

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE DOCTORALE

Physique Chimie Sciences de la Terre de l'Univers et de l'Ingénieur

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Discipline : Géologie

Année : 2019 N° d'ordre :

THESE DE DOCTORAT

Formation doctorale : Dynamique, Environnement et Ressources des bassins sédimentaires

Présentée par :

Habib NGOM

EVOLUTION MORPHOSEDIMENTAIRE ET MODELES DE PROTECTION SHORELINES DU LITTORAL SABLEUX DE SALY, PETITE COTE, SENEGAL

Soutenue le 29/02/2020 devant le jury composé de :

Président :	Raphaël SARR	Professeur Université Cheikh Anta Diop Dakar
Rapporteurs :	Dano ROELVINK	Professeur UNESCO-IHE, Delft, Pays-Bas
	Amadou Tahirou DIAW	Professeur Université Cheikh Anta Diop Dakar
Examinateurs :	El Hadji SOW	Professeur Université Cheikh Anta Diop Dakar
	Pape Goumba LO	Professeur Directeur du CEREEQ
	Boubou Aldiouma SY	Professeur Université Gaston Berger Saint-Louis
Directrice de thèse :	Isabelle NIANG	Professeur Université Cheikh Anta Diop Dakar

DEDICACES

Je dédie ce travail :
À mon Père Pierre NGOM et
À ma Soeur Cécile Daba NGOM (in memoriam).

“SERVUM SERVORUM DEI”

Résumé

L'évolution historique de la ligne de rivage de 1954 à 2035 a été suivie à l'aide d'images aériennes et de modèles d'évolution morphodynamique ShorelineS. Une surveillance mensuelle en 2014 d'une série de 9 profils de plage renseigne aussi sur l'évolution morphosédimentaire du littoral. Les résultats montrent un déséquilibre sédimentaire considérable entre un secteur Nord-Ouest en accumulation et un secteur Sud-Est en érosion, séparés par l'épi de la résidence Safari. La combinaison de différentes structures de protection inhibe la manifestation des effets positifs de certains d'entre eux. Dans le secteur Sud-Est, qui est toujours affecté par les courants de retours associés aux épis du secteur Nord-Ouest, les brise-lames réduisent légèrement les taux d'érosion. Les murs en enrochements occupent les plages récréatives et sont sujets à un affouillement et à une submersion qui les rendent instables. La comparaison des taux d'évolution mesurés et simulés pour la période 2003-2016 montre que les épis sont plus favorables que les murs ou les brise-lames à l'accumulation des plages sableuses de Saly. Toutefois la longueur de certains épis accentue les phénomènes d'érosion. Une réduction de la longueur des épis G1 et G5 pourrait être une solution transitoire au problème de l'érosion de la côte. Un réseau structuré d'épis qui prend en compte les caractéristiques physiques du littoral pourrait aussi stabiliser à long terme les plages de Saly. La combinaison épis et brise-lames des modèles des scénarios M3, M8 et M10 sur lesquels la position et la longueur des épis sont mieux évalués minimise les effets de l'érosion sur la côte plus que les autres. Seules quelques segments du littoral subissent encore une érosion qui peut être arrêtée par un rechargement de sable bien localisé.

Mots clés : Saly, côtes sableuses, évolution, ligne de rivage, morphosédimentaire, images aériennes, profils de plage, modèle ShorelineS, DSAS, érosion, accumulation, structures de protection.

Abstract

The historical evolution of the coastline from 1954 to 2035 was followed by aerial images and ShorelineS morphodynamic evolution models. A monthly monitoring in 2014 of a series of 9 beach profiles also provides information on the morphosedimentary evolution of the coastline. The results show a considerable sedimentary imbalance between a northwestern sector generally in accumulation and a southeastern sector under erosion separated by the groyne of the Safari residence. The combination of different protective structures inhibits the manifestation of positive effects of some of them. In the southeastern sector, breakwaters slightly reduce the erosion rates of the beach which are still affected by the return flows associated with the groynes of northwestern sector. Riprap walls occupy recreational beaches and are subject to scour and submersion that make them unstable. Comparison of measured and simulated change rates for the 2003-2016 period, shows that groynes are much more favorable than the breakwaters or seawalls for accretion on the sandy coast of Saly. However, the length of some groynes accentuates erosion phenomena. A reduction in the length of the G1 and G5 groynes could be a transitional solution to the problem of coastal erosion. A well-sized and structured groynes field that takes into account the physical characteristics of the coast could in the long term stabilize the sandy beaches of Saly. The groynes and breakwaters combination of the M3, M8 and M10 scenario models, where the position and length of the groynes are better evaluated, minimizes the effects of erosion on the coast more than the others do. Only few sections of the coastline are still subject to erosion, which can be stopped by well-localized sand nourishment.

Key words: Saly, Sandy beaches, Shoreline evolution, morphosedimentary evolution, aerial images, beach profiles, ShorelineS models, DSAS, erosion, accretion, protective structures.

REMERCIEMENTS

A l'issue de la rédaction de ce travail de recherche, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à celles et à ceux qui m'ont aidé à le réaliser.

J'exprime d'abord ma profonde gratitude à Madame Isabelle Niang, ma directrice de thèse, Professeur au Département de Géologie pour avoir bien voulu m'engager dans la recherche. J'ai toujours bénéficié madame, de votre soutien et de vos conseils durant toutes ces années de DEA et de Thèse. J'ai particulièrement apprécié votre dynamisme, votre disponibilité et votre sens du travail bien fait. Malgré les problèmes de santé qui ne vous ont pas épargné ces dernières années, vous avez toujours porté votre attention sur ces travaux, apporté des corrections et orientations qui ont été indispensables à leur réalisation. Et ce avec des efforts que je qualifierai de « surhumains ». Vous avez tenu malgré une santé précaire à assister et conseiller vos doctorants. Vous m'avez fait connaître et aimer les littoraux. Je vous remercie vivement pour tout et vous souhaite un prompt rétablissement. Veuillez trouver ici le témoignage de toute ma reconnaissance et mon affection.

J'exprime aussi ma profonde gratitude au Professeur Dano Roelvink, directeur de la section *Systèmes Côtiers, Ingénierie et Développement Portuaire* à UNESCO-IHE, Delft, Pays-Bas. Monsieur Roelvink pour m'avoir invité à effectuer un stage en modélisation littorale à l'IHE, vous avez rendu possible la réalisation d'une grande partie de ce travail. Vous m'avez soutenu financièrement, formé et accompagné tout au long de ce stage avec beaucoup de patience, de pédagogie et de compréhension. J'allais dire que la tâche n'avait pas été facile avec ce doctorant qui avait des difficultés avec l'anglais mais aussi avec des outils clés de recherche comme Matlab entre autres. Les corrections apportées à travers les articles publiés m'ont aussi permis d'arriver à la hauteur de la plupart des objectifs fixés. Je vous remercie vivement pour tout.

A Monsieur Raphaël Sarr, Professeur au département de géologie de l'UCAD, merci d'avoir accepté de présider le jury. Je suis très heureux et honoré de vous compter parmi les membres du jury. Durant tout mon cursus étudiant vous avez contribué à assurer ma formation dans les amphithéâtres mais aussi sur le terrain. Vous avez aussi en tant que responsable de la formation doctorale validé le projet de thèse et permis de m'inscrire à plusieurs reprises. Merci pour tout.

Monsieur Amadou Tahirou Diaw, Professeur au Département de Géographie de l'UCAD, je vous remercie encore une fois pour avoir rapporté ce travail. Une fois de plus car vous avez examiné mes travaux de DEA et avec beaucoup de disponibilité, m'avez aidé à

parfaire le document. Les remarques précisées et les conseils prodiguées durant cette étape m'ont beaucoup encouragé à poursuivre mes travaux de thèse.

Monsieur El Hadji Sow, Professeur au Département de Géologie de l'UCAD, je vous remercie encore une fois de bien vouloir examiner ce document. Vous avez examiné mes travaux de DEA et contribué à assurer ma formation en géologie de la première année à l'AEA, à l'occasion des excursions au Sénégal oriental. Je suis très ravi et honoré de vous compter parmi les membres du jury.

Monsieur Boubou Aldiouma Sy, Professeur de géographie à l'UGB, merci de participer à l'examen de ce travail. J'ai suivi avec attention vos interventions pertinentes à l'occasion des soutenances de thèse de plusieurs de mes camarades doctorants. Je suis très heureux et honoré de pouvoir bénéficier à cette occasion de vos précisions, suggestions et conseils.

Monsieur Pape Goumba Lô, Professeur de géologie et directeur du CEREEQ, je vous remercie aussi d'avoir contribué à l'examen de cette thèse. Je vous ai aussi suivi à l'occasion de plusieurs soutenances de thèse, conférences, séminaires et médias. J'ai été particulièrement marqué par votre sens de l'innovation scientifique. C'est aussi un plaisir et un honneur de vous compter parmi les membres du jury.

Je remercie aussi très sincèrement ceux que j'appellerai mes ainés, les docteurs et assistants au Département de Géologie Abdoulaye Ndour, Kader Ba et Boubacar Fall. Abdoulaye Ndour vous m'avez accompagné au quotidien, guidé pas à pas, motivé durant toutes ces années. Vous m'avez aussi aidé à affronter les difficultés de la vie et à trouver des solutions à mes problèmes de recherche. Qu'ALLAH et votre guide spirituel Serigne Saliou Mbacké soient satisfaits de toutes vos œuvres. Kader Ba, durant tout mon parcours dans la recherche j'ai bénéficié de vos précieux conseils. Boubacar Fall aussi, vos suggestions ont permis d'orienter ce travail. Que le SEIGNEUR vous le rende au multiple, mes frères.

Merci aussi à tous ce qui ont contribué par leur apport matériel ou financier à l'achèvement de cette thèse. Je veux particulièrement citer Monsieurs Madiab Diouf de la DGTC et Ousmane Bocoum du CSE qui m'ont donné des photos aériennes et images satellitaires de très bonne qualité de la zone de Saly. Je remercie aussi au même titre le Professeur Bassirou BA du département de physique et à travers lui la structure qu'il dirigeait, l'école doctorale Physique, Chimie, Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Ingénieur (PCSTUI) qui par sa contribution financière m'a permis de soutenir les dépenses liés au stage au Pays Bas. Pour l'accueil chaleureux qui m'a été réservé à l'IHE, je remercie la secrétaire Martine Roebroeks et le Docteur Ali Dastgheib qui ont fait de ce séjour un moment profitable.

Mes remerciements vont aussi à tous le personnel et aux enseignants du Département de Géologie, aux camarades de recherche, aux collègues professeurs des Sciences de la Vie et de la Terre, à mes supérieurs administratifs et à tous les amis qui de près ou de loin ont contribué au bon déroulement de ce travail. Je voulais citer entre autres les assistants Abdoulaye Ndiaye et Andrien Gozo ; les docteurs Yves birame Diadhiou, Mamadou Sadio, Badara Diagne, Coumba Sy et Ibrahima Mall ; les doctorants Sokhna Astou Mbacké Diop, Jean Pierre Gane Sarr, Jean Marcel Youm, Papa Sagne et Khady Ndiaye ; les professeurs de l'enseignement secondaire ou moyen Ousmane Badji, Babacar Faye, Diegane Ndiaye, Ibou Dione, Aliou Gningue et Mamadou Saliou Diallo puis les chefs d'établissements scolaires Raoul Gomis et Mbissine Ndiaye.

Une pensée particulière aux familles Sagna et Ngom. A la famille Sagna, ma famille d'accueil à Dakar et particulièrement à Madame Félicité Sagna qui est pour moi une deuxième mère, j'exprime ma profonde reconnaissance et mon affection. Je vous remercie pour tout ce que vous avez fait et continuez à faire pour moi. A la famille Ngom, ma famille biologique, à mon père, à ma mère, à mes frères et sœurs, je n'aurai jamais pu faire ce travail sans votre soutien, vos encouragements et vos prières. Je ne vous remercierai jamais assez. Une pensée pieuse à mon père qui été récemment arraché à notre affection. Que le SEIGNEUR vous accueille dans son royaume, Amen.

SOMMAIRE

Résumé	Erreur ! Signet non défini.
INTRODUCTION GENERALE.....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE I. PRESENTATION DU CADRE D'ETUDE.....	Erreur ! Signet non défini.
I.1. Cadre géographique.....	Erreur ! Signet non défini.
I.2. Cadre géologique.....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion partielle.....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE II. PRINCIPAUX FACTEURS D'EVOLUTION DU LITTORAL.....	Erreur ! Signet non défini.
II.1. Agents hydrodynamiques.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2. Quantités de sédiments disponibles	Erreur ! Signet non défini.
II.3. Facteurs anthropiques	Erreur ! Signet non défini.
II.4. Dynamique littorale	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion partielle.....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE III. EVOLUTIONS HISTORIQUE DE LA LIGNE DE RIVAGE ET MORPHOSEDIMENTAIRE DU LITTORAL	Erreur ! Signet non défini.
III.1. Méthodes d'étude de l'évolution de la ligne de rivage.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2. Méthodes de détermination des caractéristiques topographiques	Erreur ! Signet non défini.
III.3. Méthodes de calcul des paramètres sédimentologiques	Erreur ! Signet non défini.
III.4. Evolution historique de la ligne de rivage de 1954 à 2016	Erreur ! Signet non défini.
III.5. Evolution morphosédimentaire du littoral	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion partielle.....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE IV. MODELES DE PROTECTION ET EVOLUTION FUTURE DE LA LIGNE DE RIVAGE	Erreur ! Signet non défini.
IV.1. Modèles d'évolution du trait de côte.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.2. Présentation du modèle ShorelineS	Erreur ! Signet non défini.
IV.3. Validation du modèle ShorelineS	Erreur ! Signet non défini.
IV.4.5 Scénarios de protection du littoral.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.5. Evolution future du rivage.....	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion partielle.....	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE V. STRATEGIES DE PROTECTION DU LITTORAL	Erreur ! Signet non défini.
V.1. Différentes mesures de protection côtière	Erreur ! Signet non défini.

V.2. Etude des ouvrages de protection réalisés à Saly	Erreur ! Signet non défini.
V.3. Modèles de protection ShorelineS du littoral de Saly	Erreur ! Signet non défini.
V.4. Planification de la protection du littoral	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion partielle.....	Erreur ! Signet non défini.
CONCLUSION GENERALE	Erreur ! Signet non défini.
BIBLIOGRAPHIE	Erreur ! Signet non défini.

ABBREVIATIONS

ANACIM	Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie
ANSD	Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
CERC	Coastal Engineering Research Center
CEM	Coastline Evolution Model
CEREEQ	Centre Expérimental de Recherches et Etudes pour l'EQuipement
CSE	Centre de Suivi Ecologique
DEEC	Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés
DELTARES	Delft hydraulique
DHI	Danish Hydraulic Institute
DPM	Domaine Public Maritime
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
DTGC	Direction des Travaux Géographique et Cartographique
EARM	Erreur Absolue Relative Moyenne
EPR	End Point Rate
GENESIS	GENEralised model for SImulating Shoreline change
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
INTAC	Projet d'INtégration du Changement Climatique dans le développement durable au Sénégal
IHE	Institute of Water Education
MEPN	Ministère de l'environnement et de la protection de la nature
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NMLM	Niveau Moyen Local de la Mer
NMGM	Niveau Moyen Global de la Mer
PCDE	Projet de Croissance et de Développement des Exportations

PGIZC	Plan de Gestion Intégrée des Zones côtière
PANA	Plan National d’Action pour l’Adaptation
PNAE	Plan National d’Action pour l’Environnement
PNAT	Plan National d’Aménagement du Territoire
R	Coefficient de corrélation
RMSE	Root-Mean-Square Error
SAPCO	Société d’Aménagement et de Promotion des Côtes et zones touristiques
SAUFRASE	Société d’Architecture et d’Urbanisme Franco-Sénégalaise pour l’Aménagement du territoire
UAT	Unité d’Aménagement Touristique
UEMOA	Union Economique et Monétaire Ouest Africaine
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l’Education, la Science et la Culture

INTRODUCTION GENERALE

Contexte scientifique et problématique

Le littoral définit la bande de terre comprise entre une étendue maritime et le continent. Selon les échelles retenues, cette zone peut s'étendre de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres de part et d'autre de la limite terre-eau. La longueur des littoraux représentent 500 000 km sur la planète dont 170 000 km se présentent sous forme de systèmes sableux (CERC, 1984). Ces environnements sont le siège d'interactions complexes entre l'hydrosphère, l'atmosphère, la lithosphère et la biosphère et sont parmi les environnements les plus évolutifs à la surface de la planète (Bruun, 1962; Carter, 1988 ; Paskoff, 1993). Très dynamiques, les littoraux sableux sont caractérisés par des déplacements constants de sédiments pouvant aboutir à la création de formes particulières. Selon Almar (2009), la dynamique littorale s'établit suivant trois échelles spatio-temporelles : l'échelle instantanée, l'échelle évènementielle ou cours terme et l'échelle moyen à long terme. A chaque échelle, une morphodynamique littorale peut être associée à des processus hydrodynamiques (figure 1). Ces littoraux sont aussi parmi les environnements les plus étudiés non seulement du fait de leur dynamique mais aussi à cause de leur attractivité. Ils accueillent différents types d'aménagements et sont le lieu de diverses activités économiques et socio-culturelles. Actuellement, la majeure partie de la population mondiale réside près de la côte, avec environ 44% de la population mondiale vivant à moins de 150 km des côtes (Syvitski *et al.* 2005). Du fait de leur vulnérabilité, les littoraux sableux font aussi l'objet de plusieurs études car ils connaissent des phénomènes d'érosion ou de submersion de leurs plages dont les conséquences sont particulièrement néfastes pour la société humaine.

Les côtes ouest-africaines sont composées de 97% de sédiments meubles et seulement 3% de roches consolidées (PRLEC-UEMOA, 2010). Elles sont en grande partie constituées d'estuaires et de plages. L'érosion côtière est l'un des principaux problèmes environnementaux auxquels est confronté le littoral de la zone de l'Afrique de l'Ouest (Ibe, 1991). Sur les secteurs sableux du Sénégal à la Sierra Léone, les taux d'érosion estimés par Ibe et Quelennec (1989) varient de -1,2 à -6 m/an. Les côtes sableuses occupent plus de 70% du littoral sénégalais et forment deux grands ensembles séparés par la presqu'île du Cap Vert (Niang-Diop, 1995). La côte nord ou Grande Côte (de Saint-Louis à Yoff) est adossée à un puissant système dunaire et est quasi rectiligne. La côte sud ou Petite Côte (de Hann à Djiffere) est une côte segmentée en une succession de caps et de baies dont la disposition est contrôlée par la tectonique. Une grande partie du littoral de la casamance est aussi sableux (figure 2). Les opportunités économiques présentes dans les littoraux sénégalais sont à

l'origine d'une forte affluence des populations vers ces zones qui se retrouvent sursaturées. La population côtière du Sénégal est assez élevée, estimée à 8 500 000 habitants dans un rayon de 60 km et représente plus de 65% de la population totale du pays (CSE, 2015). Le résultat est une fragilisation du littoral qui se manifeste par la dégradation de ses ressources, la pollution et l'érosion de ses côtes. Les problèmes d'érosion côtière se sont très tôt signalés au Sénégal mais ont pris ces dernières années des proportions inquiétantes en relation avec une urbanisation galopante. Ils se matérialisent par une régression constante de la ligne de rivage avec des taux de recul qui se situent en moyenne entre -1 à -2 m/an pour les plages sableuses (MEPN, 2006), et les effets sur les infrastructures et les habitations sont tels qu'il a fallu recourir à des techniques de protection littorale qui, du reste, n'ont pas toujours donné des résultats satisfaisants.



Figure 1 : Echelles spatio-temporelles de l'hydro-morphodynamique littorale. Description de différents processus morphodynamiques (en rouge) associés à une échelle spatiale, une échelle temporelle et les processus hydrodynamiques correspondants (en bleu). Les boîtes représentent les 3 grandes gammes d'échelles des processus littoraux : l'échelle instantanée, événementielle (ou court terme) et l'échelle moyen à long terme. Les flèches verticales entre les boîtes représentent des interactions (Almar, 2009)

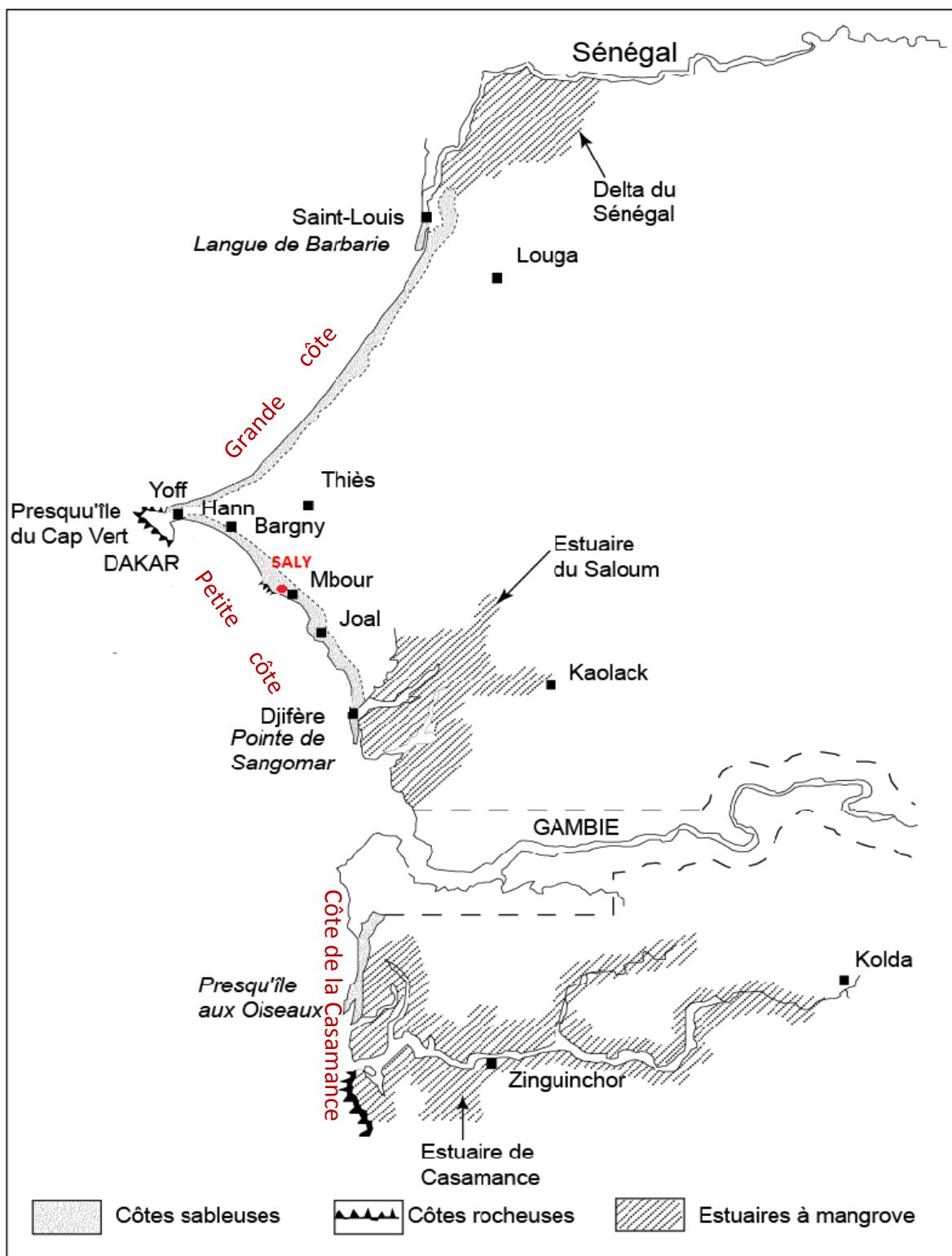


Figure 2: Principaux types de côtes au Sénégal (Sall, 1982, modifiée)

Sur la Petite Côte, la station balnéaire de Saly dans les années 2000 était l'une des destinations touristiques les plus importantes du Sénégal. En raison de l'attractivité de la côte liée aux développements touristiques et de sa position de carrefour non loin de Dakar, la capitale du pays, l'expansion de l'urbanisation a été disproportionnée, notamment sur le domaine public maritime à partir de 2000 (Faye, 2013). Le développement de ces activités économiques a favorisé ces dernières années un accroissement de la population de la commune de Saly qui est passée de 1438 habitants en 1976 à 20000 habitants en 2012. Cette dynamique du tourisme et cette forte urbanisation ont conduit à la hausse de la demande de sable et à la préoccupation de la conservation des plages avec la menace sérieuse des processus d'érosion côtière (Faye 2013). Au fil des ans, les activités touristiques diminuent en raison de la crise économique dans ce secteur et de la destruction des installations touristiques avec l'intensification de l'érosion côtière qui entraîne une perte importante de plages. Les facteurs en cause sont multiples mais pourraient être principalement liés entre autres à un déficit d'apports sédimentaires, à des houles de tempête, à une élévation du niveau de la mer, à des prélèvements de sable et à une construction désordonnée entre 1998 et 2006 d'épis et d'une Marina.

Pour remédier à l'érosion, d'autres structures de protection, des épis et des brise-lames ont été construits entre 2006 et 2015 sur le littoral de Saly, soit par les hôteliers, soit par l'Etat du Sénégal. Une étude du CSE (2004) sur cette côte a révélé une stabilité du trait de côte entre 1978 et 1989 avec un taux d'accumulation moyen d'environ 0,11 m/an. Entre 1989 et 2001, il se produit un recul du trait de côte estimé en moyenne à -1,83 m/an. Faye (2013) a enregistré des taux d'érosion moyens respectifs de -0,65 et -2,27 m/an pour les périodes 2003-2007 et 2007-2012. Ainsi, l'érosion a commencé à Saly depuis 1989 et augmente malgré la multiplication des structures de protection. On peut se demander si cette combinaison de structures de protection contribue à protéger le littoral ou constitue une source d'érosion. Quel est l'impact des structures de protection sur l'évolution du littoral ? Quelles sont les causes de l'érosion de la côte ? Quelles structures conviennent mieux à la protection du littoral de Saly ? Ou simplement, est-il approprié de continuer ce type de protection en construisant des structures rigides ? Et enfin, quelle stratégie de protection du littoral devrait être promue ?

Hypothèses et Objectifs de recherche

Les phénomènes d'érosion prennent ces dernières années de plus en plus d'ampleur le long du littoral malgré la mise en place d'ouvrages de protection côtiers (épis, murs, brise-

lames, etc). L'érosion se manifeste par la réduction ou la disparition des plages et par la destruction des installations hôtelières avec pour conséquences un ralentissement des activités touristiques, des pertes d'emplois et la fermeture d'hôtels sur le littoral de Saly. Plusieurs auteurs ont travaillé sur l'évolution du littoral de Saly, parmi lesquels Turmine (2001), CSE (2004), Dabo (2004), Faye (2013) et Ndiaye (2016). La plupart ont déterminé des secteurs en érosion avec des taux plus ou moins élevés mais sans pour autant préciser les causes de l'érosion et sans proposer des modèles de gestion du littoral. Le rapport du CSE (2004) indique un taux d'érosion moyen de -0,9 m/an à Saly en utilisant des photos aériennes de 1978, 1989 et 2001. Ce rapport annuel sur l'environnement indique qu'un facteur moins marqué entre 1978 et 1989 semble avoir entraîné à Saly, une avancée très nette de la mer sur le continent entre 1989 et 2001. Des facteurs naturels (le climat, les vagues, les courants et le déficit sédimentaire) et anthropiques (le prélevement de sable, la construction de bâtiments sur les plages et la construction d'ouvrages perpendiculaires au rivage) déterminent l'apparition et l'intensité de l'érosion des côtes dans la zone. Ndiaye (2016) a beaucoup insisté sur les causes de l'érosion qui seraient liées à une anthropisation de plus en plus accrue de la plage, les épis et les constructions sur le rivage étant les principaux facteurs responsables. Selon Turmine (2001), la comparaison des images *Spot* de 1988 et 1999 donne un taux assez important de recul du rivage compris entre le Sud de Somone et Saly de l'ordre de -4,3 m/an. Ce dernier note que cette situation est contradictoire avec le contexte bathymétrique et sédimentologique qui devraient favoriser la sédimentation à la côte et pose l'éventualité d'un déficit sédimentaire dont l'origine est à rechercher (Niang-Diop, 2003). L'accrétion ou l'érosion du rivage est déterminée par l'équilibre entre la quantité de sédiments disponible sur la zone côtière (l'offre) et la quantité de sable nécessaire pour maintenir l'équilibre du système (la demande) (Taal et al, 2016). Cette demande dépend de l'évolution des caractéristiques hydrodynamiques, anthropiques et géologiques de la zone côtière. Par exemple, une élévation du niveau marin ou une diminution des apports sédimentaires accentue la demande. Elle peut alors dépasser l'offre, moins de sédiments sont disponibles sur la zone littorale et la ligne de rivage recule vers les terres (érosion). Une baisse du niveau de la mer ou une augmentation des apports sédimentaires réduit la demande. Elle peut alors être inférieure à l'offre, plus de sédiments sont disponibles sur le littoral et la ligne de rivage avance vers le large (accrétion). L'évolution du rivage dépend du bilan sédimentaire, le déficit de sédiment conduit à une érosion du rivage et le gain de sédiment mène à une accrétion. De ce qui précède trois hypothèses de recherche peuvent se dégager :

- le déficit sédimentaire à Saly est lié aux caractéristiques hydrodynamiques en

particulier à une élévation du niveau marin ;

- le déficit sédimentaire est dû à une réduction des apports de sédiments sur le littoral ;
- le déficit sédimentaire est le résultat d'une anthropisation du littoral notamment de la construction des ouvrages de protection côtière.

Dans cette thèse nous étudions la dynamique des plages de Saly à moyen et long terme. La plage est à l'interface entre l'océan et la zone utilisée et aménagée par l'homme. C'est une zone charnière, particulièrement sensible à l'attaque des vagues lors d'une tempête et suivie avec attention dans les programmes de gestion du littoral (ré-ensablement, protection par enrochement) (Almar, 2009).

Les deux objectifs principaux de cette thèse sont de :

- Connaitre l'évolution morphosédimentaire du littoral ;
- Proposer des modèles de protection du littoral de Saly.

Pour suivre l'évolution du littoral, trois objectifs spécifiques sont visés : connaitre les caractéristiques morphologiques des plages ; déterminer les taux d'évolution du littoral et déterminer les caractéristiques granulométriques des sédiments littoraux.

Trois objectifs spécifiques sont aussi visés pour la proposition des modèles de protection du littoral : connaitre les structures de protection les plus efficaces; déterminer les causes de l'érosion côtière et élaborer des modèles de protection des plages.

Méthodologie et organisation de la thèse

A l'échelle pluriannuelle, une analyse de photos aériennes, d'images satellitaires et de modèles d'évolution du littoral permet de connaitre son évolution morphologique. L'imagerie aérienne ou spatiale, en permettant une prise de vue instantanée de grandes étendues et en autorisant des échelles adaptées à la recherche géomorphologique, précisément du 1/10 000 au 1/100 000, a fait progresser rapidement l'étude des littoraux. La répétitivité des prises de vue satellitaires et la généralisation des techniques de rectification facilitent les procédures de comparaison et permettent de quantifier les modifications survenues au cours des années (Diaw, 1997). La modélisation littorale permet de faire une description ou une prédition des changements morphologiques qui se produisent le long du rivage en intégrant les processus lents et les processus rapides de la dynamique littorale. Selon Villaret (2004), il est nécessaire de construire des outils de modélisation permettant de prédire précisément les taux de transports littoraux et les évolutions morphodynamiques qui en résultent. La modélisation permet aussi de comprendre les conséquences des interventions humaines ainsi que les

répercussions de leur modification sur le littoral. Haggett (1973) définit les modèles comme « *des représentations schématiques de la réalité, élaborées en vue de la comprendre et de la faire comprendre* ». Pour Varenne (2013) le modèle scientifique est « *un objet médiateur qui a pour fonction de faciliter une opération cognitive dans le cadre d'un questionnement orienté* ». Bien que ce dernier distingue les notions de modèle et de simulation par leurs fonctions respectives de description et de prédiction, les deux termes seront confondus dans cette étude car le modèle ShorelineS utilisé assure à la fois les deux fonctions. ShorelineS est un nouveau modèle numérique développé par IHE et Deltares qui apporte plusieurs innovations à la modélisation littorale. Il permet de déterminer d'une part, sur une section du littoral les zones stables, en érosion ou en accumulation et de prédire leur évolution. D'autre part des structures en dur peuvent être intégrées ou retirées du modèle et l'étude des modifications apportées sur le rivage permettent de connaître les structures de protection les plus efficaces, de déterminer des causes de l'érosion côtière à Saly et de retenir des scénarios de protection efficaces pour lutter contre l'érosion du littoral.

A l'échelle annuelle la détermination des caractéristiques topographiques et sédimentologiques est faite par une analyse de profils de plage levés sur le terrain en 2014 et des paramètres granulométriques des échantillons de sédiments prélevés sur le site à la même période. Les caractéristiques topographiques renseignent sur l'évolution à moyen terme du littoral. Elles permettent d'identifier suivant le contraste saisonnier des zones stables, en accumulation ou en érosion. Elles nous permettent aussi de déterminer le rôle des différents agents morphogènes dans l'évolution du littoral. L'analyse sédimentaire permet de connaître la nature et les caractéristiques granulométriques des sédiments constituant le littoral, de suivre leur évolution annuelle, spatiale et de déterminer leur origine probable. Les caractéristiques topographiques et sédimentologiques sont par ailleurs utilisées comme données d'entrées pour le modèle ShorelineS. Elles permettent une calibration du modèle qui utilise une formule simple de type CERC pour calculer les transferts sédimentaires locaux et représenter l'évolution morphologique de la ligne de rivage.

L'organisation de cette thèse s'articule autour de cinq chapitres. Chaque chapitre introduit, s'achève par une conclusion partielle qui résume en quelques points les éléments clés du chapitre.

Le premier chapitre présente le cadre de l'étude. Les caractéristiques géographiques et géologiques de la station balnéaire de Saly y sont développées. Il s'agit des facteurs climatiques, des caractéristiques hydrodynamiques, des particularités socio-économiques, des formations géologiques, des structures tectoniques, du plateau continental et de la

morphologie littorale.

Le deuxième chapitre analyse les principaux facteurs d'évolution du littoral. Après la présentation des données disponibles, les agents hydrodynamiques, les quantités de sédiments disponibles et les facteurs anthropiques du littoral sont analysés afin de préciser le rôle de chaque facteur sur la dynamique littorale.

Le troisième chapitre donne des mesures à des échelles spatio-temporelles différentes des changements morphosédimentaires du littoral. Les méthodologies sont expliquées, les taux d'évolution pluriannuelle et les caractéristiques morphologiques et sédimentologiques annuelles du littoral y sont déterminés.

Le quatrième chapitre permet d'élaborer des modèles d'évolution du littoral. Après une présentation des modèles d'évolution de la ligne de rivage, les fonctions *ShorelineS* sont présentées puis validées. Plusieurs scénarios de protection du littoral sont déroulés de 2003 à 2016 pour distinguer les plus aptes à minimiser les effets de l'érosion sur les plages. Puis les meilleurs scénarios sont projetés jusqu'en 2035 afin de prédire l'évolution future de la ligne de rivage.

Le cinquième et dernier chapitre présente des stratégies de protection du littoral. Les différentes mesures de protection du littoral sont présentées et le fonctionnement des ouvrages de protection réalisés à Saly analysé. Les données recueillies ont permis d'élaborer des modèles de protection *ShorelineS* du littoral. Ce travail permet de proposer des solutions au problème de l'érosion des côtes qui s'inscrivent dans le cadre d'une planification stratégique et opérationnelle de la protection littorale.

CHAPITRE I. PRESENTATION DU CADRE D'ETUDE

Tels que définis, les littoraux sont des zones de transition entre l'eau, la terre, l'air et le vivant. Ils sont de ce fait sous l'emprise de plusieurs facteurs d'évolution d'ordre climatiques, hydrodynamiques, géologiques et anthropiques dont les variations définissent la morphologie côtière (figure 2). Les côtes sableuses sont particulièrement sensibles aux variations des facteurs d'évolution du littoral car constitués de sédiments meubles, non cohésifs plus facilement mobilisables. Ces facteurs présentés dans cette étude dans un cadre géographique et un cadre géologique permettent de caractériser le littoral sableux de la station balnéaire de Saly.

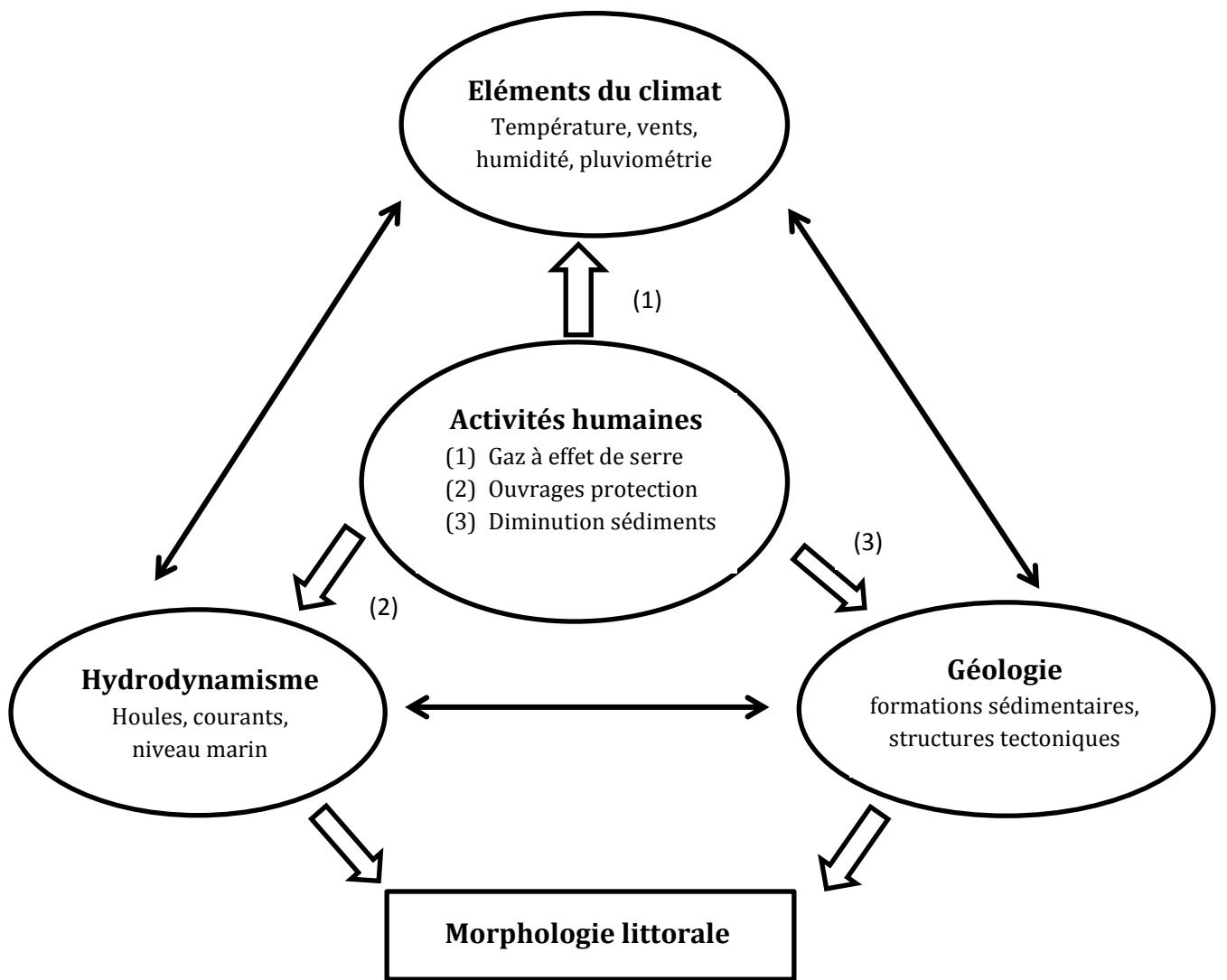


Figure 3 : Relations simplifiées entre les différentes composantes du littoral

I.1. Cadre géographique

Cette partie indique la localisation de la station balnéaire de Saly et présente ses caractéristiques climatiques, hydodynamiques et socio-économiques.

I.1.1. Localisation de la zone d'étude

La commune de Saly est située à environ 80 km au Sud de Dakar sur la Petite Côte du Sénégal. Elle est limitée au Nord et au Sud par les communes de Ngaparou, et de Mbour, à l'Est par celle de Malicounda et à l'Ouest par l'Océan Atlantique. La zone étudiée est comprise entre $17^{\circ}00'00''$ et $17^{\circ}02'30''$ de longitude Ouest et $14^{\circ}26'00'$ à $14^{\circ}20'30''$ de latitude Nord.

Plusieurs installations touristiques et des quartiers traditionnels longent le littoral de Saly. C'est une station balnéaire qui joue un rôle important dans l'économie nationale du fait de ces nombreux hôtels et résidences et aussi du flux important de touristes qu'il reçoit depuis plus de trois décennies. Avec des arrivées estimées à 200 000 touristes par an, Saly compte 15 hôtels de 2 à 5 étoiles et 23 résidences (Intac, 2011). Toutefois une simple observation de son littoral montre un contraste très marquant entre des plages ensablées au Nord-Ouest de l'hôtel Lamentin à la résidence Safari et des plages démaigries au Sud-Est de Safari Résidence à Cocotiers hôtel. Le littoral est très affecté par le phénomène de l'érosion côtière (photos 1 et 2). Les propriétaires hôteliers et l'Etat du Sénégal à travers la Société d'Aménagement et de Promotion des Côtes et zones touristiques (SAPCO) ont mis en place plusieurs ouvrages de protection du littoral pour lutter contre l'avancée de la mer. Ainsi entre 1998 et 2014, 13 épis (G0 à G12), 5 séries de murs en béton et en enrochements (R1 à R5) et 3 brise-lames (B1 à B3) ont été construits à Saly (figure 3). Les murs de protection sont des structures poids-autonomes conçues pour protéger la terre ferme de l'action des vagues. Ils durcissent la ligne de rivage pour la rendre plus résistante à l'érosion. Les épis sont des structures de protection plus ou moins perpendiculaires au rivage et conçus pour stopper tout ou une partie des sédiments de la dérive littorale de façon à constituer ou modifier une plage. Le brise-lames est une structure de protection le plus souvent immergée destiné à réduire l'énergie des vagues à la côte.

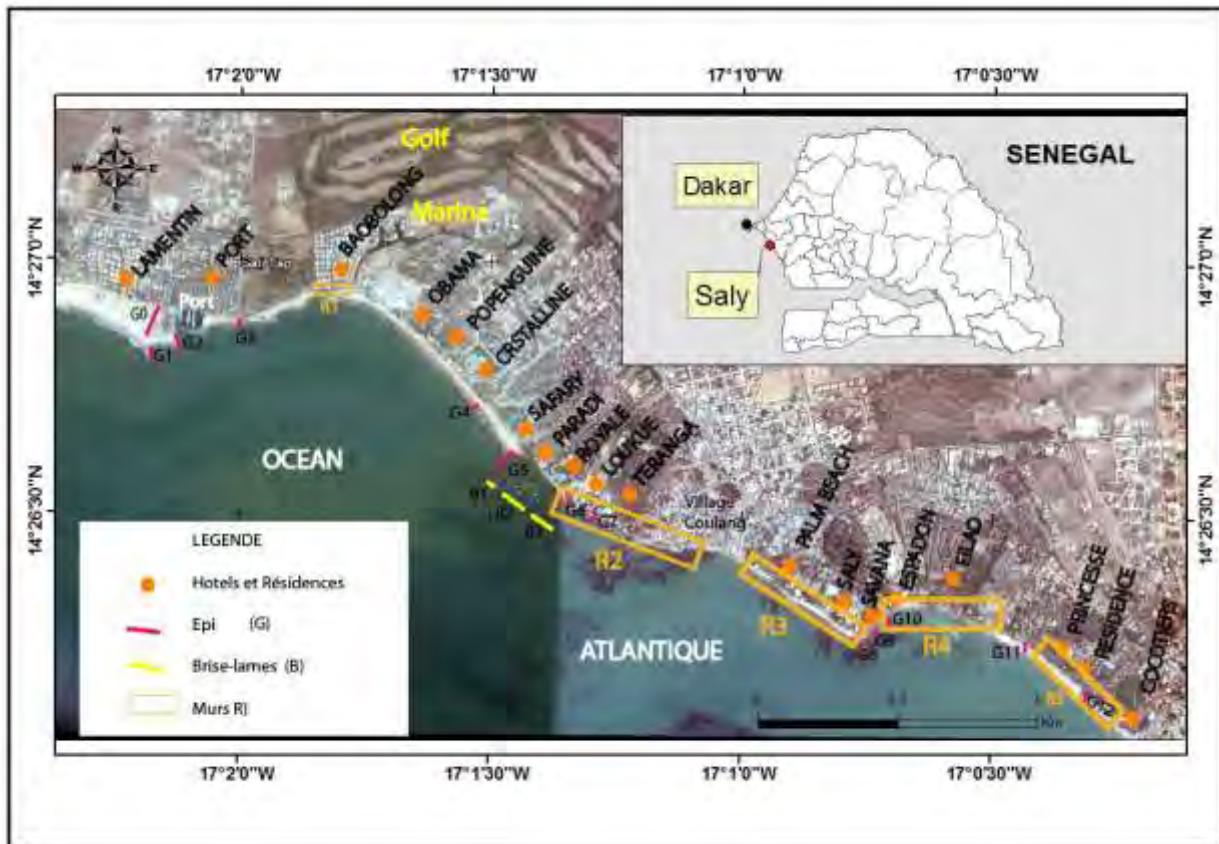


Figure 4 : Localisation de la zone d'étude (Google Earth image, 2015) (Ngom *et al.*, 2018)



Photo 1 : La plage de la partie Sud de Saly prise le 23 février 2014 5 (A) ; La même plage le 26 Août 2014 après de fortes houles (B)

I.1.2. Caractéristiques climatiques

La circulation atmosphérique régionale détermine les caractéristiques des éléments du climat en relation avec les agents hydrodynamiques.

I.1.2.1. Circulation atmosphérique

Des informations sur la circulation atmosphérique régionale peuvent être obtenues dans les nombreuses références bibliographiques disponibles. Nous pouvons citer entre autres; Sagna, 1990 ; Niang-Diop, 1995 ; Leroux, 1996 et 2001 ; Malou, 2004. 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. Les variations saisonnières de la position et de l’importance des centres de pressions (anticyclones des Açores, de Sainte Hélène et de Lybie) et de la dépression saharienne conditionnent notamment l’occurrence et les caractéristiques aérologiques des saisons climatiques et des régimes pluviométriques en Afrique de l’Ouest (PNUE, 1983). Selon Malou (2004), le climat de la région est de type nord soudanien mais à signature littorale. Il appartient à la région climatique de la Petite Côte et du Saloum et se caractérise par deux saisons : la saison sèche et froide, de novembre à mai, et la saison des pluies ou hivernage, humide et chaude, de juin à octobre.

I.1.2.2. Eléments du climat

Les vents, les précipitations, l’humidité relative et les températures sont les principaux facteurs climatiques qui déterminent les processus d’évolution du littoral. Les effets combinés de ces éléments du climat produisent une altération des terrains du domaine continental et règlent le régime hydrographique des fleuves et rivières qui apportent les produits d’altération à la mer. La végétation dans la zone littorale dépend aussi étroitement de ces facteurs du climat. Celle-ci agit directement en liant physiquement les sédiments et en réduisant la turbulence des eaux peu profondes. Avec la multiplication des aménagements et infrastructures une végétation d’ornement s’est développée sur le littoral de Saly, constituée surtout de *Prosopis*, d’*Hibiscus*, de bougainvilliers, d’*Eucalyptus* et de filaos (Faye, 2013). Des données de l’ANACIM ont permis de construire les figures 4 à 7 qui présentent des caractéristiques climatiques de la région entre 1968 et 2010.

