980**. Genèse des phosphates alumineux du Sénégal occidental, étapes et guides de l'altération. *Sci. Géol. Bull.*, 67, Strasbourg, 229 p.

- Flicoteaux, R et Medus, J. 1980. Existence d'une lacune entre les termes marins du Paléogène et du Néogène du Sénégal méridional démontré par les microfaunes et les microflores. *Trav. Labo. Sc. Terre, Fac. Sc. Marseille St-Jérôme*, Série A, 12, 29 p.
- Folk, R.L., 1966. A review of grain-size parameters. Sedimentol., Amsterdam, 6, 73-93,
- Folk, R.L., Ward, W.C., **1957**. Brazos River bars : a study in the significance of grain size parameters. *J. Sedim. Petrol.*, Tulsa (Okl.), 27, 3-26.
- Foster, E.R. et Savage, R.J., 1989. Methods of historical shoreline analysis. In : Magoon, O.T., Converse, H., Miner, D., Tobin, L.T., and Clark, D. (eds.), «Coastal Zone'89», 5, 4434-4448.
- Freiburghaus P., Galimont G., Payot M., Schifferli R., 1981. Diokoul I981. Amélioration de l'habitat en milieux périurbains. Etudes préliminaires. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Dpt Architecture, 494 p.
- Froidefond, J.M., **1975**. Analyse cartographique de la bathymétrie du proche plateau continental de la baie de Rufisque (Sénégal). Thèse 3ème cycle. Univ. Bordeaux J. 1206, 97 p.
- Füssel, H.-M (2007). Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustainability science* 2: 265-275.
- Gaye, D.H., **1999.** Inventaire morphologique de la tête de la presqu'île du Cap Vert. Mémoire de D.E.A. Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 71 p.
- G.I.E.C/IPCC, 1990. The I.P.C.C. Response Strategies, Working Group III 159 p.
- G.I.E.C/ I.P.C.C, **2001**. Climate change 2001: Impacts Adataptation and vulnerability. A report of the Working Group II. Summury for Policy Makers. 18 p.
- G.I.E.C/IPCC, 2007. Groupe de travail I du GIEC. Quatrième Rapport d'évaluation, Bilan 2007 des changements climatiques les bases scientifiques physiques, Résumé à l'intention des décideurs 25 p.
- G.I.E.C/IPCC, 2012. Rapport spécial des Groupes de travail I et II du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat; Résumé à l'intention des décideurs. Gestion des risques de catastrophes et de phénomènes extrêmes pour les besoins de l'adaptation au changement climatique. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis, 28 p.

- Giresse, P.,Barusseau, J.P. Descamps, C., Monteillet, J., 1988. Enregistrement sédimentologique et archéologique des oscillations climatiques récentes dans le domaine littoral de l'extrême ouest africain. Contribution à l'étude des aridifications. Rapport final. Lab. Rech.Sedim. marine, Perpignan, 133 p.
- Gorodiski, A. **1958**. Miocène et indices phosphatés de Casamance (Sénégal) C. R. *somm. Soc. Géol. Fr.*, p.293-297.
- Grenier, A. et J.-M. M. Dubois, 1992. Évolution des côtes aux Îles-de-la-Madeleine, p. 59-64,
  In Dubois, J.-M. M. et Gagnon, J. (réd.), Les Îles-de-Ia-Madeleine : un pays à découvrir.
  Numéro spécial de *ln/o GéoGraphes*, 1, 126 p.
- Griggs, G. B. et J. F. Tait. 1988. «The effects of coastal protection structures on beaches along Northern Montery Bay, California». *Journal of Coastal Research*, 4, 93-111.
- Guérin, K., **2003**. Dynamique du littoral sableux de Tiaroye à Bargny (Baie de Gorée Sénégal). Mémoire de Maîtrise, UFR de géographie, Paris-I/UCAD, 218 p.
- Guèye, K., **1997**. Conception d'un ouvrage de protection cotiere contre les inondations a Rufisque. Thèse de 3<sup>eme</sup> cycle, dépt.de Géologie, Univ.CAD de Dakar, 209 p.
- Guilcher, A., **1959**. L'Archipel de Molène (Finistère). Etude morphologique. *Revue de Géographie physique et de Géologie Dynamique*, II, 2, 81-96.
- Guillou, H., 2008. Datation par la méthode potassium-argon sans traceur de roches volcaniques du Sénégal. Rapport du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Unité Mixte de Recherche CEA – CNRS, 14 p.
- Hallégatte, S., **2009**. Changement climatique et gestion des risques naturels Adaptation au changement climatique Liaison Energie-Francophonie, 85 4 trimestre, 83-85.
- Hoozemans, F.M.J., Marchand, M., Pennekamp, H.A. 1993. Sea level rise. A global vulnerability assessment. Delft Hydraulics, Delft / Rijkswaterstaat, The Hague, 184 p.
- Hulme, M. **2009.** les obstacles à l'adaptation. Adaptation au changement climatique Liaison Energie-Francophonie, 85 4 trimestre, 140-142
- Ibe A.C., Quelennec R.E. 1989. Méthodologie d'inventaire et de contrôle de l'érosion côtière

dans la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Rapports et Etudes mers régionales, PNUE, Nairobi, 107 p.

- Jaramillo, E., H. Contreras et A. Bollinger., **2002.** «Beach and faunal response to the construction of a seawall in a sandy beach of south central Chile». *Journal of Coastal Research*, 18,.3, 523-529.
- Khatib, R., Ly, A., Sow, E.-H., Sarr, R. 1990. Rythmes sédimentaires liés aux variations eustatiques globales au Campanien et Maastrichtien du Sénégal. Révision stratigraphique de la série du Crétacé terminal du Cap de Naz. C.R.Acad.Sci., Paris, Ser.II, 311, 1089-1095.
- Kirby, A. 2009. Kick the habit. PNUE 200 p.
- Knoepfel, P.Nahrath, S. Savary, J. Varone, F., 2010. Analyse des politiques suisses de l'environnement. Zürich : Rüegger 592 p.
- Kraus, N.C., 1988. The Effects of Seawalls on the Beach : An Extended Literature Review. In N.C. KRAUS and O.H. PILKEY. (Edidors), The Effets of Seawalls on the Beach, *Journal of.Coastal Research.*, Sp.Issue 4, 1-29.
- Kraus, N.C., Hanson, H. et Blomgren, S.H., 1994. "Modem Functional Design of Groin. Systems". Proceedings of the 24th Coastal Engineering Conference, 1327-1342.
- Kraus, N. C.and W. G. McDougal. **1996.** The Effects of Seawalls on the Beach. Part I. An updated literature review. *Journal of Coastal Research*, 12, 3, 691-701.
- Lappartient, J. R., 1985. Le « Continental terminal » et le Pléistocène ancien du bassin sénégalo-mauritanien (Stratigraphie, sédimentation, diagenèse, altérations. Reconstitution des paléorivages au travers des cuirasses). Thèse Etat Sciences, Univ. Aix-Marseille, St Jérôme, 286 p.
- Laaroubi, H., **2009**. Etude hydrologique des bassins versants de Rufisque; Thèse de doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle de Géographie, option hydrologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar 265 p.
- Lawson, E. B., 1970. Etude géemorphologique et biogeographique de la région de Mbao (Presqu'ile du Cap Vert, Sénégal). Mem. Maîtr., Dpt Geogr., Fac. Lettre Sci. Hum., Dakar, 152 p.