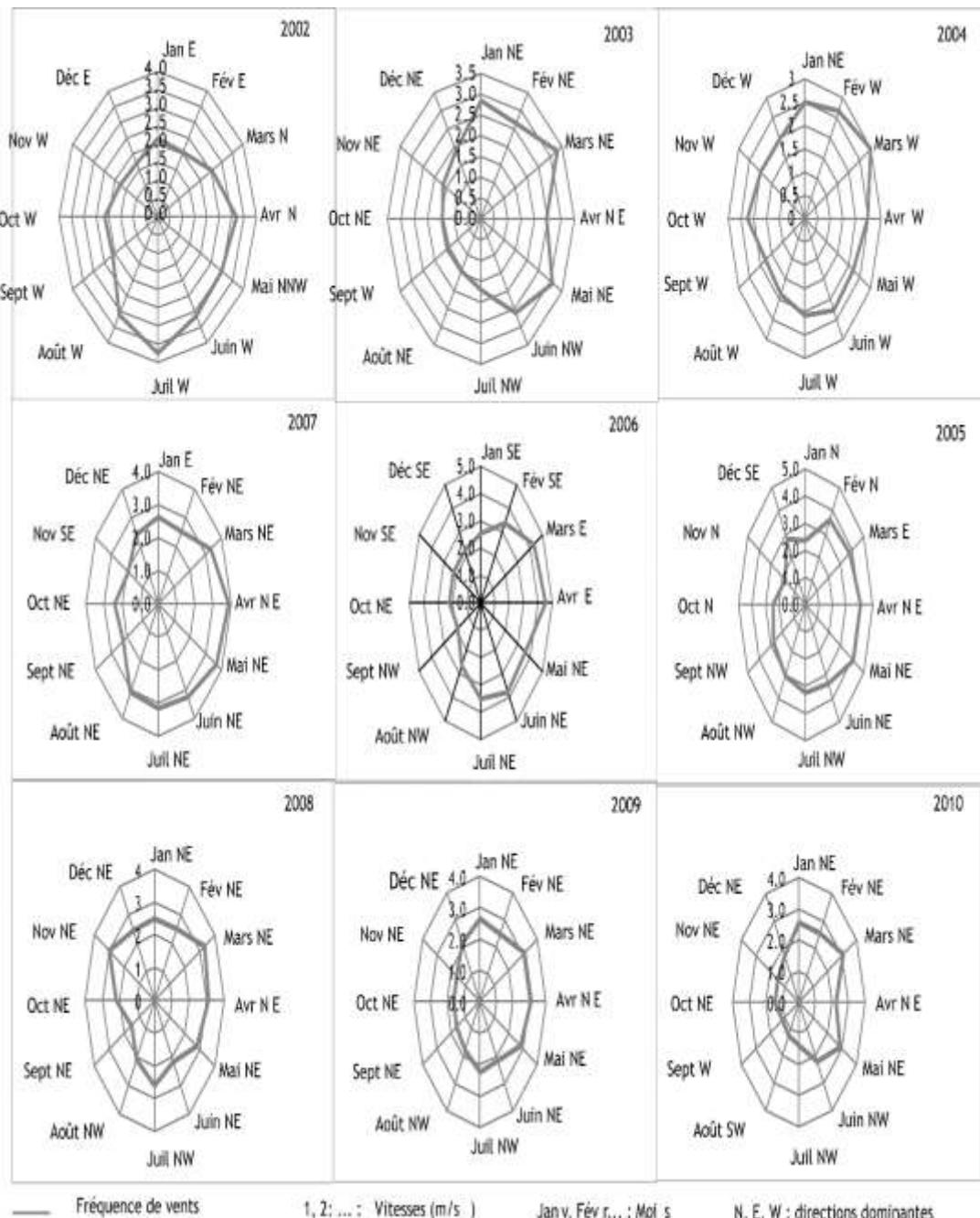


Figure 5: Vitesses moyennes annuelles et directions des vents au sol à Mbour de 2002 à 2010 Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal (Diadhiou, 2018)

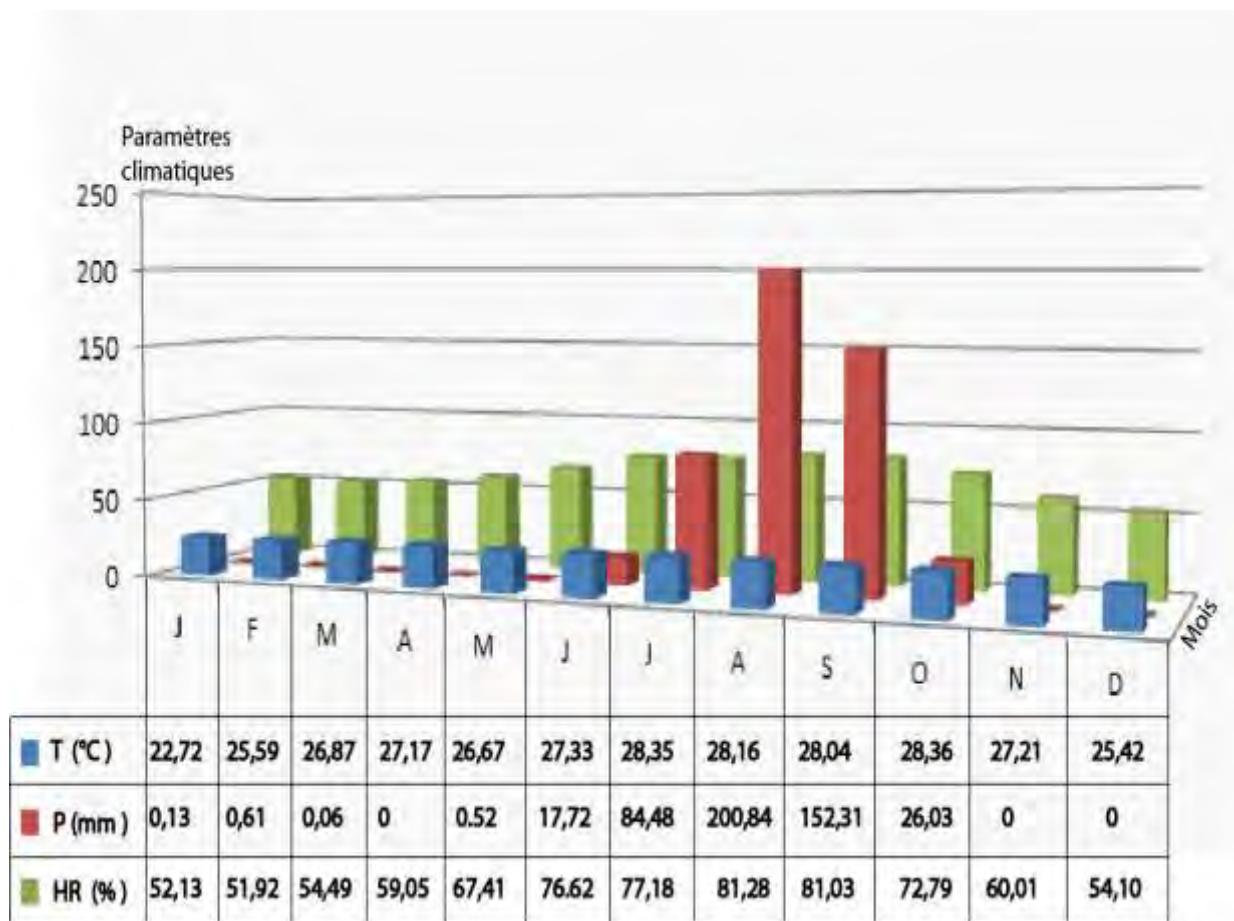


Figure 6 : Valeurs moyennes mensuelles des paramètres climatologiques (de Janvier (J) 1968 à Décembre (D) 2008) à la station de Mbour (T= température ; P= pluviométrie et HR= humidité relative)

I.1.2.2.1. Vents

Trois flux d'air saisonnier se déplacent et alternent tout au long de l'année : l'alizé maritime, l'alizé continental et la mousson. L'alizé maritime est un vent de direction Nord-Ouest/Sud-Est constamment humide et frais. Son parcours océanique lui donne de la fraîcheur et une humidité qui peut apporter du brouillard et de la rosée. L'harmattan ou alizé continental, de direction Nord-Est/Sud-Ouest souffle dans la partie continentale du pays. Il est semi-permanent, chaud et sec, souvent chargé de poussières. La mousson est un vent chaud et humide, centré dans l'atlantique. 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 balaien le territoire d'Est en Ouest et qui apportent 99% du total des précipitations dans le domaine sahélien (Sagna, 1990).

Les données de la station synoptique de Mbour indiquent au cours de l'année deux grandes périodes marquées par des inversions dans la direction des vents (figure 4). De décembre à avril, on note la prédominance de vents des secteurs Nord et Nord-Est qui correspondent surtout au alizés maritimes alors que de juin à octobre on a une période caractérisée par les vents de secteurs Ouest, Sud-Ouest et Nord-Ouest. Ils correspondent à des flux d'alizés maritimes alternant avec la mousson. Les mois de mai et de novembre correspondent respectivement à des périodes de transition vers l'hivernage ou vers la saison sèche. Ainsi, la zone d'étude est caractérisée par la présence des alizés maritimes qui alternent en saison des pluies avec les flux de mousson (Diadhiou, 2018). Les vitesses moyennes des vents varient entre 1 et 4 m.s^{-1} . Elles sont maximales du mois de mars à juin et minimales entre les mois de septembre à novembre. Les vents agissent sur le littoral, soit directement par la déflation éolienne, soit de manière indirecte en induisant les houles.

I.1.2.2.2. Précipitations

Les pluies (juin-octobre) représentent 99 % du total des précipitations annuelles. Pour la période 1968-2003, la pluviométrie moyenne annuelle à la station de Mbour est de 478,42 mm, le mois d'août étant le mois le plus pluvieux (figure 5). L'évolution interannuelle des précipitations montre une tendance générale à la baisse depuis 1968 même si un regain d'humidité est noté entre 1997 et 2002 (figure 6). Une faible quantité de pluie (environ 1%) est également enregistrée de novembre à mai. Celle-ci correspond aux perturbations d'origine polaire constituant le phénomène « heug ».

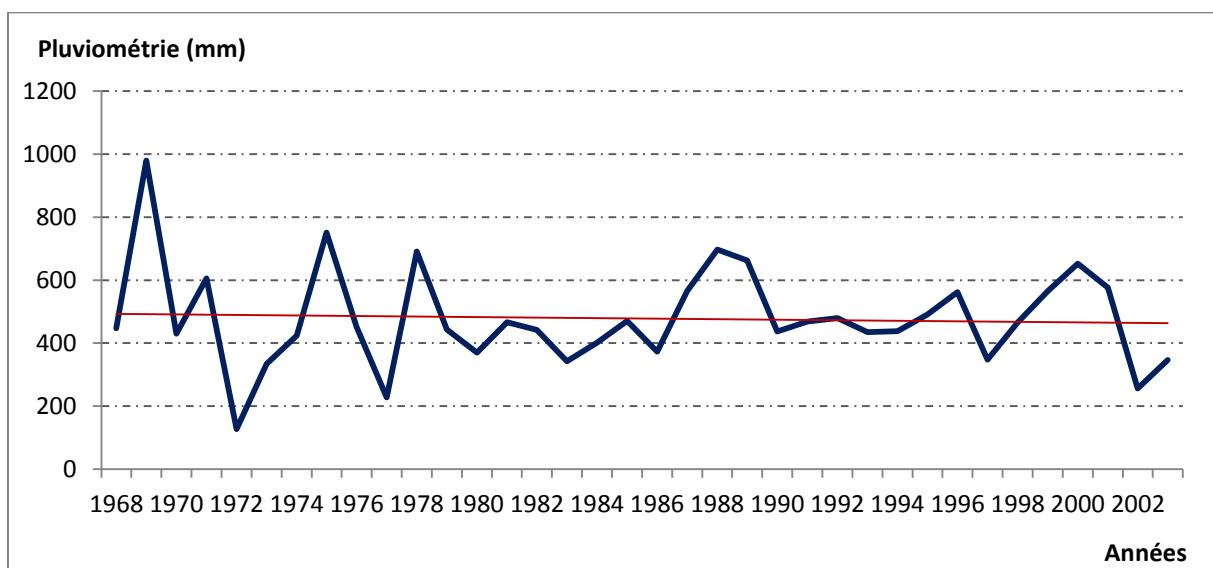


Figure 7: Evolution des cumuls pluviométriques annuels à la station de Mbour de 1968 à 2003

I.1.2.2.3. Humidité relative

L'évolution mensuelle de l'humidité relative présente une allure uni-modale avec un seuil maximum de 81,28% en août et un minimum en février avec 51,92% (figure 5). C'est donc pendant l'hivernage, lorsque les flux humides dominent la circulation, qu'on observe les moyennes mensuelles les plus élevées, alors que le contraire est observé en saison sèche. L'humidité relative élevée observée à Mbour est due à l'influence permanente de la brise marine qui est un flux chargé d'humidité.

I.1.2.2.4. Température

Les températures sont caractérisées par une relative fraîcheur due surtout aux brises de mer. Les maxima s'observent vers la fin de la saison des pluies (température moyenne mensuelle de 28,36 °C en octobre) et les minima pendant la saison sèche (température moyenne mensuelle de 22,72 °C en janvier) (figure 5). Les températures moyennes inter-annuelles diminuent de 1968 à 1989 puis augmentent de 1989 à 2003. On note une tendance générale à la hausse par rapport à la moyenne qui est de 23,86 °C (figure 7). Des pics de températures élevées sont notés entre 1982 et 1984 puis entre 1999 et 2002.

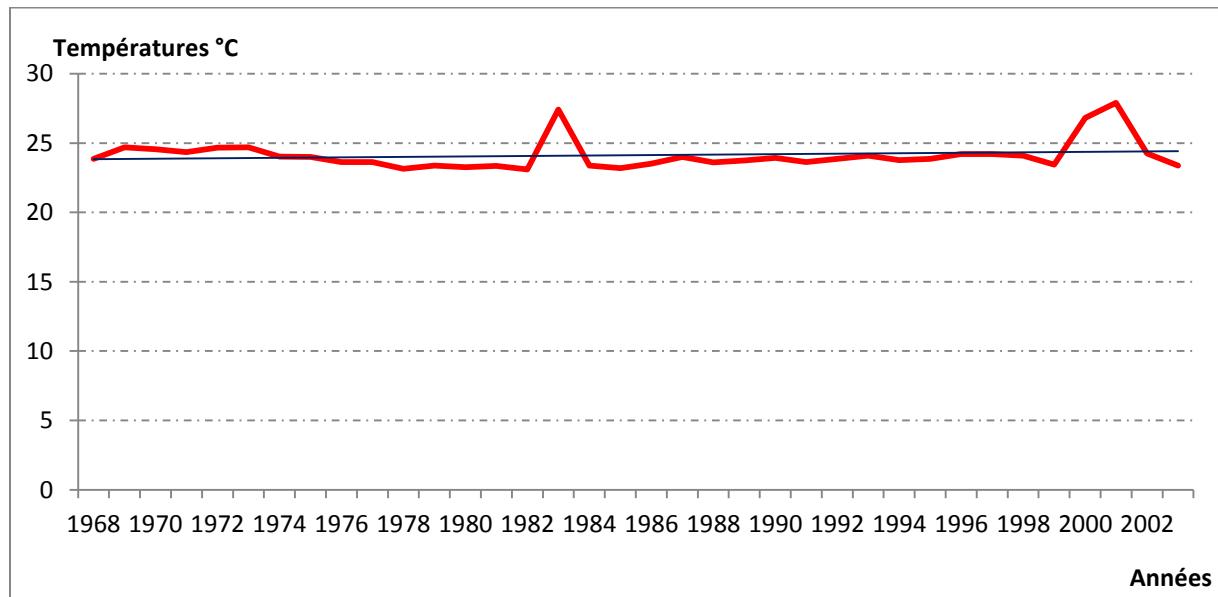


Figure 8: Evolution des températures moyennes annuelles à la station de Mbour de 1968 à 2003

I.1.3. Caractéristiques hydrodynamiques

La circulation océanique superficielle et les upwellings provoquent des perturbations saisonnières significatives sur le niveau marin local qui à son tour influence les caractéristiques des houles et des courants induits.

I.1.3.1. Circulation océanique

La circulation océanique superficielle de la façade nord-occidentale de l'Afrique qui couvre le Sénégal a été très bien présentée par Niang-Diop, (1995) qui distingue trois courants liés aux alizés. Le courant nord-équatorial qui transporte vers l'Ouest les eaux froides et salées du courant des Canaries, le courant sud-équatorial qui transporte vers l'Ouest les eaux froides du courant de Benguela et entre ces deux courants, s'intercale le contre-courant nord-équatorial plus ou moins liés à la Zone Inter-Tropicale de Convergence, qui transporte vers l'Est les eaux chaudes et salées, formées sur le bord occidental de l'Atlantique, et va donner naissance au courant de Guinée (figure 8).

Cette circulation zonale, qui détermine un transfert prédominant des eaux de surface vers l'Ouest, induit un déficit d'eau le long du plateau continental sénégalais qui est compensé de deux manières (Johnson et al., 1975 ; Wooster *et al.*, 1976 ; Mittelstaedt, 1983) par :

- une circulation méridienne contrôlée par les alizés avec, en saison sèche (novembre à mai), une advection des eaux de surface froides vers le Sud et, en saison des pluies (juin à octobre), une advection vers le Nord, d'abord des eaux tropicales (chaudes et salées), puis des eaux guinéennes (chaudes et dessalées). Ces courants géostrophiques ont des vitesses moyennes de 20 cm.s^{-1} et atteignent leur maximum d'intensité (environ 50 cm.s^{-1}) en avril-mai.
- des remontées d'eaux profondes ou upwellings qui se produisent en saison sèche, sous l'influence des alizés du Nord-Est. Les upwellings sont un phénomène majeur de la circulation océanique du plateau continental sénégalais. Ils sont engendrés par l'interaction complexe des alizés de Nord-Est, plus ou moins parallèles à la côte et du courant des Canaries (Sarnthein *et al.*, 1982). Les eaux de surface sont entraînées vers le large et remplacées par des eaux froides, riches en éléments nutritifs, qui proviennent de la masse d'eau centrale sud-atlantique située à des profondeurs de 100 à 200 m (Voituriez et chuchla, 1978 ; Mittelstaedt, 1983 ; Rebert, 1983 ; Niang-Diop, 1995).

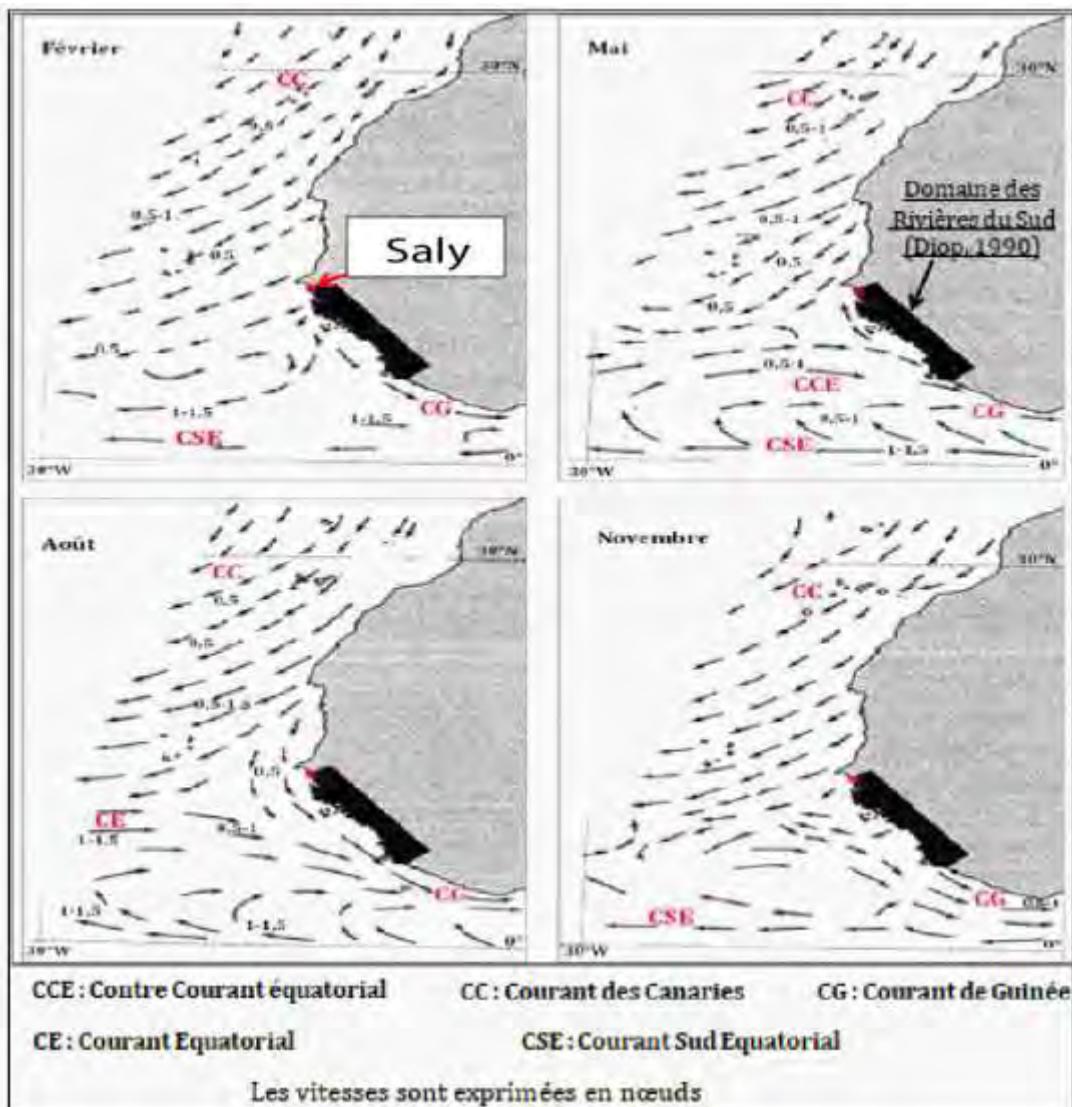


Figure 9 : Variations saisonnières des courants généraux sur le littoral ouest-africain (d'après Shom, 1981, in Cormier-Salem, 1999)

I.1.3.2. Houles et courants de houle

Les caractéristiques générales des houles sur la Petite Côte sont connues, en particulier grâce aux travaux de la DHV (1979), de SOGREAH Ingénieurs Conseils (1981) et de Nardari (1993). On distingue ainsi des houles longues provenant essentiellement de deux directions : des houles du Nord-Ouest (NW) présentes toute l'année et des houles du Sud-Ouest (SW) qui n'interviennent que pendant l'hivernage (juillet à octobre) et essentiellement sur la côte sud de Dakar (figure 9). Les houles du NW présentent en eau profonde des hauteurs moyennes de 1,67 m avec des périodes moyennes de 6,3 s alors que les houles du SW présentent des hauteurs moyennes de 1,49 m avec des périodes de 5,7 s (tableau 1). La houle de NW subit des diffractions sur la tête de la presqu'île du Cap Vert et donc est considérablement amortie

quand elle atteint la Petite Côte. Cet effet est relativement moins important dans la région de Mbour qui peut être atteinte par des houles de NW non diffractées bien que Nardari (1993) indique une puissance de la houle avant déferlement de seulement 1 kw par mètre de crête de houle, alors que les houles de SW dans la même zone auraient une puissance de 2 kw par mètre de crête de houle. A cela s'ajoutent les houles d'Ouest (W) mais qui sont rares quoique très puissantes (20 kw par mètre de crête de houle). Les conditions extrêmes de la houle sur la Petite Côte ont été calculées par DHV (1979) et SOGREAH (1981). Les houles au large du Sud de la Petite Côte sont donc relativement modérées et plus de 50 % des houles sont inférieures à 1,22 m pour la hauteur, et à 6 secondes, pour la période. Cependant, certaines conditions provoquent des houles extrêmes annuelles, décennales et centennales pouvant être relativement destructrices si elles s'accompagnent d'une surcote et de vents violents. La houle décennale est ainsi estimée à une hauteur de 3,4 à 5 m alors que la houle centennale aurait une hauteur comprise entre 5 et 6 m.

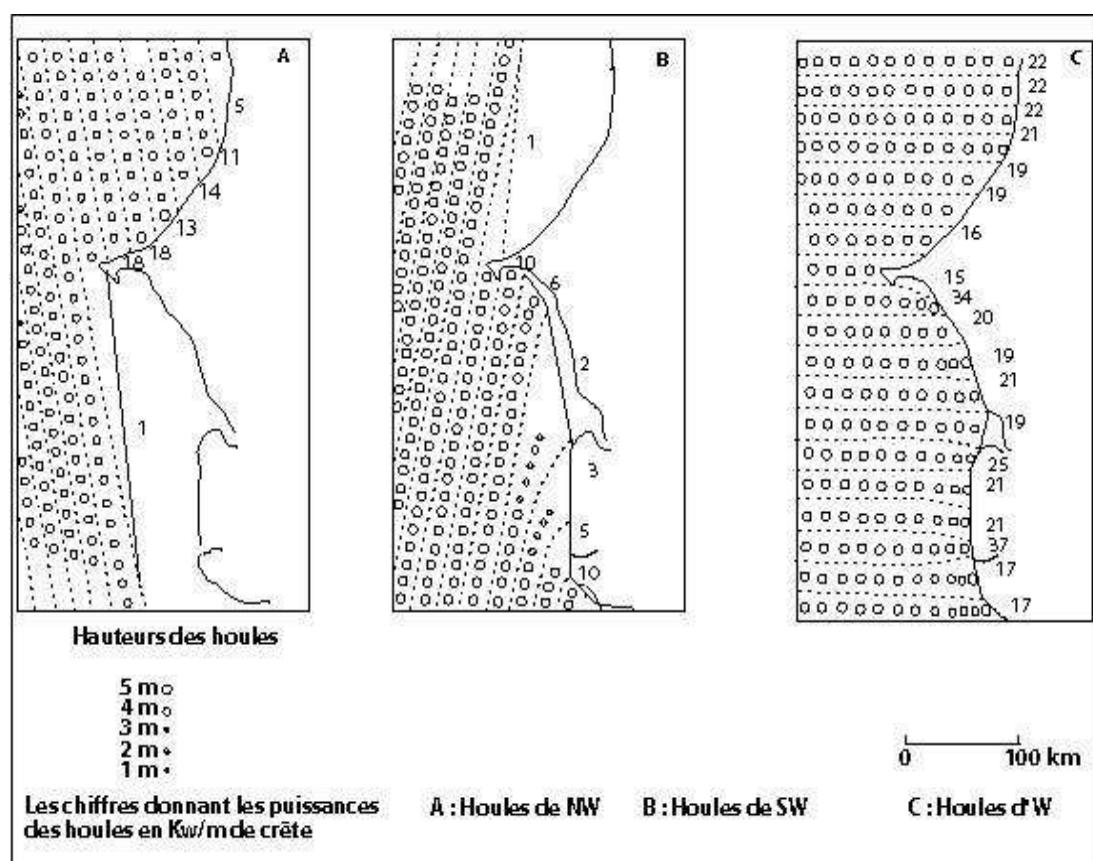


Figure 10: Modèles de propagation des houles le long du littoral sénégalais (Nardari, 1993)

Tableau 1 : Caractéristiques en eau profonde des houles longues au large des côtes sénégalaises (Nardari, 1993)

Types de houles	Période moyenne	Hauteur moyenne	Longueur d'onde moyenne	Puissance avant déferlement
NW	6,3 s	1,67 m	62 m	18 kW.m ⁻¹
SW	5,7 s	1,49 m	51 m	11 kW.m ⁻¹
W	6,8 s	1,80 m	73 m	23 kW.m ⁻¹

Les caractéristiques des houles sur la Petite Côte sont principalement à l'origine de courants de houle et de courants de dérive littorale. Les courants de houle se font dans la direction de propagation des houles. Les courants de dérive littorale sont parallèles à la côte et naissent de l'obliquité des houles par rapport au rivage. Les houles de NW qui contournent la presqu'île du Cap-Vert, arrivent sur la Petite Côte avec une certaine obliquité, favorisant ainsi une dérive littorale dirigée du Nord vers le Sud (Riffault, 1980). Pendant l'hivernage interviennent aussi des courants de dérive littorale dirigés vers le Nord en relation avec les houles de SW (Dabo, 2004).

I.1.3.3. Marées et courants de marée

Les marées sont de types semi-diurnes au Sénégal avec une période d'environ 12 h 20 mn. Les amplitudes moyennes des marées sont assez faibles de l'ordre 0,5 m en mortes eaux et 1,60 m en vives eaux exceptionnelles. Les niveaux extrêmes ont alors +1,70 m en pleine mer et +0,10 m à basse mer et compte tenu des abaissements ou surélévations d'origines météorologiques, ils pourraient atteindre des côtes de plus de 2,00 m par rapport au zéro hydrographique (Saufrase, 1998). Les pleines mers de vives-eaux sont les plus importantes pendant l'hivernage, alors qu'elles sont les plus faibles en fin de saison sèche (avril - mai). Les basses mers de vives-eaux maximales suivent un rythme identique mais débutent plus tôt (juin-juillet) que les pleines mers de vives-eaux. Les marnages les plus élevés se situent donc lors de la saison sèche (février-mars) où les basses mers de vives-eaux sont les plus faibles, et à la fin de l'hivernage (août-septembre) où les pleines mers de vives-eaux sont les plus fortes (Turmine, 2000).

Les marnages moyens faibles, inférieurs à 1,6 m, classent les côtes sénégalaises dans la catégorie des côtes microtidales. La conséquence est que les courants de marée agissent plus sur la dynamique littorale au niveau des embouchures et moins sur les baies sableuses plus ouvertes. Sur la Petite Côte, les courants de marée sont faibles avec des vitesses maximales inférieures à $0,15 \text{ m. s}^{-1}$ (Domain, 1976 ; Rebert, 1983). La marée ne détermine pas souvent une érosion importante. En fait, son rôle devient plus intéressant lorsque plusieurs conditions sont réunies. En effet, les houles fortes peuvent être associées à une forte amplitude de marée et causer une érosion exceptionnelle. Le rythme d'érosion peut donc s'accroître lors des pleines mers de vives-eaux surtout si celles-ci sont suivies de houles importantes. Les coups de vents violents, les houles de Sud-Ouest modérées et les fortes marées d'hivernage sont donc favorables à une érosion plus forte. Mais, c'est surtout lors des fortes houles du Nord et les fortes marées de saison sèche que l'aléa est fort, d'autant que les sédiments sont plus facilement mobilisables du fait de leur assèchement rapide (Turmine, 2001).

I.1.3.4. Niveau marin et ses variations

Le niveau marin est la hauteur moyenne de la surface de la mer, par rapport à un niveau de référence suffisamment stable et en moyenne sur une période de temps suffisamment longue (un an au minimum) pour que la valeur soit indépendante des fluctuations causées par exemple par les vagues et les marées (perturbations) ([https://fr.wikipedia.org/wi/Niveau de la mer, le 9 novembre 2019 à 02 :34](https://fr.wikipedia.org/wi/Niveau_de_la_mer_le_9_novembre_2019_%C3%A0_02%3A34)). On distingue un niveau marin local ou régional et un niveau marin global ou eustatique. Le Niveau Moyen Local de la Mer (NMLM) est défini par rapport à un point de référence situé sur la terre ferme alors que le niveau moyen global de la mer (NMGM) fait appel à un géoïde de référence ou pour simplifier à un ellipsoïde de référence. Il est difficile de réaliser une mesure directe du niveau moyen de la mer. En effet, de nombreuses perturbations diurnes et saisonnières affectent les mesures : la marée, les effets de la pression atmosphérique, les vagues, certains courants marins (le Gulf Stream, le phénomène el niño ou les upwellings), les variations saisonnières de la température et de la salinité de l'eau, les crues des fleuves et rivières, l'évaporation et les précipitations. Afin d'obtenir une estimation de la variation du niveau moyen dans le temps, il est nécessaire de soustraire ces perturbations rapides et périodiques. Les variations du niveau moyen sont très lentes, donc de basse fréquence. Ainsi, il suffit d'appliquer sur les séries temporelles de mesures enregistrées, une fonction mathématique dite filtre passe-bas. Cette fonction a pour caractéristique de ne conserver que les basses fréquences d'un signal. Ainsi, les perturbations diurnes ou saisonnières sont éliminées du signal. Les marégraphes et l'altimétrie satellitaires

permettent de mesurer les variations du niveau marin ([https://fr.wikipedia.org/wii/Niveau de la mer le 9 novembre 2019 à 02 :34](https://fr.wikipedia.org/wii/Niveau_de_la_mer_le_9_novembre_2019_%C3%A0_02%3A34)). Le niveau de la mer a varié de façon plus ou moins rapide, au cours des âges. Certaines périodes de l'histoire de la Terre sont marquées par une élévation du niveau des océans alors que d'autres le sont par une baisse de ce niveau. La tendance actuelle est une élévation du niveau de la mer. Depuis 1900, les observations marégraphiques montrent une élévation globale du niveau marin de 1 à 3 mm par an avec une moyenne de 1,8 mm par an. Depuis 1992, les programmes satellites TOPEX et JASON ont fourni des mesures du changement du niveau de la mer. Ces données montrent une élévation moyenne de 3 mm par an (GIEC/IPCC, 2001). Elle excède celle obtenue par les marégraphes. Plusieurs facteurs affectent le volume, la masse et la position des océans et mènent à des changements du niveau global de la mer. Les deux influences primaires sont d'une part la température qui augmente le volume d'eau par dilatation thermique et d'autre part l'importance et la position de la masse des eaux « *prisonnières* » des terres telles que l'eau douce des rivières, les lacs, les glaciers, les calottes glaciaires des pôles. Sur des échelles de temps géologiques, des changements de forme des bassins océaniques et de la distribution des terres et des mers affectent le niveau de la mer. Le niveau marin à Dakar est donné par rapport à un niveau de référence local défini en 1965 et situé à 8,3 m au-dessous du repère scellé du puits du marégraphe de Dakar, soit à environ 6 m au-dessous du zéro du Service Hydrographique de la Marine et 7 m au-dessous du zéro de l'Institut Géographique National (Niang-Diop, 1995). Les taux moyens d'élévation du niveau marin local établis à l'aide des données du marégraphe de Dakar pour ces cinquante dernières années seraient compris entre 1 et 3,4 mm par an, soit une moyenne de 2,4 mm par an (Niang-Diop, 1995). Les variations locales du niveau de la mer sont dues à de multiples facteurs, en particulier les variations absolues du niveau global des océans et les variations relatives du niveau des continents liées à un phénomène d'isostasie, une subsidence, une surrection, la tectonique des plaques, un séisme ou à un rejet de failles etc.

La montée du niveau de la mer affecte les zones côtières de basses altitudes souvent densément peuplées ou représentant un enjeu économique important comme les deltas, les îles, les estuaires et les vasières à mangrove comme on en trouve au Sénégal (delta du Sénégal, estuaire et îles du Saloum et les vasières du littoral sud). Des inondations, des pertes de terres habitables ou cultivables, des phénomènes de salinisation des terres et des eaux, la disparition de la mangrove, la modification de la dynamique littorale et l'accentuation des phénomènes d'érosion sont entre autres des impacts attendus (Paskoff, 2001).

I.1.3.5. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est très peu diversifié dans la zone de Saly. Une lagune appelée la mare aux oiseaux ou encore le marigot de Kirène est présente sur la partie nord. Elle était alimentée par une rivière à sec pendant la majeure partie de l'année et qui débite uniquement pendant la saison des pluies. Les crues remplissaient alors le marigot et perçaient par déversement un chenal dans le cordon littoral qui le sépare de la mer. Le marigot recevait aussi des eaux marines durant les épisodes de tempêtes ou les fortes marées lorsque la mer submergeait le cordon littoral. Le lit de la rivière est peu visible sur le terrain mais apparaît clairement sur les photos aériennes (figure 10). Le marigot a un bassin versant d'une superficie de $53,5 \text{ km}^2$ et qui culmine à 13 m d'altitude. Le fond du marigot, dans sa partie en aval, se situe entre +0,6 et +1,3 m d'altitude (Saufrase, 1998). La crue décennale de ce marigot a été estimée par Saufrase (1998) à $25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et la crue centennale à environ $60 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

D'après ce rapport, d'importantes modifications ont été apportées suite aux aménagements touristiques. C'est ainsi que le cordon littoral a souvent disparu ou a été arasé quand il n'est pas occupé par des habitations. De même, le fonctionnement du marigot de Kirène a été fortement perturbé. Son bassin versant est d'abord coupé en deux par la nationale 1 de Mbour à Nguekokh avec une superficie de $26,5 \text{ km}^2$ dans la partie Est et 27 km^2 dans la partie Ouest. Avec l'aménagement du golf à partir de 1994, les eaux venant de l'amont sont maintenant captées par le golf et servent d'alimentation en eau pour ses pelouses. De ce fait, le bief aval fonctionne de manière séparée et reçoit uniquement des eaux de la mer. Il se produit également des infiltrations d'eau de mer au travers du cordon. Toutefois les quantités d'eaux marines reçues par le marigot sont très limitées du fait des constructions sur le cordon littoral. Le chenal qui le sépare de la mer sur ce qui devait être l'emplacement de la Marina est très étroit. Durant les épisodes de tempêtes ou de fortes marées, les eaux marines submergent alors les habitations proches de l'entrée du chenal qui sont de ce fait sujettes à une forte érosion.

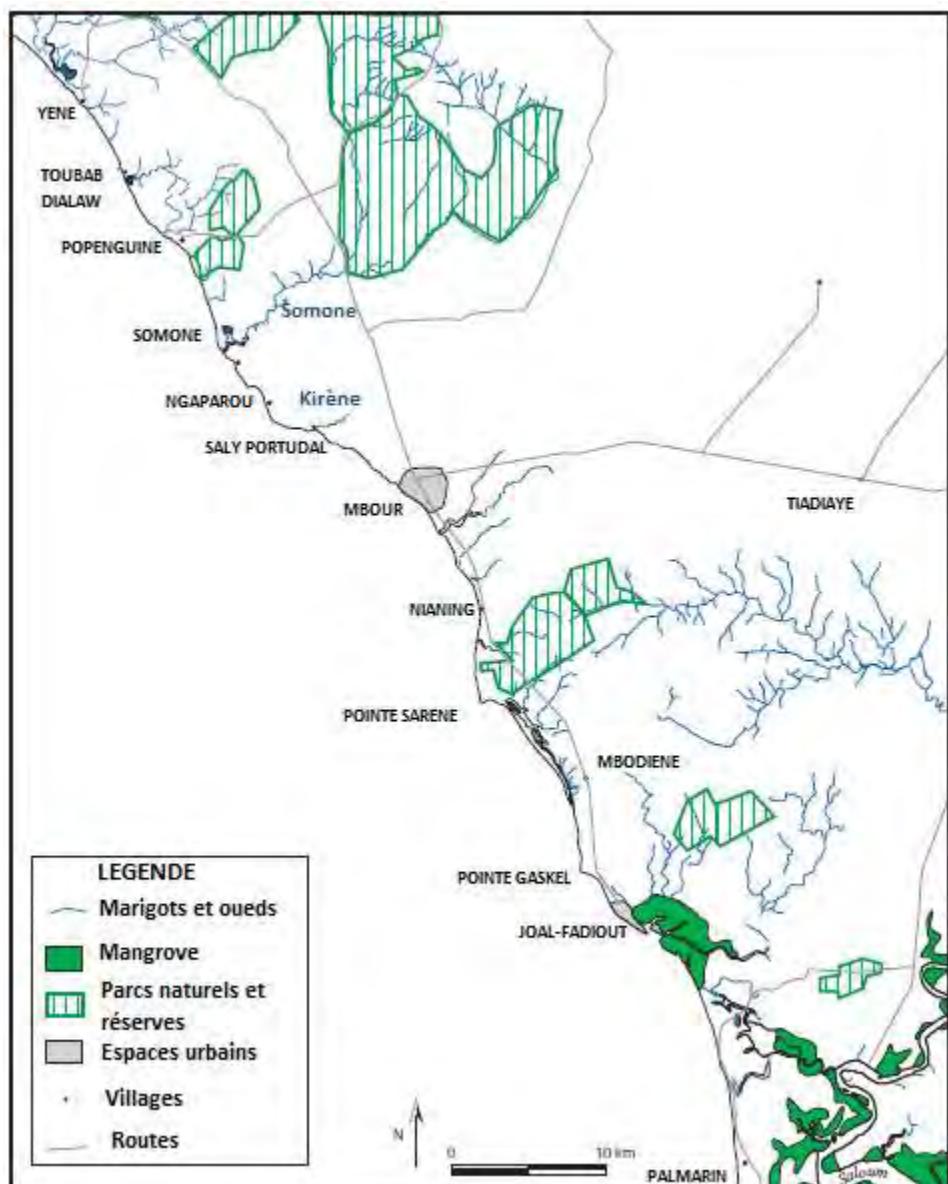


Figure 11: Le réseau hydrographique de Yène à Palmarin



Figure 12 : Vues de la partie Nord de Saly en 1954 (A) et en 2007 (B)

I.1.4. Particularités socio-économiques

A l'origine, le village de Saly était le siège d'un ancien comptoir portugais. Les colons l'auraient surnommé Saly Portugal, une dénomination qui s'est transformé au fil du temps en Saly Portudal. Ce village traditionnel paisible, aux plages ensoleillées, est fréquenté d'abord par des fonctionnaires et militaires français qui, séduits par les paysages, y construisent de nombreux bungalows. Une élite sénégalaise est aussi très tôt attirée par ces paysages exotiques où elle construit des résidences secondaires. Puis par la volonté politique Saly Portudal se transforme à partir des années 1980 en une véritable station touristique moderne. Depuis lors, la population, les aménagements et les activités touristiques connaissent des évolutions remarquables. Les données énoncées dans ce paragraphe proviennent surtout de l'ANSD, de la SAPCO, du Ministère du Tourisme, du rapport Dehoorne et Diagne (2008) et de nos enquêtes sur le terrain.

I.1.4.1. Population

La population de Saly Portudal est dans son ensemble caractérisée par sa diversité et sa croissance rapide. De 1438 habitants en 1976, la population de Saly comptait 20000 habitants en 2012. L'ANSD estime la population de la commune de Saly en 2016 à 29245 habitants dont 15359 hommes et 13886 femmes. Cette population peut être divisée en trois entités distinctes : les autochtones, les résidents et les touristes. Les autochtones représentent la population locale qui occupe surtout les villages traditionnels qui ont évolué administrativement pour donner des quartiers plus modernes. Ces quartiers se sont constitués à l'origine autour de six hameaux qui s'étaient formés avec l'arrivée par vagues successives

de populations : Saly Niakhniakhal, Saly Bambara, Saly Velingara, Saly Tapé, Saly Joseph et Saly Koulang. Cette population locale pratique encore aujourd’hui des activités traditionnelles comme l’agriculture et la pêche en plus des activités plus liées au tourisme (commerce, transport...). Les résidents sont venus à Saly avec l’essor du tourisme. Il s’agit de saisonniers ou de permanents qui assurent en grande partie la main d’œuvre au sein des infrastructures hôtelières. Les saisonniers y restent souvent pour quelques temps alors que les permanents s’installent pour des périodes beaucoup plus longues. Cette population résidente provient souvent des autres régions du Sénégal ou de l’étranger. Certains résidents logent à Saly même et d’autres rentrent les soirs principalement dans la commune voisine de Mbour. Les résidents seraient d’ailleurs à l’origine de l’accroissement de la population du village érigé en commune en 2009 et qui compte actuellement douze quartiers dont six nouveaux : Saly Golf, Saly Extension, Saly Station, Saly Carrefour, Saly Aérodrome et Saly Médine. Les touristes à Saly viennent d’horizons divers, d’Europe, d’Asie, d’Afrique et des Amériques et restent sur la station touristique pour une durée moyenne de 5,6 jours contre une moyenne nationale du séjour de 3,6 jours. La fréquentation s’est accélérée à partir des années 1990 passant de 40 226 personnes en 1988 à 93 356 en 1999 (Ministère du Tourisme et des Transports Aériens, 2000). Aujourd’hui sur un total annuel de 900 000 touristes au plan national, Saly en accueille 200 000, environ 22 % des touristes du pays (Faye, 2013). Grâce au tourisme, Saly est passé d’un stade rural (village) à un stade urbain (commune). Ce dynamisme s’explique par sa position géographique de carrefour (proche de la capitale et des grands centres régionaux), ses potentialités naturelles (mer, plages, soleil, lagune) et ses aménagements structurés (zones résidentielles, lieux de loisirs). Mais ce développement occasionne plusieurs problèmes sociologiques : délinquance, prostitution, pédophilie.

I.1.4.2. Aménagements

La station touristique de Saly est une création majeure de la Société d’Aménagement de la Petite Côte, dite SAPCO, qui a été inaugurée le 24 février 1983. Cette station s’étend sur une superficie de 600 ha formant le titre foncier n°3405 TH affecté en bail par l’Etat à la SAPCO pour une durée de 50 ans renouvelable. Elle comprend deux Unités d’Aménagements Touristiques appelées UAT Sud et UAT Nord. Sur ces unités se sont développés depuis la création de la station plusieurs établissements hôteliers, para-hôteliers et des infrastructures liées au tourisme. En 2005, l’unité d’aménagement touristique Sud (UAT Sud) dites Saly Sud couvrait une superficie de 230 ha sur lesquels sont construits 12 réceptifs de base fonctionnels dont 10 hôtels et 2 RESIDENCES de vacances. Divers réseaux et voiries ont été aussi

aménagés : un réseau routier de 10 km de long, un réseau électrique de 12 km appuyés par un groupe électrogène d'une puissance de 45 KVA, deux forages et un château d'eau d'une capacité de 8000 m³, un environnement planté reposant sur 350 000 arbres d'espèces variées formant des zones vertes. Des équipements collectifs et d'animation ont été aussi mis en place : un karaoké, un karting, des centres commerciaux, deux guichets de banque, un cinéma, un casino, une héli-station, un aérodrome, un centre international de pêche sportive, un village artisanal, des piscines, une brigade de gendarmerie etc. L'unité d'aménagement touristique Nord (UAT Nord) ou Saly nord couvrait une superficie de 350 ha entrecoupée d'une lagune dite « mare aux oiseaux ». Saly Nord s'est développé un peu plus tard et est tourné vers le concept para-hôtelier. Il offre quatre réceptifs fonctionnels qui sont en fait des résidences de vacance. Comme pour Saly Sud un réseau d'adduction d'eau et un câblage téléphonique ont été réalisés sur Saly Nord qui compte aussi des équipements collectifs et d'animation comme un golf de rang international et une marina. Cette dernière était un projet de la société Saly Mar SA (Faye, 2013). Sur un terrain de 71 224 m² sise à Saly Nord et cédé en bail par la SAPCO, la société Saly Mar avait l'ambition de construire un complexe touristique composé d'une marina avec un port de plaisance, de 44 bungalows construits sur pilotis, d'un hôtel de 120 chambres, de 81 résidences, de piscines, d'un restaurant panoramique, d'un night-club, d'un jazz club et des boutiques. Malheureusement, après le démarrage du projet en 2005 et la construction de quelques résidences témoins, le projet fut arrêté par faute de financement. Néanmoins sur l'ensemble de la station touristique de Saly, les aménagements ont continué à se multiplier et à se diversifier depuis 2005 avec la mise en place de nouvelles infrastructures : un institut sportif, une compagnie de pompiers, un hôpital, un lycée etc.

Les retombées économiques et sociales de ces aménagements sur le littoral de Saly en termes d'emploi, d'impôts et de taxes sont considérables. En 2005 l'UAT Sud a générés 600 emplois directs et l'UAT Nord prévoyait d'offrir 500 emplois au terme de la réalisation des projets selon la SAPCO. A cette date, la taxe de promotion touristique se chiffrait à 16 milliards depuis la mise en place de l'UAT Sud. En 1997, le tourisme avait généré sur le plan économique près de 77 milliards de CFA à l'échelle nationale, plus du tiers de cette somme revenait à la station de Saly qui reste sans nul doute la première station touristique du Sénégal. Ces aménagements ont également permis une modernisation du cadre de vie avec l'électrification et l'arrivée de l'eau potable dans les quartiers traditionnels. Des structures médicales modernes sont aussi à la disposition des populations locales. Toutefois ces aménagements ont créé à Saly beaucoup de problèmes environnementaux. Il est constaté la disparition d'écosystèmes naturels comme la lagune, des pertes de terres agricoles, des

phénomènes d'érosion avec la réduction des plages qui nous intéressent particulièrement. La consommation d'espaces par les implantations hôtelières crée aussi beaucoup de litiges fonciers. Selon Faye (2013), la dynamique spatiale obtenue sur la base des données aériennes et satellitaires de 1989, 2003, 2007 et 2012, montrent d'une part, une forte progression du bâti, de l'ordre de 33,17% en rapport avec la multiplication des infrastructures et aménagements touristiques et, d'autre part, des pertes de plage d'environ 10,24% liées à l'érosion côtière, sur l'intervalle chronologique 1989-2012 (figure 11). Cette prééminence du bâti s'est opérée au détriment d'entités spatiales comme la végétation et les sols nus qui ont connu une forte régression avec des taux respectifs de 6,65% et 19,04%.

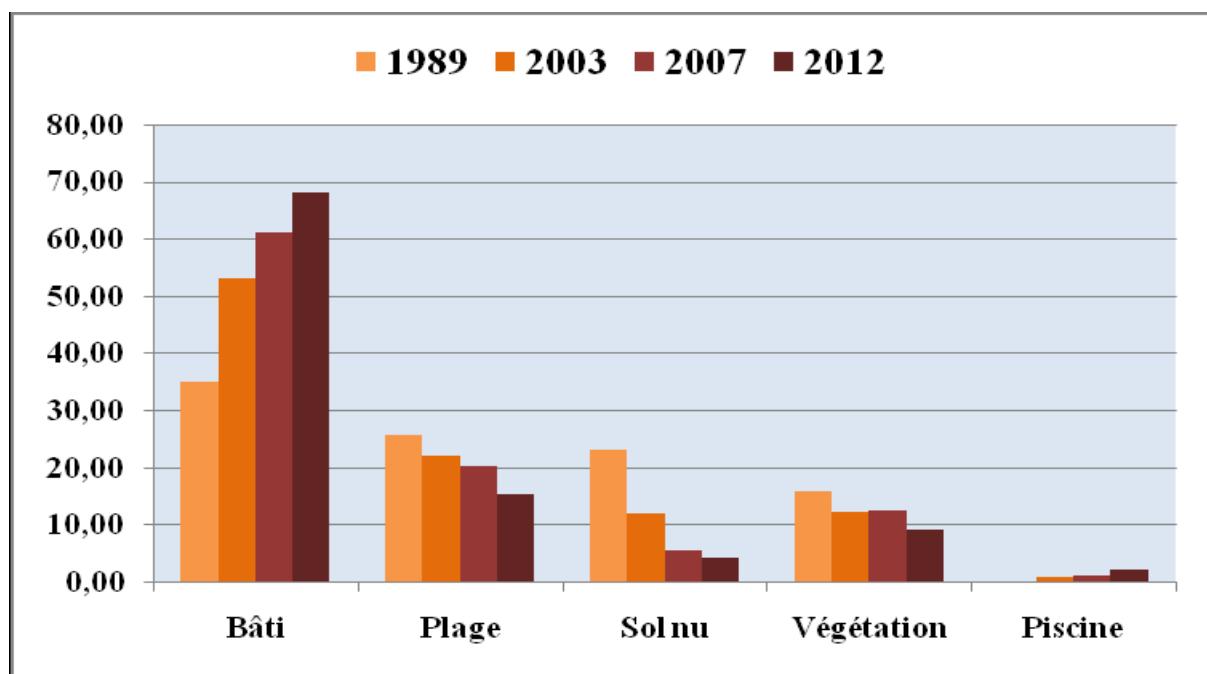


Figure 13 : Superficie (%) des classes d'occupation du sol de 1989 à 2012 (Faye, 2013)

I.1.4.3. Activités économiques

Le littoral de la Petite Côte « fait l'objet d'une convoitise en raison de son potentiel écologique et socioéconomique » (Ciss, 1983 ; Sène-Diouf, 1987 ; CSE, 2005). Ceci se traduit par une grande concentration humaine mais aussi par le développement des activités telles que la pêche, l'industrie, le commerce et le tourisme. Les activités économiques principales à Saly sont celles du secteur touristique. Les chaines d'hôtels d'une capacité d'accueil de 6000 lits offrent plus de 3000 emplois directs c'est-à-dire des emplois strictement hôteliers et qui sont créés du fait même de l'activité de l'entreprise hôtelière : service d'accueil, service

d'hébergement, gestion du personnel, agents de nettoiement, chauffeurs, gardiens, jardiniers etc (Tine, 2012). En dehors des structures hôtelières, d'autres opportunités d'emplois se dessinent aussi dans les secteurs du commerce et de l'artisanat avec la vente d'objet d'art, de bijoux, des produits du textile mais aussi dans les secteurs du transport et des services. Selon Sène-Diouf (1987), le secteur touristique génère des emplois indirects qui se situent en dehors de l'hôtel comme les restaurants, les agences de voyages, les guides et agents de l'administration nationale du tourisme. De nombreuses activités informelles s'organisent autour du tourisme comme dans le domaine de la location de voitures privées ou de taxis pour des excursions individuelles. Beaucoup d'hôteliers travaillent avec des entreprises de taxis privées (qui emploient des chauffeurs, des « aides-chauffeurs » ainsi que des chargeurs).

L'emprise du tourisme dans les espaces ruraux a engendré une désorganisation de l'économie traditionnelle qui était basée sur l'agriculture et la pêche. L'agriculture qui fut longtemps la seconde activité économique après la pêche subit de plein fouet les effets du tourisme par la réduction et la disparition des terres de culture. Les anciens espaces agricoles ne sont pas en mesure de résister à l'extension rapide des espaces touristiques autour de Saly. Seuls les villages de Saly Vélingara et Saly Joseph continuent de pratiquer l'agriculture. Concomitamment, la pêche traditionnelle est également touchée par le déploiement des emprises touristiques. Les portions de littoral les plus accessibles se réduisent et de nouvelles réglementations pénalisent le travail des pêcheurs par exemple avec l'interdiction des traditionnels séchages et fumages de poissons considérés comme nuisibles pour le tourisme. Les zones touristiques du littoral continuent d'être des mirages pour les jeunes populations des villages environnants ou des régions économiquement fragilisées. Il s'y pose des problèmes de disparités salariales significatives entre les expatriés et les nationaux. Les salaires bas ne permettent pas d'enrayer la paupérisation et la marginalisation des masses rurales. La plupart des employés n'ont pas une carrière professionnelle bien définie en raison de la flexibilité totale du travail et de la durée réduite des engagements ; ils constituent en quelques sortes des « perpétuels saisonniers ». L'inflation s'installe dans les zones touristiques compte tenu des nouveaux flux financiers liés aux touristes. Les modestes villageois sont de fait exclus des logiques commerciales qui s'imposent dans leur espace de vie habituel (Dehoorne et Diagne, 2008).

I.2. Cadre géologique

La dynamique côtière est étroitement liée à la nature des formations géologiques du littoral et à leur évolution tectonique. La morphologie littorale dépend avant tout de la disponibilité des sédiments provenant des formations géologiques émergées et de la couverture sédimentaire du plateau continental. Selon leur caractère consolidé ou non et leur degré de fracturation, les roches du littoral sont différemment affectées par les processus d'érosion.

I.2.1. Contexte géologique

L'histoire géologique de la zone d'étude s'inscrit dans celle du bassin sénégalo-mauritano-guinéen. Ce bassin côtier ouest africain est constitué de terrains méso-cénozoïques qui reposent en discordance au Nord sur des formations précambriennes de la Dorsale Réguibat, à l'Est sur la chaîne hercynienne des Mauritanides et au Sud-Est sur le bassin paléozoïque de Bowé (figure 12). C'est le plus vaste des bassins côtiers de la marge Nord-Ouest de l'Afrique. Il couvre une superficie de 340000 km² et présente 1200 à 1300 km de côte, depuis le Cap Blanc, au Nord de la Mauritanie, jusqu'au Cap Roxo, au Sud, en Guinée Bissau (Bellion et Guiraud, 1982). Il présente une largeur maximale de 560 km au niveau du parallèle de Dakar, et la puissance des formations méso-cénozoïques atteint 12 000 mètres au large de la Casamance, au Sud du Sénégal. Sa structure d'ensemble est celle d'un bassin de marge passive (Castelain, 1965; Bellion, 1989), avec un remplissage sédimentaire s'épaissant en direction de l'océan et formé de prismes élémentaires progradants superposés. Le bassin s'est individualisé à la suite de l'écartement des plaques africaine et américaine à la fin du Trias lors de l'ouverture de l'Atlantique centrale (Bellion, 1987).

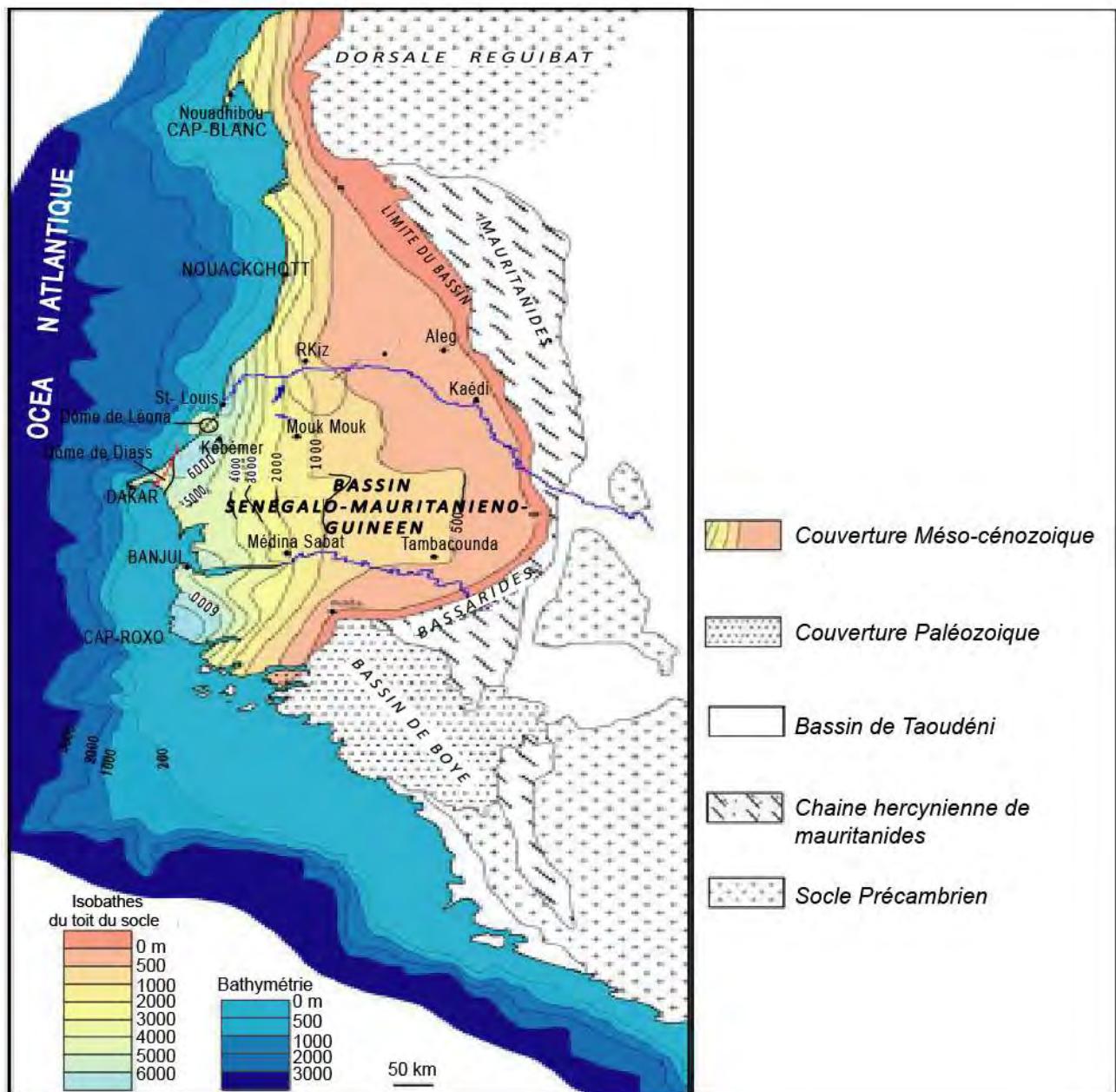


Figure 14 : Le Bassin sédimentaire sénégalo-mauritano-guinéen dans son cadre régional (Roger *et al.*, 2009)

Le bassin comprend un domaine occidental subsident à l'Ouest du méridien 16°30'W séparé du domaine oriental stable, à l'Est du méridien 15°30'E, par une zone de flexure (Flicoteaux *et al.*, 1988). Le domaine occidental est constitué à l'Ouest par la presqu'île du Cap vert et à l'Est par le plateau de Thiès bordé par les plaines côtières des littoraux nord et sud. Son socle est enfoui sous une couverture estimée à plus de 8000 m d'épaisseur cumulé, reconnue de l'Oxfordien à l'Actuel (Bellion et Giraud, 1982). Dans la région de la presqu'île du Cap Vert, ce domaine occidental est caractérisé par des failles parallèles à la côte découpant des blocs en horsts et grabens (Spengler *et al.*, 1966) associés à un volcanisme

Oligocène à Quaternaire (Cantagrel *et al.*, 1976). Les auteurs distinguent dans la presqu'île du Cap Vert, les horsts de Diass et de Dakar séparés par le graben de Rufisque. Le littoral sableux de Saly se trouve dans la partie occidentale du bassin sénégalo-mauritano-guinéen.

I.2.2. Formations géologiques

Située à l'Est du horst de Diass, la zone de Mbour-Saly occupe la plaine côtière au Sud du plateau de Thiès. Les formations géologiques affleurantes de l'axe Poponguine-Mbour-Ngasobil pouvant affecter l'évolution du littoral de Saly datent de la fin du Crétacé, du Tertiaire et du Quaternaire (figure 13, 14 et 15). Du fait de leur proximité, les falaises littorales situées sur cet axe pourraient alimenter en sédiments la dérive littorale arrivant à Saly par le Nord ou le Sud. Le choix de présenter surtout les formations géologiques de l'axe Poponguine-Mbour-Ngasobil se base aussi sur des subdivisions de la Petite Côte. Diaw (1997) a mis en évidence un découpage de la Petite Côte à partir d'un indice de linéarité côtière. Ainsi, il scinde ce littoral en deux secteurs avec d'une part le secteur entre Hann et la Pointe Sarène au Nord et d'autre part, celui entre la Pointe Sarène et Palmarin au Sud. En effet, le premier secteur peut être divisé en deux ensembles avec en premier lieu, un secteur abrité par la presqu'île du Cap-Vert, entre Hann et Toubab Dialaw, correspondant à une large baie où l'érosion y est accrue (Niang-Diop, 1994 et 1995). Puis, le secteur entre Toubab Dialaw et la Pointe Sarène est marqué par le remaniement important des sédiments avec une alternance de petites baies et de caps. Sur ce dernier secteur, les formations géologiques de l'axe Poponguine-Mbour-Ngasobil encadrent le littoral de Saly qu'elles peuvent influencer en termes d'apports sédimentaires du fait de leur proximité.

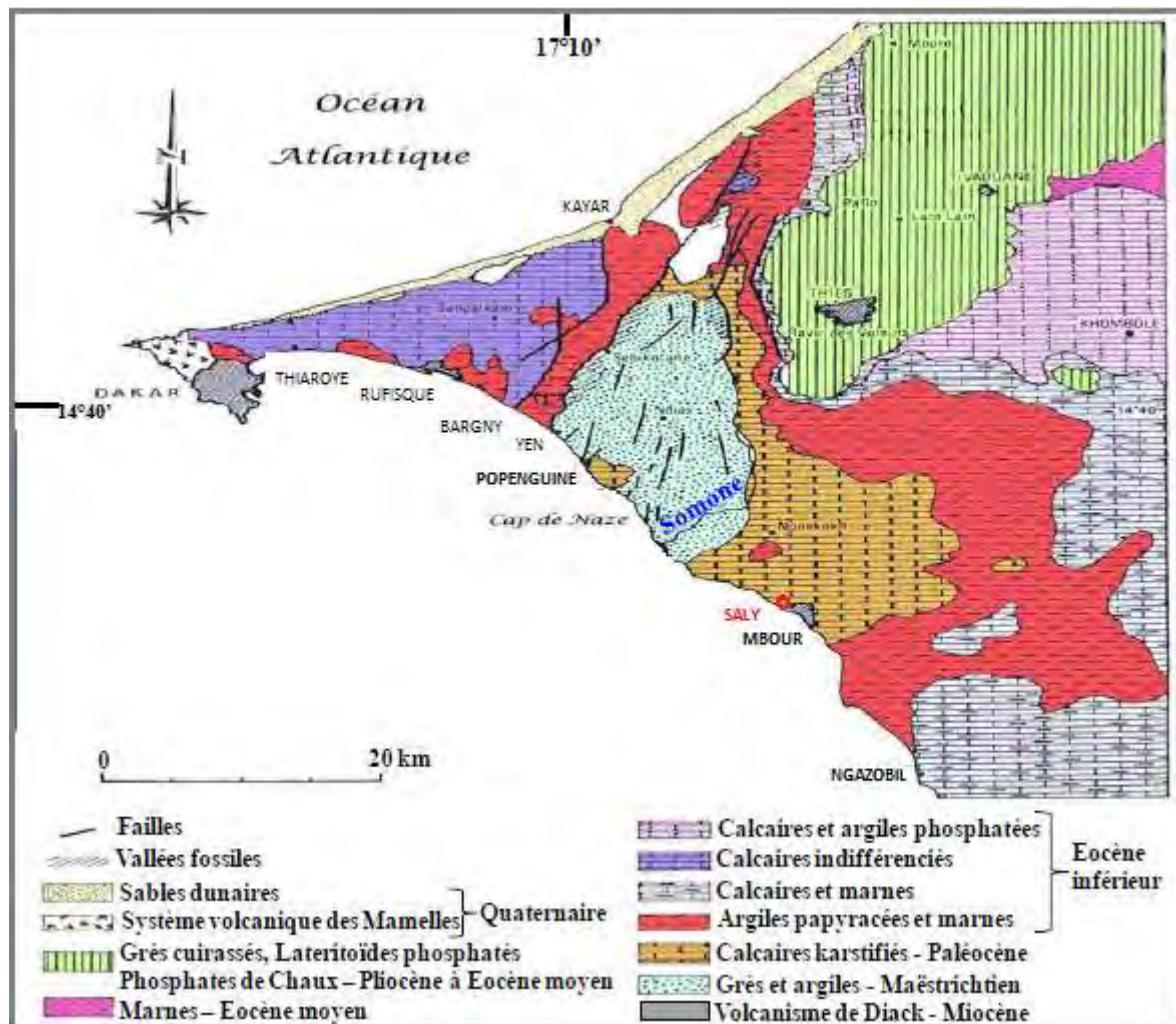


Figure 15 : Carte géologique de la presqu'île du Cap-Vert (d'après Ducasse *et al.*, 1978)

I.2.2.2. Crétacé terminal

Une sédimentation essentiellement terrigène a permis la mise en place du **Groupe de Diass** sur la partie occidentale du bassin sénégalo-mauritano-guinéen. Ce groupe est constitué à sa base par la **Formation de Paki** datée du Campanien terminal et au sommet par la **Formation du Cap de Naze** datée du Maastrichtien (figure 14). Plusieurs auteurs ont signalé la présence du Campanien supérieur dans les carrières de Paki où il affleure sous la forme de grès (Tessier 1954a, Lappartient et Monteillet, 1980, Roman et Sornay, 1983). Ce Campanien supérieur a été aussi retrouvé à la base de la falaise du Cap de Naze. Khatib *et al.*, (1990) ont relevé la coupe de la falaise et distingué 4 unités lithostratigraphiques, reprises par Sow (1992) et Sarr (1995). L'unité basale argileuse est coiffée par un niveau gréseux enrichi en dents et vertèbres de poissons et moules internes de Brachiopodes non déterminés. Ce niveau renferme une microfaune planctonique d'âge Campanien supérieur (*Rugoglobigerina rugosa*,

Guembelina globulosa, *Globotruncanita* cf. *calcarata*, *G.aegyptiaca*). Au-dessus de cette unité basale, attribuée au Campanien supérieur, les deux unités sus-jacentes dessinent des séquences granocroissantes, silto-argileuses à la base et gréseuses au sommet. La dernière séquence (unité 4), argilo-silteuse, est tronquée à son sommet sous la cuirasse latéritique. La coupe témoigne d'un empilement de séquences progradantes. Seules les deux unités basales, fossilifères, ont pu être datées par les foraminifères planctoniques (Khatib *et al.*, 1990). Si la première est clairement campanienne, la seconde unité correspond à la base du Maastrichtien (biozone à *Gansserina gansseri*), et dans cette hypothèse, le haut de la coupe serait alors maastrichtien. La troisième unité a livré de rares foraminifères arénacés et se termine par un niveau condensé à grains de quartz grossiers riche en vertèbres et dents de poissons ; ce niveau a livré aussi de rares ammonites et bélémnites et des restes de reptiles (Sarr, 1995). Des affleurements datant du Maastrichtien ont été aussi trouvés dans les falaises de la plage de Poponguine (Tessier, 1954 b), du Cap Rouge (Sow, 1992) et de Toubab Dialaw (Khatib *et al.*, 1990).

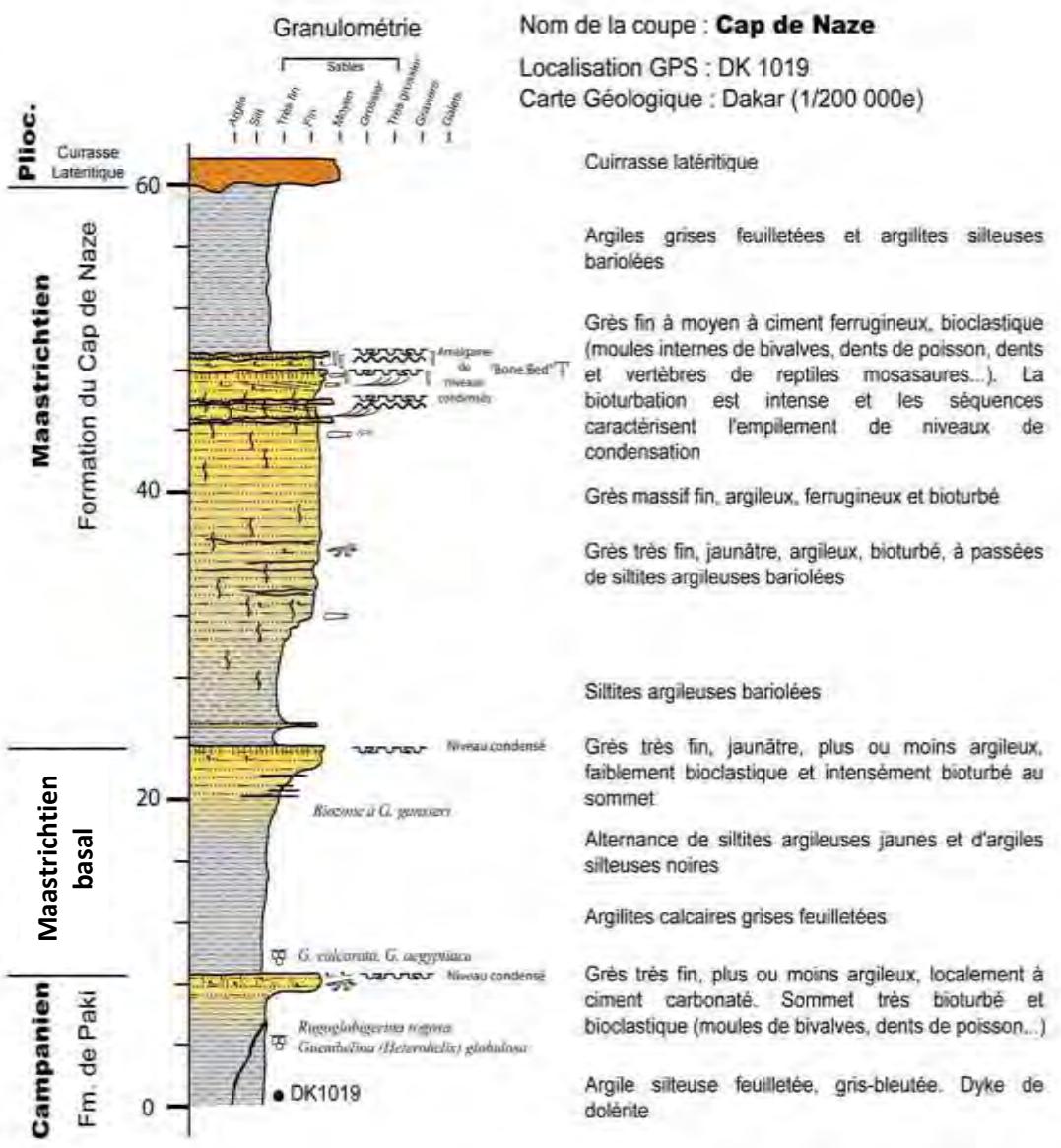


Figure 16 : Coupe du Crétacé supérieur de la falaise du Cap de Naze (Roger *et al.*, 2009)

I.2. 2.3. Paléogène

Au **Paléocène** la sédimentation est essentiellement chimique et biochimique. Le Danien est mal représenté à l'affleurement, uniquement connu sur le littoral atlantique, dans la région de Ndayane-Poponguine (**Formation de Ndayane**) (Castelain, 1965). Dans la carrière de Poponguine, le Danien débute par une première unité à faciès de plateforme, oocalcarénitique et très bioclastique riches en mollusques, avec une composante sableuse. Cette séquence est coiffée par des alternances marno-calcaires, à faciès de plate-forme externe (offshore

supérieur), bien exprimées dans la falaise côtière exposée sous la Résidence présidentielle. Dans la carrière située à l'entrée est de Poponguine, cette seconde unité présente à sa base des couches en éventail, preuve de déformations contemporaines des dépôts. Le Sélando-Thanétien affleure beaucoup plus largement, à la périphérie du Horst de Diass et principalement sur son flanc oriental. Il est aussi exposé au pied de la falaise de Thiès et dans la région de Mbour-Saly. La *Formation de Poponguine* datée du Thanétien est la plus largement représentée à l'affleurement. Elle correspond aux «calcaires coquilliers» ou encore « calcaires zoogènes » des anciens auteurs (Tessier, 1952 ; Castelain, 1965). Malheureusement, seul le sommet de cette unité affleure vraiment, sa base n'étant connue que dans une seule localité, sous la Chapelle de Poponguine (Tessier, 1952). Dans ce site, elle est représentée par un calcaire grossier brèchique à débris coquilliers (à abondantes Turritelles), discordant sur les calcaires micritiques argileux de la Formation de Ndayane (Danien).

A l'Est du Graben de Rufisque, en direction de Thiès et de Joal, les faciès rapportés à l'**Eocène inférieur** affleurent largement. Les différents faciès observés constituent les membres de la *Formation de Thiès*. Parmi ces faciès nous pouvons citer sur l'axe Poponguine-Mbour-Ngasobil, 5 unités lithostratigraphiques distinctes : le Membre de Yène, le Membre de Tiémassas, le Membre de Pointe Sarène, le Membre du Ravin des Voleurs et le Membre de Ngazobil. Les dépôts du **Membre de Yène** (« ancien horizon du piézomètre de Yène », Elouard *et al.*, 1976 b) viennent colmater des perforations creusées dans le calcaire paléocène. Les faciès calcarénitiques ont livré une très riche association de foraminifères planctoniques. Les calcarénites basales sont surmontées par des argiles feuillettées blanches à niveaux stratiformes de silex. Cette unité constitue le **Membre de Tiémassas** (« horizon de Tiemassasse » de Elouard *et al.*, 1976 b), bien exposé au Sud de Mbour et au pied de la falaise de Thiès. Les argiles feuillettés sont très bien représentées au niveau de la butte de Gandigal où elles reposent sur un niveau gloconieux et phosphaté. Formant un niveau repère qui vient entrecouper la série argilo-marneuse, un banc de calcaire phosphaté silicifié a été distingué, constituant le **Membre de la Pointe Sarène** (« horizon de la Pointe Sarène » d'Elouard *et al.*, 1976 b). En dehors de la Pointe Sarène, ce banc de calcaire est très difficile à observer à l'affleurement. Les argiles feuillettées s'enrichissent progressivement en carbonate vers le haut, pour passer à des marnes blanches compactes ou feuillettées. Celles-ci constituent le **Membre du Ravin des Voleurs** (« Marnes du Ravin des Voleurs » de Tessier, 1952 et 1954b ; «Formation du Ravin des Voleurs » d'Elouard *et al.*, 1976 b)). La série yprésienne s'enrichit encore vers le haut en carbonates et se clôt par les alternances marne/calcaire argileux du **Membre de Ngazobil**, qui correspond à l'« horizon de Ngazobil » défini par Tessier (1952)

dans la petite falaise côtière au Nord de Joal (figure 15).

Des accumulations datées de l'**Eocène supérieur-Oligocène** ont été retrouvées à Toubab-Dialaw. L'existence d'accumulations erratiques de blocs de calcaires paléogènes (Eocène) a déjà été reconnue par Tessier (1954 a), qui attribue notamment les accumulations à « blocaux » à des processus de remaniement dans des produits de projections volcaniques, à Toubab Dialaw notamment. Dans certains cas cependant, cette interprétation de diatrème ne tient pas, en particulier pour l'affleurement côtier de Toubab Dialaw (Sarr *et al.*, 2000 *in* Roger *et al.*, 2009) où les dépôts conglomératiques s'apparentent plutôt à une coulée de débris (« debris flow ») d'origine sédimentaire, telle qu'il en existe classiquement sur les marges des continents. Un petit affleurement situé à l'ouest du lac Tanma et surmontant les calcaires noduleux yprésiens du Membre de Ngazobil présente ce même type de faciès de méga-brèche.

I.2.2.4. Néogène

Un volcanisme **Oligo-Miocène** se rencontre sous forme de petits affleurements disséminés dans toute la région du Cap-Vert et du Horst de Diass. Il s'agit essentiellement de produits effusifs (coulées et lacs de lave), de produits intrusifs (sills et dykes) et de produits explosifs (tufs et brèches) (Bandia, Toubab Dialaw, Cap de Naze). Les formations indurées par les oxydes de fer couvrent de larges superficies et témoignent de conditions climatiques humides de mise en place que souligne la présence fréquente de gaines racinaires. Ces latérites sont attribuées au **Pliocène** sur la base d'observations et de datations réalisées à Dakar, à la Pointe Fann où la cuirasse s'observe au toit des coulées volcaniques du Cap Manuel dont les plus récentes sont datées de $5,30 + 0,30$ Ma et se trouvent recouvertes par les formations volcaniques des Mamelles dont l'une des plus anciennes a été datée à $1,50 + 0,10$ Ma (Roger *et al.*, 2009).

Au **pliocène**, sous un climat tropical chaud et humide, se produit une altération ferrallitique à l'origine de la cuirasse latérique, visible sur le plateau de Thiès et le massif de Diass (Demoulin, 1970 et Nahon, 1971). De son démantèlement résulte un deuxième cuirassement, formé à partir de la cimentation des produits d'altération issus de la première cuirasse, notamment des gravillons ferrugineux, mélangés à des argiles rouges (Tessier, 1952). Elouard *et al.* (1967) pensent que la cuirasse gravillonnaire de Gandigal se serait formée sur les argiles de l'Eocène inférieur, et aurait été démantelée partiellement. La troisième phase de cuirassement correspond aux épandages gravillonnaires qui sont sub-affleurants à Nianing et à Ngazobil ou se retrouvent enfouis sous les sables argileux, parfois

cimentés en conglomérats. Ce niveau est également repéré en mer, au large de Mbour. Ces épandages gravillonnaires qui seraient d'âge plio-quaternaire disparaissent à proximité de l'estuaire du Saloum.

Nom de la coupe : **Falaise de Ngazobil**

Carte Géologique : Thiès (1/200 000e)

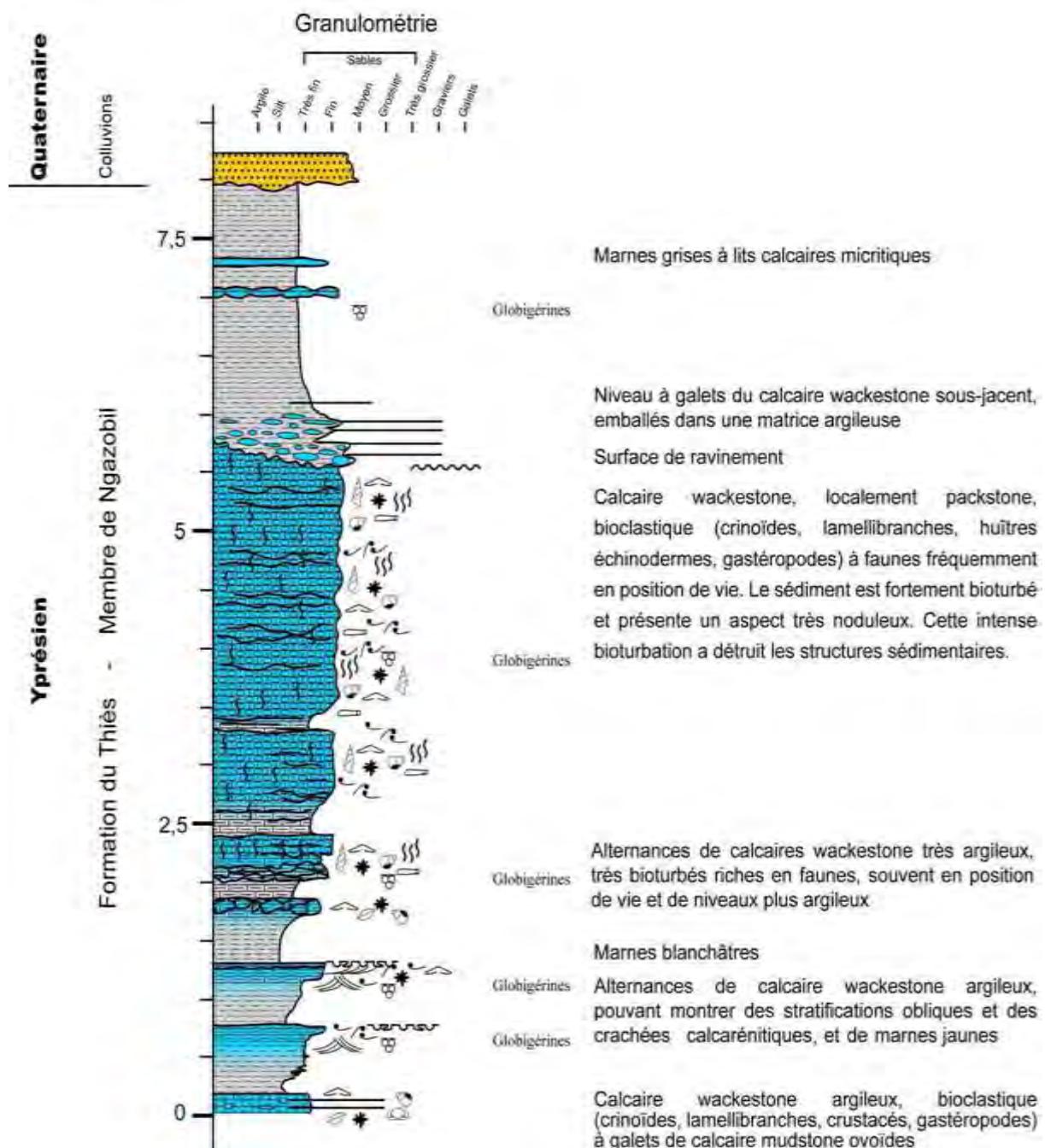


Figure 17 : Coupe de la falaise de Ngazobil (Roger *et al.*, 2009)

I.2. 2.5. Quaternaire

Au Quaternaire les faciès sont très variés et liés aux fluctuations des lignes de rivage, elles-mêmes en rapport avec les variations glacio-eustatiques globales (Bellion, 1989). Les formations du Quaternaire sont bien représentées dans la région de Mbour-Saly et ont fait l'objet d'une description par Elouard *et al.* (1967) (figure 16). Elles reposent sur un niveau de gravillons ferrugineux enrobés d'argiles issues du démantèlement des cuirasses ferrugineuses plio-quaternaires de la butte de Gandigal.

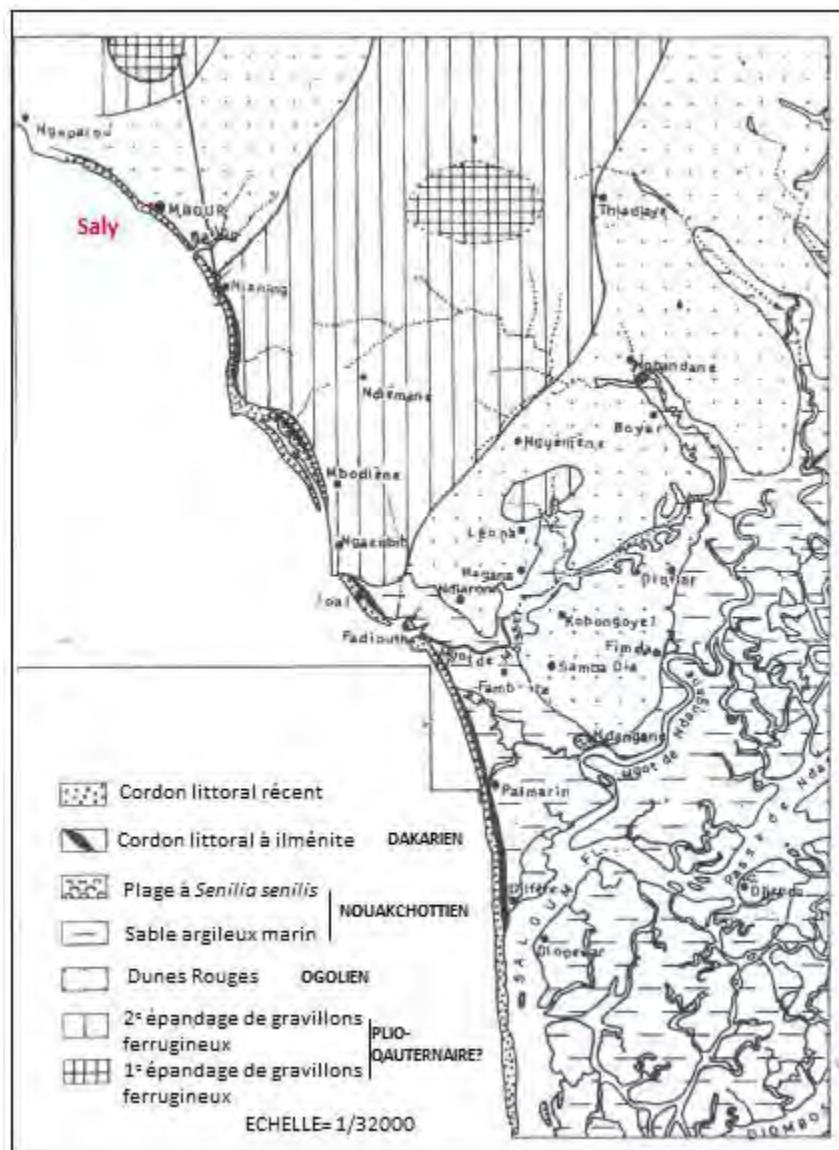


Figure 18 : Carte des formations du Plio-quaternaire de la région de Mbour-Joal (Sarr, 1982)

Les formations géologiques quaternaires de la région de Mbour-Saly peuvent être attribuées à:

- l'Eémien-Aïoujen (125 000 à 100 000 ans BP): c'est un épisode humide et

transgressif caractérisé en bord de mer par des dépôts de grès calcaires fossilifères à *Lopha stentina* ou de « beach rocks ». Les beach rocks de Bargny (31 400 + 1 700 ans B. P. et 32 500 + 2 150 ans B. P.), de Poponguine et de la pointe de Sangomar sont rattachés à cette période (Sarr, 1982). Un niveau analogue a été retrouvé dans des puits situés à quelques kilomètres à l'Est de Joal (Ndiarone, Bagana et Léona) entre 7 et 12 m de profondeur (Sarr, 1982). Leur attribution à l'Inchirien repose uniquement sur des analogies de faciès. Selon Diouf (1989), ne seraient attribuable à l'Inchirien que les beach rocks situés au-dessus du zéro actuel. Quant au beach rocks de Bargny attribués à l'Inchirien, ils seraient en fait d'âge éemien-aioujien ;

- **l'Ogolien** (20 000 à 18 000 ans BP), correspond à une longue période sèche à aride. Il est caractérisé par une large régression marine. Le niveau marin se trouvait aux environs de 100 m en dessous du zéro actuel et donc près du rebord du plateau continental. Le climat est passé d'un climat tropical humide à saisons alternées à un climat très aride. Se forment alors des alignements dunaires orientés NE-SW qui vont constituer de grands ergs. D'après Elouard *et al.* (1967), ces dunes sont constituées de sables quartzeux fins, colorés en surface en rouge par les oxydes de fer lors de l'épisode humide ultérieur (Tchadien), d'où leur appellation de "Dunes Rouges". Malgré l'érosion, ces Dunes Rouges sont représentées dans la région de Mbour, où elles recouvrent les formations du Paléocène et de l'Eocène inférieur. La ville de Mbour est bâtie sur l'extrémité de l'une de ces dunes rouges qui se prolongeaient bien au-delà, sur le plateau continental alors exondé (Hébrard, 1966). Michel (1962) signale les dunes rouges jusqu'aux abords du Saloum ;
- **le Tchadien** (11 000 à 7 000 ans B P), doit sa dénomination à une époque où les lacs sahariens, en particulier le lac Tchad, ont atteint leur plus haut niveau. C'est un épisode humide, avec une élévation du niveau marin jusqu'à environ -25 m. Ce qui provoque ainsi une nouvelle phase d'entaille des cours d'eau qui traversent les dunes ogoliennes pour se jeter dans l'océan. Au Sénégal, il se forme dans les dépressions interdunaires (Niayes) des dépôts sableux humifères. Vers 7 000 ans intervient, un bref épisode aride qui assèche les lacs (Hébrard, 1978) ;
- **le Nouakchottien** (entre 6 800 et 4 200 ans BP), est un épisode humide. On note une transgression qui atteint son maximum vers 5 500 ans B.P. aux alentours de 1 à 2 mètres d'altitude. La transgression nouakchottienne a permis la formation de nombreuses lagunes côtières et de golfes marins. Elle est caractérisée par la présence de niveaux de terrasses fossilifères. Entre Mbour et Joal peuvent s'observer, à

proximité du littoral et à la faveur de dépressions, des formations attribuées au Nouakchottien. Il s'agit en particulier de la terrasse de Mbodiène, décrite par Debenay et Bellion (1983), et représentée notamment par des sables argileux à *Senilia senilis* ;

- le **Tafolien** (4 200 à 2 000 ans B. P.) est marqué par une régression marine qui accompagne une tendance climatique semi-aride induisant un recul du niveau marin, coté à environ -2,5 m. Vers 4200 ans B. P., des courants de dérive littorale régularisent la côte (Elouard et Rosso, 1977) et édifient des cordons littoraux (dunes jaunes) riches en minéraux lourds (Hébrard, 1978), aussi bien sur la côte mauritanienne que sur le littoral sénégalais. Cette dérive littorale est à l'origine de la formation des flèches sableuses le long de la Petite Côte (celles de Pointe Sarène, Mbodiène, Joal et Sangomar). La dernière phase humide (2 800 à 2 000 ans BP) durant laquelle s'édifie le cordon littoral riche en ilménite est attribuée là où elle est reconnue au Dakarien ;
- **La période subactuelle** est marquée par une régularisation de la côte avec la formation de larges plages sableuses rectilignes. Sous un climat un peu plus humide que l'Actuel, des dunes paraboliques se mettent en place dans les anciennes embouchures du Sénégal (Michel *et al.*, 1968, in Diouf, 1989). Par la suite, plusieurs petites oscillations du niveau marin entraînent la formation des cordons littoraux emboîtés (cordon littoral actuel).

I.2.3. Structures tectoniques

L'évolution de la région de Mbour-Saly est très liée à l'histoire tectonique du bassin qui est marquée par des périodes de paroxysmes entrecoupées de phases plus calmes. Certaines des phases tectoniques vont affecter l'évolution des cuirasses ferrugineuses du horst de Diass, limité sur sa bordure orientale par la faille de la falaise de Thiès (figure 17). Il faut noter que la structuration du Horst de Diass est très sous-estimée, en raison du recouvrement latéritique qui masque les accidents. A Poponguine, un nombre élevé d'accidents d'orientation E-NE est visible dans les affleurements du Campano-Maastrichien et du Paléocène (Faye, 1983). Au Nord-Est, la faille de Tivaouane borde le plateau de Thiès. En direction du Sud (Joal/Saloum), les failles prennent une orientation NE-SW (failles de Nianing, Ngazobil, Joal et Djifère). La zone de Mbour-Saly est encadrée par les failles de la falaise de Thiès et de Nianing. Les études géophysiques menées dans le bassin ont indiqué l'existence d'une anomalie gravimétrique positive dans la région de Mbour qui a été attribuée à l'existence d'une intrusion de roches magmatiques située vers 5 km de profondeur qui aurait créé une structure

anticlinale d'axe N-S, affectée de nombreuses failles. Un accident important, d'orientation NE-SW, séparerait cette structure de celle de Diass (Liger, 1979).

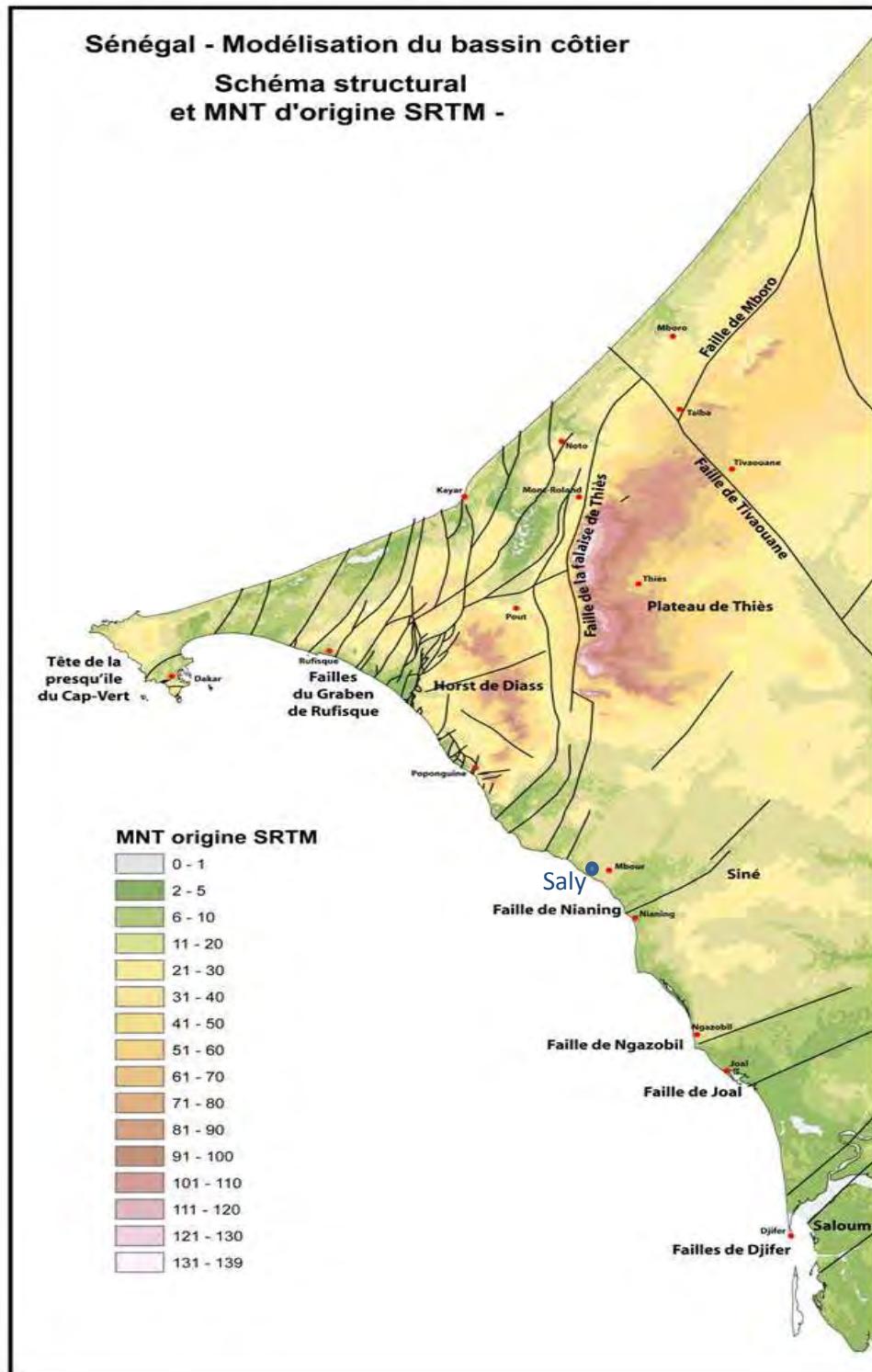


Figure 19: Carte des domaines structuraux du Sénégal occidental (Roger *et al.*, 2009)

I.2.4. Plateau continental

Le plateau continental est une partie de la marge continentale qui représente l'extension en

mer du continent. Il est limité par une rupture de pente au-delà de laquelle le talus continental le raccorde aux grands fonds marins. L'isobathe des 200 m est conventionnellement choisie pour marquer la limite vers le large du plateau continental. Ce dernier présente des caractéristiques morphologiques et sédimentaires qui influencent l'action des agents hydrodynamiques sur le littoral.