Leroux, M., 1977. Le climat. In : « Atlas National du Sénégal », I.G.N., Paris, 16-23.

- Leroux, M., 1983. Le climat de l'Afrique tropicale. Champion ed., Paris/Genève, 1, 633 p.
- Leroux., M. 1996. La dynamique du temps et du climat. Paris, : Masson, 310 p.
- Leroux, M., **2001.** *The meteorology and climate of Tropical Africa*.Chichester (UK): Springer-Praxis, 548 p.
- Lessard, G.L., **1982**. Télédétection aérospatiale et les environnements littoraux. Séminaire de télédétection, Département de Géographie, Université de Sherbrooke, 36 p.
- Lompo, M., **1987**. Méthodes et étude de la fracturation et des filons. Exemple de la région du Cap Vert (Sénégal). Mém. D.E.A., Dpt Géologie, Univ. Dakar, 58 p.
- Ly A., **1985**. Le tertiaire de Casamance (Sénégal) : Biostratigraphie (Foraminifères) et sédimentologie d'après les données de subsurface. Thèse de Doctorat, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, 215 p.
- Mahé, G., **1993.** Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique: étude des éléments du bilan hydrique et variabilité inter-annuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes "" Paris (FRA), Coll. ORSTOM, 439 p.
- Malou, M., 2004. Impact du climat sur les ressources en eaux souterraines en zones Soudano-Sahélienne, Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences naturelles de géologie appliquée, Dép. Géologie, FST, Uni. Dakar, 153 p.
- Masse, J.P., 1968. Contribution à l'étude des sédiments actuels du plateau continental de la région de Dakar (République du Sénégal). Rapp. Labo. Geol., Fac.Sci., Univ. Dakar, 23, 81 p.
- Masselink, G., Short, A.D., **1993.** The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology : a conceptual beach model. *Journal .Coastal Research*, 9, 785-800.
- Mc Laren. P. **1981**. An interpretation of trends in grain sizc measures. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tulsa, 51, 2, 611-624.
- Mc Laren, P., Bowles, D. **1985**. The effets of sediments transport on grain size distribution. *Journal of Sedimentary Petrology*, Tusla, 55, 4,57-470.

- Meagher, L.J., Ruffmann, A.S., Stewart, J. Mc G., Zukauskas, W., Van Derlingen, W. J. M.,
  1977. C. S. S. Baffin offshore survey: Senegal and the Gambia. Vol. 2 : A contribution to the geophysics and geology of the continental shelf and margin of Senegal and the Gambia, West Africa. Dpt. Fisheries Environ. Energy Mines and Ressources, Ottawa, 83 p.
- Michel, P., **1973**. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etudes géomorphologiques. ORSTOM ed., Paris, 3 tomes, 752 p.
- Migniot, C., Bouloc, J. **1981**. Erosion et sédimentation en mer et en rivière. *ln:* Filliat G. (ed.) *La pratique des sols et fondations,* Ed. du Moniteur. Paris. 627-731.
- Misdorp, R., Dronkers, J., Spradley, J.R. **1990**. A world wide cost estimate of basic coastal protection measures. In : « Strategies for adaptation to sea level rise », IPCC/RSWG, The Hague, App.D, 64-119.
- Moore L. J., 2000. Shoreline mapping techniques. Journal of Coastal Research, 16, p. 111 124.
- Morton, R.A, **1991**. Accurate shoreline mapping: past, present and future. *In: Coastal Sediments'91*, ASCE, New York, 1, 997-1010.
- Morton. A., Leach M.P., Paine J.G., Cardoza M.A., **1993**. Monitoring beach changes using GPS surveying techniques. *Journal of Coastal Research*, 9, 702 720.
- Morton R.A., Speed M.F., **1998**. Evaluation of shorelines and legal boundaries controlled by water levels on sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, 14, 1373 1384.
- Murday, M., **1986**. *Beach erosion in West Ajrica*. Research Planning Institute Inc., Columbia (South Carol.), 101 p.
- Nardari, B., **1993**. Analyse de la houle sur les côtes du Sénégal. Application à la pointe de Sangomar. Rapport de stage U.T.I.S., ISRA/ORSTOM., Dakar, 31 p.
- Nation Unies, 1983. Techniques pour la lutte contre l'érosion des côtes 143 p.
- Niang Diop, I., **1995**. L'érosion côtière sur la Petite Côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque. Passé-Présent-Futur, Thèse de Doctorat, Univ. d'Angers, 317 p.
- Niang-Diop, I., Dansokho, M., Diaw, A.T., Diouf, P. S., Faye, S., Gueye, K., Guissé, A., Ly, I.,
  Matty, F., Ndiaye, P., Sène, A., 2005 : Etude de la vulnérabilité des côtes sénégalaises aux changements climatiques. Programme d'Assistance des Pays-Bas. Ministère de

l'environnement et de la protection de la nature. Rapport final, 133 p.

- Nicholls, R.J. **2003**. Case study on sea level impacts, Organisation pour la coopération économique et le développement, < http://www.oecd.org/dataoecd/7/15/2483213.pdf >, [consultation: 10 janvier 2007].
- Nicholls, R.J. et Mimura, N. **1998**. «Regional issues raised by sea-level rise and their policy implication», *Climate Research*, 11, 1, 5-18.
- Ndour, A., **2006**. Evolution du littoral de Rufisque de Juin 2005 à décembre 2006. Mémoire de D.E.A. Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 99 p.
- Ndour, A., Niang, I., Diaw, A.T., Ba, K., Sakho, I., Diagne, B., and Fall, B. 2014. Effects of protective structures in morpho-sedimentological changes: a case study of Rufisque's coast, Petite Côte, Senegal. *Journal of Shipping and Ocean Engineering* 4, 9-10, 279-289
- OMM (Organisation Météorologique Mondiale), **2003**. Le climat de demain OMM-N°952 Genève, Suisse, 36 p.
- OMM (Organisation Météorologique Mondiale). **2006.** Aspects écologiques de la gestion intégrée des crues, Genève, Suisse, 83 p.
- Ottman, F. 1965. Introduction à la géologie marine et littorale. Ed. Masson, Paris, 259 p.
- Paskoff, R. **1985**. Les littoraux. Impact des aménagements sur leur évolution. Collection géographie, Edition Masson, 184 p
- Paskoff, R., 1993. Côtes en danger. Paris : Masson 250 p.
- Paskoff, R., 1998a. La crise des plages : pénurie de sédiments. MappeMonde, 52, 4, 11-15.
- Paskoff, R.: **1998b.** Les littoraux, impacts des aménagements sur leur évolution. A. Colin, Paris, 264 p.
- Paskoff, R. **2001**. *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers. Le mythe et la réalité.* Institut Océanographique, Paris, collection «Propos», 190 p.
- Péguy, Ch. P. 1989. Jeux et enjeux du climat. Masson, Paris, 254 p.