I.2.4.1. Caractères morphologiques

Les largeurs, les pentes, les affleurements rocheux, les bancs et les canyons sous-marins que présente un plateau continental définissent sa morphologie. Le plateau continental de la Petite Côte s'élargit progressivement vers le Sud. De 10 km à Dakar, il atteint une largeur de 65 km à Saly, 70 km au droit de Joal et 100 km au large de la Casamance (figure 18). Le plateau continental de la Petite Côte est aussi caractérisé par un certain nombre de bancs sous-marins. Il présente deux types de bancs rocheux : certains sont allongés et correspondent à d'anciennes lignes de rivage et d'autres, comme le banc de Mbour, sont collés à la côte. Ces bancs engendrent des ruptures de pente affectant des grès ferrugineux très calcifiés (falaises sous-marines). Au niveau de Saly, des affleurements rocheux sont bien visibles à marée basse. Ces écueils rocheux ferrugineux apparaissent à de faibles profondeurs et constituent des brise-lames naturels. Ils relèvent les fonds marins et diminuent les pentes en face de Saly. L'isobathe de 5 m est localisée à 2 km du rivage. Au niveau de Popenguine et Mbour les pentes varient entre 0,1 et 0,3 % (Dwars, Heederik et Verhey Ingenieurs Conseils, 1979). Ces bancs et affleurements rocheux ont une origine volcanique au large du Cap Manuel et dans la baie de Gorée et une origine sédimentaire au large de la Petite Côte (Domain, 1977). La largeur importante, les bancs sous-marins, les affleurements rocheux et les faibles pentes réduisent l'énergie des houles en les amortissant à proximité du rivage. Ceci pourrait se réaliser en face du littoral de Saly où ces caractéristiques sont notées.

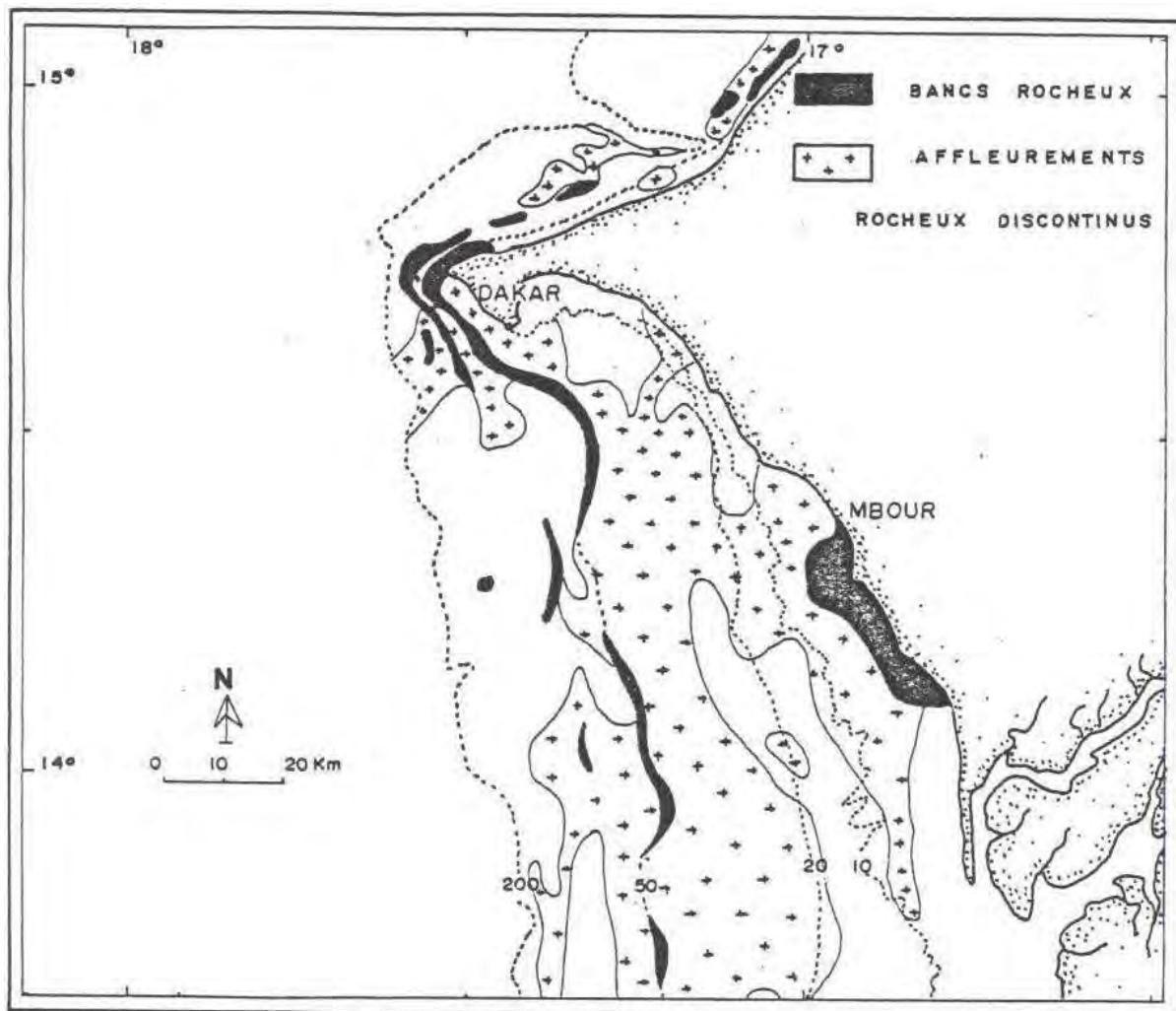


Figure 20: Bancs et affleurements rocheux sur le plateau continental sénégalais (Domain, 1977)

Il existe deux grandes entailles sous-marines du plateau continental ou canyons le long du littoral sénégalais : le canyon de Kayar et le canyon de Dakar. Ces canyons jouent un rôle important dans la sédimentation de la zone côtière par leur action de piégeage d'une grande partie du transit sédimentaire parallèle au rivage et venant de la Mauritanie. Ce qui influe sur la sédimentation le long de la Petite Côte en provoquant notamment un déficit sédimentaire sur le secteur entre Hann et Toubab Dialaw fortement érodé selon Niang-Diop (1995).

I.2.4.2. Couverture sédimentaire

Au large de la Petite Côte, on observe sur le plateau continental de grandes étendues de sables fins ($125\text{-}250 \mu\text{m}$) dépourvues d'éléments vaseux à des profondeurs inférieures à 20 m (Sall, 1982) entre 25 et 75 m de profondeur, les sables moyens ($250\text{-}500\mu\text{m}$) dominent sur le plateau continental ainsi que sur les hauts fonds proches du littoral (Barrusseau et al, 1988)

(figure 19). Ce sont des sables en équilibre avec les conditions hydrodynamiques actuelles. Ils représentent d'anciens sédiments éoliens ogoliens remaniés par la mer nouakchottienne (Barusseau, 1984 ; Barusseau *et al.*, 1988). D'après les cartes bathymétriques, des étendues importantes de sables fins se trouvent dans les eaux peu profondes en face du littoral de Saly. A proximité des hauts fonds rocheux, on a des graviers alors que dans les zones relativement abritées, on a des sables vaseux (sables fins signalés plus haut). Au-delà de 5 m de profondeur, les sédiments sont très carbonatés (teneurs en général supérieures à 75%) et sont constitués de sables grossiers qui, selon Barusseau (1984), sont liés aux affleurements rocheux. Ces sables sont bioclastiques et représenteraient une partie de la sédimentation actuelle sur le plateau continental. Ce faciès correspondrait aux sables biogènes à débris de balanes de Masse (1968). Tous ces sables sur le plateau continental de la Petite Côte constituent un stock de sédiments que des houles fortes peuvent mobiliser en direction du rivage.

Les caractères morphologiques et la couverture sédimentaire du plateau continental n'agissent pas en faveur d'une accentuation des phénomènes d'érosion à Saly. L'énergie des houles serait réduite et des sédiments semblent disponibles. Même si des études minutieuses sur les courants et les transferts sédimentaires littoraux sont nécessaires pour le confirmer, nous pouvons constater avec Turmine (2001), que la situation d'érosion du littoral de Saly est en contradiction avec le contexte bathymétrique et sédimentologique qui devrait favoriser la sédimentation à la côte. Turmine pose l'éventualité d'un déficit sédimentaire dont l'origine est à rechercher. Vu ce qui précède, cette recherche devrait s'orienter vers les effets des actions anthropiques qui peuvent accentuer localement les courants littoraux ou créer un déficit sédimentaire sur un secteur en bloquant le transit littoral.

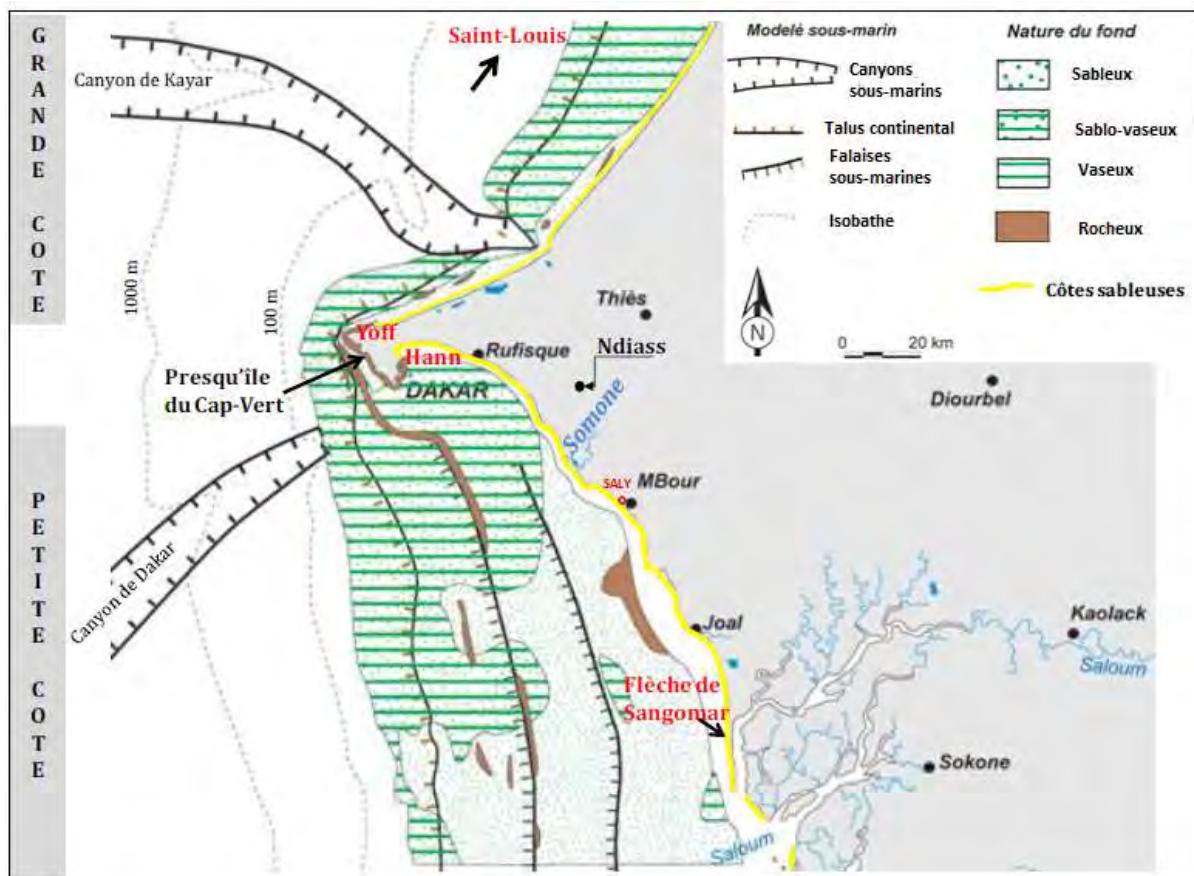


Figure 21 : Couverture sédimentaire de la Petite Côte (Turmine, 2001)

I.2.5. Morphologie du littoral

Le littoral de Saly occupe une plaine côtière entrecoupée de quelques dépressions et adossée au plateau de Thiès. Cette plaine côtière présente quelques hétérogénéités avec des buttes qui atteignent 40 m à Gandigal. Au Nord-Ouest de Saly le massif de Diass s'élève à 105 m alors que le plateau de Thiès culmine au Nord à 105m (figure 17). La coupe géologique de Gandigal à Nianing montre une faible倾inlaison des formations géologiques vers le SSE (figure 20). Les principales unités géomorphologiques présentes le long du littoral sont : les Dunes Rouges, les cordons littoraux, les dépressions inter-dunaires, la plage, les caps et les affleurements rocheux. Ces unités géomorphologiques reposent sur des calcaires paléocènes, des argiles de l'Eocène inférieur et des gravillons ferrugineux du Quaternaire (figures 20 et 21).

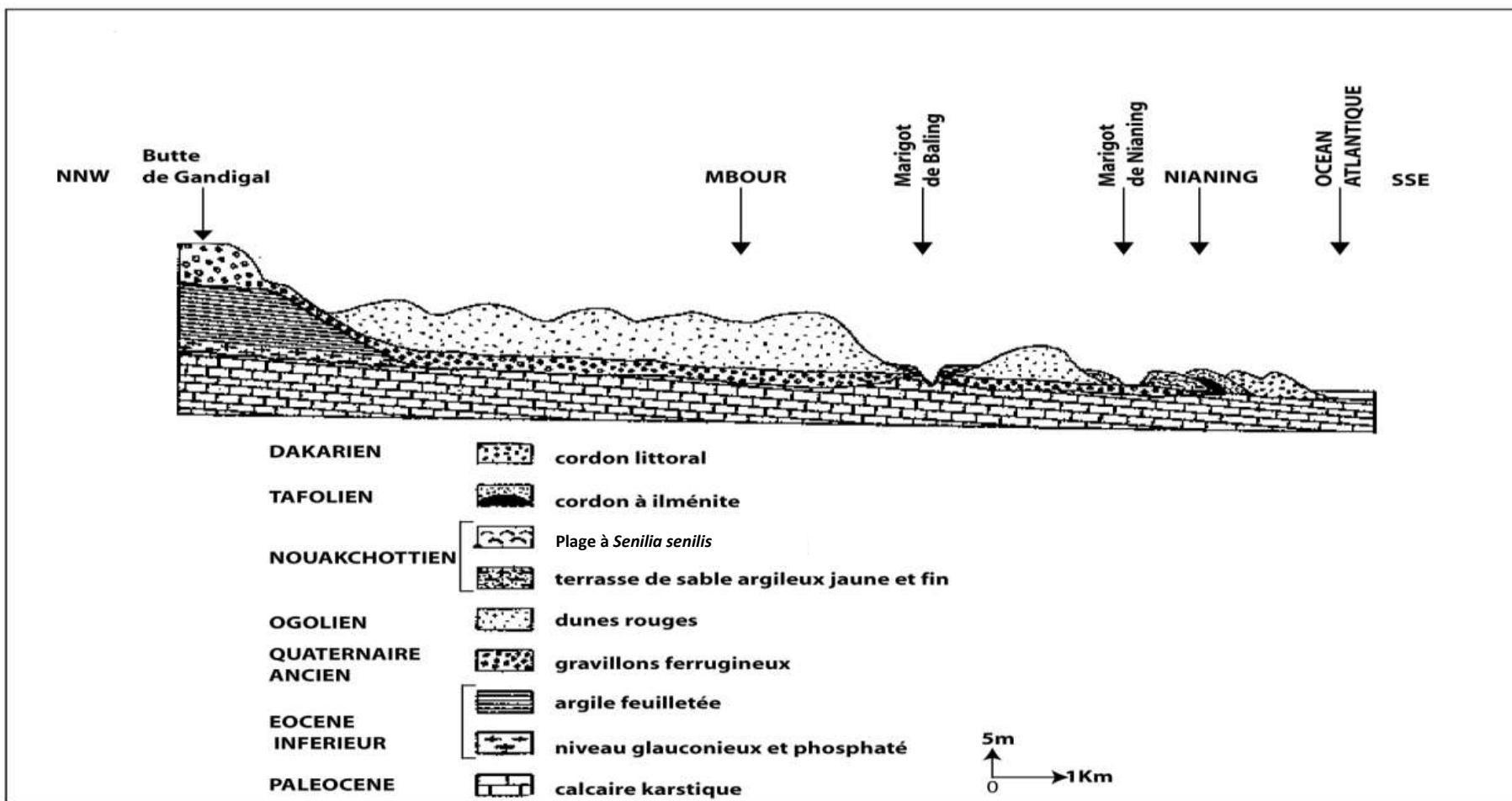


Figure 22 : Coupe géologique de Gandigal à Nianing (Elouard *et al.*, 1967)

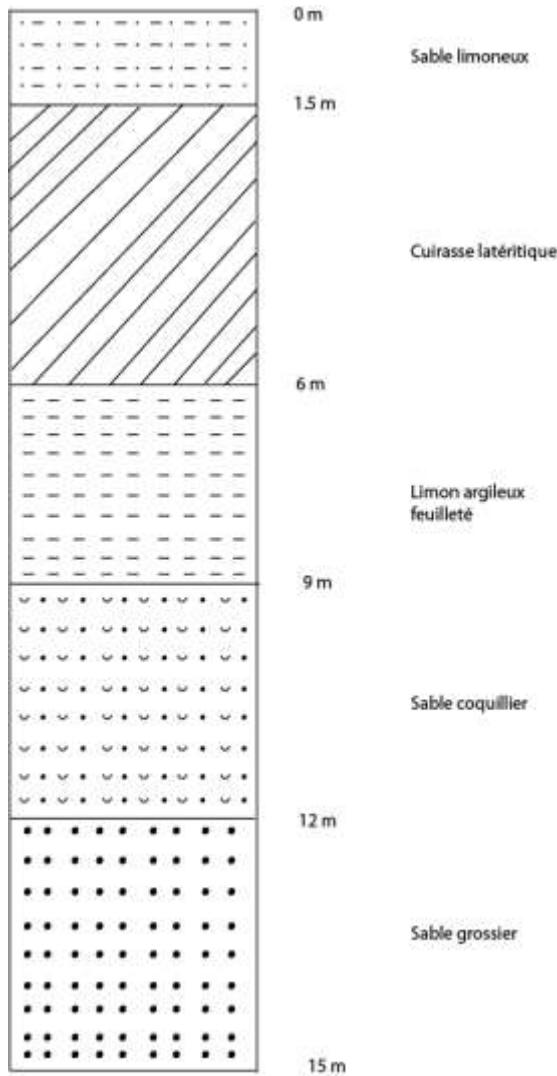


Figure 23 : Sondage de reconnaissance SCII à Marina Saly (Saufrase,1998)

I.2.5.1. Dunes rouges

Elles sont constituées de sables fins roux azoïques sur un substrat de graviers latéritiques reposant sur des calcaires du Paléocène (Faye, 1988). Ces dunes rouges ogoliennes sont fortement arasées et démantelées par les aménagements touristiques. Ces altitudes faibles, sont inférieures à 10 m à proximité du rivage. Autrefois dominées par des baobabs, les dunes sont maintenant partiellement occupées par la zone de reboisement en *Eucalyptus* de la SAPCO.

I.2.5.2. Cordons littoraux

Après la dernière régression quaternaire, la dérive littorale, aidée par la déflation éolienne édifie le cordon actuel qui fait suite à la plage (Faye, 1988). Il pouvait atteindre une largeur

de 500 m, une altitude de 5 m et est entrecoupé de caps rocheux. Le cordon littoral est occupé par les quartiers traditionnels et les hôtels. Le rapport de Saufrase (1998) indique la présence de sables fins au sommet du cordon littoral entre le marigot de Kirène et la plage. Faye (1988) distingue un cordon ancien (altitude de 4 m) séparé du cordon actuel par une dépression au niveau de laquelle affleure la nappe (marigot de Kirène). Le cordon actuel s'est accumulé par dérive littorale lors du retrait de la mer à partir du maximum de la transgression nouakchotienne. Aux apports de la dérive littorale s'est ajouté le sable issu du démantèlement des dunes ogoliennes adjacentes et de la terrasse par déflation éolienne. Le cordon ancien correspondrait au cordon à ilménite édifié au Tafolien. Il portait une végétation d'herbacées et d'arbustes de type *Maetus senegalensis*, *Cenchrus biflorus* et *Leptadenia hastata*.

I.2.5.3. Plage

Elle est une accumulation sur le bord de la mer de matériaux plus grossiers que les constituants principaux de la vase (Guilcher et Nicolas, 1954).

Sur le plan longitudinal les plages de Saly comportent des baies séparées par des caps (figure 22). Du Nord au Sud, nous distinguons le cap de la résidence du Port, la Baie 1, le cap du Ponton de l'hôtel Espadon et la Baie 2 qui s'allonge vers Mbour. Sur la Baie 1 se concentrent les hôtels de l'UAT Nord et le quartier traditionnel de Saly Coulang. La Baie 2 s'allonge le long des hôtels de l'UAT Sud et le quartier traditionnel de Saly Niakh Niakhal.



Figure 24 : Découpage morphologique du rivage de Saly (UAT : Unité d'Aménagement Touristique) (Google Earth image, 2015)

Sur le plan transversal, les plages de Saly, essentiellement sableuses peuvent être subdivisées en trois unités morphologiques : la haute plage, la basse plage ou estran et la plage sous-marine (photo 2 ; figure 23). 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. Elle est prise par les installations hôtelières. 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. L'estran est utilisé par les hôteliers à marée basse pour des activités récréatives. Il présente régulièrement des rides de courants et des croissants de plage. 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 demi-longueur 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 (Ndour, 2015). 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). La plage sous-marine fréquentée par les baigneurs est le domaine des affleurements rocheux ferrugineux (photos 2 et 3).

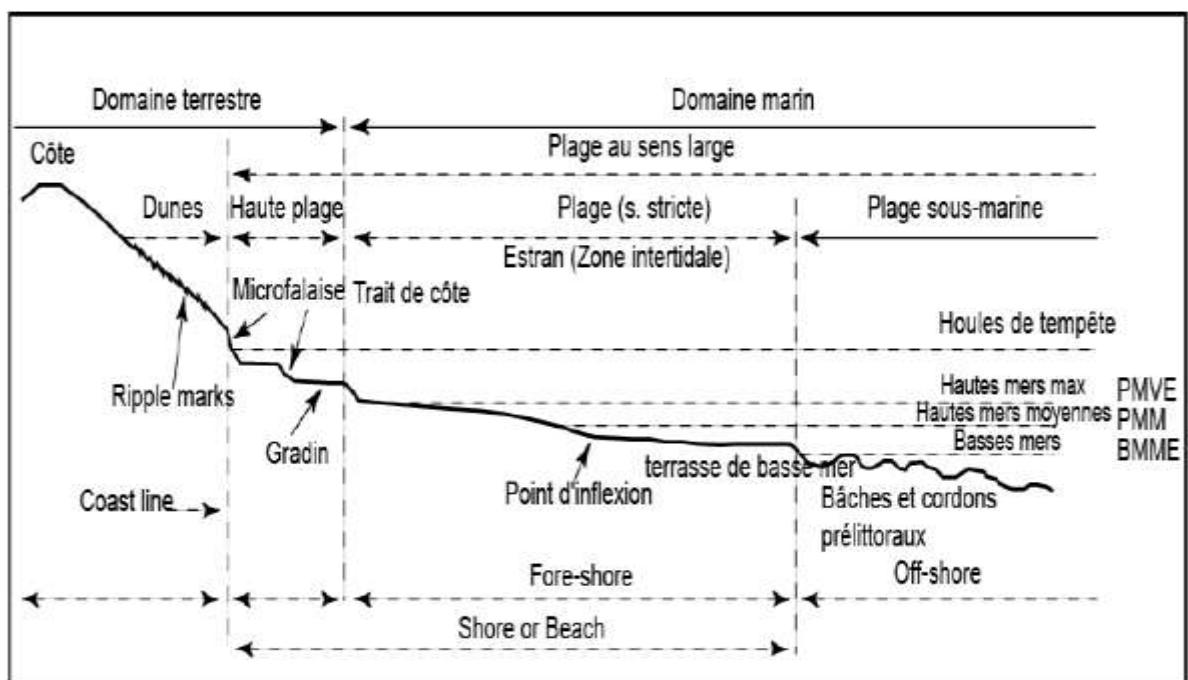


Figure 25 : Principales unités morphologiques d'une plage sableuse et ses agents dynamiques (d'après Ottman, 1965).



Photo 2 : Principales unités morphologiques sur la plage de Saly



Photo 3 : Affleurements rocheux sur la plage sous-marine de Saly

Conclusion partielle

Le climat de la zone d'étude de type nord soudanien à signature littorale se caractérise par deux saisons : la saison sèche de novembre à mai et la saison des pluies de juin à octobre. Les alizés maritimes soufflent pendant la saison sèche, apportent l'humidité et la fraîcheur de novembre à janvier puis la chaleur entre février et avril. La mousson arrive pendant l'hivernage avec les pluies et la chaleur. Le mois d'août présente la pluviométrie moyenne maximale et le mois d'octobre la température moyenne maximale.

Le littoral de Saly reçoit toute l'année des houles du NW, pendant l'hivernage des houles du SW et de fortes houles d'Ouest d'octobre à novembre. Ces houles sont à l'origine des courants perpendiculaire à la côte et des courants de dérive littorale parallèle au rivage. Les marées de vives eaux qui surviennent pendant l'hivernage et surtout l'élévation du niveau marin globale et locale constatée ces dernières années accentueraient les effets érosifs des houles et des courants littoraux.

L'érosion pourrait aussi être accentuée par les particularités socio-économiques du littoral. La population, très diversifiée, a connu depuis 1976 une évolution croissante avec l'essor des activités touristiques. Les aménagements se sont diversifiés aussi à partir des années 1980 sous l'impulsion de la SAPCO. Le résultat est la modernisation de Saly malgré la crise du tourisme qui représente le secteur d'activités principales et Saly passe d'un village à celui d'une commune.

Sur le plan géologique, la zone de Saly-Mbour repose sur un substratum calcaire datant du Paléocène supérieur. Ces calcaires recouvrent des sables argileux affleurant dans les falaises au Nord-Ouest de Saly, à Poponguine et qui peuvent apporter des sédiments au littoraux adjacents. Les calcaires paléocènes peuvent être recouverts de formations argileuses à attapulgite de l'Eocène inférieur qui affleurent au Sud de Mbour, jusqu'à Mbodiène. Ensuite, on trouve la cuirasse latéritique ou une couche de gravillons latéritiques. Ces formations sont recouvertes de dunes rouges d'âge ogolien vers l'intérieur, tandis qu'on se rapprochant de la côte on trouve un cordon littoral actuel et la plage. Les caractères morphologiques et la couverture sédimentaire du plateau continental n'agissent pas en faveur d'une accentuation des phénomènes d'érosion à Saly.

**CHAPITRE II. PRINCIPAUX FACTEURS
D'EVOLUTION DU LITTORAL**

L'évolution d'un littoral sableux dépend principalement des quantités de sédiments disponibles et des caractéristiques des agents hydrodynamiques capables de les mobiliser. A chaque fois qu'il y a une variation spatiale ou temporelle de l'une de ces deux composantes du littoral, le profil de plage se modifie, soit dans le sens de l'accumulation, soit vers l'érosion (figure 24). L'analyse des variations spatio-temporelles des caractéristiques des agents hydrodynamiques et des quantités de sédiments disponibles renseignent sur les causes de l'évolution du littoral. Des facteurs anthropiques peuvent être à l'origine de ces variations car les activités humaines modifient sur le littoral le stock de sédiments disponibles, l'hydrodynamisme et finalement la dynamique littorale. Comme agents pourvoyeurs d'énergie sur le littoral, nous considérons uniquement les agents hydrodynamiques car l'action directe des vents sur les plages sableuses du littoral fortement urbanisé de Saly serait négligeable. Toutefois les vents agissent indirectement sur le littoral car ils génèrent les processus hydrodynamiques.

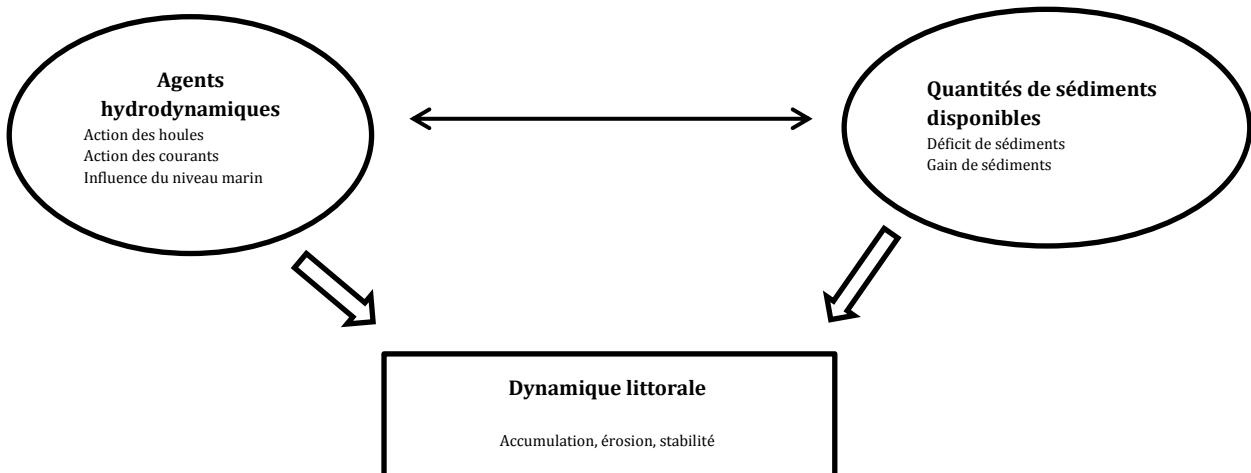


Figure 26 : Les principaux facteurs d'évolution du littoral

II.1. Agents hydrodynamiques

Il s'agit des houles et des courants induits dont les actions peuvent être influencées par le niveau marin.

II.1.1. Données disponibles

Plusieurs données sont utilisées dans l'analyse des facteurs d'évolution du littoral. La plupart sont disponibles dans la littérature mais les données de houles locales disponibles sont très rares. Pour étudier l'action des agents hydrodynamiques sur le littoral, il était nécessaire d'acquérir et de traiter des données de houles.

II.1.1.1. Acquisition

Les données de houles utilisées dans cette étude proviennent d'ERA-Interim (<http://apps.ecmwf.int/datasets/>). Ce sont des données satellitaires au large de Saly qui donnent les hauteurs, les périodes et les directions journalières des houles de 1979 à 2016. Pour traiter ces données de houles au large, un script et le modèle hydrodynamique XBeach de Deltares (Delft hydraulique) ont été utilisés. Le script « runEFshow.m » est contenu dans la plateforme « *Openearth* ». XBeach est un code à accès libre largement utilisé, conçu à l'origine pour modéliser l'impact des tempêtes sur les cordons littoraux. Au cours de la dernière décennie, d'importantes fonctionnalités ont été ajoutées, telles que les effets d'asymétries des vagues de façon à simuler le transport littoral et l'undertow. Un meilleur résolution des vagues stationnaires permet aussi de simuler les barres de plages sur des profils à 1D ou à 2D (Roelvink *et al.*, 2009 et 2018b ; Roelvink et Costas, 2018). Il permet d'élaborer des modèles de vagues en faisant apparaître les modifications de la houle avec la diminution des profondeurs de la bathymétrie.

II.1.1.2. Traitement

Le script runEFshow.m (figure 25) effectue d'abord dans Matlab une analyse des données de houles au large et détermine :

- des séries temporelles des hauteurs, des périodes et des directions de houles ;
- des roses des fréquences, les hauteurs significatives et les périodes des houles ;
- un diagramme du climat des vagues au large de la côte (figure 26).

Le diagramme du climat des vagues classe les séries temporelles de houles dans 20 directions et pour chaque direction, la hauteur de vague représentative et la période moyenne, de sorte que le flux d'énergie soit le même dans chaque cellule. Les fonctions Xbeach utilisent dans Matlab le diagramme du climat des vagues au large pour simuler les conditions hydrodynamiques en eaux peu profondes. Sur les modèles hydrodynamiques produits par XBeach , sont représentés les hauteurs moyennes et les directions moyennes des houles au déferlement.

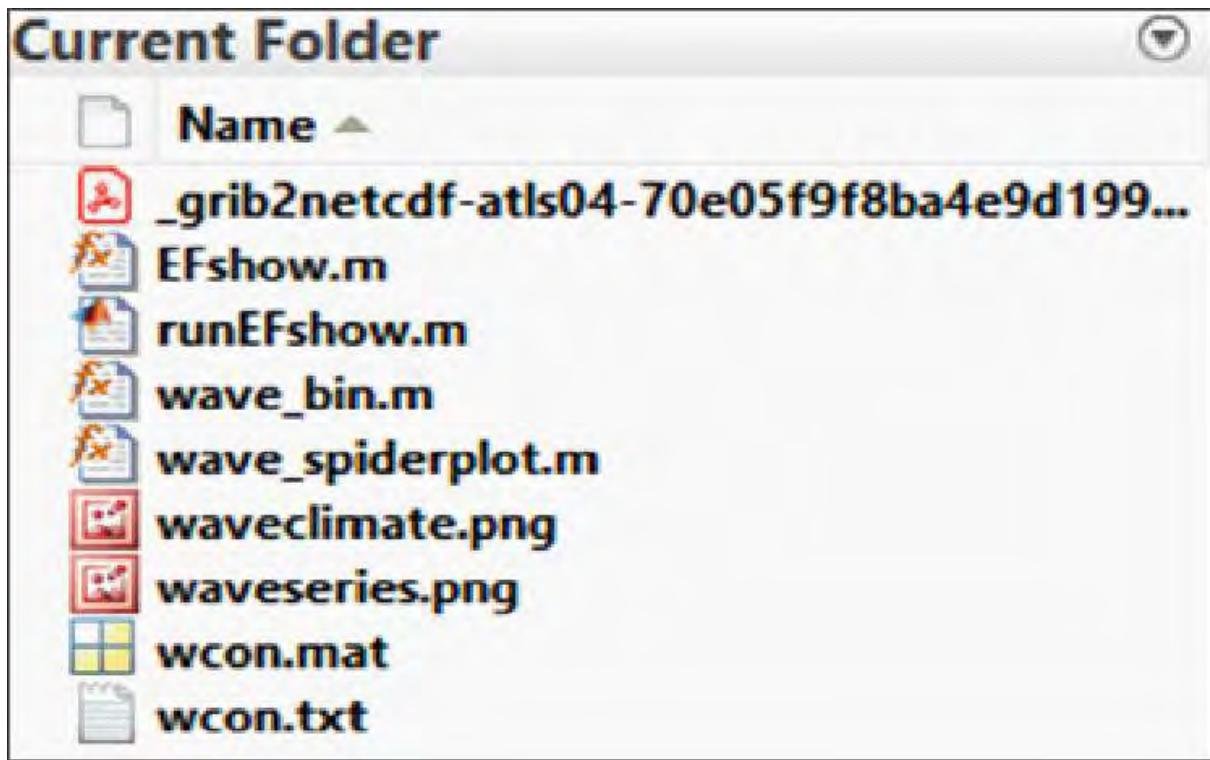


Figure 27 : Répertoire Matlab contenant le script runEFshow.m

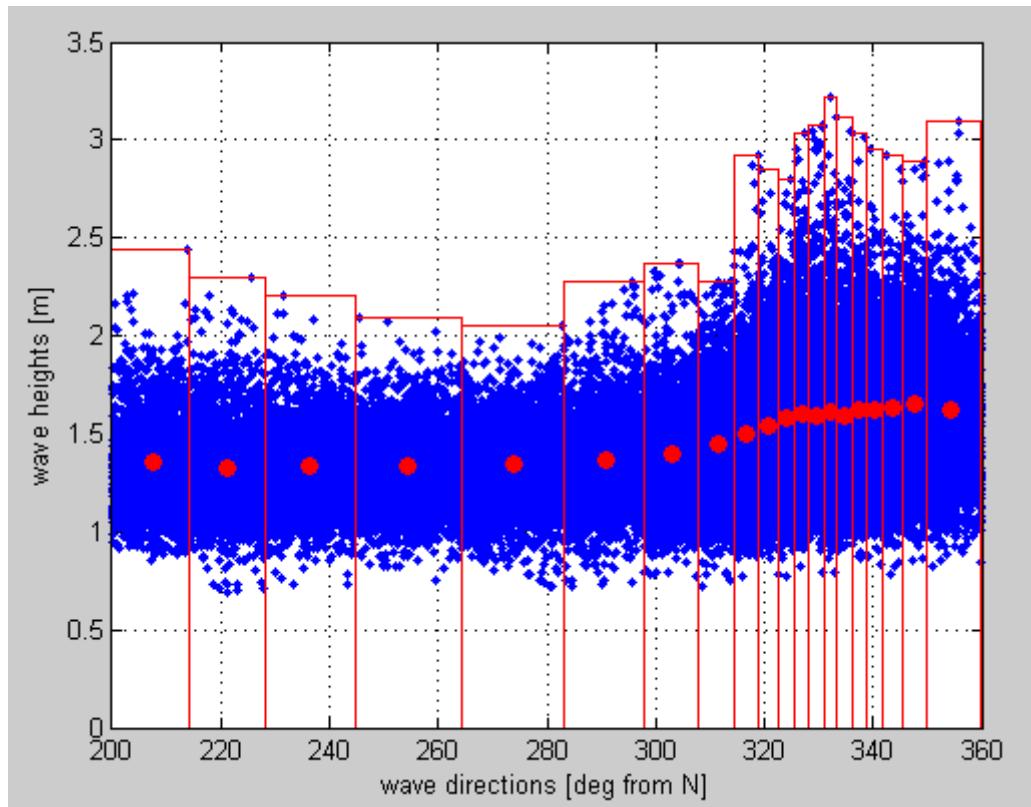


Figure 28 : Climat de vagues offshore schématisé

II.1.2. Action des houles

Au large de Saly, les séries temporelles des houles d'ERA interim montrent dans l'ensemble des hauteurs moyennes inférieures à 2 m, des périodes inférieures à 20 s et des directions comprises entre N200 et N360 (figure 27). Les roses des houles permettent de distinguer deux directions principales de houles. Des houles du Nord plus fréquentes, de directions N300 à N360, avec des occurrences de 10 à 15%. Des houles du Sud moins fréquentes, de directions N180 à N240, avec des occurrences de 5 à 10 % (figure 28). Les houles du Nord présentent des hauteurs moyennes significatives de 1,5 m, des hauteurs moyennes et périodes maximales respectives de 3 m et 16 s alors que les houles du Sud présentent des hauteurs significatives de 1 m, des hauteurs moyennes et périodes maximales respectives de 2,5 m et 10 s (figure 29 et 30). Par ailleurs les séries temporelles des houles au large de Saly ne montrent pas, depuis 1979, des variations significatives des hauteurs, des périodes et des directions des houles. C'est dire que l'analyse temporelle des caractéristiques des houles à Saly ne montre aucune modification pouvant expliquer la dynamique actuelle érosive du littoral. Les figures 31 et 32 qui représentent les directions et les hauteurs annuelles indiquent une saison chaude de novembre à avril pendant laquelle les houles au large ont une incidence Nord à Nord-Ouest et une hauteur significative relativement importante. Une saison humide de mai à octobre pendant laquelle les houles sont orientées Sud-Ouest et sont globalement plus faibles (Egis, 2017).

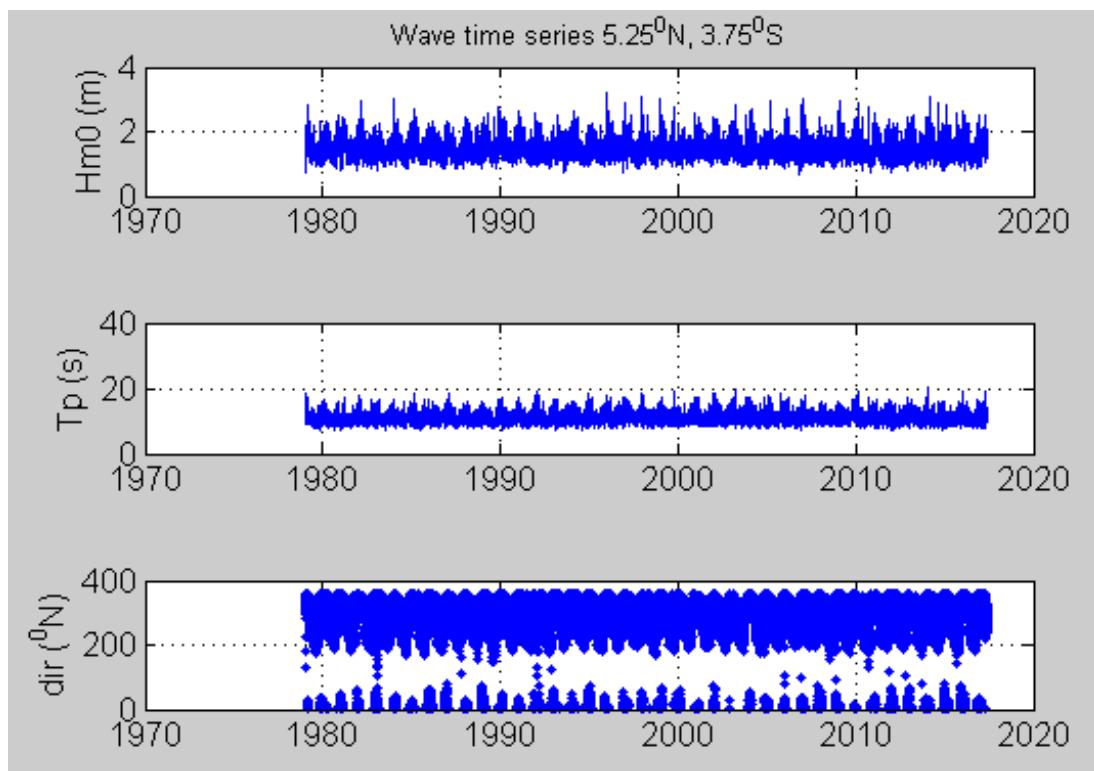


Figure 29 : Variations moyennes des séries temporelles de hauteurs de vagues ($Hm0$), de périodes (Tp) et de directions (dir) (1978-2016) le long de la côte de Saly (ERA-Intérim, <http://apps.ecmwf.int/datasets/>)
Séries temporelles des houles d'ERA Interim extraites à $5,25^{\circ}$ N et $3,75^{\circ}$ S

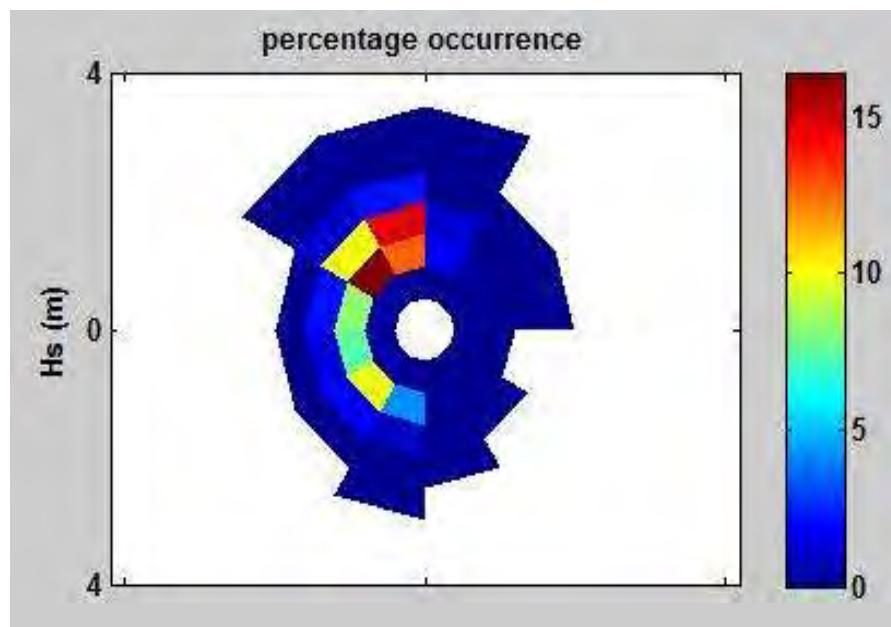


Figure 30 : Les fréquences des houles au large de la côte de Saly

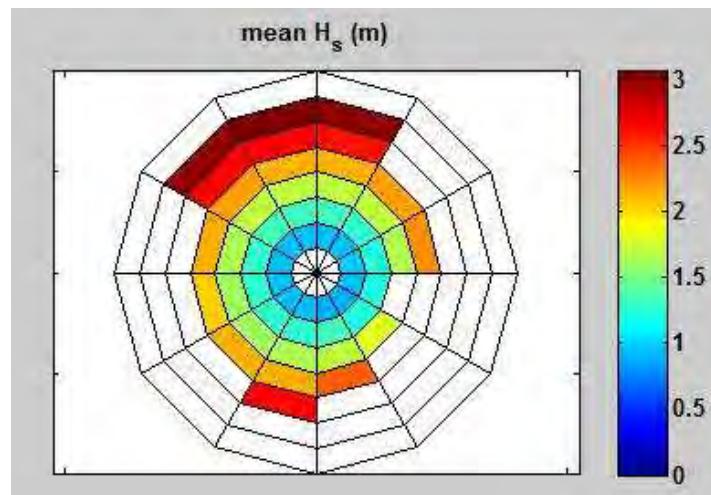


Figure 31: Hauteur moyenne significative des houles au large de la côte de Saly

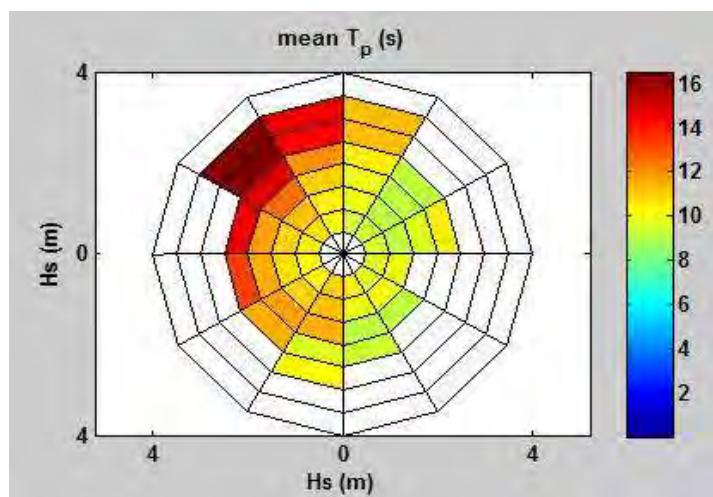


Figure 32 : Périodes moyennes des houles significatives au large de la côte de Saly

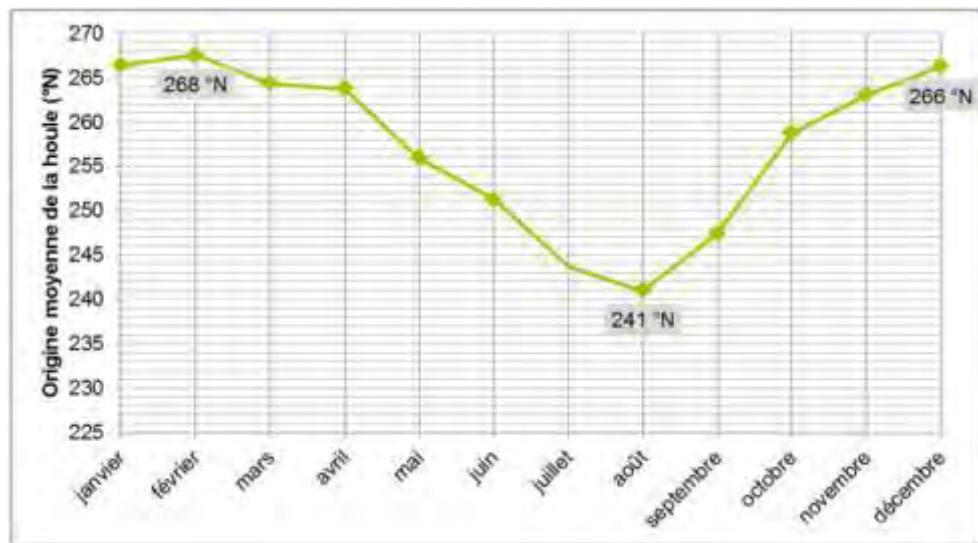


Figure 33 : Évolution saisonnière de la direction de la houle au large de la côte de Saly (Egis, 2017)

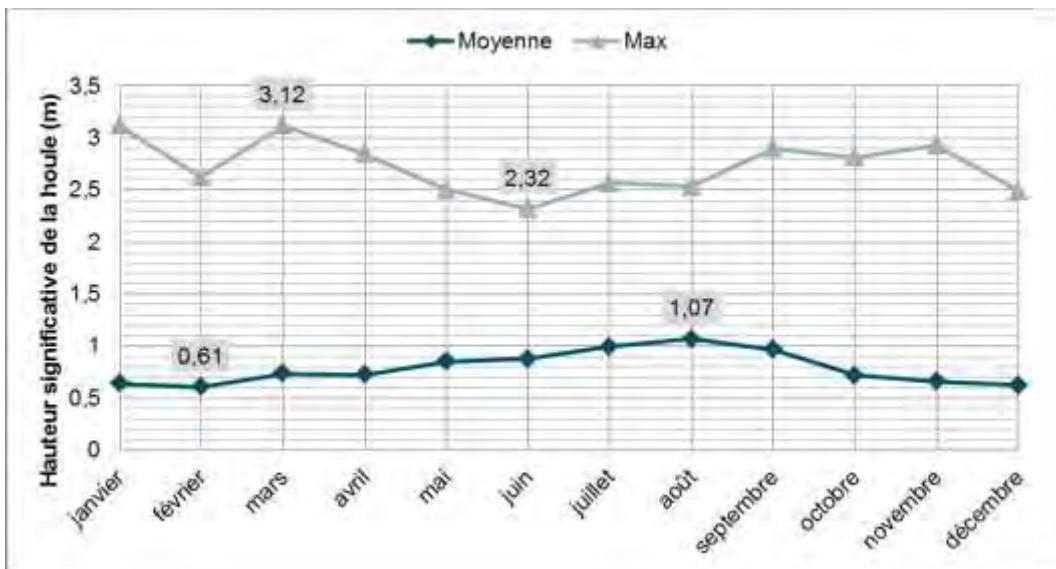


Figure 34 : Évolution saisonnière de la hauteur significative la houle au large de Saly (Egis, 2017)

Les hauteurs moyennes des houles significatives qui arrivent à Saly sont parmi les plus élevées de la Petite Côte (figures 33 à 34). Les houles à la côte sont supérieures à 0,6 m et la plupart du temps proches de 1,6 m (figures 29 à 30). L’angle d’attaque des houles par rapport au littoral de Saly est toujours compris entre 240 et 270°N contrairement aux baies de Hann ou de Rufisque où les angles sont plus faibles (figures 35 à 36). Ce qui témoigne de la diffraction que subissent les houles du Nord-Ouest qui arrivent sur le littoral de Saly en contournant la presqu’île du Cap Vert. L’analyse spatiale des caractéristiques des houles montre que Saly reçoit des houles avec des hauteurs plus élevées comparé aux littoraux situés un peu plus au Nord de la Petite Côte. Ces houles relativement plus élevées qui arrivent à Saly même si elles peuvent accentuer les phénomènes d’érosion, n’en serait pas l’origine car ces tendances d’évolution spatiale des hauteurs de houles existaient depuis 1979 bien avant le déclenchement des phénomènes d’érosion. Cependant les très fortes houles qui arrivent sur le littoral au moment des épisodes de tempêtes peuvent avoir des effets destructeurs sur la plage, le cordon littoral ou les infrastructures. L’énergie des vagues génère par ailleurs des courants de houle qui jouent un rôle important dans le transport sédimentaire littoral.

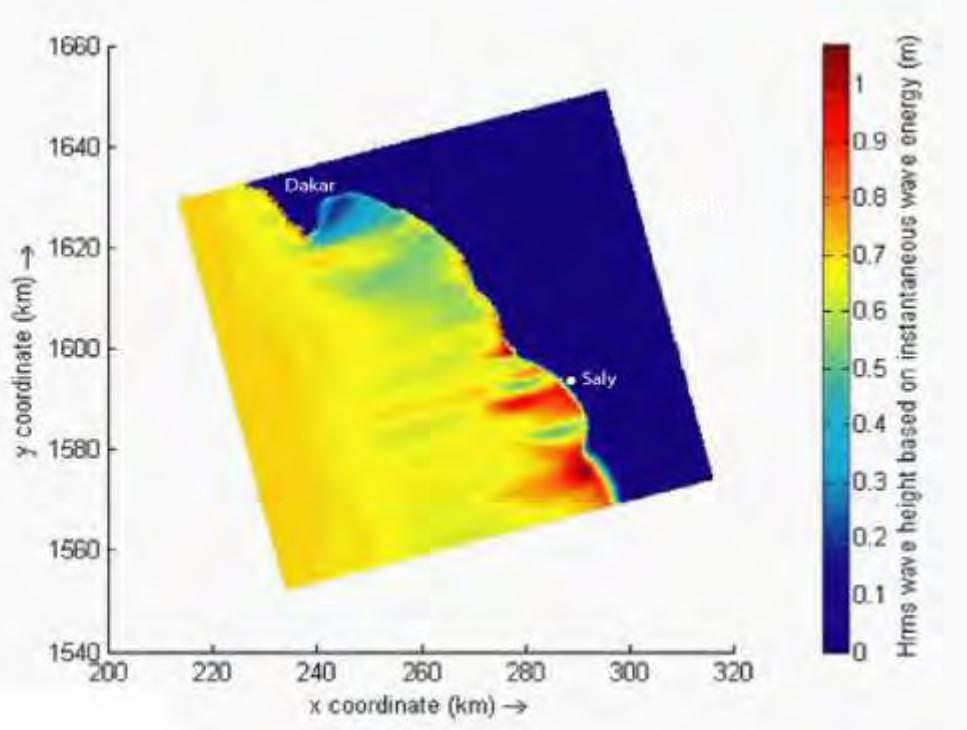


Figure 35 : Hauteurs moyennes des houles sur la côte de Saly

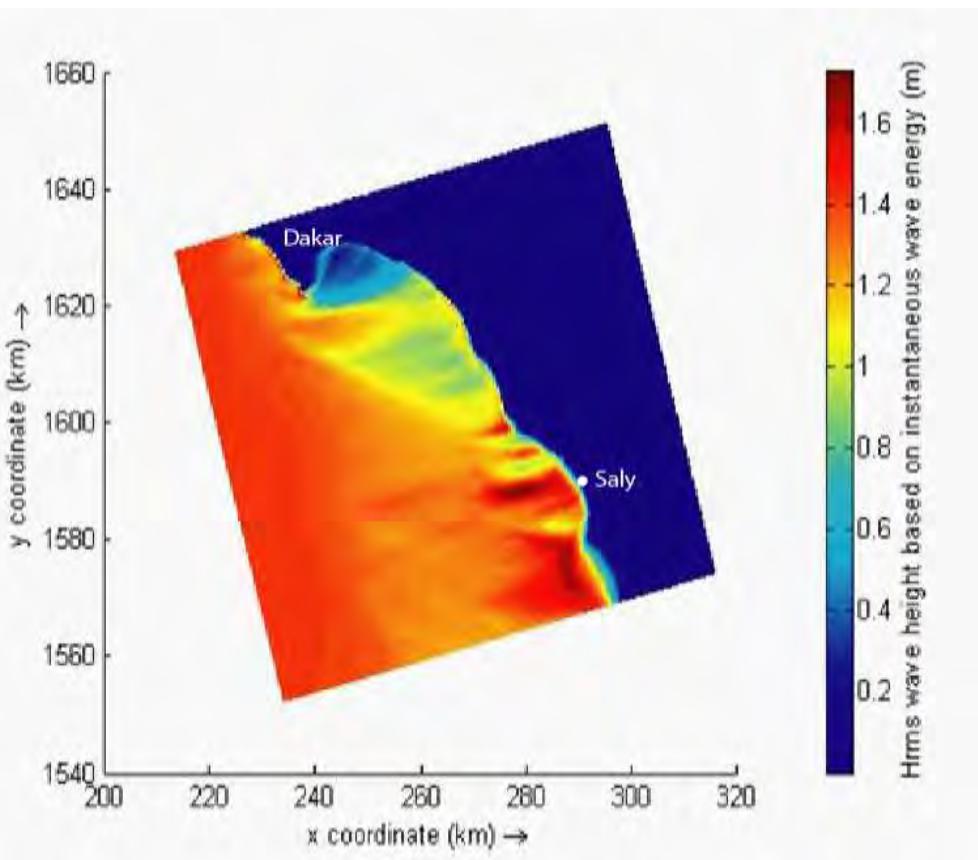


Figure 36 : Hauteurs moyennes des houles sur la côte de Saly

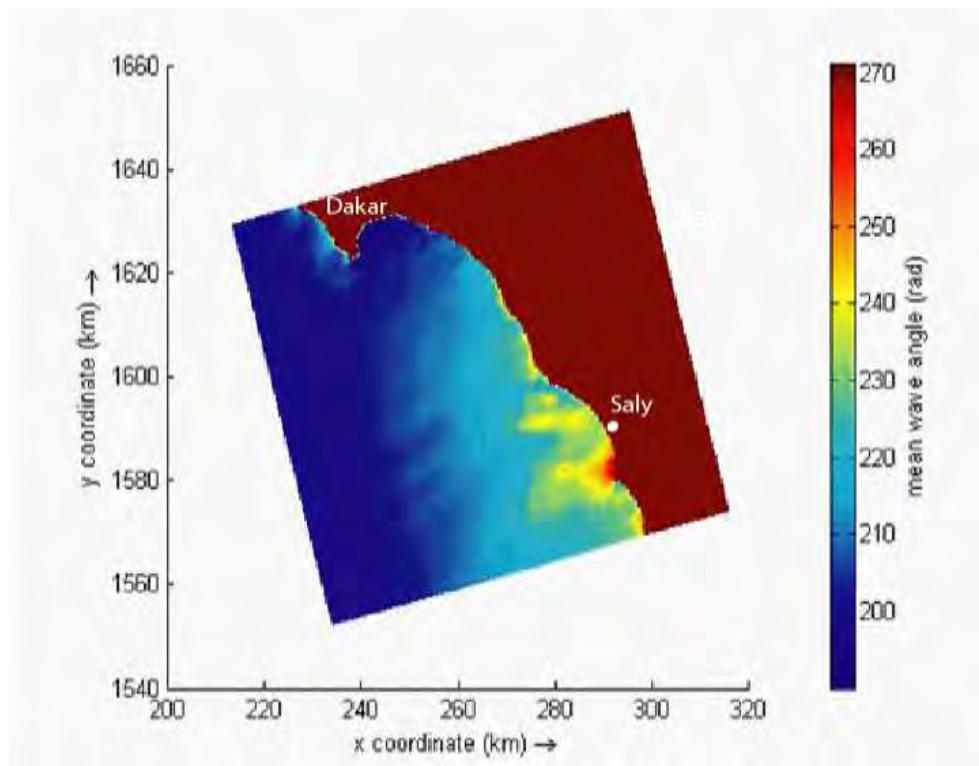


Figure 37 : Directions moyennes des houles au large de 200°N (Sud)

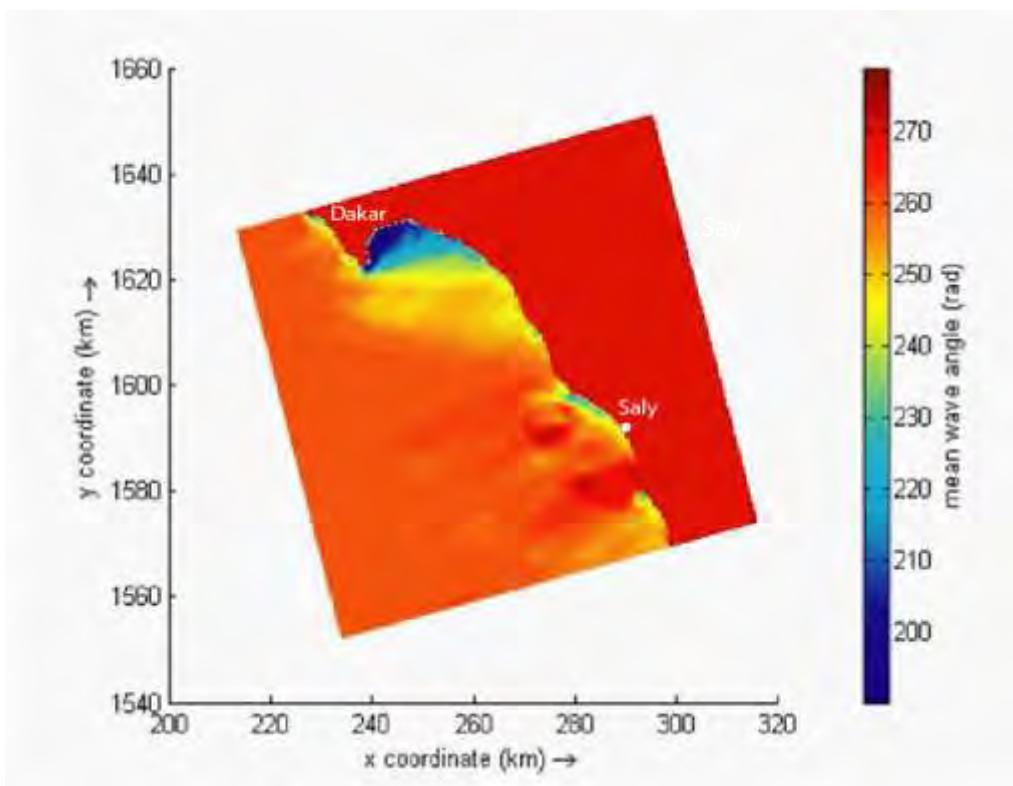


Figure 38 : Directions moyennes de houles au large de 270° N (Nord)

I.1.3. Action des courants

Il existe sur le littoral des courants généraux liés à la circulation des masses d'eau océanique, des courants de marée, des courants de houle et des courants de vents. Nous insisterons sur les courants générés par les houles, les courants de dérive et les courants sagittaux qui ont un rôle primordial dans le transport sédimentaire (Courtaud, 2000).

Les courants sagittaux se font dans la direction de propagation des houles et sont à l'origine des engrangements et démaigrissements de la plage selon les périodes de l'année. Il y a engrissement en période de houles de beau temps, les sédiments étant entraînés du large vers la plage par des vagues à faibles cambrures. En période de houle de tempête, il se produit un démaigrissement des plages avec le déplacement rapide des sédiments vers le large par des vagues à fortes cambrures. Sur le littoral de Saly, les courants sagittaux sont intrinsèques aux directions de houle dominantes du Nord et du Sud.

Les courants de dérive sont parallèles à la côte et naissent de l'obliquité des houles par rapport au rivage. Ces courants jouent un rôle important dans l'alimentation des plages en sables lorsque leur charge sédimentaire est importante. Lorsque la quantité de sédiments dont ils disposent est inférieure à leur capacité de transport, ils exercent une action érosive sur les côtes sableuses. Les courants de houle les mieux connus sur le littoral de Saly sont les courants de dérive littorale. Leurs vitesses peuvent atteindre 1 à 1.5 m/s. Les courants dominants sont générés par les houles du Nord et donc dirigés vers le Sud comme en atteste les accumulations et les érosions respectives en amont et en aval des structures perpendiculaires à la plage. Toutefois les houles de SW sont capables aussi de générer de tels courants mais dirigés en sens inverse, c'est-à-dire vers le Nord, et ceci pendant l'hivernage. D'après Turmine (2001), ce sont les houles de WSW-ENE qui donneraient les transports sédimentaires les plus importants, estimés entre 7500 et 186 500 $m^3.an^{-1}$. Ces courants déplacent les sédiments dans la zone de déferlement (Beach et Sternberg, 1992; Calliari, 1994; Courtaud, 2000). Ils créent des chenaux d'érosion longitudinaux, parallèles au rivage et aux isobathes (Blanc, 1973). Selon Blanc (1973), ils peuvent déplacer les sédiments enlevés du fond jusqu'à des distances supérieures à 2,5 kilomètres.

Les courants sagittaux et les courants de dérive ne constituent pas des sources d'érosion du littoral de Saly puisque les houles qui les génèrent n'ont pas connues de modifications spatio-temporelles significatives depuis 1978, bien avant le déclenchement des phénomènes d'érosion. L'action des courants sur l'évolution du littoral peut se manifester sur une section

du littoral au cours des épisodes de tempêtes pour ce qui concerne les courants sagittaux ou à court ou moyen terme pour le courant de dérive littorale.

II.1.4. Influence du niveau marin

L’élévation du niveau marin peut être à l’origine d’une accentuation des phénomènes d’érosion. Selon Paskoff (2001), le rehaussement du plan d’eau a une double conséquence : d’une part, il facilite la propagation de la houle vers le rivage en diminuant le freinage lié à la réfraction sur les petits fonds littoraux ; d’autre part, il permet aux vagues d’agir à un niveau plus élevé et avec une hauteur de déferlement plus grande. Ainsi le niveau marin a une influence sur l’action des houles et des courants induits. Il accroît ou réduit selon sa variation, hausse ou baisse, les effets des houles et des courants de houles. Par ailleurs, les côtes microtidales (cas du Sénégal) où les vagues libèrent toujours leur énergie au même niveau (marnage faible, inférieur à 2 m), sont plus vulnérables à l’érosion que les côtes macrotidales.

Les taux moyens d’élévation du niveau marin local établis à l’aide des données du marégraphe de Dakar pour ces cinquante dernières années seraient compris entre 1 et 3,4 mm par an, soit une moyenne de 1,4 mm par an (Niang Diop, 1995). Il faut toutefois signaler que les taux d’élévation du niveau marin récemment obtenus avec des données satellitaires sont nettement supérieurs avec une moyenne de 3 mm par an. En utilisant la moyenne d’élévation du niveau marin de 1,4 mm par an, nous pouvons estimer la hausse du niveau marin local à Saly entre 1943 et 2016 à 102,2 mm soit 10,22 cm. Durand et Heurtefeux (2006) ont proposé une formule utilisée par Suanez et *al.* (2007) pour évaluer le recul lié à l’impact de l’élévation du niveau marin sur les côtes basses de la plage du Vougot Guissény (Bretagne). La formule est la suivante :

$$R = r + [(E21 - E20) / P]$$

R = recul du trait de côte (m) ; r = vitesse connue du recul du trait en m/an ; E21 = valeur d’élévation du niveau marin pour 2050 ; E20 = valeur annuelle d’élévation du niveau marin au XXe siècle multipliée par la durée de la prévision, soit $1,4 \times 34 \text{ ans} = 47,6 \text{ mm}$; P = pente de l’estran en %.

Diadhiou, (2018) a utilisé cette formule de Durand et Heurtefeux (2006) pour évaluer le recul du trait de côte face à la montée de la mer à Joal. La valeur d’élévation du niveau marin prévue pour l’année 2050 est 10 cm pour les scénarios de Base, 19 cm pour les scénarios optimistes et 50 cm pour les scénarios extrêmes (Jevrejeva et *al.* (2012) de Rahmstorf (2007)

et Grinsted et al. (2009)). Les résultats montrent une vulnérabilité graduelle de la côte à l’élévation du niveau marin. Le recul maximal du trait de côte en 2050 atteint 0,81 m pour le scénario de base, 3,48 m pour le scénario optimiste et 14,14 m pour le scénario pessimiste. Nous avons avec la même méthode calculée les reculs prévisionnels du trait de côte dû à l’élévation du niveau marin au Nord et au Sud de Saly de 2016 à 2050 en utilisant les données recueillies sur le terrain en 2014. Les reculs prévisionnels dus à l’élévation du niveau marin à Saly du Nord au Sud sont résumés dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2 : Reculs prévisionnels dus à l’élévation du niveau marin à Saly

Zones littorales	Vitesse de recul du trait de côte	Pentes des estrans	Reculs prévisionnels des scénarios d’élévation du niveau marin		
			de base	optimiste	extrême
Zone nord	-0,39	6	0,39	0,41	0,46
zone médiane	-2,53	7,02	2,53	2,55	2,59
Zone sud	-1,53	9,27	1,53	1,54	1,57

Ces résultats montrent que pour l’horizon 2050, les parts de l’élévation du niveau marin sur le recul du trait de côte à Saly pour les scénarios extrêmes sont très faibles, de l’ordre de 3 à 3,4 %. L’élévation du niveau marin n’expliquerait pas les forts taux d’érosion obtenus ces dernières années sur certains segments du littoral de Saly. Autrement dit son influence sur les houles et les courants induits ne pourrait expliquer l’accentuation des phénomènes d’érosion signalés depuis 1989. Iare (1996), soulignait déjà que la montée lente du niveau marin ne provoque pas de problèmes littoraux majeurs à court et moyen terme. Mais, à long terme, elle aggrave le phénomène d’érosion marine et le recul du rivage.

II.2. Quantités de sédiments disponibles

Dans les zones semi-arides comme le Sénégal, la dégradation mécanique met à la disposition des agents éoliens et hydrodynamiques d’importantes quantités de sédiments qu’ils peuvent apporter au rivage. Des apports surtout sableux constituent sur le littoral des accumulations dunaires pouvant combler en partie le déficit sédimentaire lié aux départs de sédiments dans les secteurs en érosion.

II.2.1. Origine des sédiments

Un littoral reçoit des apports sédimentaires provenant des fleuves, des rivières, des vents, du plateau continental et des littoraux voisins (figure 37).

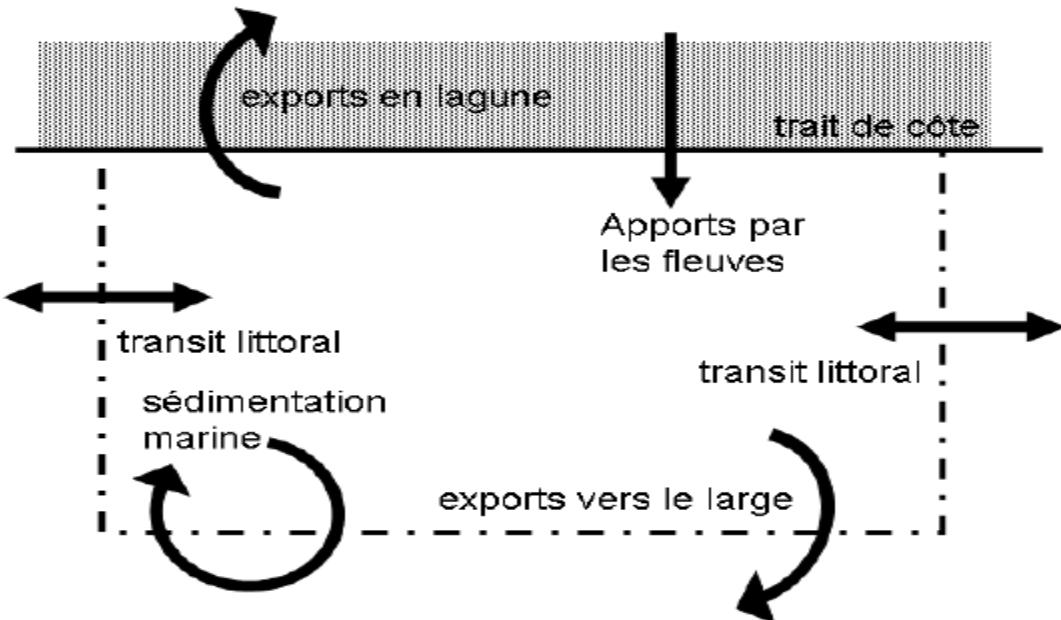


Figure 39 : Schéma des échanges sédimentaires à prendre en compte dans le bilan sédimentaire d'une portion de littoral (Leredde, 2011)

Sur la zone d'étude, la faiblesse du réseau hydrographique et la forte urbanisation réduisent fortement les apports de sédiments au littoral par les cours d'eau et les vents. Le fonctionnement du marigot Kirène a été fortement perturbé par les aménagements touristiques. Il ne reçoit plus d'eau venant de l'amont et ne peut non plus percer le cordon littoral occupé. Au Sud, le fleuve Saloum se distingue par une absence totale d'alimentation en eau douce pendant la plus grande partie de l'année. En plus, les phénomènes de marée et de salinité ont une forte influence sur le réseau hydrographique (Diaw, 1997). Tout ceci fait que les teneurs en sédiments relativement fins dans l'estuaire du Saloum sont très faibles. Au Nord, les apports en eau douce des rivières qui alimentent la lagune de la Somone sont faibles et temporaires. Depuis 1975, le débit maximal n'a jamais dépassé $10 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ à cause des barrages hydrauliques édifiés sur les courts supérieurs et moyens des rivières (Sakho, 2011). Les apports de sédiments par les vents, importants sur la Grande Côte où ils forment un massif dunaire, sont très faibles sur la Petite Côte voir négligeables.

Sur le plateau continental au large de Dakar et le long de la Petite Côte, on retrouve deux types de faciès (Masse, 1968). Des faciès terrigènes qui ont un pourcentage en fraction

terrigène supérieur à 50%. Ils sont représentés par des sédiments très grossiers (exemple : les galets) ou très fins (exemple : les sablons). Les matériaux grossiers sont de nature pétrographique variée, alors qu'au contraire, les matériaux fins sont presqu'exclusivement quartzeux. Les matériaux terrigènes se limitent à des profondeurs inférieures à 35 m. Les faciès biogènes ont un pourcentage en carbonate supérieur à 50%. Ils sont le plus souvent représentés par des sables moyens ou fins (Masse, 1968). Les matériaux carbonatés sont issus du remaniement des organismes testacés principalement calcaires. L'endofaune de mollusques est la source la plus importante de matériel biogène, à l'échelle du plateau continental. Avant 35 m de profondeur, les faciès biogènes se répartissent en fonction de l'hydrodynamisme et des biocénoses mais au-delà de cette profondeur la répartition des sédiments est liée à celles des biocénoses actuelles ou quaternaires (thanatocénoses). Ces faciès se sont souvent déposés dans des conditions hydrodynamiques différentes de celles qui règnent actuellement sur le plateau continental et sont donc mobilisables en direction de la plage.

Un apport de sédiments peut provenir également de l'érosion des littoraux voisins. Les sédiments érodés en un point sont transportés par les courants et déposés plus loin dans les zones où la capacité de transport des agents hydrodynamiques est réduite. C'est la dérive littorale qui est le principal agent responsable de ces apports littoraux. A l'échelle locale, une simple observation du littoral de Saly montre qu'un ouvrage perpendiculaire au rivage (épis, jetée etc) crée en amont une accumulation importante de sédiments apportés par la dérive littorale et juste en aval une érosion dont l'ampleur pourrait être liée à la longueur de l'ouvrage. A l'échelle régionale, le transit littoral est plus important le long du littoral nord où la dérive littorale mobilise entre 200000 et 1500000 m³ de sédiments par an selon Barusseau, (1980). Le long du littoral sud, à peine 10000 à 25000 m³ de sédiments alimentent le transit littoral.

II.2.2. Budget sédimentaire

Le rapport entre les apports et les départs de sédiments sur une section du littoral détermine son budget sédimentaire. En cas de déficit sédimentaire, le littoral évolue en faveur d'une érosion. Par opposition, un gain sédimentaire crée une accumulation sur le littoral. Du fait de la faiblesse du transit littoral, la Petite Côte connaît dans son ensemble un déficit sédimentaire essentiellement lié à des caractéristiques morphologiques. En reprenant le découpage de la partie nord de la petite côte en deux sous-ensembles de Niang-Diop (1995), le déficit sédimentaire est plus marqué entre Hann et Toubab Dialaw où la côte est plus

abritée par la presqu'île du Cap vert. Entre Toubab Dialaw et Pointe Sarène il se produit un remaniement important de sédiments et la dérive littorale se rechargeant progressivement reconstitue de petites baies entrecoupées de cap rocheux. L'observation montre le long du littoral de Saly, une alternance de plages en accumulation, de plages en érosion et de plages stables en relation avec les ouvrages de protection de la côte. C'est dire que le déficit sédimentaire à l'origine des phénomènes d'érosion de la côte à Saly se produit sur certaines sections du littoral, parfois même très localisés et pourrait être attribués à des activités humaines.

II.3. Facteurs anthropiques

Les activités humaines peuvent induire sur un littoral des changements sur les caractéristiques hydrodynamiques ou sur les quantités de sédiments disponibles. Le résultat correspond souvent à une modification de la dynamique littorale.

II.3.1. Modifications de l' hydrodynamisme littorale

L'élévation du niveau marin et les fortes houles peuvent être liées au réchauffement climatique dont l'homme est particulièrement responsable. Les changements dans les concentrations de gaz à effet de serre anthropiques, des aérosols et de la couverture végétale altèrent l'équilibre énergétique du système climatique. Le dioxyde de carbone est le plus important des gaz à effet de serre anthropique. Les concentrations de CO₂ (379 ppm) et de CH₄ (1774 ppm) en 2005 excèdent largement le domaine des variations naturelles enregistrées au cours des 65000 dernières années ([https://fr.wikipedia.org/wi/Niveau de la mer](https://fr.wikipedia.org/wi/Niveau_de_la_mer)). L'augmentation de la concentration de CO₂ est due principalement à l'utilisation de combustibles fossiles (pétrole et charbons). Ces fortes concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont à l'origine du réchauffement climatique qui s'est accéléré ces dernières années. Onze des douze dernières années (1995-2006) figurent parmi les années les plus chaudes depuis 1850. La tendance moyenne du réchauffement climatique sur 100 ans (1906-2005), publiée dans le quatrième rapport du Groupe Intergouvernemental pour l'Evolution du Climat (GIEC), est de 0,74°C et est supérieure à la valeur correspondante observée entre 1901 et 2000, publiée lors du troisième rapport (0,6°C) (GIEC, 2007). La montée du niveau de la mer est cohérente avec le réchauffement. En moyenne mondiale, le niveau de la mer a crû depuis 1961 avec une valeur moyenne de 1,8 mm/an et depuis 1993 de 3,1 mm/an. Le réchauffement climatique accentue aussi la fréquence des événements exceptionnels : coup de mer, tempêtes et surcotes. Au Sénégal, des événements périodiques extrêmes désastreux interviennent et soulèvent la question du risque dû à l'occupation parfois

non réglementée de la côte. En septembre 2009, les fortes houles et la marée de vives eaux ont entraîné la destruction de plages et d'infrastructures hôtelières. Les exemples de Rufisque en 2007 avec le déferlement des vagues sur la côte et la furie des trains de houles survenue sur toute la Petite Côte la nuit du 05 au 06 septembre 2015 causant des destructions de maisons et / ou des inondations temporaires à Hann, Mbao, Rufisque, Bargny, Sendou, Yène, Toubab Dialao, Mbour, Joal et Palmarin sont assez illustratifs (Diadhiou, 2018).

Les ouvrages de protection comme les brises lames et les épis créent d'une part sur le littoral des zones abritées aux caractéristiques hydrodynamiques particulières. Sur ces zones abritées les hauteurs des vagues diminuent, leurs périodes augmentent et leurs directions changent. Les vitesses des courants diminuent aussi dans ces zones plutôt calmes favorables à une accumulation. Si à long terme les épis provoquent des accumulations en amont, les brises lames quant à eux génèrent des salients ou tombolos du côté de la plage. Le but principal d'un brise-lame est de réduire le taux d'érosion du rivage en diminuant l'énergie des vagues qui atteignent le rivage par dissipation, réfraction ou réflexion des ondes de déferlement (Nordstrom, 2000). D'autres parts les ouvrages de protection créent des zones plus agitées caractérisées par des vagues beaucoup plus énergiques et la présence de courants de retours. Ces zones agitées sont souvent en érosion. Pour les épis et les brise-lames les phénomènes d'érosions se manifestent à leur extrémité aval dans le sens de la dérive littorale dominante. Les murs de protection modifient les caractéristiques de la houle au déferlement. Ils sont à l'origine de phénomènes de réflexion et d'affouillement. Au cours des tempêtes, les murs de protection littoraux sont submergés et la réflexion des vagues emporte les sédiments vers le large ou vers les littoraux voisins. C'est dire donc que les épis, les brise-lames et les murs de protection construits à Saly, peuvent modifier l'hydrodynamisme du littoral en créant sur certaines sections du littoral des zones calmes et sur d'autres des zones plus agitées.

II.3.2. Modifications des quantités de sédiments disponibles

Les activités humaines peuvent diminuer ou augmenter les apports sédimentaires sur le littoral modifiant les quantités de sédiments disponibles.

L'apport sédimentaire au rivage peut être diminué à la suite d'une forte urbanisation, d'une construction de barrages sur les fleuves et/ou d'une modification du transport littoral. A Saly, les habitations et les installations hôtelières par leur rôle d'écran réduisent fortement les apports éoliens de sédiments à la côte. La disparition du réseau hydrographique en l'occurrence la rivière qui alimentait le marigot kirène pendant l'hivernage annihile presque complètement les apports de sédiments au rivage par les cours d'eaux. Cela d'autant plus que

le Saloum et la Somone véhiculent des quantités négligeables de sédiments. Les structures perpendiculaires au rivage, comme les nombreux épis de Saly, interceptent en partie ou en totalité les sédiments transportés parallèlement au rivage par la dérive littorale. Des segments en aval de ces ouvrages de protection dans le sens de la dérive littoral, connaissent un important déficit sédimentaire ou à défaut des périodes de privations sédimentaires.

Les quantités de sédiments disponibles sur le rivage peuvent être diminuées par l'extraction de sables et de graviers dans le fleuve, sur les plages et dans des zones au large du rivage. L'extraction de sables de plage se fait un peu partout au Sénégal malgré l'existence de carrières officielles ouvertes. La carrière la plus proche de la zone d'étude est celle de la pointe Sarène, à Nianing, ouverte par arrêté interministériel n° 00175 du 15 janvier 1974, a une superficie de 0,5 km². En 2000, les prélèvements de sables coquilliers dans les carrières officielles utilisés pour la construction étaient estimés par le service des mines à 231380 m³. Des sites de prélèvement frauduleux sont aussi signalés au niveau de Saly, Mbour, au Nord du quai de pêche de Joal, à la pointe Sarène etc. En plus des prélèvements du cordon littoral, il y aussi le long de la petite côte, ceux de galets de basalte et de coquillages utilisés toujours dans le domaine de la construction. Il y a eu aussi l'exploitation sur la Petite Côte, à Djiffère, entre 1953 et 1961 de 209344 tonnes de minéraux lourds (ilménite, zircon et rutile) (Niang-Diop, 1994). Or lorsque ces prélèvements (sables, minéraux et coquillages) deviennent supérieurs aux apports sédimentaires d'une localité, ils induisent un déséquilibre des plages, déclenchant le processus d'érosion.

L'agglutination de sédiments assurant la stabilisation du rivage peut être perturbée par l'élimination de la végétation et les travaux de construction sur le rivage (plage) comme les murs de protection. Ces activités humaines sur le rivage empêchent la fixation des sédiments sur les plages, en les déifiant physiquement et en provoquant leur migration vers le large ou vers les littoraux voisins. Par contre les activités de constructions proches du rivage (cordon) comme les implantations humaines et les installations hôtelières ont pour effet de soustraire une partie du stock sédimentaire à l'action des houles et des courants. Une grande partie des quantités de sédiments disponibles sur le cordon littoral peut être fixée par les constructions proches du rivage. Il se produit alors sur le littoral un déficit sédimentaire car ce stock de sédiments immobilisé, ne contribue plus à l'équilibre des plages. Les agents hydrodynamiques pour combler ce déficit sédimentaire, sapent les bâtiments. Les deux UAT de Saly entièrement établies sur le cordon littoral large d'environ 500 m occupent une superficie globale de 5800000 m². Sachant que les dunes du cordon avant d'être arasées pour les besoins des constructions avaient des hauteurs égales environ à 5 m au-dessus du 0 hydrographique,

nous pouvons estimer les volumes de sédiments retenus sur le cordon dunaire par les aménagements touristiques de Saly en 2005. Le produit de la surface occupée par les UAT et de leur hauteur approximative donne un volume 29000000 m³ de sédiments. Ce chiffre déjà considérable ne prend pas en compte les surfaces occupées par les autres aménagements publics et les quartiers traditionnels. C'est dire qu'à Saly des quantités énormes de sédiments sont fixées par les constructions et donc soustraites de la dynamique littorale.

II.4. Dynamique littorale

Les littoraux sableux sont les plus dynamiques, par le rôle moteur joué par le forçage hydrodynamique et le caractère non cohésif des sédiments (Almar, 2009). L'hydrodynamisme et la disponibilité des sédiments déterminent la dynamique littorale. Les réponses des plages à une variation de forçage hydrodynamique ou de la quantité de sédiments disponibles se manifestent par une érosion et une accumulation.

II.4.1. Phénomène d'accumulation

Les zones en accumulation sont surtout signalées à Saly juste en amont des épis et en face des brise-lames. Ces accumulations qui peuvent se produire sur une courte période surtout pour les épis montrent une fois de plus l'impact exercé par les activités humaines sur l'évolution du littoral. Elles montrent aussi par ailleurs que les quantités de sédiments transportés par la dérive littorale Nord-Sud sont non négligeables, ceux-ci pouvant reconstituer rapidement les plages en amont des épis. Les brise-lames peuvent provoquer des accumulations dans leur zone abritée du côté de la plage sous la forme de tombolo et/ou de salient. Néanmoins le constat est que le littoral de Saly connaît un déficit sédimentaire dû probablement à des activités anthropiques. Même si les houles de beaux temps peuvent apporter encore des sédiments sur le rivage, une quantité importante de sédiment est immobilisée par les ouvrages de protection sur le rivage, une autre est bloquée par les ouvrages perpendiculaires au rivage comme les épis. C'est un littoral qui ne peut pas ensabler naturellement toutes ces plages. Un rechargeement de sable peut compenser temporairement le déficit sédimentaire. Même si une relocalisation des installations hôtelières semble difficile à envisager, du fait du coût financier qu'elle engendrerait, une minimisation des effets érosifs des ouvrages de protection côtière serait une solution très prometteuse aux problèmes d'érosion. Une optimisation des caractéristiques techniques des ouvrages de protection côtière (longueur, orientation, position etc.) permettrait de favoriser les phénomènes d'accumulation sur ce littoral sableux. Cependant des études minutieuses permettraient de connaître les insuffisances des ouvrages de protection côtière à l'origine de leur inefficacité.

II.4.2. Phénomène d'érosion

Les plages de Saly connaissent depuis 1989 des phénomènes d'érosion récurrents. Des pertes importantes de plages sont signalées juste en aval des ouvrages de protection dans le sens de la dérive littorale. Les houles sont des agents dynamiques importants du littoral surtout lorsqu'elles sont exceptionnellement fortes. La réponse de la plage à ce forçage est importante à différentes échelles temporelles, plusieurs kilos de sédiments (par mètre de plage) pouvant être transportés en quelques secondes par une seule vague déferlant sur la plage (Hughes et al. 1997; Masselink and Puleo, 2006), plusieurs tonnes de sédiments (par mètre de plage) déplacées en quelques jours lors d'une tempête (Russell, 1993; Aagaard et al. 2005). À Saly les données hydrodynamiques montrent qu'à la suite de chaque événement tempétueux la dérive littorale pouvait, avant le déclenchement des processus d'érosion (1989), rééquilibrer le profil de la plage car véhiculant aussi des quantités non négligeables de sédiments. Environ 10000 à 25000 m³ de sédiments peuvent être transportés le long de la côte en un an par la dérive littorale (Barusseau, 1980) soit 45000 tonnes sachant que la densité d'un sédiment sableux humide est de 1,8 t/m³ (Sakho, 2011). Les effets érosifs à l'échelle événementielle des fortes houles s'estompent à moyen et long terme au fur et à mesure sous l'action des effets accumulateurs de la dérive littorale et des houles de beaux temps. Autrement dit nous pensons qu'à Saly, avant 1989, l'action de la dérive littorale et des houles de beaux temps compensait d'une certaine manière celle de la houle de tempêtes. Ce littoral recevait principalement des sédiments provenant soit des littoraux voisins, véhiculés par la dérive littorale, soit du large représentés par des sables biogènes apportés par les houles de beaux temps. Les apports présentent des variations notables depuis l'aménagement de la station touristique, le déficit sédimentaire noté serait probablement dû à des activités humaines. Les actions anthropiques affectant le plus les quantités de sédiments disponibles à Saly sont celles fixant les sédiments sur le cordon littoral comme l'implantation humaine et les installations hôtelières. Elles immobilisent une grande quantité de sédiments qui devrait servir à rééquilibrer les plages à la suite des épisodes de tempêtes. La fixation sur le cordon littoral de ce stock sédimentaire a pu créer à Saly un déséquilibre des plages à l'origine de leur érosion. Celle-ci, une fois enclenchée peut être accélérée par endroit par des ouvrages de protection mal conçus avec surtout des épis ne respectant pas des espacements et des longueurs adéquates. Ce scénario qui expliquerait l'origine et l'accentuation des phénomènes d'érosion à Saly mérite toutefois d'être précisé et soutenu par des données quantitatives et qualitatives sur l'évolution du littoral

Conclusion partielle

L'analyse des principaux facteurs d'évolution du littoral de Saly montre que les agents hydrodynamiques ne seraient pas à l'origine des phénomènes d'érosion notés à Saly depuis 1989, même s'ils représentent les moteurs de la dynamique littorale. Les actions des houles et des courants marins ne connaissent pas de variations significatives depuis 1979. L'influence du niveau marin sur ces agents hydrodynamiques qui pourrait engendrer une érosion de la côte est très faible.

Les quantités de sédiments disponibles sur le littoral et pouvant équilibrer les plages en cas d'érosion sont faibles et cela non seulement à cause des apports sédimentaires réduits mais aussi surtout à cause des quantités importantes de sédiments fixés sur le cordon littoral par les implantations humaines et les installations hôtelières. C'est dire que le littoral connaît un déficit sédimentaire parfois très localisé qui peut être attribué à des activités humaines. Ainsi les actions anthropiques modifient l'hydrodynamisme littoral créant des zones agitées et des zones plus calmes. Elles diminuent aussi les apports de sédiments à la côte, les prélèvent ou les fixent sur le cordon dunaire.

Le résultat sur la dynamique littorale est une alternance de zones en accumulation et de zones en érosion en relation avec les ouvrages de protection de la côte. Les accumulations artificielles se localiseraient surtout en amont des épis ou en face des brise-lames. Les phénomènes d'érosion récurrents sont signalés sur les plages n'ayant pas reçus récemment des structures de protection et en aval des épis. L'érosion des plages de Saly a pu être déclenchée par la fixation des quantités importantes de sédiments sur le cordon littoral par des actions anthropiques. Puis il se serait accentué à cause des tentatives inadéquates de protection du littoral notamment par des épis.

CHAPITRE III. EVOLUTIONS HISTORIQUE DE LA LIGNE DE RIVAGE ET MORPHOSEDIMENTAIRE DU LITTORAL

Il existe aujourd’hui plusieurs méthodes dans la recherche sur l’évolution des littoraux. Trois approches se distinguent pour les méthodes largement utilisées dans le monde. La première approche regroupe les méthodes qui utilisent des données mesurées sur le terrain ou sur des documents illustratifs (cartes, photos aériennes, images aériennes, MNT et vidéos). Ce sont des méthodes plus anciennes qui donnent actuellement, grâce à la technologie de l’information et à l’ordinateur, des résultats très réalistes. Le degré de précision de ces méthodes repose en grande partie sur celle des appareils de mesure, des méthodes de traitement et d’analyse utilisées. Il s’agit entre autres des méthodes qui utilisent des mesures topographiques, bathymétriques, climatologiques, hydrographiques, océanographiques, sédimentologiques, statistiques et des méthodes de télédétection utilisant des mesures sur des photos aériennes, des images satellitaires, ou des images vidéo. La deuxième approche regroupe les méthodes utilisant des données des modèles physiques ou mathématiques dont le développement est plus récent. En raison de la nature complexe des processus hydrodynamiques côtiers, les résultats des recherches sur les modèles physiques ont une portée limitée en espace ainsi qu’en temps (Pham, 2012 *in* Than, 2015). Ces méthodes sont souvent coûteuses. Les modèles numériques permettent une simulation plus détaillée des phénomènes, plus de réalisme et une plus longue période de simulation. Ces deux premières approches présentent des liens car les mesures sur le terrain sont utilisées comme données d’entrées dans la modélisation. La troisième approche regroupe les méthodes intégrées d’analyse utilisant à la fois des données de terrain et des données de modèles élaborés. Elle permet d’examiner la relation entre les résultats des différentes méthodes de recherche pour trouver les règles, l’orientation générale. Cette méthode est particulièrement importante lors du choix des résultats ou d’une solution de protection (Than, 2015). Dans cette thèse nous utilisons cette approche à différentes échelles de temps. A l’échelle pluriannuelle l’interprétation de photos aériennes, d’images satellitaires et de modèles d’évolution permettent de suivre l’évolution historique de la ligne de rivage. A l’échelle annuelle des profils topographiques et l’analyse d’échantillon de sédiments permettent de connaître l’évolution morpho-sédimentaire du littoral à court et moyen terme.

III.1. Méthodes d’étude de l’évolution de la ligne de rivage

Les sources, les caractéristiques et les méthodes de traitement des données numériques nécessaires à l’étude de l’évolution de la ligne de rivage sont présentés dans cette partie.

III.1.1. Acquisition des données numériques

Les données disponibles comportent des photographies aériennes et des images satellitaires. Il s'agit des photos aériennes de Saly prises en 1954, 1978 et 1989 mais aussi des images satellitaires des années 2003, 2007 et 2016 (tableau 3). Ces images et photos ont été obtenues auprès du Centre de Suivi Ecologique (CSE) et de la Direction des Travaux Géographique et Cartographique (DTGC). Le choix des dates a été motivé par la disponibilité des supports numériques (photos aériennes et images satellitaires), leur précision et aussi par l'évolution socio-économique de la station balnéaire de Saly. Les activités touristiques étant lancées en 1983, les photos aériennes de 1954 et 1978 permettent d'appréhender l'évolution littorale antérieure aux activités touristiques. La photo aérienne de 1989 et les images satellitaires de 2003, 2007, 2016 permettent de voir l'impact de la forte anthropisation sur la dynamique littorale.

Tableau 3 : Caractéristiques des supports numériques utilisés

Types	Dénomination ou référence	Echelle ou résolution	Numéro du cliché	Dates de prise de vue
P H O T O S	IGN AOF 1954- 079	1/50000	104	Février-mars 1954
	78. ND28 – XIII – XV / 600	1/60000	163	Décembre 1978
	CT SGN JICA	1/60 000	L25 N°000001	15 mars 1989
I M A G E S	SPOT	5 m	/	2003
	Quick Bird	1/10000	281597 ; 279589 ; 273597	2007
	SENTINEL	10 m	/	10 octobre 2016

III.1.2.Traitement des supports numériques

Les images satellitaires et les photos aériennes utilisées ont été géoréférencées dans le même système de cordonnées (WGS 84 UTM 28N) avec au minimum 10 points de contrôle obtenus à partir de l'image la plus récente 2016 (Moore, 2000). Dans l'environnement microtidal de Saly, la ligne de rivage considérée sur les images est celle de la limite des hautes mers moyennes car elle est très nette, continue et facilement reconnaissable sur l'ensemble des images. Les différentes lignes de rivage des images et des photos ont été digitalisées à l'aide d'ArcGIS. Une ligne de base (baseline) a été créée Onshore et l'extension

d'ArcGIS le Digital Shoreline Analysis System (DSAS) 4.3 de Thieler et al 2004 a permis de générer des transects distants de 50 m et perpendiculaires et ensuite de calculer les taux d'évolution de la ligne de rivage en utilisant la méthode EPR (End Point Rate) qui ne nécessite que deux lignes de rivage pour faire le calcul des taux (figure 38). La méthode EPR a l'avantage de faciliter ainsi les calculs mais présente toutefois un inconvénient majeur car elle ignore les variations cycliques de l'évolution de la ligne de rivage entre les deux dates considérées (Crowell et al, 1997; Dolan et al, 1991).

Plusieurs méthodes existent pour déterminer la marge d'erreur dans le calcul de l'évolution de la ligne de rivage. Dans cette étude, les estimations d'erreurs basées sur les formules de Hapke et al. (2010) ont été utilisées en tenant compte de trois termes d'incertitude : l'incertitude de géoréférencement (U_g), l'incertitude de digitalisation (U_d), et l'incertitude des variations moyennes de la marée (U_t).