- Peterson, C.D., Jackson, P.L., O'Nell, D.J., Rosenfeld, C.L., Kimerling, A.J. 1990. Littoral cell response to interannual climatic forcing 1983-1987 on the central Oregon coast, USA. *Journal of Coastal Research*, 6, 1, 87-110,
- Piermay. J.L , **2003**. L'invention de la ville en Afrique sud-saharienne. In Historiens et Géographes, 379, 24-41.
- Pilkey O.H., Wright III, H.L., **1988**. Seawalls versus beaches. J Journal of Coastal Research Special.Issue 4, 77-92.
- Pinson-Mouillot. J., 1980. Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais (Nord de la presqu'île du Cap Vert). Thèse 3ème cycle, Univ. Bordeaux I, 1554, 106 p.
- Plant, N. G. et G. B. Griggs., 1992. «Interactions between nearshore processes and beach Morphology near a Seawall». *Journal of Coastal Research*, 8, 183-200.
- PNUE, **2009**. Kick the habit. Guide de l'ONU pour la neutralité climatique. GRID-Arendal et Zoï Environment network, 200p.
- Ponsard J. F., Roussel J. et Villeneuve M., 1988. The Pan-African orogenic belt of southern Mauritanides and northern Rokelides (southern Senegal and Guinea, West Africa): gravity evidence for a collisional suture. Journal of Afri. Earth Sciences, 7, 463-472.
- Rebert,, J.P., **1983**. Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. Doc.Scienr., CRODT/ISRA, Dakar, 89, 99 p.
- Regamey, J.M. **1984**. Diokoul. Sénégal. Digues antiérosives. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 12 p.
- Reineck, H.E., Singh, I.B., **1975**. Depositional sedimentary environments. With reference to terrigenous clastics. Springer-Verlag, Berlin, 439 p.
- Riffault, A., **1980**. Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais (Sud de la presqu'île du Cap Vert). Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Université. Bordeaux I. 145 p.
- Roger, J., Noel B.J., Barusseau, J.P., Serrano, O., Nehlig, P., Duvail, C. **2009a**. Notice explicative de la carte géologique du Sénégal à 1/500 000, feuilles nord-ouest, nord-est et sud-ouest. Ministère des Mines, de l'Industrie et des PME, Direction des Mines et de

la Géologie, Dakar, 61 pages.

- Roger, J., Duvail, C., Barusseau, J.P., Noel B.J., Nehlig, P., Serrano, O. 2009b. Carte géologique du Sénégal à 1/500 000, feuilles nord-ouest, nord-est et sud-ouest. Ministère des Mines, de l'Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar, 3 coupures.
- Roger, J., Banton, O., Barusseau, J.P., Castaigne, P., Comte, J-C., Duvail, C., Nehlig, P., Noel
  B.J., Serrano, O., Travi, Y. 2009d. Notice explicative de la cartographie multi-couches à 1/50 000 et 1/20 000 de la zone d'activité du Cap-Vert. Ministère des Mines, de l'Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar, 245 p.
- Roy, C. 1989. Fluctuations des vents et variabilité de l'upwelling devant les côtes du Sénégal. Oceanol Acta, Paris, 12, 4, 361-369,
- Ruffman, A., Meagher, L.J., Stewart, J.M.G., **1977.** Bathymétrie du talus et du plateau continental du Sénégal et de la Gambie (Afrique de l'Ouest). In: Le Baffin : Levé au large du Sénégal et de la Gambie, 1, 23-38.
- Ruz, M.H., 2005. Des côtes arctiques aux rivages tempérés : la question de l'influence de la zonalité sur la géomorphologie de littoraux meubles, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université du Littoral – Côte d'Opale, 131 p.
- Sagna, P., 2005. Dynamique du climat et son évolution récente dans la partie Ouest de l'Afrique Occidentale. Thèse de doctorat d'Etat ès Lettres, Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, UCAD, Tome I, 271 p.
- Sagna, P. 1990. Apport pluviométrique des lignes de grains au Sénégal de 1981 à 1985. in Publications de l'Association Internationale de Climatologie, 3, 279-287.
- Sahu, B.K., **1964**. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. J *.Sedim. Petrol.*, Tulsa (Okl.), 34, 73-83.
- Sall, M.M., **1982**. Dynamique et morphogenèse actuelle au Sénégal occidental. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Louis Pasteur de Strasbourg I, 604 p.
- Samat S., **2007**. Impact des aménagements en enrochement sur la morphogenèse côtière quelques cas dans le Golfe du Lion. Thèse, Université Aix-Marseille III, France, p. 341.

Sarnthein, M., Thiede, J., Pfaumann, U., Erlenkeuser, H., Füterer; D., Koopmann, B., Lange, H., Seibold, E., 1982. Atmospheric and oceanic circulation patterns of northwest Africa during the past 25 million years.*In:* Von Rad U. *et al* (eds) *Geology of the Northwest African continental margin*. Springer Verlag, Berlin, 545-604.

Sarr R 1998. Les ostracodes paléocènes du horst de Diass (Sénégal) : biostratigraphie, systématique, paléoenvironnement. *Revue de Micropaléontologie*, Paris, 41, 2, 151-174.

- Seck, A., **1990.** Etude des caractéristiques techniques des ouvrages de protection du littoral de Rufisque. Mémoire I.S.T., Fac.Sci., Univ.Dakar, 021, 47 p.
- Smith, G.L., Zarillo, G.A. **1990**. Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photographic and beach profiling techniques. *Journal of Coastal Research*, 6, 111-120.
- Sogreah Ingénieurs Conseils., **1981**. Etude de la houle et du vent sur le site de Bargny (République du Sénégal). MIFERSO, Dakar, Rpt R 35 1160b, 34 p.
- Sonu, C. J., Van Beek, J. L., **1971.** Systematic beach changes on the Outer Banks, North Carolina. *J. Geol.*, Chicago, **79**, 416-425.
- Sow, E.H. 1992. Etude sédimentologique et révision chronostratigraphique du Crétacé terminal du Horst de Ndiass (Sénégal occidental). Thèse Doctorat 3è cycle, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, 145 p.
- Sow E. H., 2007. Histoire sédimentaire du domaine occidental du bassin Sénégalo- Mauritanien d'après les données exoscopiques des grains de quartz de la série Campano-Maastrichtienne du horst de Ndiass (Sénégal, Afrique de l'Ouest). J. Sci. Université C.A.D Dakar, Sénégal, 7, 1-15.
- Sow, Y., 1994. Etude de l'ensablement du chenal de prise d'eau de la centrale thermique duCap des Biches (C III). Rapport d'UV<sub>15</sub>: stage d'entreprise. Univ C.A.D de Dakar, Fac. Sci. Techn./ Institut des Sciences de la Terre, 58 p.
- Stafford D.B., Langfelder J., **1971**. Air photo survey of coastal erosion. *Photogrammetric Engineering*, 37, 65 575.
- Stapor F.W. 1971. Sediment budgets on a compartmented low-to-moderate energy coast in northwest Florida, *Marine Geology*, 10, 2, 1-7.

- Stapor, F.W. **1973.** History and sand budgets of the barrier island system in the Panama City, Florida, Region, *Marine Geology*, 14, 4, 277-286.
- Suanez, S. 2009. La question du bilan sédimentaire des côtes d'accumulation Rôle des forçages naturels et anthropiques dans les processus morphodynamiques analysés à partir de quelques exemples pris en Méditerranée et en Bretagne, Mémoire présenté en vue de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Uni. de Caen – Basse Normandie, 1, 212 p.
- Sy A. 1982. Etude géomorphologique des flèches sableuses du littoral sénégalais : Langue de Barbarie (Nord Sénégal) - Pointe de Sangomar (Saloum) - Presqu'île aux Oiseaux (Casamance). Mémoire de Maîtrise, Université de Dakar, 103 p.

Tessier F., **1952**. Contributions à la stratigraphie et à la paléontologie de la partie ouest du Sénégal (Crétacé et Tertiaire). *Bulletin de la Direction des Mines de l'AOF*, Dakar, 14, 1, 1-267.

Tessier, F., **1954b.** Notice explicative de la feuille Thiès-ouest. Carte géol. de l'A.O.F. au 1/200.000, Dakar. 86 p.

- Tessier, F., Flicoteaux, R. Lappartient, J. R, Nahon, D., Triat, J. M., 1975. Reforme du concept de continental terminal dans les bassins sédimentaires côtiers de l'ouest africain. IX<sup>eme</sup> Congr. Intern.Sédim., Nice, Thème 1, 207-217.
- Thieler E.R., Danforth W.W., 1994. Historical shoreline mapping (II): Application of the digital shoreline mapping and analysis systems (DSMS / DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico. *Journal of Coastal Research*, 10, 600 - 620.
- Thieler, E.R., Ergul, A., Martin, D., Thompson, M., 2004. Tutorial for the Digital shoreline analysis system (DSAS) version 2.1.1. Extension for Arc View.USGS / PEROTSYSTEMS, 30 p.
- Thomas, I. F., **2007.** Le vent sur le littoral d'Afrique de l'Ouest 8° à 22° N– 12° à 26° W-Données ERS1 – ERS2 - QUIKSCAT. Laboratoire de Géographie Physique UMR 8591 du CNRS 60 p.
- Touré, B., Kouamé, K.F., Wade, S., Collet, C., Affian, K., Ozer, A., Rudant, J.P., Biémi, J. (2012) L'influence des actions anthropiques dans l'évolution historique d'un littoral sableux à forte dérive sédimentaire : la baie de Port-Bouët (Abidjan,

Côte d'Ivoire). Revue Géomorphologie : relief, processus, environnement. 3, 369-382.

- Vanney, J.R., **1991**. *Introduction à la géographie de l'océan*. Institut océanographique-Paris, 17 1-2, 214 p.
- Villeneuve, M. Rochet, J., Faye, M., 1993. Héritage structuraux panafricains et hercyniens sur la marge africaine de l'Océan Atlantique, entre la Mauritanie et le Libéria. *Bull. Soc. Geol.France*, Paris, 164, 6, 851-860
- Weber, E. **2006**. Experience-based and description-based perceptions of long-term risk: why global warming does not scare us (yet). *Climatic Change*, 77: 103-120.
- Wentworth, C. K. 1922. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. Journal of Geology, 30, 377-392
- Wright, L.D., Short T, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Mar. Geol.*, Amsterdam, 56, 93-1 18.
- Wright L. D., Short A. D., Green M. O., 1985. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: an empirical model. Mar. Geol., Amsterdam, 62, 339-36.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Principaux types de côtes au Sénégal (Sall, 1982, modifiée).	10
Figure 2: Répartition spatio-temporelle des facteurs climatiques, hydrodynamiques,	12
Figure 3 : Localisation de la zone d'étude (Image Spot 2006)	16
Figure 4 : Les masses d'air et le déplacement du F.I.T. (Front Inter Tropical)	17
Figure 5 : Evolution de la pluviométrie moyenne mensuelle à Dakar (Station de Dakar	Yoff
1900 - 2008)	19
Figure 6 : Variabilité interannuelle des précipitations annuelles à Dakar (1900-2008)	20
Figure 7 : Ecarts pluviométriques par rapport à la moyenne (Source : station de Dakar	Yoff
1900 -2008)	20
Figure 8 : Evolution inter-mensuelle de la température moyenne de la région	21
Figure 9 : Variation mensuelle de la direction et de la vitesse du vent en cm $.s^{-1}$ de $.05/08/$	/1991
- 31/12/2006	22
Figure 10: Moyennes mensuelles de la vitesse du vent de 1951 à 2009 à Dakar	24
Figure 11: Evolution de l'humidité relative moyenne mensuelle à Dakar (1951-2003)	24
Figure 12 : Le Bassin sédimentaire sénégalo-mauritano-guinéen dans son cadre régional	25
Figure 13 : Schéma structural de la presqu'île du Cap Vert	26
Figure 16 : Bathymétrie de la marge continentale sénégalo-gambienne	36
Figure 17: Le littoral de Rufisque dans la baie de Gorée image spot 1999;	39
Figure 18 : Profil annuel de la marée de 1960 à 2006 à Dakar	41
Figure 19 : Variation du marnage à Dakar (2005-2006) durant la période d'étude	41
Figure 20 : Direction et fréquence des houles dominantes (A) et des houles occasionnelles (	B)42
Figure 21 : Modèles de propagation des houles le long de la côte sénégalaise	43
Figure 22 : Plans de houle et dérive littorale induite (houle de Nord-ouest)	44
Figure 23 : Carte de localisation de la zone d'étude montrant les ouvrages de protection c	ontre
l'érosion côtière	56
Figure 24 : Le champ d'épis de Diokoul	57
Figure 25 : Le mur de protection à Rufisque	58
Figure 26 : Mur en béton armé de Diokoul	61
Figure 27 : Carte de localisation des profils de plage	70
Figure 28 : Principales unités morphologiques d'une plage sableuse et ses agents dynamiq	jues .
	72
Figure 29: Fenêtre du logiciel Origin 6.0 montrant le calcul des quartiles à partir d'une co	ourbe
cumulative	74
Figure 30: Etapes de l'étude de l'évolution de la ligne de rivage à Rufisque par le DSAS	77
Figure 31 : Validation du géoréférencement de l'image de référence.	80