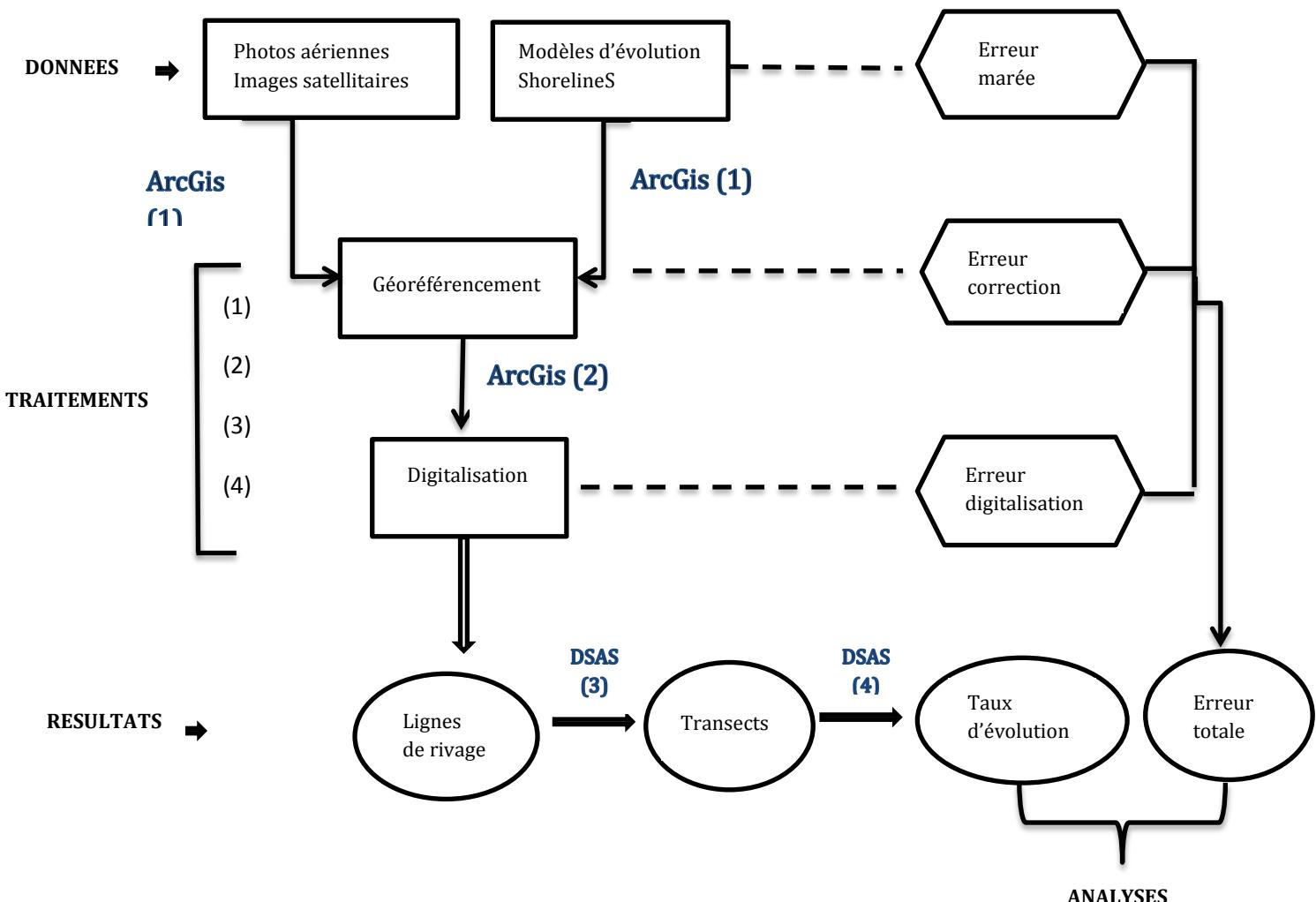


Figure 40 : Organigramme des méthodes utilisées pour déterminer les taux d'évolution de la ligne de rivage

Les images ont été corrigées en utilisant un polynôme de premier ordre avec une erreur moyenne quadratique ou Root-Mean-Square Error (RMSE) de 0,3 m. Cette erreur multipliée par la résolution donne l'incertitude associée à la correction géométrique en mètre (Faye, 2010). L'erreur liée à la marée a été calculée à partir des profils de plages levés en 2014. Pour cela nous avons supposé que dans cet environnement microtidal de Saly, les variations interannuelles de la marée sont négligeables. Ensuite les variations de la marée pendant les périodes de fortes houles où certains profils de plage ont été levés ont été aussi exclues. Après ces hypothèses, l'erreur moyenne liée à la variation de la marée obtenue à partir des profils au cours de cette année 2014 est de 11 m.

L'incertitude totale pour chaque position de rivage (U_p) et l'erreur moyenne sur chaque période étudiée ont été données par équations ci-dessous:

$$U_p = \sqrt{U_g^2 + U_d^2 + U_t^2} \quad UE = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}}{\text{year 2} - \text{year 1}}$$

U_1 et U_2 sont les erreurs totales de la position de la ligne de rivage pour chaque année.

Le tableau 4 suivant donne les erreurs associées aux données numériques utilisées dans cette étude. Les erreurs liées à la position des lignes de rivage varient entre 11 et 11,44 m. La période 1954-1989 présente une erreur moyenne plus faible de 0,44 m/an alors que la période 1989-2016 présente une erreur moyenne plus élevée de 0,54 m/an.

Tableau 4 : Erreurs associées aux supports numériques utilisés

Supports numériques	Photo 1954		Photo 1978	Photo 1989	Image 2003	Image 2007	Image 2016
Inceritudo de géoréférencement (U_g)	0,32		0,42	0,75	1,5	0,36	3
Incertitude de digitalisation (U_d)	1		1	1	1	1	1
Incertitude de marée (U_t)	11		11	11	11	11	11
Incertitude total de la ligne de rivage (U_p) en m	11,04		11,05	11,07	11,14	11,05	11,44
Erreur moyenne sur chaque période en m/an	1954-1978	1978-1989	1954-1989	1989-2003	1989-2007	2003-2016	1989-2016
	0,65	1,42	0,44	1,12	0,86	1,22	0,58

III.2. Méthodes de détermination des caractéristiques topographiques

Il s'agit plus précisément de levés topographiques qui ont permis de tracer des profils de plage du littoral.

III.2.1. Levés topographiques

Le matériel topographique est constitué d'un niveau optique, d'un trépied, d'une mire et d'un ruban (Photo 4). 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 côté, à partir duquel commence le profil et un repère lointain stable (mur de clôture, maison, hôtel, résidence 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 porte-mire 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 (Ndour, 2015).



Photo 4 : (A) Le matériel topographique ; (B) Le porte-mire

Pour connaître l'évolution morphologique du littoral à court terme, 09 profils de plage, 04 (P1 à P4) sur le secteur Nord-Ouest et 05 (P5 à P9) sur le secteur Sud-Est (figure 39), ont été levés mensuellement pendant un an (décembre 2013 à décembre 2014). 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 plus facilement à la zone de déferlement.

Le profil P1 se situe entre les hôtels Baobolong et la Résidence du port, le profil P2 entre les hôtels Obama et Baobolong, le profil P3 à l'hôtel Cristalline et le profil P4 se situe à l'hôtel Safari, juste en amont du long épi. Le profil P5 se situe à l'hôtel Paradis, juste en face des brise-lames, le profil P6 à Saly Coulang, le profil P7 à l'hôtel Saly Mer, le profil P8 à l'hôtel Cocotier et le profil P9 se situe au quartier traditionnel de Saly Niakh-Niakal (figure 39 ci-dessus).

III.2.2. Tracé des profils de plage

Les profils sont tracés grâce à un programme informatique, PROFILER 3.0, en utilisant une échelle relative. Le zéro, tant vertical (altitude) qu'horizontal (distance), est constitué par le repère arrière fixe de chaque profil. Ainsi sur les profils obtenus, l'axe des abscisses correspond à la distance cumulée entre les positions de la mire et le repère arrière fixe et l'axe des ordonnées correspond à l'altitude du point sur lequel la mire est positionnée par rapport au zéro du repère arrière fixe.

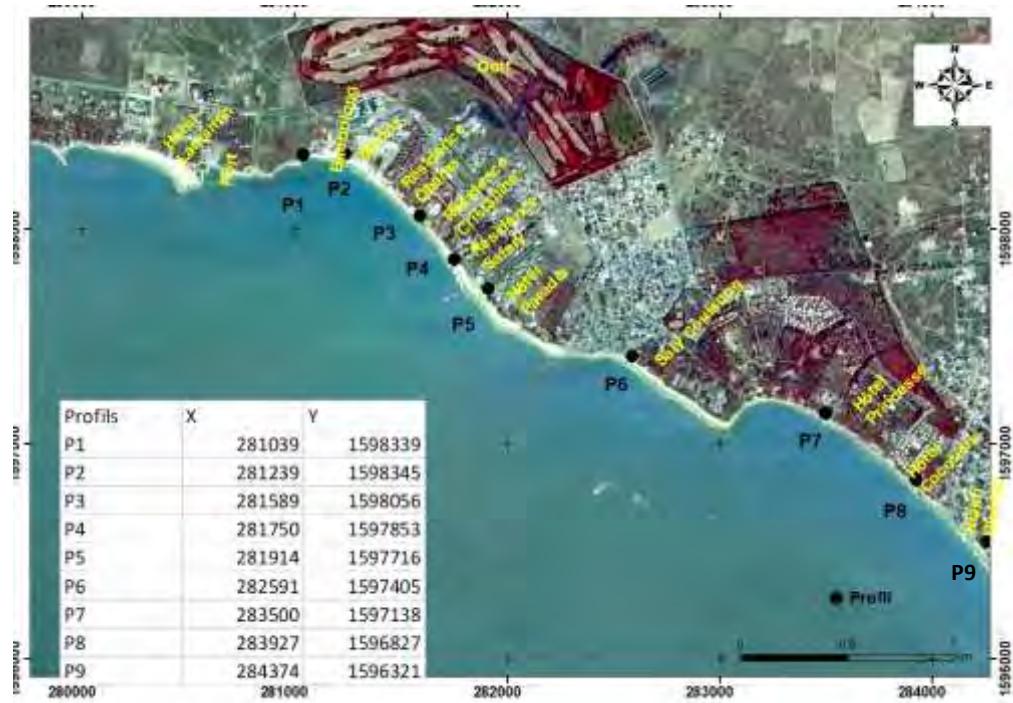


Figure 41 : Positions des repères arrière fixes des différents profils de plage

Les caractéristiques morphologiques des profils comme les largeurs et les pentes sont déterminées par PROFILER. La forme des profils est déduite de leur analyse comparative. La terminologie de Sonu et Van Beek (1971) qui distinguent trois grandes formes (concave, rectiligne, et convexe, avec ou sans berme) est utilisée.

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 mètre (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 des limites, mais néanmoins permettent d'avoir une idée d'ensemble des mouvements verticaux affectant un profil donné (Ndour, 2015).

III.3. Méthodes de calcul des paramètres sédimentologiques

Un prélèvement d'échantillons de sédiments et leur traitement au laboratoire ont permis de déterminer les indices granulométriques du littoral de Saly au cours de cette période d'étude.

III.3.1. Prélèvement des échantillons

Des prélèvements ont été effectués une fois tous les deux mois (bimestriels) sur les différentes unités morphologiques de chaque profil : haute plage, mi-estran, bas estran (mer) et déferlement. De décembre 2013 à décembre 2014, 216 échantillons de sédiments ont été prélevés sur le littoral. 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.

III.3.2. Traitement des échantillons

Au laboratoire de Sédimentologie et de Biostratigraphie du Département de Géologie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, les sédiments prélevés sur le terrain sont soumis à un lavage suivi d'une décarbonatation et d'un tamisage. Puis les poids des refus des tamis ont subi un traitement informatique pour déterminer les indices granulométriques.

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 et pesés à nouveau. Les pourcentages de carbonates (CaCO_3) sont calculés par la formule suivante :

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{150 - \text{poids après attaque}}{150\text{g}} \times 100$$

Le tamisage à sec des sédiments est effectué sur une colonne de 16 tamis (50 à 1600 µm) de norme AFNOR (série de raison $10\sqrt{10}$). Le refus de chaque tamis est récupéré et pesé avec une balance de précision (au milligramme près). Les poids des refus de chaque échantillon ainsi obtenus ont été saisi dans le programme GRADISAT. Ce dernier donne un ensemble de statistiques sur la distribution de la taille des grains et l'analyse des sédiments non consolidés par tamisage ou granulomètre laser. Dave Thornley et John Jack de l'Institut de recherche postdoctorale en sédimentologie de l'Université de Reading (Royaume-Uni) et du département de géologie de l'Université Royal Holloway de Londres (Royaume-Uni) sont à l'origine du développement de ce programme (Blott, 2000). GRADISAT calcule automatiquement les quartiles, détermine les indices granulométriques de Folk et Ward et donne une description physique des sédiments.

Les indices de Folk et de Ward (1957) déterminés par GRADISAT sont : la moyenne, les coefficients de classement (sorting index), d'asymétrie et l'indice d'acuité (tableau 5). Il faut rappeler que ces indices ne s'appliquent qu'à des sédiments unimodaux. Pour les sédiments plurimodaux, on se limitera à donner les modes et les pourcentages.

Tableau 5 : Formules et échelles de Folk et de Ward (1957)

Moyenne	Sorting	Skewness	Kurtosis		
$Mz = \frac{Q_{16} + Q_{50} + Q_{84}}{3}$	$Sig = \frac{Q_{84} - Q_{16}}{4} + \frac{Q_{95} - Q_5}{6.6}$	$Sk = \frac{(Q_{16} + Q_{84}) - 2Q_{50}}{2(Q_{84} - Q_{16})} + \frac{(Q_5 + Q_{95}) - 2Q_{50}}{2(Q_{95} - Q_5)}$	$K = \frac{Q_{95} - Q_5}{2.44(Q_{75} - Q_5)}$		
Sorting (Sig)	Skewness (Sk)		Kurtosis (K)		
Très bien classé	< 0,35	Dominance des éléments très fins	+0,3 à +1	Très platikurtique	< 0,67
Bien classé	0,35 à 0,50	Dominance des éléments fins	+1 à +0,3	Platikurtique	0,67 à 0,90
Moyennement bien classé	0,50 à 0,70	Symétrique	+0,3 à -0,1	Mésokurtique	0,90 à 1,11
Moyennement classé	0,70 à 1	Dominance des éléments grossiers	-0,1 à 0,3	Leptokurtique	1,11 à 1,50
Mal classé	1 à 2	Dominance des éléments très grossiers	-0,3 à -1	Très leptokurtique	1,50 à 3
Très mal classé	2 à 4			Etrêmement leptokurtique	> 3
Extrêmement mal classé	> à 4				

- La moyenne appelée aussi grain moyen, reflète la taille moyenne des sédiments et permet d'apprécier les conditions de dépôt (Diaw, 1997). Elle donne une idée sur l'énergie du milieu (Reineck et Singh, 1975). Cependant, elle est influencée par la granulométrie du sédiment source (Sahu, 1964 ; Folk, 1966). Si l'échantillon est unimodal, le nom attribué à un sédiment est généralement défini par sa moyenne (Folk et Ward, 1957) (tableau 6). La médiane, appelée P50 ou Ø50 correspond à la taille des particules pour une masse cumulée de 50 % de sédiments.

Tableau 6 : Classes granulométriques utilisées dans GRADISAT (modifié à partir de Udden, 1914 et Wentworth, 1922)

Taille des grains		Termes de description
phi	μm	
-1	2000	Graviers
0	1000	Très grossiers
1	500	Grossiers
2	250	Moyens
3	125	Fins
4	63	Très fins
		Silt

- **Le coefficient de classement ou Sorting Index (SO)** correspond à un écart-type et renseigne donc sur la dispersion d'une courbe granulométrique. Il est aussi appelé l'indice de tri ou coefficient de dispersion des sédiments. Il permet de déterminer le degré de classement des sédiments.
- **Le coefficient d'asymétrie ou Skewness (Sk)** permet de voir l'abondance des particules fines ou grossières par rapport à la moyenne, et de mesurer la symétrie de la distribution granulométrique. Il varie entre -1 et +1.
- **L'indice d'acuité ou kurtosis (K)** 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. 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.

III.4. Evolution historique de la ligne de rivage de 1954 à 2016

Les taux d'évolution des lignes de rivage de 1954 à 2016 sont présentés dans cette partie. Cette évolution est étudiée pour une première période comprise entre 1954 et 1989 puis pour une deuxième période qui s'étend de 1989 à 2016. Le littoral de Saly a été subdivisé en 5 segments en tenant compte des taux d'évolution.

III.4.1. De 1954 à 1989

Les taux d'évolution EPR de la ligne de rivage entre 1954 et 1978 montrent que tout le littoral de Saly est en accumulation au cours de cette période. Les taux sont toutefois plus élevés sur les segments 1 et 2 au Nord (1,33 et 1,26 m/an) que sur les segments 4 et 5 au Sud de Saly (0,39 et 0,93 m/an) (figure 40 et 41). Pour la période 1978-1989 les mêmes tendances se poursuivent, le littoral étant toujours en accumulation. Les taux d'accumulation qui sont très élevés sur les segments au Nord de Saly, diminuent fortement vers le Sud. De 2,73 m/an sur le segment 1, on passe à un taux très faibles de 0,46 m/an sur le segment 4. Les segments 3 et 5 sont relativement stables. Le littoral de Saly connaît ainsi au cours de cette première période, 1954-1989, une accumulation généralisée avec une diminution progressive des taux du Nord vers le Sud.

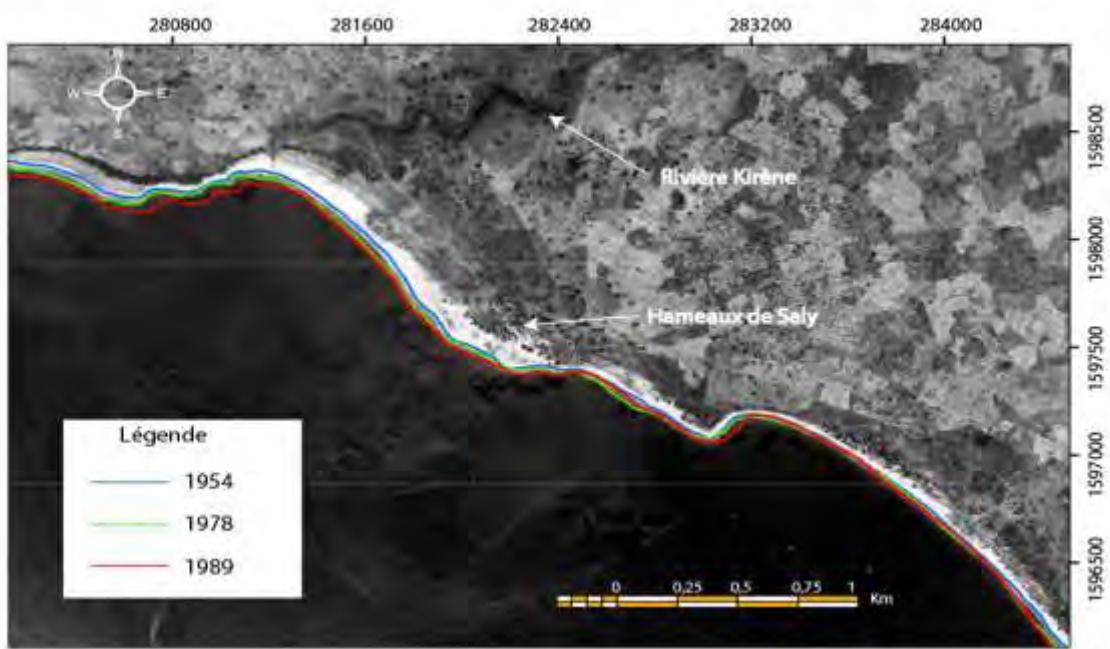


Figure 42: Evolution de la ligne de rivage de 1954 à 1989



EPR Segment	S1	S2	S3	S4	S5	M
1954-1978	1,33	1,26	0,85	0,39	0,93	0,97
1978-1989	2,73	2,10	-0,03	0,46	-0,10	1,04
1954-1989	1,77	1,52	0,57	0,41	0,60	0,97

Figure 43: Taux d'évolution de la ligne de rivage entre 1954 à 1989

Cette accumulation généralisée serait due à une évolution naturelle du littoral de Saly qui avant 1989 n'était pas fortement urbanisé. Ceci surtout entre 1954 et 1978 avant la mise en place des installations hôtelières. Les quelques hameaux qui constituaient à cette période le village de Saly ne perturbaient pas l'évolution naturelle du littoral qui connaissait presque sur tous ces segments des phénomènes d'accumulation. De 1978 à 1989, les taux d'accumulation augmentent sur les segments 1, 2 au Nord et diminuent sur les segments 3 à 5 au Sud. Cette évolution pourrait être liée au développement de l'unité d'aménagement touristique Sud (UAT). Plusieurs établissements hôteliers sont mis en place au cours de cette période : Palm Beach (1981), Savana (1983), Saly Hôtel (1985) et Bougaivilliers (1987). Le secteur Sud-Est ainsi artificialisé connaît une diminution de ces taux d'accumulation contrairement au secteur Nord-Ouest où le fonctionnement plus naturel provoque une accentuation des taux d'accumulation.

III.4.2. De 1989 à 2016

Cette période a été divisée en plusieurs phases : 1989-2003 ; 1989-2007 et 2003 2016. Entre 1989 et 2003 les taux d'évolution montrent que tous les segments du littoral de Saly sont en érosion. Les taux d'érosion sont plus élevés sur les segments au Nord (-2,61 ; -3,42 m/an) que sur les segments au Sud (-0,76 ; -1,41 et -0,98 m/an) (figures 42 et 43). Le littoral de Saly connaît durant cette période une érosion généralisée qui pourrait être liée à la forte anthropisation. En effet la période 1989-2003 est marquée par un développement fulgurant des activités touristiques. Des nouveaux établissements hôteliers et de nombreuses infrastructures touristiques avec en particulier un port de plaisance et un golf sont mis en place à partir de 1994. Les unités d'aménagement touristiques se développent vers la partie nord de plus en plus menacée. Les activités de construction sur la plage immobilisent une partie des sédiments qu'elles empêchent d'être utilisée comme stock régulateur. Ceci crée un déficit sédimentaire car les pertes temporaires de sédiments dues aux agents hydrodynamiques ne sont plus compensées par les sédiments disponibles.

Pour certains résidents, l'érosion généralisée au Sud est accentuée par la fermeture de l'embouchure de la lagune de Kirène due à la construction d'un golf et d'hôtels. En effet, cette lagune avec un bassin versant de 53,5 km³ recevait des eaux marines durant les périodes de fortes houles lorsque la mer submergeait le cordon littoral. Depuis sa fermeture, les eaux marines submergent durant les épisodes de tempêtes ou de fortes marées les habitations proches de l'entrée du chenal, de plus il n'y a plus d'apports via l'embouchure. Ceci pourrait

être mis en relation avec les forts taux d'érosion (-3,42 m/an) notés sur le segment 2 entre 1989 et 2003.



Figure 44: Evolution de la ligne de rivage de 1989 à 2016



EPR Segment (m/an)	Secteur Nord-Ouest		Secteur Sord-Est			Moyenne
	S1	S2	S3	S4	S5	
1989 - 2003	-2,61	-3,42	-0,76	-1,41	-0,98	-2,01
1989 - 2007	2,57	-2,01	-2,53	-2,04	-2,29	-2,28
2003 - 2016	4,73	1,42	-3,56	-1,96	-0,60	-0,65
1989 - 2016	1,31	-1,34	-1,97	-1,61	-0,96	-1,15

Figure 45 : Evolution des taux d'érosion entre 1989 et 2016

L'analyse de l'évolution de la ligne de rivage entre 1989 et 2007 montre que le secteur Nord-Ouest présente un taux d'accumulation moyen de 2,57 m/an sur le segment 1 suite aux effets des épis du Port (G0 à G3) qui captent en amont des quantités importantes de sédiments alors qu'au cours de cette période le littoral de Saly faisait l'objet d'une érosion généralisée. Après leur construction en 2004, ces épis ont eu dès 2007 des effets très significatifs sur la dynamique littorale (photo 5). Les taux d'érosion importants des segments au Sud entre 1987 et 2007 pourraient être liés aux effets aval dérive des épis du port sur le littoral déjà en érosion. La dérive littorale laisse des quantités importantes de sédiments en amont des structures perpendiculaires au rivage comme les épis ou les jetées et se retrouve en aval appauvrie en sédiments et très érosive. Le taux d'évolution côtière est positif pour le segment 1, et négatif pour les segments 2, 3, 4 et 5 (figure 44).

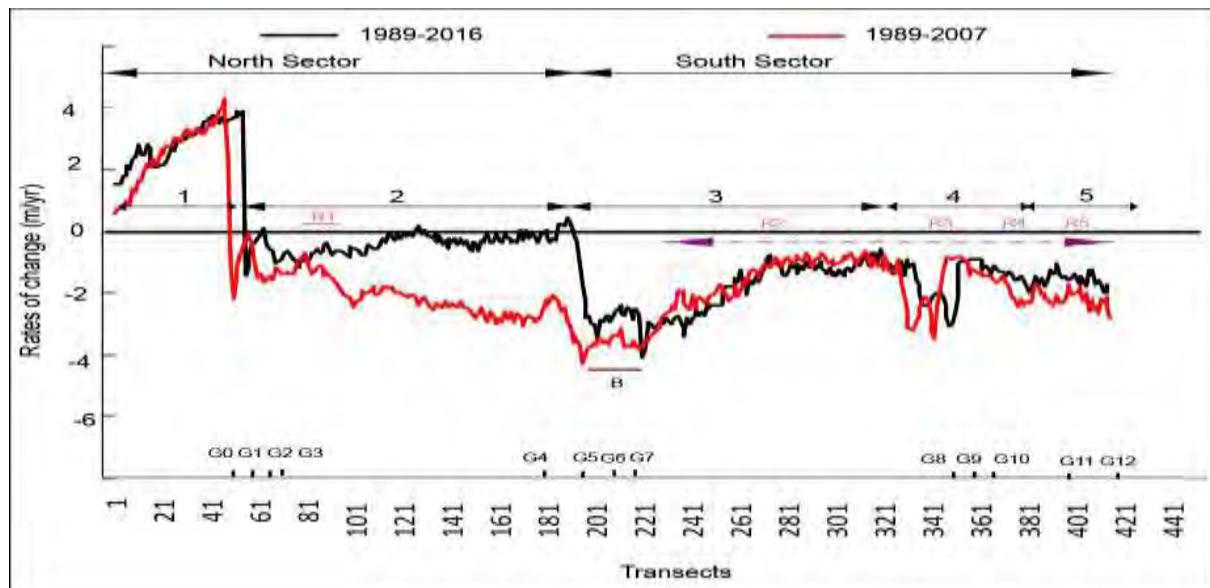


Figure 46 : Relations entre structures de protection et évolution de la ligne de rivage entre 1989 et 2016

Sur la période 2003-2016, les taux d'accumulation s'accentuent sur les segments 1 et 2 du secteur Nord-Ouest avec des taux respectifs de 4,73 et 1,42 m/an. Cette évolution s'explique par la sédimentation en amont des épis du Port qui continue toujours sur le segment 1. Le taux d'accumulation du segment 2 devenu stable pourrait s'expliquer par les effets positives des épis de la résidence Safari qui, construits entre 2005 et 2007 retiennent en amont des quantités importantes de sédiments. De 2003 à 2016, les taux d'érosion augmentent sur les segments 3 et 4. L'impact positif des structures de protection construites sur ces segments est relativement faible. Les épis G6 et G7 n'ont pas des effets positifs remarquables car ils sont trop proches de G5 et l'espacement entre eux est très faible (environ 110 m). Les trois brise-

lames B1, B2 et B3 construits entre 2013 et 2014 juste en aval de l'épi Safari n'ont pas encore un effet positif notable sur les plages en face d'eux (figure 45)



Photo 5 : plages juste en aval (A) et en amont (B) de l'épi de la résidence Safari

Les taux d'érosion diminuent sur le segment 5 entre 2003 et 2016 car toute la plage en face des installations touristiques et des résidences de ce segment a été renforcée par une combinaison de structures de protection composées de murs en béton, de murs en enrochements (R3 à R5), de sacs de sable, de pneus et d'épis (G8 à G12). Cette diminution est attribuée aux épis construits en 2015 car les structures qui durcissent la ligne de rivage comme les murs et les revêtements réfléchissent l'énergie des houles et empêchent le recul de la ligne de rivage. Ce qui conduit généralement à une perte des plages devant ces structures et une accentuation des phénomènes d'érosion sur les littoraux adjacents (Griggs, 2005 a et b ; Hall and Pilkey, 1991). Durant les périodes de beaux temps, à marée haute, des phénomènes de submersion ont lieu et les vagues qui réfléchissent sur les murs emportent les sédiments vers les littoraux voisins (phénomène d'affouillement). La capacité croissante de mobilisation des sédiments est à l'origine de l'effondrement des murs de protection (Martins et Pereira, 2014).

Pour l'ensemble de cette deuxième période, 1989-2016, tous les segments du littoral sont en érosion à l'exception du segment 1 sur lequel se font sentir les effets des longs épis du Port. Le taux d'évolution moyen global de cette dernière période est égal à -1,15 m/an. Actuellement les plages les plus vulnérables à l'érosion sont situées sur la partie sud du littoral de Saly entre la résidence Safari et l'hôtel Cocotiers malgré la présence de brise-lames, de murs en enrochements et d'épis. Les effets des brise-lames pourraient être bénéfiques à long terme car ils peuvent atténuer l'action érosive des houles de tempêtes épisodiques. Les murs de protection ne sont pas adaptés pour protéger des plages sableuses de la station touristique

de Saly car en plus d'être très instables, les murs empêchent une bonne utilisation des plages à des fins récréatives. Depuis la construction d'épis sur le secteur Nord-Ouest, les plages du secteur Sud-Est reçoivent moins de sédiments. Toutes les plages situées en amont des épis connaissent des accumulations remarquables à l'exception de ceux en amont des épis G6 et G7, trop proche de G5. Ces accumulations peuvent se produire sur une courte période (1 an pour les épis G11 et G12). Une situation comparable est notée à Keta, au Ghana où de longs épis retiennent les sédiments en amont de la ville de Keta et les plages en aval connaissent un déficit d'apports sédimentaires (Angnuureng et al., 2013). Si les effets érosifs en aval dérive des épis sont minimisés, ils pourraient constituer la forme de protection la plus appropriée pour défendre les plages sableuses de Saly. Pour cela, la porosité des structures, l'ordre de construction, les longueurs et les espacements entre épis doivent être réévalués. Les effets adverses en aval peuvent être atténués en minimisant la longueur et la hauteur des épis pour réduire le temps nécessaire au remplissage de l'épi, ce qui rétablit le contournement naturel du sable (Nations unies, 1983).

L'étude diachronique de l'évolution de la ligne de rivage à Saly montre actuellement un contraste très marquant entre un secteur Nord-Ouest en accumulation et un secteur Sud-est en érosion. Une étude à moyen terme permettrait de préciser si ces tendances évolutives se manifestent sur la morphologie littorale.

III.5. Evolution morphosédimentaire du littoral

L'analyse des profils de plage et des caractéristiques granulométriques des sédiments permet d'avoir plus d'informations sur l'évolution des littoraux sableux abritant des structures de protection côtière. Les informations obtenues sont présentées d'abord pour les profils P1 à P4 du secteur Nord-Ouest puis pour les profils P5 à P9 du secteur Sud-Est.

III.5.1. Analyse des données morphologiques

Il s'agit de présenter pour chaque secteur du littoral, les caractéristiques morphologiques (largeur, pente et forme) et les mouvements sédimentaires bimensuels (accumulation, érosion et stabilité).

III.5.1.1. Profils du secteur Nord-Ouest

III.5.1.1.1. Caractères morphologiques

L'analyse morphologique des profils P1 à P4 du secteur Nord-Ouest montre que leurs hautes plages et leurs estrans présentent des largeurs moyennes relativement égales et qui augmentent de P1 à P4 (tableau 7). Les largeurs moyennes de ces unités qui sont

respectivement de 23,94 et 20,1 m pour P1, atteignent 35,01 et 32 m pour P4. Les largeurs des zones de déferlement des différents profils sont plus variables. Il faut noter que la largeur de la zone de déferlement dépend surtout de la hauteur de la marée au moment des lever des profils. De ce fait nous insisterons surtout sur les caractéristiques morphologiques de la plage aérienne (haute plage et estran).

Tableau 7 : Largeurs mensuelles des unités morphologiques des profils P1 à P4 en 2014 ; HP = haute plage, E = estran et ZD = zone de déferlement

Profils	P1			P2			P3			P4		
MOIS	HP	E	ZD	HP	E	ZD	HP	E	ZD	HP	E	ZD
Déc				22,5	22,5	8,5	28	20	1,3	32,5	21,5	22,5
Jan	30,6	7,4	21	13	29,5	20,2	34,6	27,9	18	49,5	13	20
Fév	29	7,6	17	27,7	9,3	18	30,8	18,7	10	40	18,5	18,5
Mar	24	34,6	29	25,3	31,7	23	34	32,1	22	43,2	34,4	20,9
Avr	27,2	13,8	16,5	22,7	18,8	26	35,3	21,5	28,7	34,3	25,7	35,2
Mai	20	42	24	21,1	43,4	17,5	33	28,5	25	31	43,5	37
Juin	27,8	18,9	7	29,4	18,6	22,4	31	14,5	30,7	31	40	13
Juil	23,8	22,7	21	26,5	32,5	10	26	33,5	35,8	34	31,5	15,5
Aoû	23	27,5	22	28,5	38,5	19,8	15,3	53,2	17,5	20,5	39	11,5
Sept	28,5	24,5	30,5	32,5	35	20	27,5	51	48	30,2	36,3	30,5
Nov	23,5	21	36,5	34,3	18,7	20	32,5	43	11,5	34,5	41,5	19
Déc	29,9	21,9	30	34,5	23,5	15	34,3	33,2	19,5	39,5	40	20
Moy	23,94	20,1	21,20	26,5	26,8	18,3	30,19	31,4	22,33	35,01	32,0	21,96

Pour le profil P1, la largeur de l'estran est plus variable que celle de la haute plage. Elle atteint des maxima respectifs de 34,6 et 42 m aux mois de mars et de mai et des minima autour de 7 m aux mois de janvier et de février. La haute plage et l'estran du profil P2 présentent des largeurs à peu près égales avec des moyennes respectives de 26,5 et 26,83 m. Cependant les largeurs de ces deux unités sont très variables d'un mois à l'autre. Les largeurs de l'estran sont plus importantes aux mois de juillet et août. Les largeurs de la haute plage sont plus importantes entre les mois de septembre et décembre.

La haute plage et l'estran du profil P3 présentent des largeurs moyennes respectives de 30,19 et 31,42 m. De décembre à juin, les largeurs de la haute plage sont supérieures à celles de

l'estran alors qu'elles sont inférieures entre juillet et novembre. Du mois de décembre au mois d'avril ainsi qu'au mois de juillet, les largeurs de la haute plage du profil P4 sont supérieures à celles de l'estran. Les profils P3 et P4, plutôt proches, présentent une évolution similaire.

Les profils P1 à P4 sont en moyennes rectilignes et présentent des pentes faibles (figure 45, Annexe I). Celles de l'estran sont en moyennes plus élevées que celle des autres unités morphologiques. Les pentes des estrans sont respectivement de 6,87 ; 6,3, 6 et 5,92% alors que celles de la haute plage sont 2,41 ; 2,24 ; 3,81 et 2,13%. Elles sont plus élevées aux mois de janvier pour P1 et P4, novembre et mai pour respectivement P2 et P3 et plus faibles aux mois de mai (P1) août (P2), février (P3) et décembre (P4). Les profils P1 et P2 présentent une forme convexe rectiligne et les profils P3 et P4 des formes rectilignes.

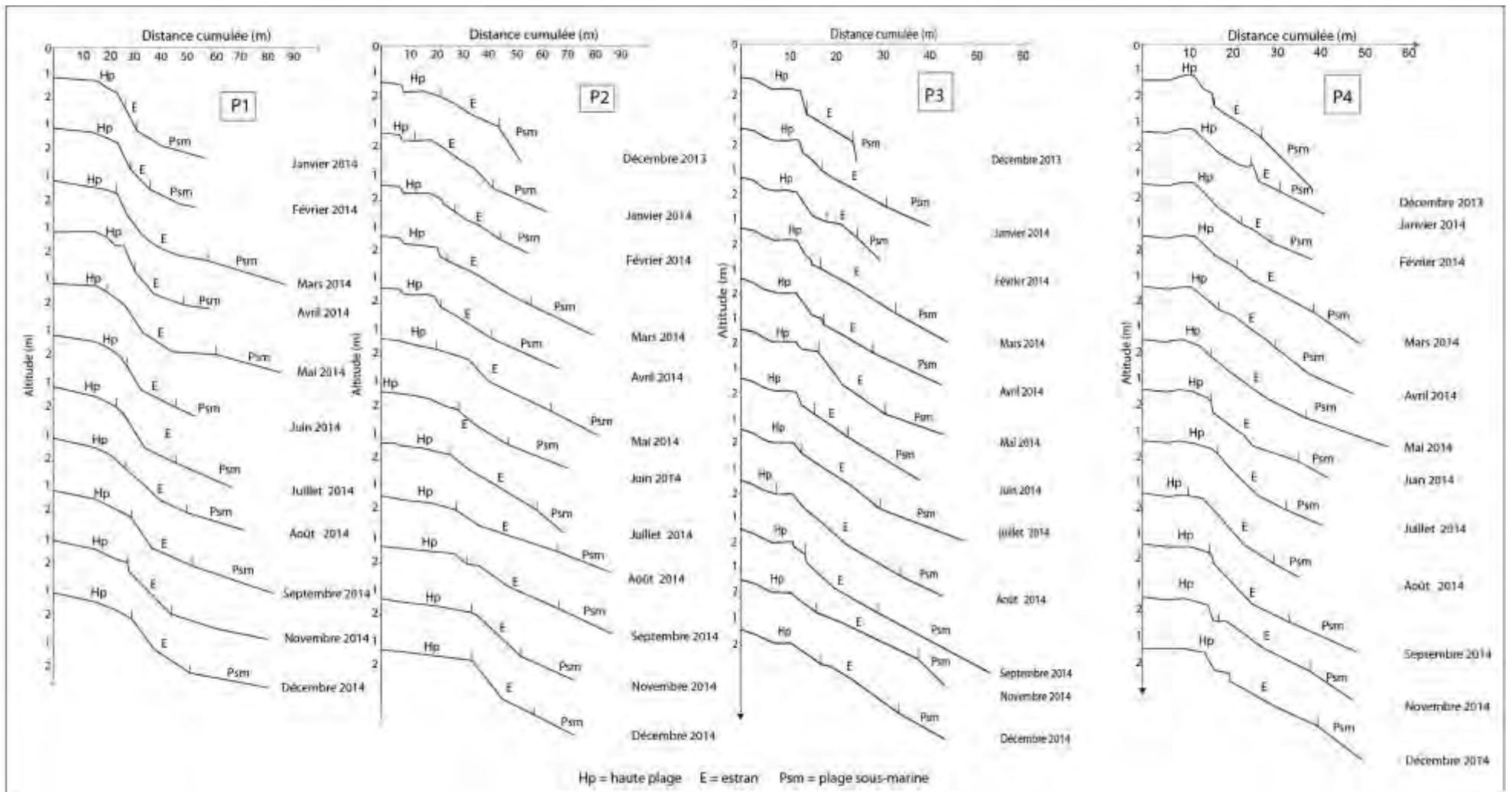


Figure 47 : Profils mensuels de plage (P1 à P4)

III.5.1.1.2. Mouvements sédimentaires

Les profils P1 à P4 présentent tous des bilans sédimentaires positifs respectifs de 2,69 ; 10,93 ; 21,18 et 28,53 m³ par m linéaire de plage. Les transferts sédimentaires se produisent surtout sur l'estran (tableau 8, figure 46). La plage du profil P1 subit une alternance de périodes d'érosion et de périodes d'accumulation. Nous avons une érosion entre janvier et mars, entre juin et juillet et au mois de novembre. La plage du profil P2 subit une longue période d'accumulation de février et août suivie par une courte période d'érosion décembre-janvier puis d'août à octobre avec un taux maximal de -8,46 m³ par m linéaire de plage. Les plus forts taux d'accumulation ont été obtenus entre avril et mai puis entre juillet et août avec respectifs de 13,08 et 16,36 m³ par m linéaire de plage. Les profils P3 et P4 sont caractérisés par une alternance de périodes d'érosion et d'accumulation. Pour les deux profils, l'érosion et l'accumulation la plus longue est enregistrée respectivement entre juillet et septembre et entre septembre et décembre.

Tableau 8: Mouvements verticaux des unités morphologiques des profils P1 à P4 (Exprimés en m³ par m linéaire de plage)

Profils	P1				P2				P3				P4			
	Périodes	HP	E	ZD	T	HP	E	ZD	T	HP	E	ZD	T	HP	E	ZD
Déc-jan					0,33	-2,48	- 2,15	-4,3	2	1,72		3,72	5,81	5,72	10,80	22,34
Jan-fév	- 3,73	-0,97	- 1,37	-6,08	- 1,04	-0,79	2,32	0,48	- 2,51	1,83	- 0,78	-1,47	- 2,18	-3,5	-0,8	-6,49
Fév-mars	- 0,78	-0,23	-	-1,02	- 0,63	1,06	-	0,42	2,69	-0,01		2,68	0,25	2,69	-	2,95
Mars-avr	1,12	-0,55	0,33	0,9	0,97	-0,91	0	0,05	- 3,47	-3,71	0,55	-6,63	- 1,14	-0,68	-11,9	-13,7
Avr-mai	0,40	7,34	-	7,75	0,02	12,88	0,17	13,08	5,97	2,70	- 1,23	7,44	0,03	-2,83	7,23	4,42
Mai-juin	- 2,72	-3,25	- 1,15	-7,14	0,69	-1,47	1,1	0,32	- 3,59	-3,94	0,82	-6,71	0,96	-3,91	0,33	-2,62
Juin-juil	- 1,72	-2,22	- 0,61	-4,56	1,12	2,29	- 2,65	0,75	- 0,61	3,68	1,58	4,66	2,72	5,62	-0,71	7,64
JuiL-aoû	0,13	5,69	4,47	10,29	- 1,25	17,61		16,36	- 0,06	-11,9	- 6,68	-18,6	- 1,02	-9,52	-1,21	-11,7
Aoû-sept	1,44	1,06	- 0,05	2,44	1,85	-1,51	- 6,75	-6,4	0,47	-3,79	- 1,01	-4,33	0,01	-1,62	0,11	-1,49
Sept-nov	- 0,12	-0,99	- 3,87	-4,98	0,77	-1,77	- 7,46	-8,46	3,11	38,31	8,13	49,55	- 0,49	21,63	5,46	26,60
Nov-déc	0,59	2,05	2,44	5,09	2,64	-2,96	- 1,05	-1,37	2,7	-3,84	- 6,91	-8,05	2,52	-2,15	0,34	0,71
Totaux	- 5,39	7,93	0,19	2,69	5,47	21,95	- 16,4	10,93	6,7	21,02	- 5,53	22,18	7,47	11,45	9,6	28,53

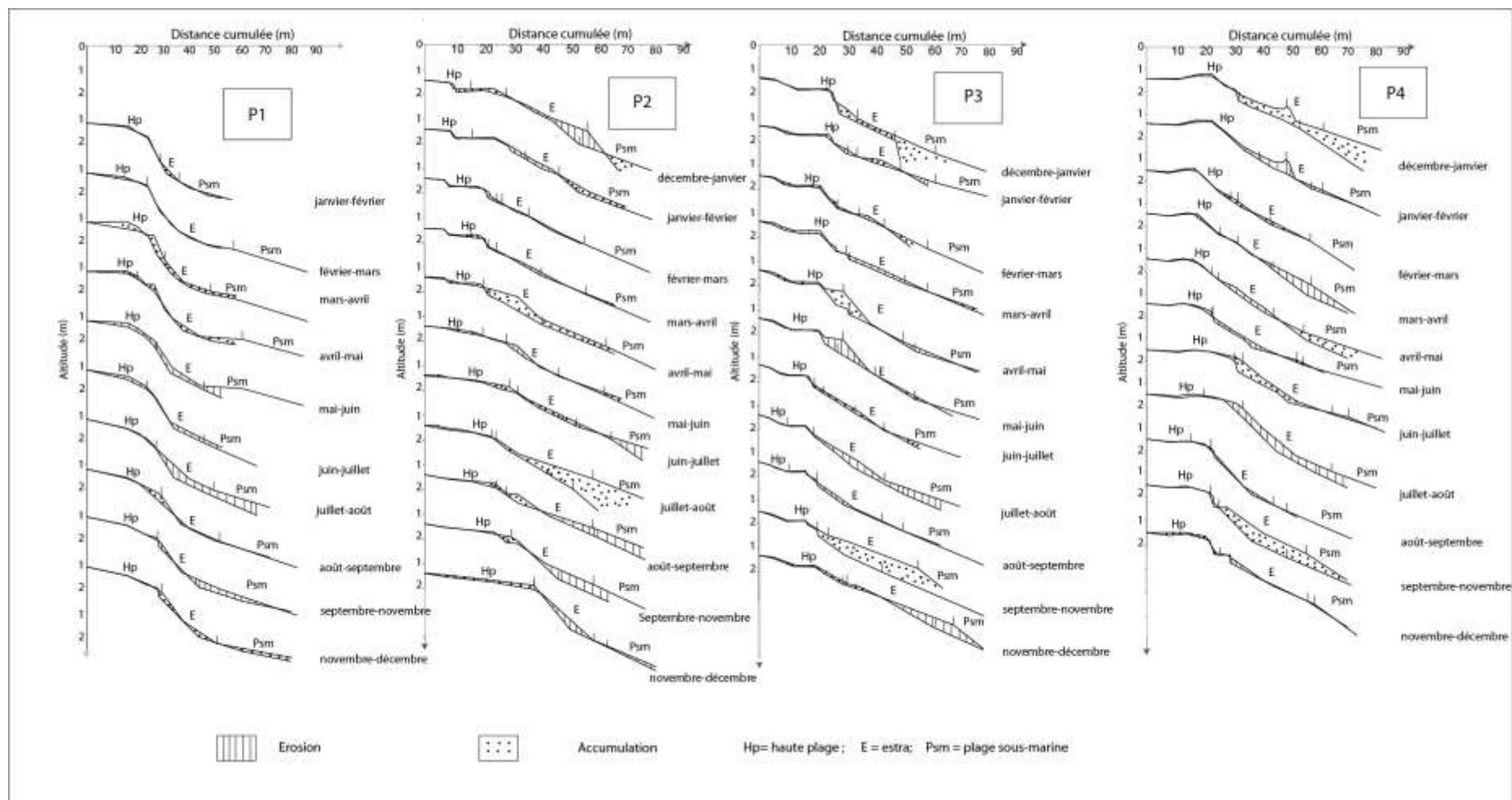


Figure 48 : Comparaison des profils mensuels de plage (P1 à P4)

III.5.1.2. Profils du secteur Sud-Est

III.5.1.2.1. Caractères morphologiques

Les profils P5 à P9 du secteur Sud-Est présentent en moyenne des estrans moins larges que ceux des profils P1 à P4 surtout pour les profils P7, P8 et P9 avec respectivement 19,90 ; 18,05 et 20,51 m (tableau 9). Les largeurs moyennes des estrans des profils P5 et P6, plus importantes sur le secteur, sont de 30,25 et 26,79 m. Les largeurs moyennes des estrans sont par ailleurs plus importantes que celles de la haute plage sur tous les profils du secteur. Ce dernier se caractérise par des largeurs très faibles des hautes plages surtout durant le mois d'août où cette unité morphologique de la plage peut être absente (P8 et P9). Les hautes plages sont plus larges aux mois de janvier et février. Les estrans sont moins larges aux mois de février et mars et plus larges en août, novembre et décembre.

Les pentes des estrans des profils P5 à P9 sont plus fortes que celles des profils P1 à P4, surtout pour P7, P8 et P9 avec respectivement 11,16 ; 9,3 et 9,27% (Annexe II, figures 47). Elles sont maximales aux mois de juin, décembre et août alors qu'elles sont minimales en septembre et février. Les hautes plages présentent des pentes plus fortes aux mois de septembre, décembre, avril et février et plus faibles en août et septembre. Les pentes varient plus au mois de décembre. La forme moyenne des profils est concave pour P5 et P7 alors qu'elle est rectiligne pour P6, P8 et P9.