Figure 32 : Fenêtre du logiciel Chips montrant l'erreur moyenne quadratique ou (RMS)	81
Figure 33 : Mosaïquage de la photographie aérienne de 1954	81
Figure 34 : Fenêtre du logiciel Chips montrant la rectification	82
Figure 35 : Détermination de la ligne de rivage (extrait d'une photographie aérienne, n	nission
IGN 1954)	83
Figure 36 : Méthodes de détermination des taux d'évolution de la ligne de rivage	85
Figure 37 : Transects générés par le DSAS pour la mesure de l'évolution du trait de côte	87
Figure 38 : P <sub>1</sub> . Profils mensuels de plage:	94
Figure 39 : P <sub>1</sub> - Comparaison des profils mensuels de plage	96
Figure 40 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil P <sub>1</sub>	98
Figure 41 : Evolution de la moyenne Mz (en $\mu$ m) au niveau du bas estran de P <sub>1</sub>	99
Figure 42 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques	100
Figure 43 : P <sub>2</sub> . Profils mensuels de plage H (m) =hauteur en mètres;	102
Figure 44 : P <sub>2</sub> -Comparaison des profils mensuels de plage H (m) =hauteur en mètres;	104
Figure 45 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil P <sub>2</sub>	106
Figure 46 : Evolution de la moyenne Mz (en $\mu$ m) du bas estran de P <sub>2</sub>	106
Figure 47 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques	107
Figure 48 : P <sub>3</sub> Profils mensuels de plage H (m) =hauteur en mètres;	109
Figure 49 : P <sub>3</sub> -Comparaison des profils mensuels de plage	111
Figure 50 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil P <sub>3</sub>	114
Figure 51 : Evolution de la moyenne Mz (en $\mu$ m) du bas estran de P <sub>3</sub>	114
Figure 52 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques	115
Figure 53 : P <sub>4</sub> Profils mensuels de plage	117
Figure 54 : Comparaison des profils mensuels de plage (P <sub>4</sub> )	119
Figure 55 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil P <sub>4</sub>	122
Figure 56 : Evolution de la moyenne Mz (en $\mu$ m) du bas estran de P <sub>4</sub>	122
Figure 57 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologique	ues du
profil P <sub>4</sub>	123
Figure 58 : P <sub>5</sub> Profils mensuels de plage	125
Figure 59 : Comparaison des profils mensuels de plage (P <sub>5</sub> )	127
Figure 60 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil P <sub>5</sub>	129
Figure 61 : Evolution de la moyenne Mz (en $\mu$ m) au niveau du bas estran de P <sub>5</sub>	130
Figure 62 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologique	ues du
profil P <sub>5</sub>	130
Figure 63 : P <sub>6</sub> Profils mensuels de plage	132
Figure 64 : Comparaison des profils mensuels de plage (P <sub>6</sub> )	135
Figure 65 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil P <sub>6</sub>	138

Figure 66 : Evolution de la moyenne Mz (en $\mu$ m) du bas estran de P <sub>6</sub> 138
Figure 67 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques 139
Figure 68 : Comparaison de la forme des profils de plage des deux secteurs (P3 et P6) 141
Figure 69 : Bilan annuel des mouvements verticaux des plages de Rufisque 144
Figure 70 : La différenciation sédimentologique des deux secteurs du littoral de Rufisque 150
Figure 71 : Variations saisonnière de la granulométrie au niveau du mi-estran
Figure 72 : Bilan et cumul annuels des mouvements verticaux des profils de plage 153
Figure 73 : Evolution de la moyenne Mz de l'ensemble des profils du bas estran 154
Figure 74 : Effets nocifs d'un mur de protection sur une plage
Figure 75 : Effets dommageables des épis sur le trait de côte
Figure 76: Evolution de la ligne de rivage aux abords du port de Nouakchott (Mauritanie) entre
1980 et 2005
Figure 77 : Comparaison des profils de plage en amont dérive du canal de la centrale thermique
du cap des Biches
Figure 78: Comparaison des profils de plage à l'extrémité nord-ouest du cimetière musulman de
Diokoul
Figure 79: Comparaison des profils de plage à l'extrémité sud est du cimetière musulman de
Diokoul
Figure 80: Comparaison des profils de plage du cimetière musulman de Thiawlène 166
Figure 81: Comparaison de deux profils des deux périodes d'études; A: plage en amont dérive
du canal de la centrale du Cap des Biches et B: Extrémité nord-ouest du mur du cimetière de
Diokoul
Figure 82: Comparaison des courbes granulométriques des sables de mi-estran 171
Figure 83 : Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1954 à 1980 178
Figure 84: Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1980 à 1997
Figure 85 : Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1997 à 2006 182
Figure 86 : Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1954 à 2006 185
Figure 87 : Evolution de la ligne de rivage à Rufisque de 1954 à 2006 186
Figure 88 : Variations des températures, du niveau moyen de la mer
Figure 89 : Prévisions du réchauffement climatique au 21ème siècle selon les scénarios
d'émissions du rapport du GIEC (2001)- Scénarios d'émissions IS92e à sensibilité climatique
élevée, IS92a à sensibilité climatique moyenne et IS92c à sensibilité climatique faible 192
Figure 90: Stratégies d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer
Figure 91: Stratégies d'adaptation et de gestion des risques et de catastrophes face au
changement climatique
Figure 92: Mécanisme de filtrage dans le processus de d'élaboration des politiques publiques .