Tableau 9 : Largeurs mensuelles des unités morphologiques des profils P5 à P9 ; HP = haute plage, E = estran et ZD = zone de déferlement

Profils	P5			P6			P7			P8			P9		
MOIS	HP	E	ZD	HP	E	ZD	HP	E	ZD	HP	E	ZD	HP	E	ZD
Déc	25	36,6	5,4	8	28,5	10	7,9	25,1	18,5	20	17,2	15,8			
Jan	32,5	19,9	20,9	11,4	21,4	15,8	12	19,3	19	24,4	22,9	10,2			
Fév	28,5	8,2	18,3	21,5	9	8	11,7	17,5	18,8	26,7	19,3	9,5	21,6	17,1	11,3
Mar	26,7	36,5	13,6	12	21,1	14,1	12,3	16,7	20	24,7	14,1	12,4	17,1	17,9	9
Avr	24,7	32,3	15,5	9,5	29	11,5	8,4	21,5	25	22,8	21,2	10,2	16,7	18,3	14,5
Mai	25	33,9	7,1	8,8	30,2	6	6,7	18,3	7,5	17,2	10,3	17,5	13	22	7
Juin	26,9	7,4	39,4	9,4	29,8	14	6	21,3	31	18	8,6	17,3	15	21	13
Juil	21,5	30,5	24,5	9,1	26,9	13	5,6	16,9	26,5	17,7	18,3	13,5	17,7	21,3	5
Aoû	20	35	19	2	33	18	3,1	23,9	24	-	34	25	-	25	20
Sept	26,7	37,8	17,2	10	27	23	5,6	20,9	35,3	17,9	17,2	20,6	13	22	14,3
Nov	22	42	10	10,6	33,4	15,5	5,2	20,2	35,5	19,2	22,8	12,8	8,9	19,6	11,5
Déc	22	43	20	11,3	32,2	12,3	8,2	17,3	32,5	20,4	10,8	14,2	17,1	20,9	10
Moy	25,12	30,25	17,57	10,3	26,79	13,43	7,72	19,90	24,46	20,81	18,05	14,91	15,56	20,51	11,56

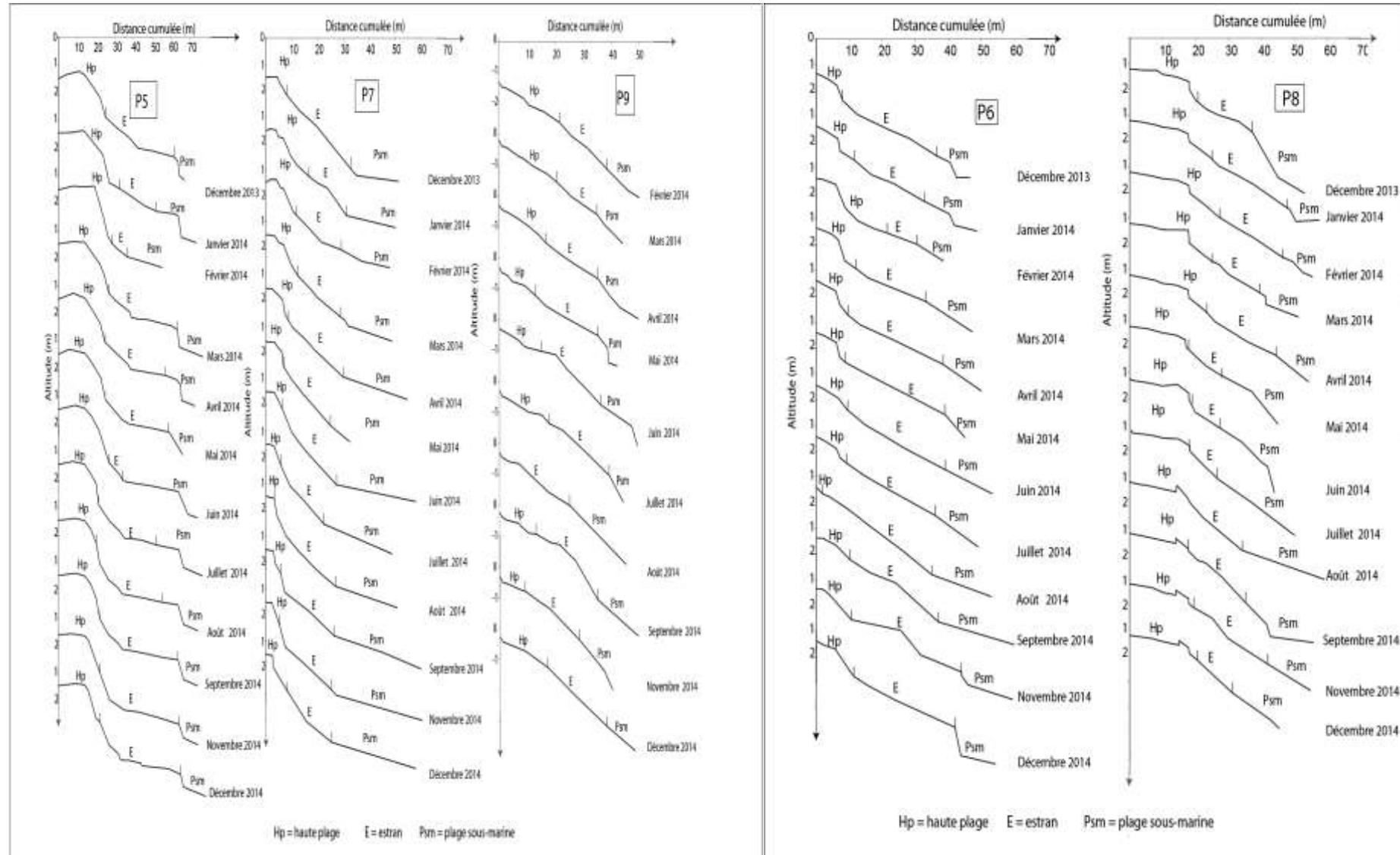


Figure 49 : Profils mensuels de plage P5 à P9

III.5.1.2. Mouvements verticaux

L'analyse des mouvements verticaux des sédiments permet de distinguer deux groupes de profil. Les profils P5, P7 et P9 qui se caractérisent par des bilans sédimentaires négatifs de -20,88 ; -21,04 et -2,81 m³/m linéaire de plage (tableaux 10 et 11; figure 48). Les bilans sédimentaires sont plus élevés sur l'estran pour P5 et P7 ainsi que sur la zone de déferlement pour P9. Les plages sont plus érodées aux mois de février, juillet et août alors que les accumulations sont maximales entre mars et juin. Les profils P6 et P8 présentent des bilans sédimentaires positifs. Les accumulations se produisent surtout au niveau des estrans aux mois de mai et janvier alors que les épisodes érosifs les plus importants ont lieu en décembre et avril.

Tableau 10 : Mouvements verticaux des unités morphologiques des profils P5, P7 et P9 (Exprimés en m³ par m linéaire de plage)

Profils	P5				P7				P9			
Périodes	HP	E	ZD	T	HP	E	ZD	T	HP	E	ZD	T
Déc-jan	-2,97	-1,78	-1,23	-5,99	-1,18	0,42	5,72	5,95				
Jan-fév	2,83	-1,47	-0,43	0,92	0,75	0,01	7,06	7,82				
Fév-mars	-3,34	-1,53		-4,87	-2,05	-5,73	-11,73	-19,52	-0,90	-1,20	-0,02	-2,20
Mars-avr	-0,42	2,92	2,42	4,92	-1,05	-2,72	0,37	-3,39	0,38	-0,10	0,2	0,47
Avr-mai	0,23	-2,15	-1,28	-3,20	-0,06	-2,57	-1,23	-3,87	-0,89	1,36	0,06	0,54
Mai-juin	-0,38	-0,83	-1,25	-2,48	-0,32	-2,19	-0,07	-2,58	2,71	5,08	1,03	8,82
Juin-juil	-1,85	-3,42	-1,99	-7,27	-0,82	-0,65	2,01	0,53	-2,17	-2,35	-1,11	-5,63
Juil-aoû	-0,45	-1,88	-0,33	-2,66	-0,22	-3,77	-1,83	-5,83		-2,66	-4,01	-6,66
Aoû-sept	-0,92	-2,32	-0,08	-3,33	0,07	1,83	3,18	5,08	0,50	5,13	-0,80	4,83
Sept-nov	0,06	-0,20	0,24	0,10	0,02	-2,56	-5,31	-7,91	0,12	-3,54	-1,01	-4,43
Nov-déc	0,06	2,35	0,55	2,98	0,34	-0,35	2,69	2,68	0,01	1,44		1,45
Totaux	-7,15	-10,31	-3,38	-20,88	-4,52	-18,28	0,86	-21,04	-0,31	3,16	-5,67	-2,82

Tableau 11 : Mouvements verticaux des unités morphologiques des profils P6 et P8 (Exprimés en m^3 par m linéaire de plage)

Profils	P6				P8			
	HP	E	ZD	T	HP	E	ZD	T
Déc-jan	0,15	-0,15	0,28	0,28	0,21	6,98	3,44	10,64
Jan-fév	0,13	1,12	0,81	2,07	0,04	-0,99	-0,57	-1,52
Fév-mars	-0,79	-2,27	-0,25	-3,31	1,27	0,52	-1,03	0,76
Mars-avr	-0,66	0,10	0,05	-0,50	-2,75	-2,71	-0,01	-5,48
Avr-mai	0,56	5,33	-0,15	5,74	0,68	-0,24	-0,38	0,05
Mai-juin	0,71	-0,93	0,58	0,36	0,49	-0,54	-2,39	-2,44
Juin-juil	-0,48	0,35	-1,79	-1,92	-1,46	-0,78	0,21	-2,02
JuiL-aoû	-0,23	-1,12	-1,29	-2,64	-	1,49	4,14	5,64
Aoû-sept	0,37	4,94	2,18	7,5	0,03	3,64	-11,67	-8,06
Sept-nov	-2,14	5,12	-1,97	1	-0,25	3,39	5,10	8,24
Nov-déc	2,04	-6,59		4,55	1,17	0,59	0,71	2,47
Totaux	-0,34	5,9	-1,55	4,03	-0,57	11,35	-2,45	8,28

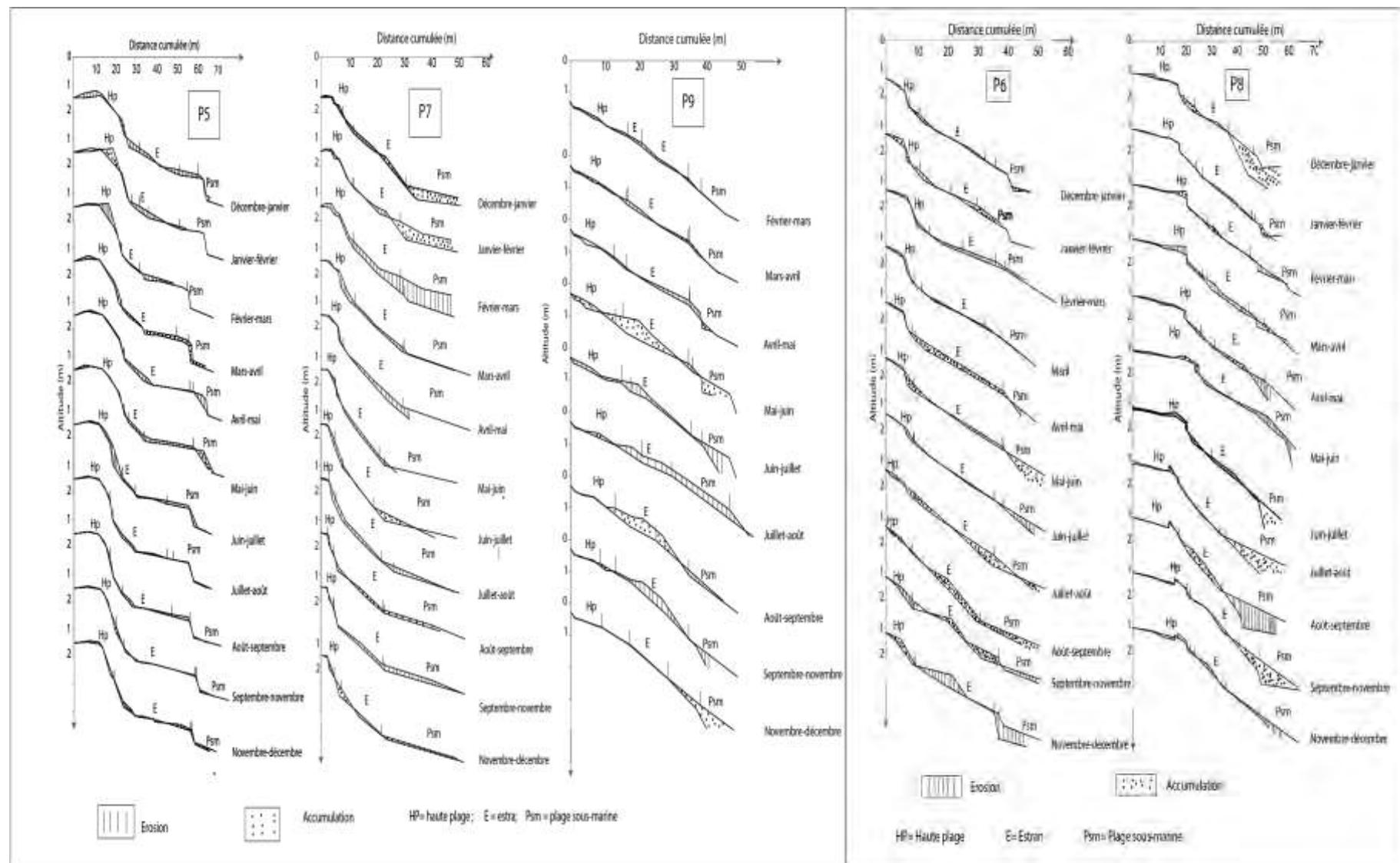


Figure 50 : Comparaison des profils mensuels de plage P5 à P9

L'analyse morphologique montre que les profils P1 à P4 du secteur Nord-Ouest sont en moyenne concave-rectilignes, présentent de faibles pentes (5 %) et des estrans plus larges (27,25 m) alors que les profils P5 à P9 du secteur Sud-Est sont en moyenne concaves, présentent de fortes pentes (7,87%) et des estrans moins larges (23,57 m) (tableau 12). Cette étude montre aussi que le bilan sédimentaire est positif pour les profils du secteur Nord-Ouest avec une moyenne de 16,08 m³ par m linéaire de plage et négatif pour les profils du secteur Sud-Est avec une moyenne de -7,37 m³/m.

Tableau 12 : caractéristiques morphologiques des estrans des profils P1 à P9

Secteurs	Nord-Ouest					Sud-Est					Saly
Profils	P1	P2	P3	P4	MN	P5	P6	P7	P8	P9	MG
Etran											
Largeurs	20,1	26,8	31,4	32	27,57	30,25	26,79	19,19	18,05	20,51	22,95
Pentes	6,52	6,3	6	5,92	6,18	4,26	7,02	10,94	9,27	7,53	7,80
Formes	CVR	CVR	R	R	CVR	CC	R	CC	R	R	R
Bilans m³/m	2,69	10,95	22,18	28,53	16,08	-10,31	5,9	-18,28	11,35	3,16	-1,63
											6,24

III.5.2. Analyse des paramètres granulométriques

Les paramètres granulométriques (moyenne, classement, asymétrie et acuité) des différentes unités morphologiques des profils de plage de chaque secteur sont présentés et analysés.

III.5.2.1. Profils du secteur Nord-Ouest

L'analyse des échantillons de sédiments prélevés sur les différentes unités morphologiques des profils P1 à P4 indique essentiellement la présence de sables fins. Seuls les échantillons de sédiments de la zone de déferlement du profil P1 sont des sables très fins (tableaux 13 et 14). Les sables fins sont en moyenne bien classés à modérément bien classés alors que les sables très fins de la zone de déferlement sont très bien classés. Les particules sont en moyennes symétriques et platykurtiques sur l'ensemble des unités morphologiques à l'exception du niveau mer où elles sont plutôt grossières et mésokurtiques. Trois échantillons de sédiments de la haute plage, un échantillon du mi-estran, huit échantillons du niveau mer et 4 échantillons de la zone de déferlement sont bimodaux. Le niveau mer plus agité montre ainsi une granulométrie plus variable avec des sédiments bimodaux dont les modes principaux allant de 125 à 200 µm sont situés dans les sables fins et les modes secondaires allant de 205 à 1600 µm dans les sables fins et les très grossiers.

Tous ces sables présentent un pourcentage moyen de carbonates de 27,29%, le niveau mer

étant toujours plus carbonaté. Pour les profils P1 et P2 la haute plage est moins carbonatée alors que pour les profils P2 et P3 la zone de déferlement est moins carbonatée. Les pourcentages de carbonates sont par ailleurs plus élevés durant le mois d'avril et plus faibles au mois de décembre (annexe III).

Tableau 13 : Variations mensuelles des moyennes des indices granulométriques sur les profils P1 et P2 avec M₁ et M₂ modes principal et secondaire et N₁ et N₂ pourcentages principal et secondaire

Profils	P1						M	P2						M
	D	F	A	J	A	N		D	F	A	J	A	N	
Haute plage														
Mz (µm)	207	233	M ₁ 250 N ₁ 25,16	233 0,39	M ₁ 25 N ₁ 35,17	207 0,53	220 0,47	219	212	216	199	230	206	213,66
Sig	0,48	0,5	M ₂ 2160	0,09	M ₂ 160	-0,1	-0,015	0,01	0,02	-0,01	-0,08	0,13	-0,12	0,50
Sk	-0,05	0	N ₂ 25,13	0,78	N ₂ 15,52	0,8	0,80	0,79	0,77	0,78	0,79	0,73	0,75	-0,008
K	0,84	0,79												0,76
Mi-estran														
Mz (µm)	165	186	216	186	204	182	189,83	202	210	297	167	274	177	221,16
Sig	0,43	0,58	0,48	0,44	0,54	0,54	0,50	0,49	0,51	0,66	0,48	0,36	0,47	0,49
Sk	-0,24	-0,14	-0,05	-0,12	-0,22	-0,23	-0,16	0,04	-0,09	-0,07	-0,31	0,14	-0,17	0,07
K	1	0,85	0,73	0,76	0,79	0,77	0,81	0,79	0,47	0,99	1,05	0,84	0,82	0,82
Mer														
Mz (µm)	182	103	165	M ₁ 125 N ₁ 7,72	M ₁ 125 N ₁ 27,56	M ₁ 80 N ₂ 29,29	150 0,58	193	301	193	193	167	M ₁ 125 N ₁ 33,62	209,4 0,63
Sig	0,9	0,24	0,6	M ₂ 250	M ₂ 250	M ₂ 1600	-0,17	0,56	0,92	0,49	0,66	0,54	M ₂ 250	-0,21
Sk	-0,46	0,18	-0,25	N ₂ 8,42	N ₂ 11,82	N ₂ 3,25		-0,15	-0,1	-0,004	-0,35	-0,45	N ₂ 9,25	
K	1,36	0,72	0,94				1	0,8	0,99	0,71	0,85	1,25		
Déferlement														
Mz (µm)	98	122	128	122	122	101	115,5	142	128	131	128	M ₂ 160 N ₁ 53,7	145 0,54	134,8 0,36
Sig	0,21	0,29	0,28	0,26	0,36	0,27	0,27	0,41	0,28	0,3	0,27	M ₂ 500	-0,11	0,1
Sk	-0,20	0,21	0,27	0,04	0	0,2	0,08	-0,06	0,2	0,19	0,28	N ₂ 2,95	1,56	0,95
K	0,74	0,64	0,65	0,66	0,88	0,71	0,71	1,06	0,71	0,83	0,63			

Tableau 14 : Variations mensuelles des moyennes des principaux indices granulométriques sur les profils P3 et P4 avec M₁ et M₂ modes principal et secondaire et N₁ et N₂ pourcentages principal et secondaire

Profils Indices	P3						Moy	P4						MOY
	D	F	A	J	A	N		D	F	A	J	A	N	
Haute plage														
Mz(µm)	219	212	M ₁ 250 N ₁ 21,83 M ₂ 500 N ₂ 6,28	199	230	206	213,2	236	215	163	277	M ₁ 250 N ₁ 27 M ₂ 800 N ₂ 56	232	224,6
Sig	0,47	0,53		0,52	0,44	0,58	0,50	0,5	0,56	0,3	0,56		0,56	0,49
Sk	0,01	0,02		-0,08	0,13	-0,12	0	-0,06	-0,14	0,04	0,07		-0,09	-0,03
K	0,79	0,77		0,79	0,73	0,75	0,76	0,81	0,83	0,83	0,81		0,77	0,81
Mi-estran														
Mz(µm)	202	210	M ₁ 200 N ₁ 26,09 M ₂ 500 N ₂ 3,14	167	274	177	206	197	184	187	157	193	141	180,71
Sig	0,49	0,51		0,48	0,36	0,47	0,46	0,49	0,47	0,4	0,35	0,36	0,29	0,40
Sk	0,04	-0,09		-0,31	0,14	-0,17	-0,07	-	-0,17	0,07	0,04	-0,02	0	-0,05
K	0,79	0,74		1,05	0,84	0,82	0,84	0,83	0,89	0,8	0,83	0,88	0,96	0,86
Mer														
Mz(µm)	193	M ₁ 315 N ₁ 12,48 M ₂ 1000 N ₂ 3,09	M ₁ 160 N ₁ 27,57 M ₂ 500 N ₂ 8,46	M ₁ 125 N ₁ 22,66 M ₂ 100 N ₂ 4,83	M ₁ 160 N ₁ 23,78 M ₂ 1600 N ₂ 4,13	172	182,5	179	178	215	180	200	137	180,43
Sig	0,56					0,63	0,59	0,46	0,54	0,53	0,65	0,52	0,22	0,51
Sk	- 0,15					-0,32	-0,23	-	-0,22	0,10	0,48	-0,26	0,12	-0,20
K	0,8					0,91	0,85	0,97	1,31	0,76	1,39	1,10	0,98	1,03
Déferlement														
Mz(µm)	142	128	M ₁ 125 N ₁ 51,33 M ₂ 500 N ₂ 0,13	M ₁ 160 N ₁ 73,57 M ₂ 500 N ₂ 6,65	216 0,46 -0,6 1,3	M ₁ 160 N ₁ 27,45 M ₂ 630 N ₁ 0,63	162	128	137	-	112	147	101	131,16
Sig	0,41	0,28					0,38	0,31	0,34	-	0,33	0,19	0,27	0,30
Sk	- 0,06	0,2					-0,15	0,23	0,08	-	0,09	-1,18	0,35	-0,09
K	1,06	0,71					1,02	0,78	0,74	-	0,82	0,41	0,64	0,73

Le grain moyen est maximal sur le mi-estran aux mois d'avril et août avec des valeurs de 233 et 236 µm et minimal aux mois de juin et novembre où il atteint 169 µm (figure 49). Il diminue aussi régulièrement de la haute plage à la zone de déferlement (figure 50). Ainsi les sables de la haute plage sont plus grossiers (supérieurs à 200 µm) que ceux de la zone de déferlement (inférieurs à 150 µm) qui sont des sables fins.

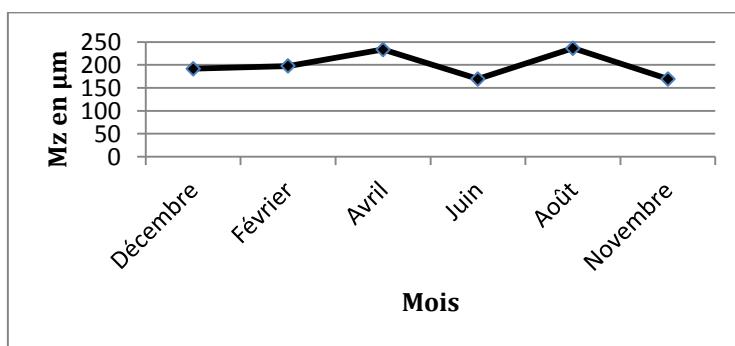


Figure 51 : Evolution de la moyenne Mz (en µm) au niveau du Mi-estran de P1 à P4

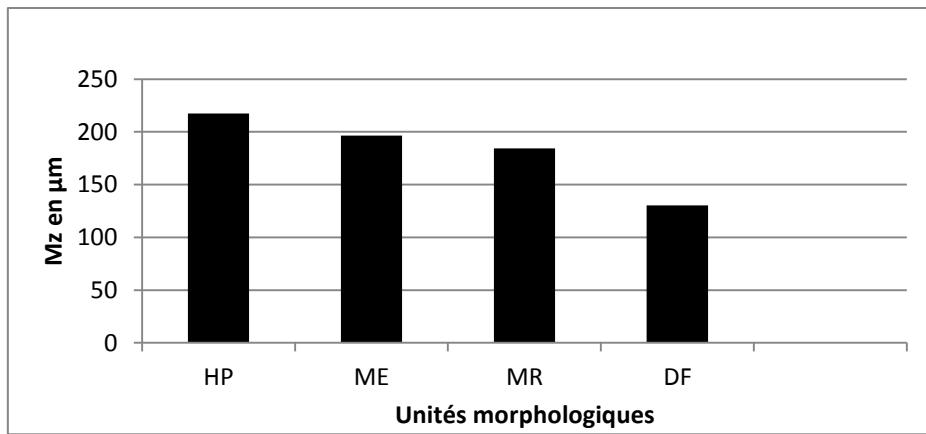


Figure 52 : Evolution de la granulométrie moyenne le long des profils de P1 à P4 avec HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

Le diagramme de dispersion Mz-sigma montre que les sables grossiers de la haute plage présentent les mêmes indices de classement que ceux du mi-estran plus fins (entre 0,4 et 0,6) (figure 51). Les sables du niveau mer avec des moyennes Mz égales à ceux du mi-estran sont les plus mal-classés alors que les sables fins de la zone de déferlement présentent les meilleurs classements. Les indices de classement plus dispersés des sables du niveau mer peuvent être supérieurs à 0,6 (décembre et février) et ceux des sables de la zone de déferlement sont dans l'ensemble inférieurs à 0,4.

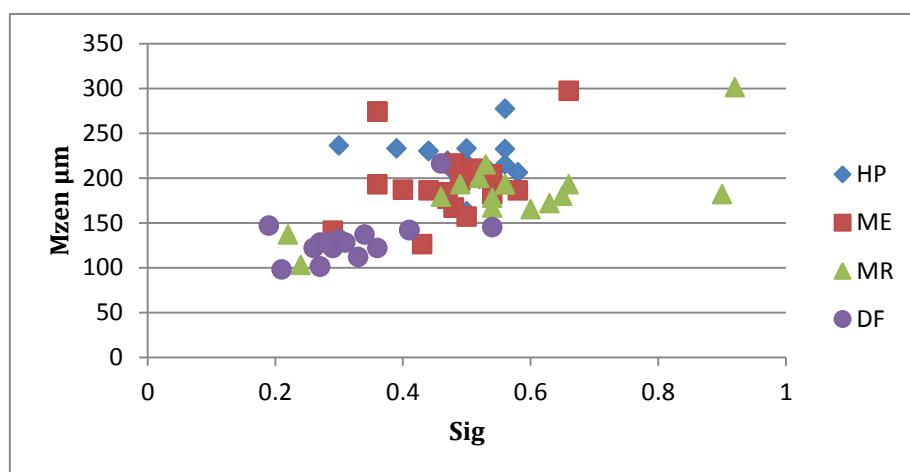


Figure 53 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques des profils P1 à P4 avec HP = haute plage ; ME = mi-estran ; MER = mer ; DFMT = Déferlement

III.5.2.2. Profils du secteur Sud-Est

L'analyse des échantillons de sédiments prélevés sur les différentes unités morphologiques des profils P5 à P9 indique la présence de sables moyens, de sables fins et de sables très fins. Les sables moyens se retrouvent surtout sur les hautes plages et les mi-estrans, les sables très fins surtout sur les zones de déferlement et les sables fins sur les différentes unités morphologiques de la plage (tableau 15). Les sables moyens et les sables fins sont symétriques à bien classés alors que les sables très fins sont dans l'ensemble bien classés. Les sables moyens et les sables fins, tous platykurtiques, sont symétriques ou présentent une abondance de particules fines. Les sables très fins avec des skewness plus variables sont symétriques, présentent une abondance de particules fines ou de particules grossières. Ils peuvent aussi être platykurtiques, mésokurtiques ou même leptokurtiques. Treize échantillons de sédiments des hautes plages, 5 autres du niveau mi-estran, 21 du niveau mer et 13 des zones de déferlement sont bimodaux. Les profils P6 et P8 renferment plus de sédiments bimodaux, les modes principaux et secondaires allant de 80 µm à 1600 µm. Trois échantillons de sédiments du niveau mer et 6 de la zone de déferlement sont trimodaux. Les modes sont aussi compris entre 80 et 1600 µm (tableau 16).

Ces sables présentent des pourcentages moyens de carbonates de 33,20 et 30,38%, le niveau mer est le plus carbonaté surtout au niveau des profils P5, P6 et P9. Le mi-estran est moins carbonaté sur les profils P7, P6 et P9, alors que pour P5 et P8 c'est respectivement sur la haute plage et la zone de déferlement. Les pourcentages moyens des carbonates sont maximaux aux mois d'août et minimaux au mois de décembre. Les sédiments des profils P5 à P9 (annexes IV et V) du Sud-Ouest sont plus carbonatés que les profils P1 à P4 du Nord-Ouest.

Tableau 15 : Variations des moyennes des principaux indices granulométriques sur les profils P5, P7 et P9 avec M₁ M₂ et M₃ modes principal et secondaire et N₁, N₂ et N₃ pourcentages principal et secondaire.

Tableau 16 : Variations des moyennes des principaux indices granulométriques sur les profils P6 à P8 avec M₁ M₂ et M₃ modes principal et secondaire et N₁, N₂ et N₃

Profils	P5						M	P7						M	P9					
	D	F	A	J	A	N		D	F	A	J	A	N							
Haute plage																				
Mz(μ m)	261	283	262	274	247	255	263, 66	260	M ₁ 250 N ₁ 26,87 M ₂ 1600 N ₂ 2,13	222	M ₁ 250 N ₁ 26,84 M ₂ 1600 N ₂ 1,05	M ₁ 250 N ₁ 27,37 M ₂ 1600 N ₂ 2,70	228	236	244	289	438	248	M ₁ 250 N ₁ 33,97 M ₂ 1600 N ₂ 3,82	304,7 5
Sig	0,63	0,58	0,55	0,6	0,56	0,55	0,55	0,54		0,45		0,51	0,5	0,45	0,53	0,56	0,49		0,50	
Sk	0,08	0,17	0,11	0,1	0,04	0,1	0,1	0,05		0,05		0,21	0,10	0,16	-0,05	0,71	0,11		0,23	
K	0,82	0,80	0,85	0,87	0,79	0,85	0,83	0,89		0,71		0,72	0,77	0,81	1	0,6	0,85		0,81	
Mi-estran																				
Mz(μ m)	M ₁ 400 N ₁	M ₁ 500 N ₁ 7,19 32,42	227	252	219	240	234, 5	259	243	275	252	272	274	262,5	297	215	261	219	310	260,4
Sig			0,46	0,34	0,43	0,42	0,41	0,42	0,59	0,67	0,5	0,39	0,54	0,51	0,48	0,33	0,42	0,71	0,38	0,46
Sk		M ₂ 1600 N ₂ 4,87 1600 N ₂ 4,75	0,11	0,13	-0,03	0,11	0,08	0,11	0,12	0,01	0,31	0,08	0,1	0,12	0,02	0,07	0,11	0,1	0,11	0,08
K			0,7	0,8	0,77	0,79	0,76	0,82	0,89	0,92	0,77	0,73	0,84	0,82	0,9	0,8	0,77	0,88	0,85	0,84
MER																				
Mz(μ m)	274	M ₁ 160 0 N ₁ 7,77	M ₁ 1600 N ₁ 29,05 M ₂ 500 N ₂ 7,43	M ₁ 315 N ₁ 15,7 M ₂ 63 N ₂ 9,63	M ₁ 315 N ₁ 24,6 M ₂ 1600 N ₂ 9,19	M ₁ 1600 N ₁ 63,28 M ₂ 80 N ₂ 12,62	274 0,39 0,2 0,78	M ₁ 250 N ₁ 4,09 M ₂ 160 0 N ₂ 7,38	M ₁ 250 N ₁ 14,19 M ₂ 125 N ₂ 13,61 M ₃ 1600 N ₃ 9,81	M ₁ 250 N ₁ 16 M ₂ 160 0 N ₂ 4,17	M ₁ 315 N ₁ 19,60 M ₂ 1600 N ₂ 5,91	102	102	M ₁ 315 N ₁ 0,22 M ₂ 160 0 N ₂ 6,08	M ₁ 315 N ₁ 6,77 M ₂ 160 0 N ₂ 9,01	M ₁ 250 N ₁ 21,7 M ₂ 160 0 N ₂ 5,46	M ₁ 1600 N ₁ 19,01 M ₂ 250 M ₃ 1600 N ₂ 17,46	M ₁ 315 N ₁ 16,58 M ₂ 250 M ₃ 1600 N ₂ 15,91	-	
Sig	0,39										0,36	0,36								
Sk	0,2										-0,06	-0,06								
K	0,78										0,82	0,82								
Déferlement																				
Mz(μ m)	M ₁ 160 0 N ₁ 46,22	M ₁ 100 N ₁ 29,56 M ₂ 250 44,21	M ₁ 1600 N ₁ 38,2 M ₂ 6,10	M ₁ 80 N ₁ 38,9 M ₂ 10,96	M ₁ 80 N ₁ 45,51 M ₂ 250 N ₂ 2,29	M ₁ 100 N ₁ 7,18 M ₂ 7,18		M ₁ 80 N ₁ 70,7 M ₂ 50 N ₂ 4,15	93	84	119	M ₁ 125 N ₁ 24,88 M ₂ 1600 N ₂ 1,04	95	97,75	182	M ₁ 160 0 N ₁ 25,0 6	132	M ₁ 250 N ₁ 23,31 M ₂ 1600 -0,1	M ₁ 80 N ₁ 25,03 M ₂ 250 N ₂ 10,28 M ₃ 1600 N ₃ ,98	157
Sig									0,28	0,27	0,29		0,33	0,29	0,68		0,58		0,45	
Sk									0,09	0,09	0,09		0,4	0,16	0,09		-0,1		-0,005	
K									0,75	0,84	0,7		0,6	0,72	0,67		0,8		0,7	

pourcentages principal et secondaire.

Profils	P6						M	P8						M
Indices	D	F	A	J	A	N		D	F	A	J	A	N	
Haute plage														
Mz(µm)	M ₁ 250 N ₁ 25,33	M ₁ 250 N ₁ 22,2	M ₁ 250 M ₂ 1600	M ₁ 250 M ₂ 1600	M ₁ 250 M ₂ 1600	M ₁ 250 N ₂ 4,07	232 0,53 0,16 0,77	M ₁ 250 N ₁ 35,94	M ₁ 250 N ₁ 24,3	M ₁ 250 M ₂ 1600	M ₁ 250 M ₂ 1600	M ₁ 250 N ₂ 5,34	M ₁ 250 N ₁ 27,64	232 0,53 0,16 0,77
Sig							-							
Sk														
K														
Mi-estrane														
Mz(µm)	196 N ₁ 8,33	M ₁ 200 M ₂ 800	196 -0,06	187 0,07	228 0	227 -0,08	206 0 0,77	266 0,38	228 0,17	M ₁ 315 N ₁ 6,49	243 0,43	M ₁ 250 M ₂ 1600	222 0,25	239,75 0,48
Sig	0,49		0,49	0,49	0,54	0,44	0,49 0	0,38	0,68					
Sk	0,07													
K	0,72													
Mer														
Mz(µm)	M ₁ 1600 N ₁ 18,54	M ₁ 1600 N ₁ 1,13	M ₁ 1600 N ₁ 55,01	M ₁ 250 N ₁ 6,11	M ₁ 500 M ₂ 250	M ₁ 1600 M ₂ 500	281 0,38	M ₁ 315 N ₁ 10,55	149 -0,17	M ₁ 315 M ₂ 1600	215 N ₂ 1,03	M ₁ 315 M ₂ 1600	215 N ₂ 0,9	215 0,37 0,02
Sig														
Sk														
K														
Déferlement														
Mz(µm)	M ₁ 80 N ₁ 49,47	M ₁ 1600 N ₁ 69,35	M ₁ 1600 N ₁ 34,61	143 0,52	128 0,44	M ₁ 1600 M ₂ 400	135,5 0,48	M ₁ 80 M ₂ 50	100 -0,31	M ₁ 250 M ₂ 1600	89 -0,31	M ₁ 160 M ₂ 1600	94,5 -0,22	94,5 0,43
Sig														
Sk														
K														

Sur le mi-estran, le grain moyen élevé, au mois de décembre diminue jusqu'au mois d'avril puis augmente jusqu'à novembre (figure 52). Les mois de novembre, décembre et février présentent les sédiments les plus grossiers (Mz supérieurs à 250 µm) et les mois d'avril, juin et août les sédiments les plus fins (Mz inférieurs à 240 µm). Le grain moyen diminue aussi régulièrement de la haute plage à la zone de déferlement. Ainsi les sables de la haute plage sont plus grossiers (supérieurs à 250 µm) alors que ceux de la zone de déferlement sont plus fins (inférieurs à 150 µm) (figure 53).

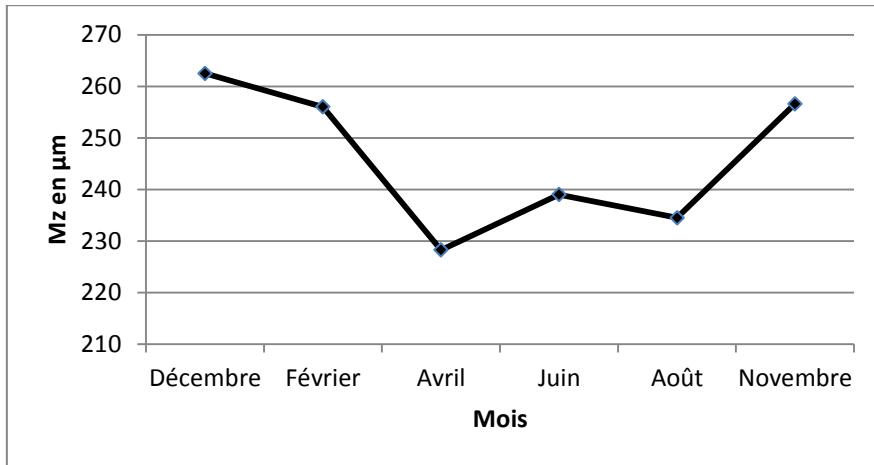


Figure 54 : Evolution de la moyenne Mz (en µm) au niveau du Mi- estran pour P5 à P9

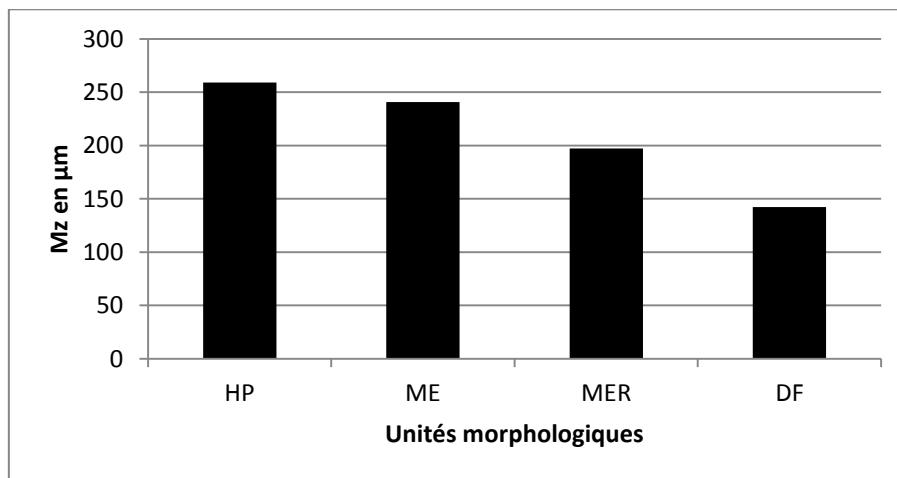


Figure 55 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil pour P5 à P9 HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement

Le diagramme de dispersion Mz-sigma montre que les sables de la haute plage présentent une granulométrie proche de ceux du mi-estran (figure 54). Les indices de classement sont toutefois plus variables pour les sables du mi-estran. Les sables de la zone de déferlement

présentent aussi des indices de classement très variables et sont plus fins que ceux des autres unités morphologiques. Avec des indices de classement d'environ 0,4 les sables du bas estran sont par contre moins variables.

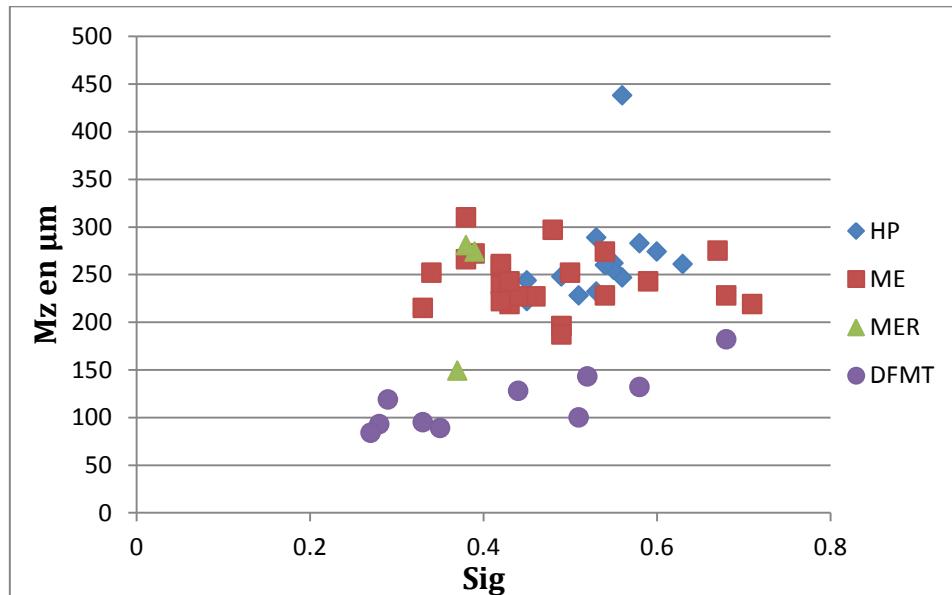


Figure 56 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques des profils P5 à P9 avec HP = haute plage ; ME = mi-estran ; MER = mer ; DFMT = Déferlement

Les sédiments du secteur Nord-Ouest sont constitués de sables fins et très fins et ceux du secteur Sud-Est par des sables moyens, fins et très fins. Les sables du secteur Nord sont dans l'ensemble plus fins, présentent les meilleurs classements et généralement symétriques et platykurtques. Les échantillons récoltés sur les estrans Nord-Ouest présentent des Mz proches de 200 µm alors que ceux des estrans Sud ont des Mz proches de 250 µm (figure 55 tableau 17). Les sables du secteur Sud-Est plus carbonatés et plus mal classés, sont souvent bimodaux ou trimodaux et présentent des coefficients d'asymétrie et d'acuité plus variables.

Tableau 17 : caractéristiques granulométriques des estrans des profils P1 à P9

Secteurs		Nord-Ouest					Sud-Est					Saly
Profils		P1	P2	P3	P4	MN	P5	P6	P7	P8	P9	MG
		Mi estran										
Mz		189,83	221,16	206	180,71	199,42	234,5	206	262,5	239,75	260,4	240,63
Sig		0,50	0,49	0,46	0,40	0,46	0,41	0,49	0,51	0,48	0,46	0,47
Sk		-0,16	0,07	-0,07	-0,05	-0,05	0,08	0	0,12	0,17	0,08	0,09
K		0,81	0,82	0,84	0,86	0,83	0,76	0,77	0,82	0,75	0,84	0,79
		Bas estran										
Mz		150	209,4	182,5	180,43	180,58	274		102	215		197
Sig		0,58	0,63	0,59	0,51	0,57	0,39		0,36	0,37		0,37
Sk		-0,17	-0,21	-0,23	-0,20	-0,20	0,2		-0,06	0,02		0,05
K		1	0,92	0,85	1,03	0,95	0,78		0,82	0,9		0,83

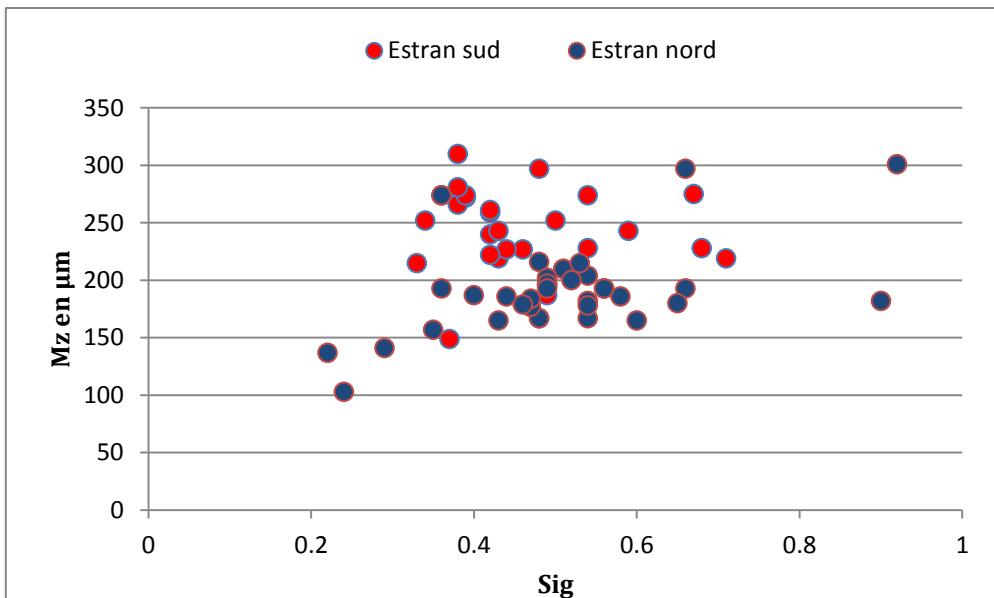


Figure 57: Diagramme de dispersion Mz-sigma des estrans des profils P1 à P9

Le suivi morpho-sédimentaire du littoral de Saly en 2014 confirme les tendances obtenues sur l'étude de l'évolution diachronique de la ligne de rivage du secteur Nord entre 1989 et 2016.

Les profils P1 à P4 du segment 2 du secteur Nord sont convexe-rectiligne et présentent des pentes faibles. Les largeurs des estrans augmentent du Nord au Sud, c'est à dire de P1 vers P4, elles sont respectivement de 20,1 ; 26,8 ; 31,4 et 32 m. Les bilans sédimentaires positifs respectifs de 2,69 ; 10,93 ; 22,18 et 28,53 m^3/m linéaire de plage augmentent aussi de P1 à P4. L'analyse des échantillons de sédiments prélevés sur les différentes unités morphologiques des profils P1 à P4 montre qu'ils sont dans l'ensemble constitués de sables fins. Ces sables platykurtiques sont aussi très carbonatés surtout sur les bas estrans, symétriques dans l'ensemble et modérément bien classés à bien classés. Les classements s'améliorent de la haute plage à la zone de déferlement. Le grain moyen diminue aussi vers la zone de déferlement. Ainsi la haute plage et le mi-estran présentent les sédiments les plus grossiers et ceci surtout pendant les mois d'avril et août. Toutes ces caractéristiques morphologiques et granulométriques montrent que les plages du segment 2 sont en accumulation suite aux effets positifs des épis G4 et G5 de l'hôtel Safari. Le bilan sédimentaire plus faible du profil P1 est lié à sa position proche de la zone d'influence des épis du Port. En effet il s'y produit un effet érosif aval épi surtout lié à ceux du Port plus proches. Ces effets négatifs en aval épi sont toutefois atténus par des affleurements rocheux naturels présents sur la zone de déferlement entre le Port et le profil P1. Ces affleurements

rocheux jouent le même rôle dans plusieurs autres endroits du littoral de Saly. Sur le secteur Nord-Ouest les plages en amont des épis sont relativement protégées de l'érosion. La plage adjacente au profil P1 est la plus menacée par l'érosion sur le secteur Nord-Ouest du fait de sa position. La résidence les Baobolong située dans cette zone est protégée des houles par un mur en enrochement (R1) (photo 6).