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des types de houles au large des côtes sénégalaises	44
Tableau 2 : Caractéristiques en eau profonde des houles longues au large des côtes sénégal	aises
	45
Tableau 3 : Propriétés fonctionnelles attribuées aux épis et leur évaluation critique accepté	ée ou
non par la littérature scientifique	54
Tableau 4 : Vitesse observée de l'élévation du niveau de la mer et estimation des contribu	tions
des différents facteurs	65
Tableau 5: Taux moyens d'évolution du littoral à Rufisque entre 1917 et 1980	66
Tableau 6 : Taux d'évolution de la ligne de rivage à Rufisque entre 1968 et 1997	66
Tableau 7: Coordonnées des profils de plage	70
Tableau 8 : Classification granulométrique de Wentworth	75
Tableau 9 : Références des photographies aériennes et des images utilisées	78
Tableau 10 : Estimation de la marge d'erreur globale de chaque période d'étude	90
Tableau 11 : Principales caractéristiques morphologiques du profil P <sub>1</sub>	93
Tableau 12 : Evolution morphologique mensuelle du profil P <sub>1</sub>	95
Tableau 13 : Variations de la moyenne Mz (en $\mu$ m) et de l'indice de classement Sig du Pro-	fil P <sub>1</sub>
selon les unités morphologiques	98
Tableau 14 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil P1Av	ec P <sub>1</sub>
et $P_2$ pourcentages principal et secondaire et $M_1$ et $M_2$ modes principal et secondaire	99
Tableau 15 : Principales caractéristiques morphologiques du profil P2	. 101
Tableau 16 : Evolution morphologique mensuelle du profil $P_2$	. 103
Tableau 17 : Variations de la moyenne Mz (en $\mu$ m) et de l'indice de classement	. 105
Tableau 18 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil $P_2$	. 107
Tableau 19 : Principales caractéristiques morphologiques du profil P <sub>3</sub>	. 108
Tableau 20 : Evolution morphologique mensuelle du profil $P_3$	. 110
Tableau 21 : Variations de la moyenne Mz (en $\mu$ m) et de l'indice de classement (sig) du p	profil
P <sub>3</sub> selon les unités morphologiques	. 113
Tableau 22 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil P3 Av	ec P <sub>1</sub>
et $P_2$ pourcentages principal et secondaire et $M_1$ et $M_2$ modes principal et secondaire	. 113
Tableau 23 : Principales caractéristiques morphologiques du profil P <sub>4</sub>	. 116
$Tableau\ 24: Evolution\ morphologique\ mensuelle\ du\ profil\ P_4\ Mouvements\ verticaux\$	. 118
Tableau 25 : Variations de la moyenne Mz (en $\mu$ m) et de l'indice de classement sig	. 120
Tableau 26 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil $P_4$ ave	$ c M_1 $
et $M_2$ modes principal et secondaire (en $\mu$ m); $P_1$ et $P_2$ pourcentages des modes princip	al et
secondaire	. 121

Tableau 27 : Principales caractéristiques morphologiques du profil P <sub>5</sub> 1	24
Tableau 28 : Evolution morphologique mensuelle du profil $P_5$ 1	26
Tableau 29 : Variations de la moyenne Mz (en $\mu$ m) et de l'indice de classement 1	28
Tableau 30 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil P5 1	29
Tableau 31 : Principales caractéristiques morphologiques du profil P <sub>6</sub> 1	31
Tableau 32 : Evolution morphologique mensuelle du profil $P_6$ 1	34
Tableau 33 : Variations de la moyenne Mz (en $\mu$ m) et de l'indice de classement 1	36
Tableau 34 : Variations moyennes des principaux indices granulométriques du profil P6 1	37
Tableau 35 : Caractéristiques morphologiques des profils des plages aériennes       1	40
Tableau 36 : Les mouvements verticaux des différents profils de la plage aérienne (en m <sup>3</sup> par	m
linéaire de plage)1	43
Tableau 37 : Variation annuelle de l'indice de classement (sig) des profils du bas estran 1	52
Tableau 38 : Variation annuelle de la moyenne Mz des profils du bas estran 1	52
Tableau 39 : Variations de la moyenne Mz en µm au cours de l'année1	55
Tableau 40 : Comparaison des données morpho-sédimentologiques des profils       1	60
Tableau 41 : Comparaison des données morpho-sédimentologiques des profils       1	61
Tableau 42: Comparaison des données morpho-sédimentologiques des profils1	61
Tableau 43 : Comparaison des données morpho-sédimentologiques des profils       1	62
Tableau 44: Avantages et inconvénients de différentes options d'adaptation 1	95

## LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Falaise du Cap des Biches montrant la plate-forme d'abrasion	38
Photo 2 : Végétation d' <i>Opuntia tuna</i> du cordon littoral de Rufisque à proximité	38
Photo 3: Effets des fortes houles du 30 mai 2014 sur le nouveau mur de Thiawlène	: A:
projection des blocs de basaltes derrière le mur; B: inondation du quartier; C: destruction	de la
promenade du mur	47
Photo 4 : La plage de Keuri Souf - Keuri Kao (le port de Rufisque) du temps de la colonis	sation
	49
Photo 5 : Photographie aérienne de 1997 montrant le canal d'alimentation en ea	u de
refroidissement de la centrale du Cap des Biches	51
Photo 6 : Canal de la centrale thermique du Cap des Biches (a: vue de face; b: vue de profil	). 51
Photo 7 : Disparition complète de la plage sur la quasi-totalité du littoral en face du quart	ier de
Thiawlène	55
Photo 8: Augmentation de la turbulence des eaux au niveau de la zone de déferlement lié	e à la
rencontre de deux vagues: une vague déferlante et une vague réfléchie sur le mur	58
Photo 9: Le Mur mixte du cimetière et du quartier Diokoul avant son renversement	59
Photo 10 : Affouillement de la base du mur de protection du cimetière musulman de Dioko	ul 60
Photo 11 : Le mur en béton armé de Diokoul durant et après la phase de construction	61
Photo 12: Réfection du mur en enrochements en face du quartier de Thiawlène	61
Photo 13 : Vue du profil P <sub>1</sub> montrant la présence de blocs de calcaires et de basaltes	95
Photo 14: Prolongement du mur par des moellons de calcaires par les populations en juin	2005
	134
Photo 15 : Effets des fortes houles du 01 juillet 2007 montrant l'apparition de la route en	149
Photo 16 : Contournement des vagues à l'extrémité du cimetière de Diokoul	165
Photo 17 : Effondrement de l'ouvrage mixte en gabions surmonté	167
Photo 18 : Basculement de l'extrémité Sud du mur mixte en gabions surmontés de mur	167
Photo 19 : Microfalaise due aux effets de contournement de la digue en enrochements	170
Photo 20: Effets bénéfique et dommageable du canal de la centrale thermique du Cap	p des
Biches sur la sédimentation A:accumulation en amont de la dérive ; B : érosion en aval	de la
dérive	184

	Juin		Août		Octobre		Décembre	e	Février		Avril		Juin	
	%CaCO	Mode	%CaCO	Mode	%CaCO	Mode	%CaCO	Mod	%CaCO	Mode	%CaCO <sub>3</sub>	Mode	%CaCO <sub>3</sub>	Mode
	3		3		3		3	e	3					
	P6													
HP	11,06	315	9,66	315	9,66	315	16,86	400	17,7	400	15,13	250	9,46	315
LHM	11,13	250	Nd	Nd	6,66	250	9,33	315	8,8	250	11,33	315	9,73	315
ME	5,33	250	4,4	250	6,86	315	7,33	250	6,5	315	5,46	250	7,53	250
Mer	19,53	250	3,06	160	16,46	315	9,13	250	30,3	500	8,26	315	9,93	250
Dflmt	11,33	250	6,13	250; 1000	9,66	315	10,73	250	8	250	8,8	250	12,26	315
							P5							
HP	15,38	250	27,4	315	23,53	250	22,4	250	20,3	250	16,93	250	20,2	315
LHM	15,6	200	18,26	250	9,8	200	19,8	250	12,5	315	14,2	315	17,73	315
ME	14,8	250	14,6	315	9,73	200	4	160	5,1	160	7,66	200	18,86	250
Mer	31,2	400	34,4	400	23,46	250	19,06	400	27,33	315	19,53	315	19,33	125
Dflmt	12,6	160	39,2	250; 1000	19	125	11,93	125	18,4	125	14,4	125	12,2	125
							P4							
HP	39,6	250	14	200	12,86	160	23,33	250	16,26	160	21	160	17,6	160
LHM	13,2	160	20,8	200	14,13	160	12,4	160	18,26	160	18,33	160	20,53	160
ME	22	125	10,46	160	17,2	125	19,26	125	21,4	100	17,06	125	18,26	125
Mer	28,66	125	19,2	160	31,33	125;500	31,86	125;	19,93	100	19,46	125	29,66	125
								1250						
Dflmt	18,53	125	38,46	160	12,66	80	18,93	100	21,46	125	18,4	125	15,86	125
							P3							
HP	27,8	200	14,73	200	14,53	160	14,26	125	12,53	160	14	200	15,26	160
LHM	17,26	160	7,4	200	16,4	160	13,06	125	13,66	125	13,66	125	11,2	200
ME	26,53	125	11,6	160	21,46	80	23,6	125	25,73	125	15,53	125	18,26	125
Mer	32,6	100;400	14,53	200	19,33	100;	31,7	100;	22,73	125	19,2	160	20,53	125
						1000		1000						
Dflmt	15,8	80	19,33	160	35,13	125	15	100	21,26	100	17,53	125	19,6	125

ANNEXE: Variation du mode (µm) et pourcentage de CaCO3 des unités morphologiques

	Juin		Août		Octobre		Décembre		Février		Avril		Juin	
	%CaCO	Mode	%CaCO	Mode	%CaCO	Mode	%CaCO	Mod	%CaCO	Mode	%CaCO <sub>3</sub>	Mode	%CaCO <sub>3</sub>	Mode
	3		3		3		3	e	3					
							P2							
HP	8,73	160	9	200	7,86	200	7	200	11,73	200	11,06	200	6,6	200
LHM	9	160	7,13	200	8	160	9	200	11,73	200	7,93	200	7,2	200
ME	7,46	200	6,93	200	7,2	160	9,06	200	16,8	125	10,06	200	7,26	200
Mer	24	200	6,93	200	9,26	200	13,2	200;	11,46	200	11,13	200	13,66	200
								1000						
Dflmt	13,06	125	8,13	200	15,2	125	10	200	13,4	160	9,06	160	13,53	160
							P1							
HP									8,93	200				
LHM	10,33	160	11,86	200	11,4	160	11,26	200	11	160	9	200	12,4	250
ME	15,13	125	16,46	160	20,33	125	12,73	160	21,8	125	16	160	12,6	200
Mer	17,73	125	15,73	200	32,35	125	15,66	125	18,26	125	21,8	160	15,86	125
Dflmt	20,86	125	9,8	200	19,33	100	25,33	100;	24,06	100	16,46	125	16,2	125
								1000						

ANNEXE (suite): Variation du mode (µm) et pourcentage de CaCO3 des unités morphologiques

REMERCIEMENTS	1
Sommaire	3
ABREVIATIONS	3
RESUME	5
INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE 1: CADRE D'ETUDE	14
I. Cadre géographique	15
I.1. Localisation de la zone d'étude	15
I.2. La circulation atmosphérique et les éléments du climat	16
I.2.1. La circulation atmosphérique	16
I.2.2. Les éléments du climat	
I.2.2.1. Les précipitations	
I.2.2.2. Les températures	20
I.2.2.3. Les vents	21
I.2.2.4. L'humidité relative	24
II. Cadre géologique	25
II.1. Contexte géologique général	
II.2. Lithostratigraphie de la région d'étude	27
II.2.1. Le Tertiaire	27
II.2.1.1. L'Eocène inférieur à supérieur	27
II.2.1.1. L'Oligocène	29
II.2.1.2. Le Miocène	
II.2.1.2. Le Pliocène	
II.2.2. Le Quaternaire	
II.2.2.1. L'Eémien ou Aïoujien (125 000- à 100 000 BP)	
II.2.2.2. L'Ogolien (20 000 B.P. à 15 000 B.P)	
II.2.2.3. Le Tchadien (11000 à 6800 B.P)	
II.2.2.4. Le Nouakchottien (6800 à 4 200B.P) ou Flandrien	
II.2.2.5. Le Tafolien (4200 à 2000 B.P)	
II.2.2.6. Le Dakarien (3000 à 2000 B.P)	
III. Le plateau continental : morphologie et sédimentologie	
IV. Description géomorphologique du littoral de Rufisque	
V. Cadre hydrodynamique	40
V.1. L a circulation océanique	40
V.2. Les marées	40
V.3. La houle et les courants induits	

## TABLE DES MATIERES

V.3.1. La houle	42
V.3.2. Les courants de houle	45
V.3.2.1. Les courants de dérive littorale	45
V.3.2.2. Les courants perpendiculaires à la côte	46
V.4. L'upwelling	48
VI. Caractéristiques anthropiques	48
VI.1. L'urbanisation	49
VI.2. Les prélèvements de sables	50
VI.3. Le canal de la SENELEC	50
VI.4. Les différentes méthodes de lutte contre l'érosion	52
VI.4.1. Les méthodes structurales	52
VI.4.2. Les méthodes non structurales	53
VI.4.3. Les ouvrages de protection du littoral de Rufisque	55
VI.4.3.1. Champ d'épis de Diokoul	56
VI.4.3.2. Les murs de protection	57
VI.4.3.2.1. Le mur en enrochements	57
VI.4.3.2.2. Le mur mixte en gabions surmontés d'un mur en béton	59
VI.4.3.2.3. Le mur en béton armé	60
VII. Les causes de l'érosion côtière et les taux d'érosion des études antérieures du littoral de	
Rufisque.	62
VII.1. Les causes de l'érosion	62
VII.1.1. Les causes naturelles	62
VII.1.2. Les causes anthropiques	63
VII.1.3. Le niveau marin et ses variations	63
VII.2. Les taux d'érosion des études antérieures du littoral de Rufisque.	65
VIII. Conclusion	66
CHAPITRE 2: METHODOLOGIES	
	68
I. Méthodes topographique et sédimentologique	68 69
I. Méthodes topographique et sédimentologique I.1. Méthode topographique	68 69 69
I. Méthodes topographique et sédimentologique I.1. Méthode topographique I.1.1. Levés topographiques	68 69 69 69
<ul> <li>I. Méthodes topographique et sédimentologique</li> <li>I.1. Méthode topographique</li> <li>I.1.1. Levés topographiques</li> <li>I.1.2. Analyse des profils de plage</li> </ul>	68 69 69 69 71
<ul> <li>I. Méthodes topographique et sédimentologique</li> <li>I.1. Méthode topographique</li> <li>I.1.1. Levés topographiques</li> <li>I.1.2. Analyse des profils de plage</li> <li>I.2. Méthode sédimentologique</li> </ul>	68 69 69 69 71 73
<ul> <li>I. Méthodes topographique et sédimentologique</li></ul>	68 69 69 71 73 73
<ul> <li>I. Méthodes topographique et sédimentologique</li> <li>I.1. Méthode topographique</li> <li>I.1.1. Levés topographiques</li> <li>I.1.2. Analyse des profils de plage</li> <li>I.2. Méthode sédimentologique</li> <li>II.2.1. Echantillonnage</li> <li>II.2.2. Analyse granulométrique</li> </ul>	68 69 69 71 73 73 73
<ul> <li>I. Méthodes topographique et sédimentologique</li> <li>I.1. Méthode topographique</li> <li>I.1.1. Levés topographiques</li> <li>I.1.2. Analyse des profils de plage</li> <li>I.2. Méthode sédimentologique</li> <li>II.2.1. Echantillonnage</li> <li>II.2.2. Analyse granulométrique</li> <li>II. Méthodes d'étude de l'évolution de la ligne de rivage</li> </ul>	68 69 69 71 73 73 73 73
<ul> <li>I. Méthodes topographique et sédimentologique</li> <li>I.1. Méthode topographique.</li> <li>I.1.1. Levés topographiques.</li> <li>I.1.2. Analyse des profils de plage.</li> <li>I.2. Méthode sédimentologique.</li> <li>II.2.1. Echantillonnage</li> <li>II.2.2. Analyse granulométrique</li> <li>II. Méthodes d'étude de l'évolution de la ligne de rivage</li> <li>II.1. Acquisition des données.</li> </ul>	68 69 69 71 73 73 73 73 77

II.3. Le choix d'une ligne de rivage de référence.	82
II.4. Méthodes d'évaluation et de mesure des taux d'évolution de la ligne de rivage	84
II.4.1. Méthodes quantitatives d'évaluation des taux d'évolution	84
II.4.1.1. La méthode de « End Point Rate » ou des « Points extrêmes »	84
II.4.1.2. La méthode de la moyenne des taux ou « Average of Rates »	85
II.4.1.3. La méthode par régression linéaire	86
II.4.1.4. La méthode des ciseaux ou « jackknife »	86
II.4.2. Mesure des évolutions et détermination des taux d'évolution	87
II.5. Les sources d'erreurs et leur estimation	88
CHAPITRE 3:EVOLUTION MORPHO-SEDIMENTAIRE DU LITTORAL DE RUFISQUE	91
I. Analyse morpho-sédimentaire des plages	92
I.1. Profil 1 (P <sub>1</sub> )	92
I.1.1. Analyse des données morphologiques	93
I.1.1.1. Caractéristiques morphologiques	93
I.1.1.2. Evolution des mouvements verticaux	95
I.1.2. Analyse des paramètres sédimentologiques	97
I.2. Profil 2 (P <sub>2</sub> )	100
I.2.1 Analyse des données morphologiques	100
I.2.1.1. Caractéristiques morphologiques	100
I.2.1.2. Evolution des mouvements verticaux	102
I.2.2. Analyse des données sédimentologiques	105
I.3. Profil 3 (P <sub>3</sub> )	108
I.3.1. Analyse des données morphologiques	108
I.3.1.1. Caractéristiques morphologiques	108
I.3.1.2. Evolution des mouvements verticaux	110
I.3.2. Analyse des données sédimentologiques	112
I.4. Profil 4 (P <sub>4</sub> )	115
I.4.1. Analyse des données morphologiques	115
I.4.1.1. Caractéristiques morphologiques	115
I.4.1.2. Evolution des mouvements verticaux	118
I.4.2. Analyse des données sédimentologiques.	120
I.5. Profil 5 (P <sub>5</sub> )	123
I.5.1. Analyse des données morphologiques	123
I.5.1.1. Caractéristiques morphologiques	123
I.5.1.2. Evolution des mouvements verticaux	126
I.5.2. Analyse des données sédimentologiques	128
I.6. Profil 6 (P <sub>6</sub> )	130

I.6.1. Analyse des données morphologiques	.130
I.6.1.1. Caractéristiques morphologiques	.130
I.6.1.2. Evolution des mouvements verticaux	.133
I.6.2. Analyse des données sédimentologiques.	.136
II. Synthèse et discussion des résultats	.139
II.1. Les résultats morphologiques	.139
II.2. Les mouvements verticaux mensuels	.143
II. 2.1. Le secteur 1 : Cap des Biches - Cap de Diokoul	.145
II.2.1. Le secteur 2 : la baie de Rufisque (P5 et P6)	.146
II.3. Synthèse des résultats sédimentologiques	.150
II.3.1 .Caractères généraux des sédiments	.150
II.3.2. Analyse des variations longitudinales de la moyenne et de l'indice de classement	
(sig) au niveau du bas estran	.151
II.3.3. Analyse des variations transversales de la moyenne (Mz)	.154
II.3.4. Variation de la moyenne Mz au cours de l'année par profil et selon les unités	
morphologiques	.155
III. Les impacts physiques des structures de protections sur le littoral	.156
III.1. Généralités sur les impacts des structures de protection	.156
III.2. Impacts des ouvrages de protection sur l'évolution morpho-sédimentaire du littoral de	
Rufisque	.159
III.2.1. Comparaison des résultats	.160
III.2.2. Discussion	.162
IV. Conclusion	.172
CHAPITRE 4 : EVOLUTION RETROSPECTIVE DE LA LIGNE DE RIVAGE DE	
RUFISQUE DE 1954 A 2006	.174
I. Impact des ouvrages de protection sur l'évolution de la ligne de rivage de 1954 à 2006	.176
I.1. La phase d'évolution naturelle 1954 à 1980	.176
I.2. La phase de construction des ouvrages (1980 à 1997)	.179
I.3. La phase post-construction (1997 à 2006)	.181
I.4. La période d'étude de 1954 à 2006	.183
II. Conclusion	.187
CHAPITRE 5 :CHANGEMENT CLIMATIQUE ET STRATEGIES D'ADAPTATION A	
L'EROSION CÔTIERE AU SENEGAL: LES OBSTACLES	.188
I. Changement climatique et stratégies d'adaptation	.190
I.1. Le Changement climatique	.190
I.2. Les stratégies d'adaptation au changement climatique	.192
II. Les stratégies d'adaptation à l'érosion côtière	.194

III. Les obstacles aux stratégies d'adaptation à l'érosion côtière au Sénégal	
III.1. Les processus hydrodynamiques	
III.2. Les obstacles techniques	
III.3. Les obstacles humains	
III.4. Les obstacles financiers	
III.5. Les obstacles politiques, institutionnels et législatifs	
IV. Conclusion	
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	
BIBLIOGRAPHIE.	211
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES PHOTOS	234
ANNEXE :	
TABLE DES MATIERES	