Photo 6 : Mur en enrochement (R1) de la résidence les Baobolongs

Les caractéristiques morpho-sédimentaires annuelles révèlent une érosion du littoral au Sud de Saly. Elles confirment ainsi les tendances de l'évolution historique de la ligne de rivage du secteur Sud-Est entre 1989 et 2016. Les profils P5 à P9 situés sur les segments 3 à 5 de ce secteur Sud-Est sont concaves et rectilignes. Leurs estrans présentent des pentes plus fortes et des largeurs plus faibles surtout pour les profils P7, P8 et P9. Les hautes plages de ces profils se caractérisent aussi par des largeurs très faibles. Les échantillons de sédiments prélevés sur les différentes unités morphologiques des profils P5 à P9 sont dans l'ensemble constitués de sables fins, très fins et moyens. Les sables moyens et les sables fins symétriques à bien classés sont platykurtiques ou présentent une abondance de particules fines. Les sables très fins surtout sur la zone de déferlement présentent des Skewness et des kurtosis plus variables. Ces sables plus carbonatés surtout en août sur le bas estran présentent plusieurs échantillons de sédiments bimodaux ou trimodaux, ce qui témoigne d'une intensité des transferts sédimentaires. Les sédiments du mi-estran et de la zone de déferlement ont des

indices de classement très variables. Le grain moyen diminue vers la zone de déferlement. Ainsi la haute plage et le mi-estran présentent les sédiments les plus grossiers et ceci surtout pendant les mois de novembre et décembre. Les caractéristiques granulométriques des sables des hautes plages et des mi-estrans de ces profils sont très proches comme le sont tout aussi celles des sables des bas-estrans et des zones de déferlement. Les formes concaves des profils de plage, les largeurs faibles et les fortes pentes peuvent être liées à l'érosion (Niang-Diop, 1995). Les grains moyens (Mz) et les coefficients de dispersion (Sig) plus élevés des sédiments de secteur Sud-Est, leur asymétrie (Sk) et leur acuité (K) plus variables reflètent une accentuation de l'énergie des agents hydrodynamiques sur le secteur qui présentent ainsi plusieurs signes d'érosion. Le secteur Sud-Est de Saly enregistre en moyenne un bilan sédimentaire négatif bien que celui des profils P6 et P7 situés respectivement sur les segments 3 et 5 soit positifs. Cette évolution positive pourrait être liée au fait que ces segments ont reçus en 2015 de nouvelles structures de protection (R3 à R5 et G8 et G12). Cependant ces accumulations pourraient aussi être épisodiques car l'évolution du rivage montre à court terme des variations importantes et dépend étroitement de l'échelle de temps considérée (Morton, 1991). Pour la gestion de l'érosion côtière, les évolutions à court terme du littoral sont plus difficile à cerner que les tendances à moyen ou long terme (Esteves *et al.*, 2002) et leur traitement correct nécessite une bonne compréhension de la dynamique côtière et des phénomènes météo-marins (Jonah *et al.*, 2016).

Conclusion partielle

Le littoral de Saly connaît entre 1954 et 1989, une accumulation généralisée avec des taux plus élevés sur le secteur Nord-Ouest. Entre 1989 et 2003, tous le littoral de Saly est en érosion. Les taux d'érosion sont toutefois plus élevés sur les segments Nord que sur les segments au Sud. Sur la période 2003-2016, les taux d'accumulation s'accentuent sur les segments 1 et 2 du secteur Nord-Ouest et diminuent sur le segment 5. Les taux d'érosion augmentent sur les segments 3 et 4. Actuellement les plages les plus vulnérables à l'érosion sont situées sur la partie sud du littoral de Saly entre la résidence Safari et l'hôtel Cocotiers malgré la présence de brise-lames, de murs en enrochement et d'épis.

L'étude morpho-sédimentaire du littoral de Saly témoigne de l'évolution historique de la ligne de rivage. Les profils P1 à P4 du secteur Nord-Ouest présentent des estrans plus larges avec des pentes plus faibles. Ces profils présentent aussi tous un bilan sédimentaire positif et subissent une accumulation qui se manifeste surtout sur l'estran, se produit la plupart du temps et se généralise au mois de mai. Les sédiments des profils P1 à P4 sont surtout représentés par des sables fins et des sables très fins, platykurtiques, très carbonatés et aussi à skewness et classements moins variables. Le grain moyen diminue de la haute plage à la zone de déferlements, les classements sont plus mauvais sur le mi-estran et meilleurs sur la zone de déferlement.

Les profils P5 à P9 du secteur Sud-Est présentent des estrans avec des largeurs plus faibles et des pentes plus importantes. Les largeurs des estrans sont plus faibles pour les profils P7 ainsi que P8 et les pentes des estrans sont plus fortes pour les profils P7, P8 et P9. Les formes concaves dominent sur ces profils du secteur Sud. Les plages de ces profils sont aussi toutes menacées car leurs bilans sont souvent négatifs et donc en faveur d'une érosion et les pertes de sédiments sont importantes sur les estrans. Les sédiments des profils P5 à P9 sont des sables fins, très fins et moyens, plus carbonatés et avec des classements, des skewness et des kurtosis plus variables. Les zones les plus vulnérables à l'érosion côtière à Saly se situeraient effectivement sur ce secteur Sud-Est notamment au niveau des plages adjacentes aux profils P5, P7 et P9. Les périodes les plus érosives se situeraient entre les mois de mars et d'août.

CHAPITRE IV. MODELES DE PROTECTION ET EVOLUTION FUTURE DE LA LIGNE DE RIVAGE

Les modèles mathématiques jouent un rôle de plus en plus important dans la géoscience en général et dans l'étude de l'évolution du littoral en particulier. Leur application permet de déterminer avec plus de précision des paramètres importants de l'évolution du littoral. Avec le développement des capacités de l'ordinateur et grâce à une meilleure connaissance des phénomènes physiques et à la formalisation avancée de l'analyse numérique (codes de calculs), les modèles actuels permettent de résoudre simultanément (couplage) les équations hydrodynamiques et le transport des sédiments (Than, 2015). Aujourd'hui, les modèles numériques sont couramment utilisés en génie côtier. MIKE, DELFT 3D, TELEMAC, SMS, et EFDC_Explorer sont les modèles couplés les plus populaires. Ils peuvent décrire assez correctement la morphodynamique d'un système et font encore l'objet de nombreuses recherches (Brière, 2005). Dans le domaine de l'évolution du littoral, les modèles mathématiques sont généralement classés en quatre catégories : les modèles de vague, les modèles de surcote, les modèles de transport des sédiments, et les modèles d'évolution du trait de côte (Than, 2015).

Dans cette étude le nouveau modèle d'évolution du trait de côte ShorelineS a été utilisé. Il apporte plusieurs innovations à la modélisation littorale. Toutefois les résultats d'un modèle doivent être validés, et lorsqu'ils sont en bon accord avec les observations, le modèle peut alors servir à des applications concrètes (Leredde, 2011). Ce chapitre permet de présenter les modèles d'évolution du trait de côte largement utilisés à travers le monde, de présenter et de valider le modèle ShorelineS, d'élaborer et d'analyser plusieurs scénarios de protection du littoral et enfin d'étudier l'évolution future de la ligne de rivage.

IV.1. Modèles d'évolution du trait de côte

Ces modèles permettent de suivre et de prédire l'évolution diachronique de la ligne de rivage. En fonction du traitement des processus hydrodynamiques responsables des changements morphologiques du rivage, on distingue plusieurs catégories de modèles.

IV.1.1. Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont basés sur l'utilisation de relations, déduites des observations, entre des variables clés du forçage hydrodynamique et les variables caractéristiques d'une morphologie à l'équilibre (Waeles, 2005). Il existe dans la littérature plusieurs relations empiriques permettant de calculer les transports sédimentaires intervenant dans la morphologie littorale (CERC, 1984 ; Kamphuis, 1991 ; Kaczmarek *et al.*, 2005; Van Rijn, 2014). Les modèles empiriques utilisent plusieurs approches pour déterminer le profil

d'évolution du rivage.

Les one-lines modèles supposent que la forme du profil côtier est régulière et conservée. Le déplacement du profil vers le continent correspond à l'érosion et son déplacement vers le large correspond à l'accumulation (figure 56). Une extension intéressante du modèle one-line est le modèle n-line ou multi-layer, dans lequel le profil côtier est schématisé par une série de lignes/couches. Les couches sont couplées mutuellement en fonction du transport cross-shore, ce qui les forcera à se déplacer vers une configuration d'équilibre. Le concept de modèle n-line a été mis au point afin de gérer le transport perpendiculaire à la ligne de rivage de manière simplifiée, comme en témoignent le modèle de Bakker (1969) et le modèle PonToS de Steetzel et Wang (2003).

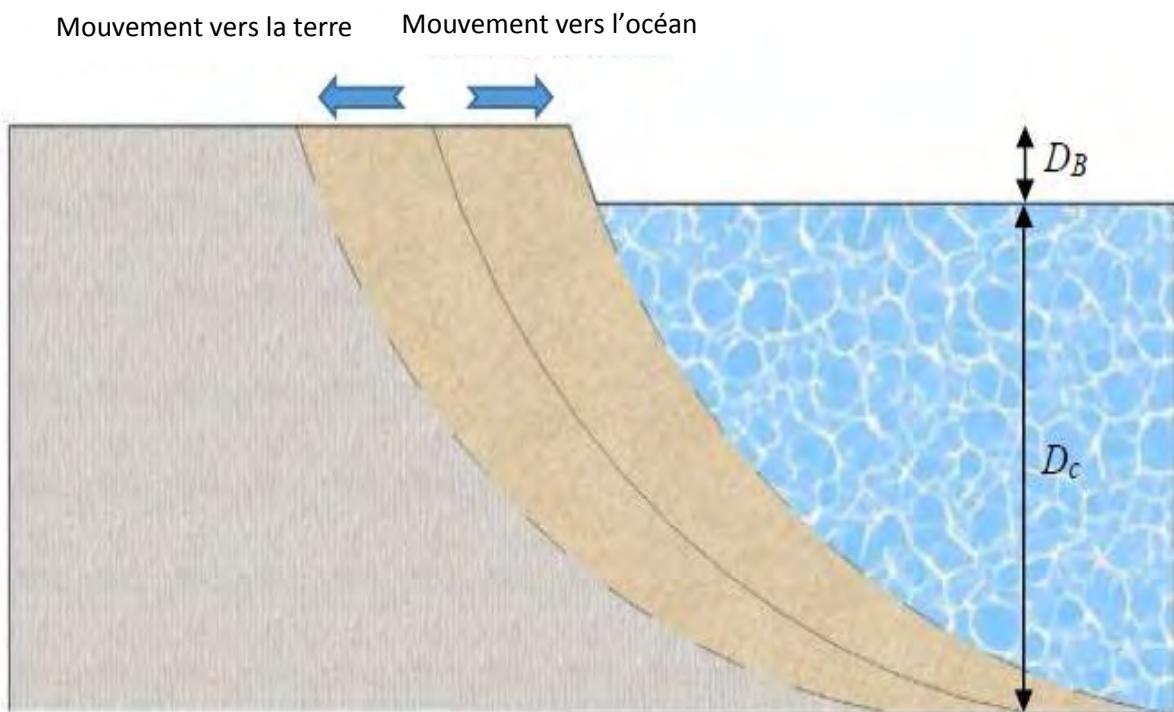


Figure 58: Modification du profil de la plage d'un rivage à une profondeur de fermeture déterminée. D_c = profondeur de fermeture du profil de plage ; D_B = hauteur de la berme de plage (Ghonim, 2019).

GENESIS (GENEralised model for SImulating Shoreline change) est un modèle numérique one-line d'évolution du rivage, très performant, développé au Coastal Engineering Research Center (CERC) (Hanson and Kraus 1989). Il simule les changements sur le rivage produits par des différences spatio-temporelles sur le transport de sables littoraux. Ces changements sont généralement causés par des perturbations notables sur le transit littoral, liées à des structures de protection côtière, à l'alimentation des plages ou à des apports

fluviaux. L'extension littorale de la modélisation peut être de l'ordre de 1 à 100 Km et le temps de stimulation compris entre 1 et 100 mois. Cependant les modifications du rivage produites par les transports sédimentaires perpendiculaires associés aux tempêtes et aux variations saisonnières des caractéristiques des vagues ne peuvent être simulées. Ces processus perpendiculaires au rivage sont supposés moyens sur un intervalle de simulation suffisamment long. C'est dire que ces modèles de profil qui utilisent une ligne de référence fixe ignorent beaucoup de processus littoraux (figure 57).

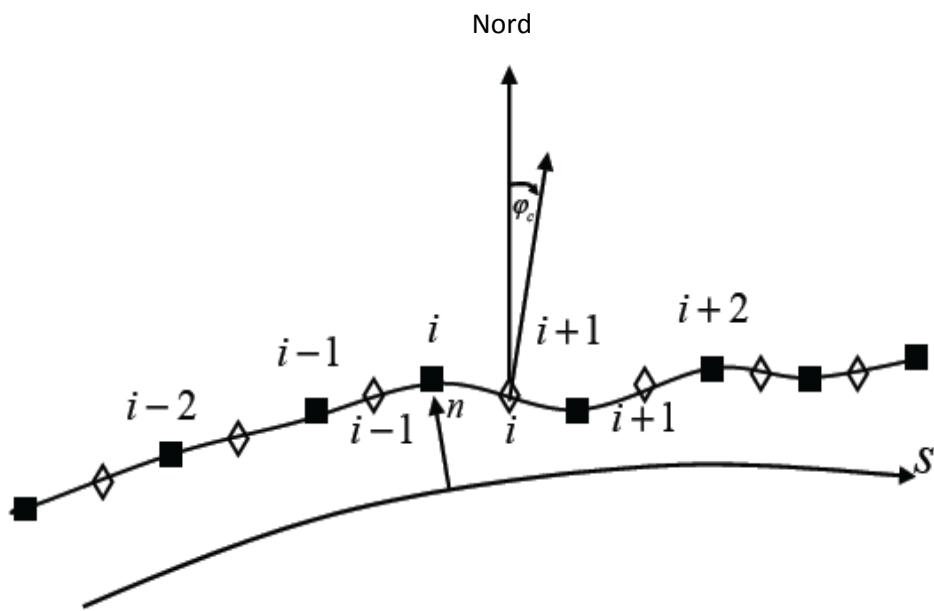


Figure 59 : Schéma illustrant l'évolution de la ligne de rivage par rapport à une ligne de référence fixe ($i + x$ = coordonnées le long de la côte modifiées simultanément en fonction de la ligne de référence)

L'approche classique des modèles empiriques ne permet de simuler que des changements morphologiques relativement faibles par rapport à la ligne de référence fixe. Ils ne représentent pas de processus importants comme la formation de flèches, des îlots, des lagunes, les coupures du cordon littoral. Ces modèles permettent toutefois de déterminer avec beaucoup de précision l'évolution à long terme du trait côte, de l'ordre de décennies à des centaines d'années. Les modèles de transport des sédiments généralement mis en œuvre dans ces modèles à une couche, déterminent le taux de transport littoral à un point donné du rivage en adoptant le climat de vague local et l'orientation des rives et n'intègrent donc généralement pas les effets de la dérive des zones en amont.

IV.1.2. Modèles de type processus

Certaines formulations de transport utilisées pour la modélisation one-line sont des modèles plus complexes, basés sur les sous-modèles des processus physiques (Deigaard et al. 1986a). Le transport des sédiments est calculé sur la base du profil côtier qui transforme les vagues du large au littoral en prenant en compte la réfraction, le shoaling et le déferlement. Un courant littoral entraîné par les gradients de tension de propagation des vagues est ensuite calculé et la concentration des sédiments en suspension dans les vagues et les courants combinés modélisée, pour finalement obtenir la distribution littorale du transport sédimentaire longitudinal. L'intégration dans le profil du transport côtier donne ensuite un taux de transport littoral pouvant être utilisé comme une donnée d'entrée dans le modèle de rivage (Kristensen, 2013). Plusieurs processus côtiers sont pris en compte dans ces modèles. Ils se sont avérés fiables dans la plupart des cas à des échelles de temps interannuelles. Cependant leur précision est limitée aux endroits où les processus secondaires qui contribuent à l'évolution côtière ne sont pas résolus (Vitousek et al., 2017).

D'autres modèles plus avancés cherchent à résoudre tous les processus physiques importants, impliqués dans l'évolution côtière. Ces modèles physiques 2D et 3D effectuent un couplage entre les processus hydrodynamiques, les transports sédimentaires et la morphologie comme par exemple les modèles Delft 3D (Roelvink et Van Banning, 1995), XBeach (Roelvink et al., 2010), Mike 21 (Warren et Bach, 1992 ; Kaergaard et Fredsoe, 2013), et ROMS (Warner et al., 2010) qui résolvent les équations de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement des fluides et des sédiments (figure 58).

Contrairement aux modèles one-lines, les modèles physiques incluent, à l'aide de grilles, les effets de la bathymétrie et peuvent également incorporer la présence de structures côtières réfléchissant les vagues (murs) ou bloquant les transferts sédimentaires littoraux (épis).

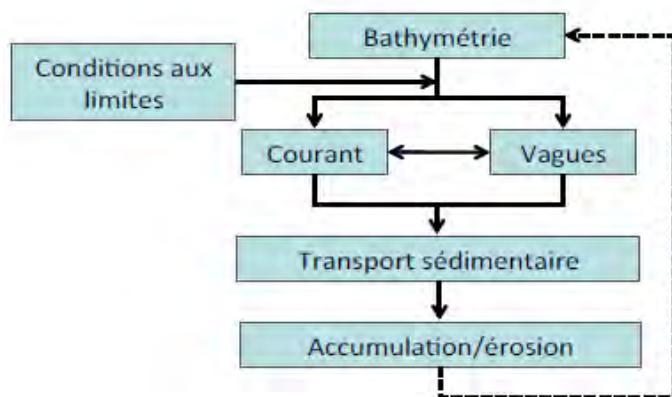


Figure 60 : Schéma conceptuel d'une boucle dans Delft 3D (Roelvink, 2006)

Différentes approches pour calculer le transport des sédiments dans ces types de modèles sont décrites dans la littérature, allant des formules empiriques (Roelvink, 2006 ; Soulsby 1997) à des modèles de vagues, quasi-3D plus sophistiqués pour l'hydrodynamique locale, le transport des sédiments en suspension et le transport total des sédiments (Fredsoe et Deigaard, 1992). Ces modèles basés sur des processus physiques sont de plus en plus capables de simuler l'érosion à petite échelle et à court terme des plages et des dunes souvent due à des épisodes de tempêtes de quelques jours à plusieurs semaines (De Winter *et al.*, 2015) et les efforts récents ont permis de réaliser des simulations réalistes sur des échelles de temps encore plus longues (Luijendijk *et al.*, 2017). Cependant, les simulations basées sur les processus physiques de changements de rivage à grande échelle (échelle de 100 à 100 km) ou à long terme (par exemple, d'une durée annuelle à décennale, telles que la reconstitution des plages) demandent beaucoup de calculs et ne sont pas très efficaces par rapport aux modèles de type processus simplifiés (Murray, 2007 ; Ranasinghe *et al.*, 2013 ; French *et al.*, 2016). De plus, le profil côtier peut être modifié lorsque la simulation se produit sur une longue période de temps et nécessitera dans tous les cas un grand degré de calibration pour produire des résultats raisonnables. Également, des discussions sur la diffusion numérique, l'instabilité numérique (Callaghan *et al.* 2006 ; Johnson et Zyberman 2002) et la rigidité numérique ajoutent quelques questions à l'applicabilité de ce type de modèle pour les analyses morphologiques à long terme.

IV.1.3. Modèles agrégés

Il s'agit des modèles hybrides aussi appelés « behaviour oriented models » qui combinent la connaissance empirique (traduite sous forme de relations mathématiques) des caractéristiques morphologiques d'un système côtier, avec l'utilisation de modèles de type processus, utilisés le plus souvent pour calculer les conditions hydrodynamiques associées à une morphologie donnée du système simulé. C'est à dire que pour chaque partie du système, une relation empirique liant les caractéristiques morphologiques au forçage hydrodynamique doit être précisée. Certains d'entre eux comme les modèles de type processus macro-échelle combinent le système sur lequel sont appliqués les processus physiques, c'est à dire qu'ils comportent beaucoup de simplifications : la géométrie de la zone à étudier, une seule granulométrie est considérée etc. (Waeles, 2005). Ces modèles construits à partir des observations sur le littoral sont largement utilisés pour estimer l'évolution côtière à long terme. Ils intègrent par exemple les taux d'évolution historique de la ligne de rivage obtenus à partir de séries de photographies aériennes orthorectifiées et géoréférencées (Dolan *et al.*,

1978 ; Crowell *et al.*, 1991; Thieler et Danforth, 1994 ; Fletcher *et al.*, 2003). Du fait qu'ils dérivent directement du comportement observé, ils rendent compte (implicitement) de tous les processus responsables de l'évolution morphologique locale du rivage. Cependant, les processus spécifiques responsables de changements morphologiques ne sont pas explicitement résolus. La qualité de ces modèles basés sur les données est étroitement liée à la quantité de données disponibles, malheureusement, les données de rivage sont souvent rares (Vitousek et al., 2017) surtout pour les événements de forte énergie comme les tempêtes qui sont pourtant les plus morphogènes.

Coastline Evolution Model (CEM) est un exemple de ces modèles agrégés. Ils montrent des instabilités importantes de la ligne de rivage comme la formation de flèches littorales. Le modèle CEM est un modèle de transport de sédiments sur one-line à complexité réduite qui simule l'évolution du rivage grâce à un transport de sédiments côtiers induit par les vagues. Le modèle utilise une grille régulière de cellules carrées pour représenter la morphologie du littoral. Chaque cellule contient une valeur «F» qui représente «une vue de la cellule occupée par l'eau ou la terre» (Ashton et Murray 2006) (figure 59). Les cellules contenant des valeurs F égales à 1 sont des cellules terrestres complètes et des valeurs F égales à 0 sont des cellules océaniques. Cette valeur est mise à jour en fonction du transport côtier de sédiments à chaque itération du modèle. Le modèle est un mélange de représentation de grille et de ligne de rivage et, bien qu'il montre des solutions d'une grande beauté et complexité, il n'est pas facilement transféré à la pratique d'ingénierie. Les CEM renferment plusieurs simplifications qui limitent leurs applications à des cas spécifiques (Ashton *et al.*, 2016). Le modèle utilise un traitement simple de la réfraction, qui peut affecter les détails des résultats sur des côtes fortement incurvées où les phénomènes de réfraction sont importantes. Aussi, les flèches littorales modélisées ont des extrémités libres, ce qui n'inclut pas les cas où une extrémité de flèche est connectée au rivage, comme lorsqu'il y a un crochet (Hoan *et al.*, 2011). Le modèle à tendance à former des bancs de sable sur les crochets des flèches littorales à des échelles basées sur la discrétisation de domaine.

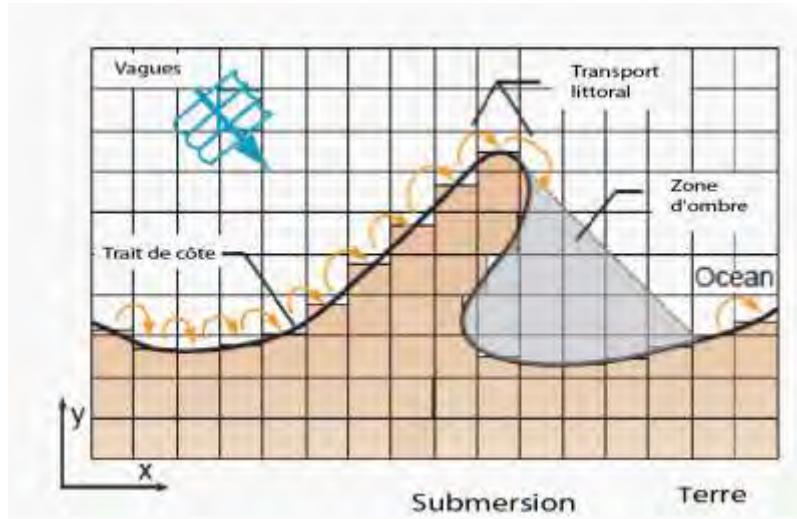


Figure 61 : Schéma du CEM illustrant la discréétisation du plan dans des cellules. Pour les vagues d'orientation et de hauteur données, les sédiments sont transportés le long du littoral en fonction de l'angle d'incidence des vagues et les quantités de cellules sont ajustées en fonction des gradients de flux. Notez également que le transport littoral ne se produit pas dans la zone "ombrée" (Ashton *et al.*, 2016)

Les modèles montrant des comportements plus avancés ont été développés pour des cas spécifiques depuis Ashton et Giosan (2011). Différents modèles utilisent désormais les grilles non-structurées, la décomposition de domaine de discréétisation et des méthodes numériques innovantes, ce qui rend le système de modélisation extrêmement rapide et autorise le calcul parallèle massif (e.g. Roland *et al.*, 2012 ; Bertin *et al.*, 2014). Récemment, les méthodes sans grille commencent à évoluer, elles sont potentiellement plus flexibles et permettent facilement de simuler des processus supplémentaires tels que la coupure de cordon, la fusion de sections littorales, les bancs de sable, l'érosion des falaises, etc.

IV.2. Présentation du modèle ShorelineS

La modélisation littorale à court terme connaît aujourd’hui des avancées notables dans la représentation des différentes formes littorales. Mais pour les modèles à moyen et long terme, des limites importantes subsistent dans la représentation de l’évolution du rivage bien que des avancées soient aussi notées. Ces limites sont surtout liées à la complexité et la rigidité des modèles de type processus et aux simplifications importantes des modèles agrégés.

IV.2.1. Caractéristiques du modèle

ShorelineS est un nouveau modèle morphodynamique développé par Deltares et IHE visant à prévoir l’évolution du littoral sur des périodes allant de plusieurs années à plusieurs siècles. ShorelineS permet de reconstituer les instabilités importantes du rivage comme les

formes en flèches, les crochets ou les ruptures des cordons littoraux. Ce modèle agrégé combine un modèle de type processus simplifié et un modèle empirique. ShorelineS, abandonne l'approche de la ligne de côte fixe en faveur d'une description complètement libre où la côte est schématisée par des chaînes de points qui peuvent se déplacer librement et interagir ensemble (Roelvink *et al.*, 2018 a). Le modèle utilise ainsi une grille flexible permettant de représenter des polylignes pouvant être ouvertes ou fermées (îles). Les structures en dur ou les rivages rocheux sont aussi représentés par un nombre arbitraire de polylignes (figure 60). Ces structures protègent des vagues et bloquent les transports sédimentaires longitudinaux là où elles sont perpendiculaires au rivage jusqu'à ce que le littoral avance suffisamment pour permettre le contournement des sédiments.

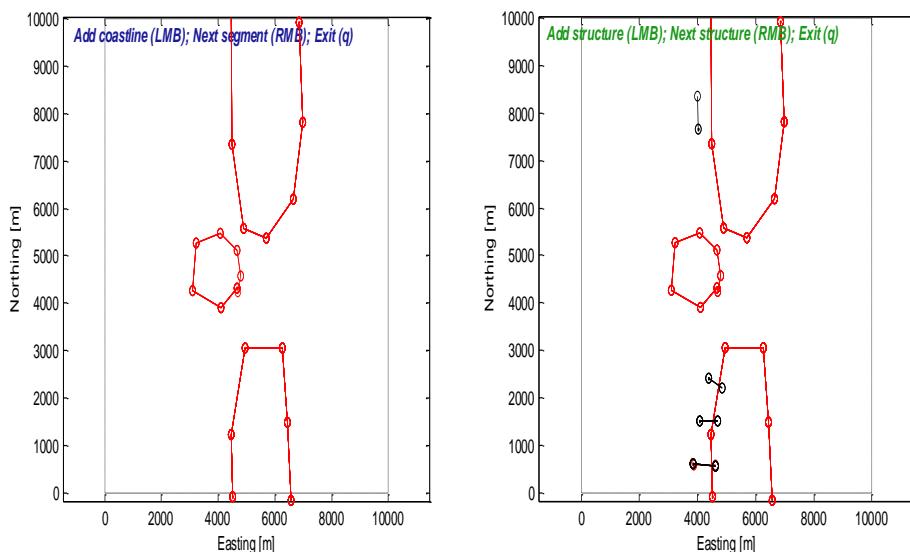


Figure 62 : Schémas illustrant des sections du rivage (en rouge) et structures en dur (en noir) en polylines

Dans ce modèle, le transport des sédiments le long des côtes est régi par une formule de transport de type CERC qui peut être calibrée pour correspondre aux taux de transport locaux (1). Le modèle Xbeach permet de déterminer le climat de vagues en précisant les hauteurs et les angles d'incidences des houles au déferlement. Les modifications du trait de côte sont calculées en fonction des gradients de transport, avec des modifications prenant en compte les instabilités aux grands angles et le transport littoral dans les « zones d'ombre ». La position de la ligne de rivage dépendra surtout de l'angle d'incidence des houles et de la hauteur des houles au déferlement (2) (figure 61).

$$(1) \quad Q = k \frac{\rho \sqrt{g}}{16\sqrt{\gamma(\rho s - \rho)(1-n)}} H_b^{5/2} \cdot \sin 2\alpha_b \quad (2) \quad \partial S_0 = \frac{-1}{1-n} \frac{1}{h_{act}} \frac{\partial Q}{\partial r}$$

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

(2): S_0 est la position de la ligne de rivage, n est le facteur de porosité, h_{act} est la hauteur du profil actif et r est une coordonnée le long de la côte.

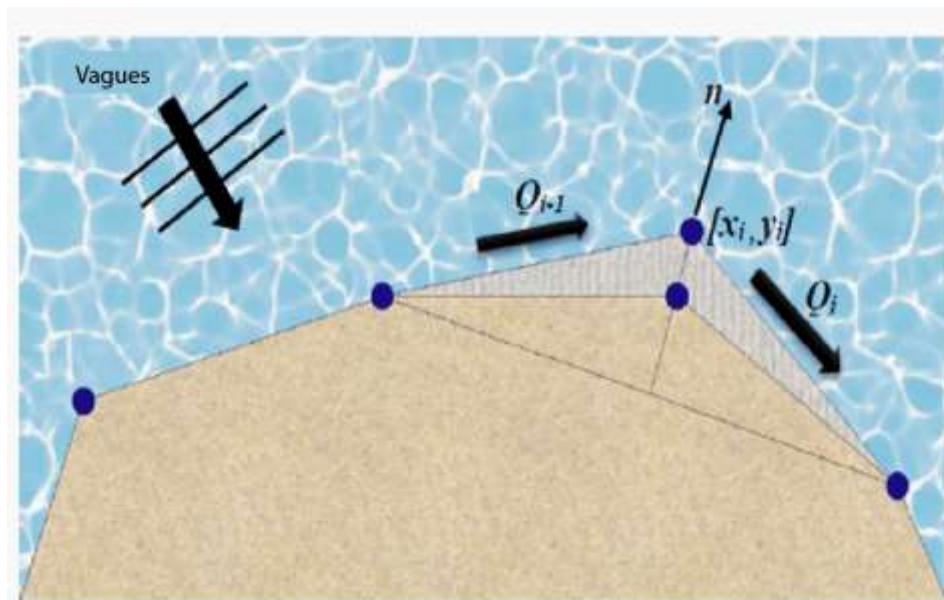


Figure 63 : Schéma illustrant la libre circulation des points de grille dans ShorelineS en fonction de l'angle d'incidence des houles et de leur hauteur au déferlement. Q = transport longitudinal, i = coordonnée d'un point de grille et n = vecteur déplacement (Ghonim, 2019)

Un requadrillage a lieu en permanence pour permettre la croissance de flèches et d'autres formes. Un ensemble de routines est appelé à chaque pas de temps pour vérifier si une submersion du cordon littoral se produit, si les flèches deviennent plus minces et se coupent, ou si des sections de rivage fusionnent (Roelvink, 2017). La flexibilité de cette approche permet de définir facilement des zones des modèles où il est possible de préciser le climat des vagues. La diffraction derrière les brise-lames peut être représentée, ce qui permet de simuler la formation de tombolos. Les traits de côtes initiaux et les structures dures peuvent être introduits de manière interactive ou lus à partir de fichiers Text.

IV.2.2. Climat des vagues

Dans ce travail le modèle Xbeach a permis une représentation du climat des vagues en eaux peu profondes à partir d'un traitement des données de houles au large d'ERA intérime. Afin de prendre en compte l'effet important de la réfraction et de la diffraction, nous avons utilisé une résolution de 200 m pour le modèle des vagues, étant donné l'échelle des caractéristiques bathymétriques (figure 62) et les formes de la côte.

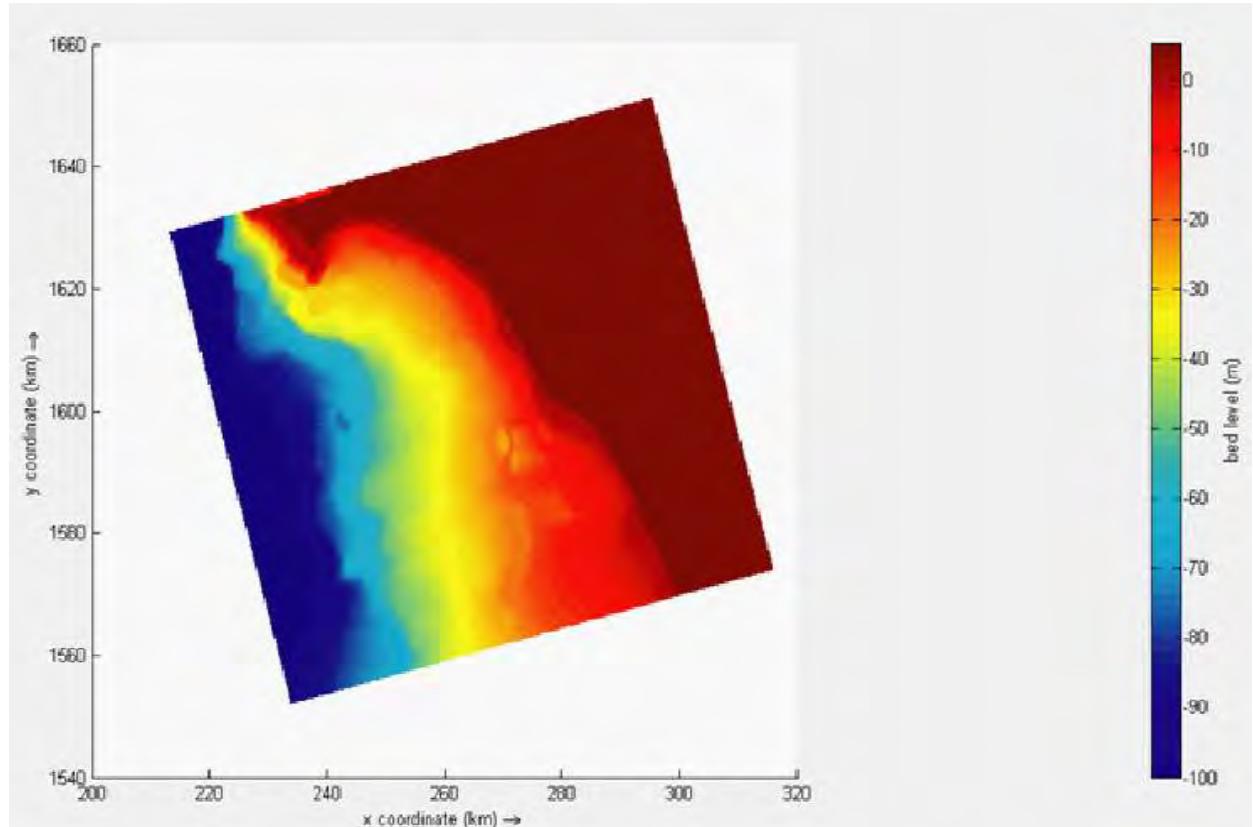


Figure 64 : Modèle bathymétrique de la Petite Côte

La figure 63 illustre la direction des vagues à grande échelle pour des houles incidentes au large des côtes d'une période de 12s. Afin d'utiliser les résultats de ces calculs de réfraction et de diffraction des vagues, nous avons créé une table de correspondance dans laquelle les caractéristiques des vagues sont stockées sur la grille pour des angles incidents de 160 à 220 degrés avec un pas de 20 degrés et pour des hauteurs de vagues de 1 et 2 m. Le modèle ShorelineS peut interpoler la hauteur et la direction des vagues au bas de son profil actif à partir de ces résultats à chaque pas de temps, en fonction de la hauteur et de la direction réelles des vagues au large. La période de la houle a été supposée constante pendant tout au long de la simulation et égale à 12 s. Le rechargeement de la plage n'est pas pris en compte dans le modèle.

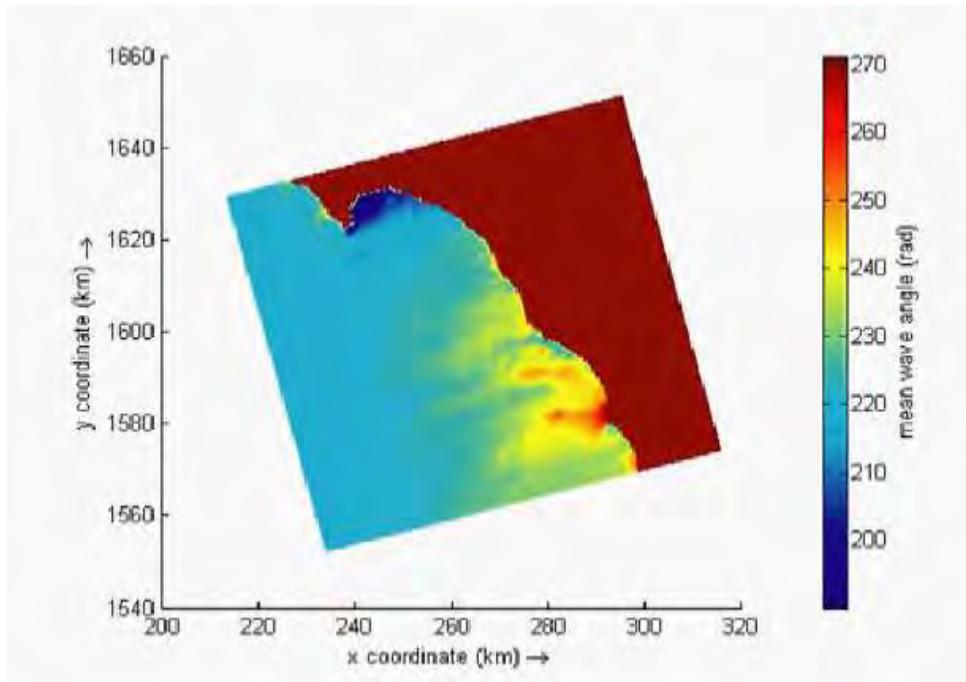


Figure 65 : Directions des vagues sur la côte à Saly pour des directions des houles au large de 20 ° N.

IV.2.3. Configuration des modèles

Les modèles d'évolution ShorelineS sont configurés dans Matlab à l'aide d'une collection de fichiers contenant des informations sur une ligne de rivage initiale (2003), une ligne de rivage observée pour comparaison (2015), les structures en durs, la bathymétrie, l'hydrodynamisme et les conditions aux limites. Ces fichiers au format Text sont d'abord regroupés dans le répertoire d'exécution des modèles (figure 64). Les fichiers Text sont élaborés à l'aide de plusieurs scripts contenus dans la plateforme *Openearth*. *Plot_bathy_from_shape* et aident à passer du format *Shape file* de la carte bathymétrique à des coordonnées cartésiennes. *RunEFshow.m* et *wcon.txt* ont permis dans *Matlab* de transformer les séries temporelles de houles en climats représentatifs de houles avec des coordonnées cartésiennes. Les lignes de rivages digitalisées dans *Arctgis 10.3* sous format shape file sont transformées en fichiers Text grâce au script *plot_costline_from_shape*. Les structures de protection digitalisées dans *Google Earth* au format *KMZ* sont exportées au format *KML* puis converties en coordonnées UTM grâce à *convert_all_klm_to_utm* et transformées en format Text avec *Read TextFile*. Puis des fichiers de Xbeach permettant de simuler la propagation des vagues en eaux peu profondes sont intégrés au répertoire. Enfin, l'exécutable *curvi_coast_Saly_wave* permet aux fonctions ShorelineS d'utiliser tous ces fichiers (figure 65) pour élaborer les modèles d'évolution du littoral et d'enregistrer leur sortie dans le même répertoire.

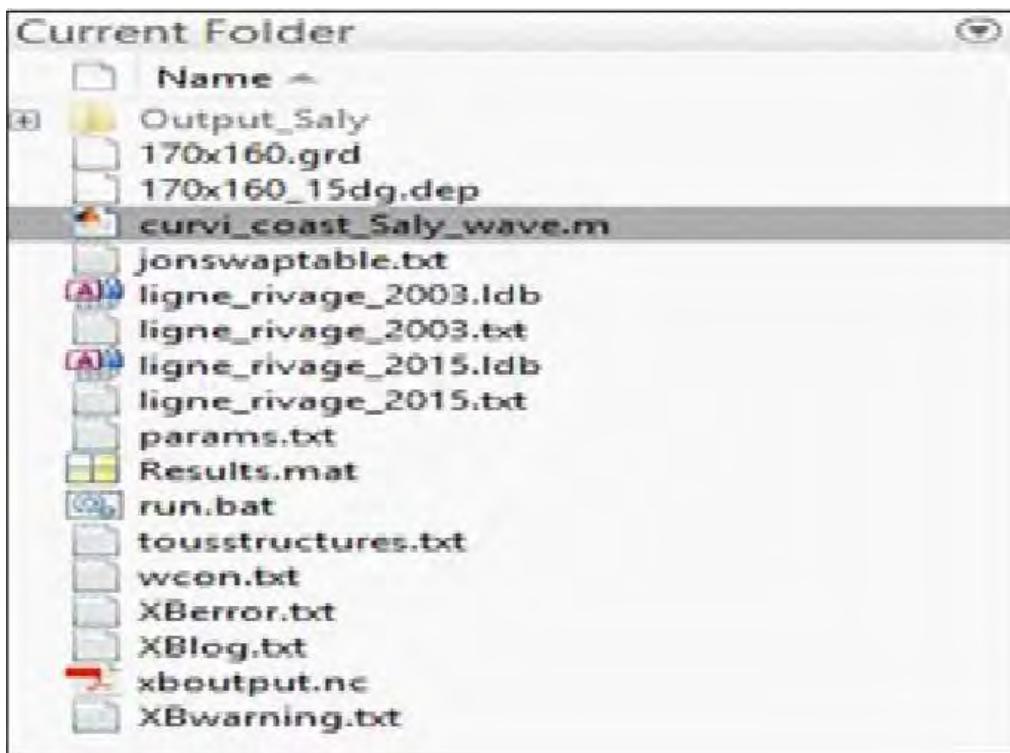


Figure 66 : Répertoire Matlab contenant l'ensemble des fichiers utilisés par le modèle ShorelineS

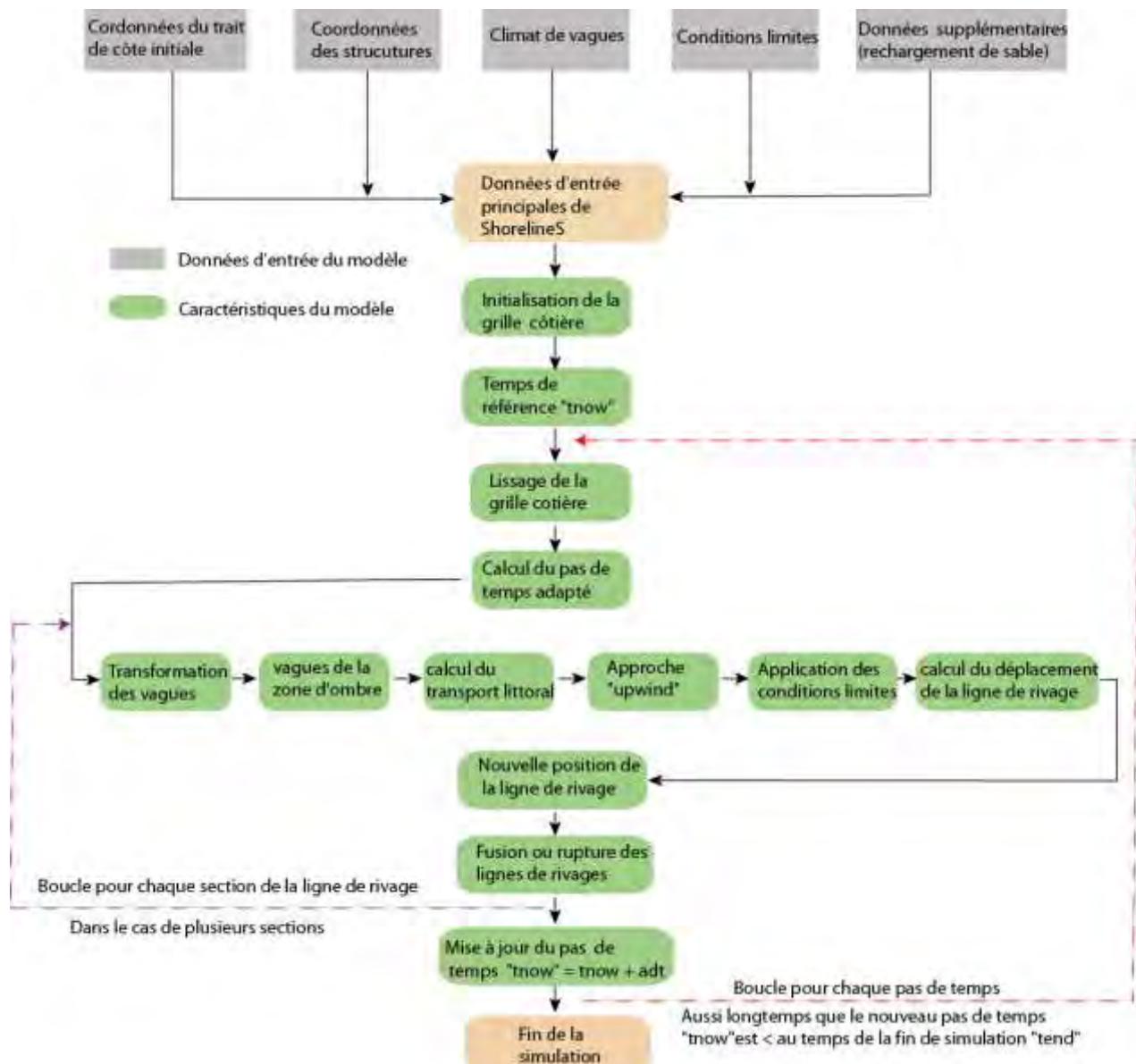


Figure 67 : Organigramme général du modèle ShorelineS (Ghonim, 2019)

IV.3. Validation du modèle ShorelineS

Dans cette partie les taux d'évolution de la ligne de rivage obtenus à partir des modèles sont comparés à ceux des images aériennes de la même période.

IV.3.1. Présentation des résultats des modèles

Les performances des modèles *ShorelineS* sont évaluées en calculant par rapport à la ligne de rivage des images, des paramètres comme l'Erreur Absolue Relative Moyenne (EARM) et le coefficient de corrélation (R) ci-dessous (3 et 4). L'Erreur Absolue Relative Moyenne donne l'incertitude des modèles par rapport aux images aériennes. Elle est moins sensible à la

présence de valeurs aberrantes ou extrêmes que le coefficient de corrélation (Van Rijn et al. 2003). Le coefficient de corrélation permet d'estimer la fidélité du modèle. Cette corrélation est meilleure lorsque ce coefficient est égal ou proche de 1. Dans cette étude, la corrélation est forte si la valeur absolue de R est comprise entre [0,5 et 1] et faible si cette valeur est comprise entre [0 et 0,5]. En effet la corrélation est négative si les variables sont des fonctions affines décroissantes (Source : fr.wikipedia.org).

(3)

$$RMAE = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{|o_i - p_i|}{p_i}$$

(4)

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2}}$$

où N est le nombre d'observations, o_i est la valeur observée de l'observation i qui correspond dans cette étude à celle de l'image, et p_i la valeur prédite de i c'est-à-dire du modèle, \bar{o} la valeur moyenne de toutes les observations et \bar{p} la valeur moyenne des valeurs prédites (Than, 2015).

La figure 66 montre les taux d'évolution du littoral calculés sur des images aériennes et simulés avec le modèle ShorelineS. Les taux d'évolution des modèles entre 2003 et 2016 montrent les mêmes tendances que les résultats des images aériennes. Les segments 1 et 2 du Nord-Ouest sont en accumulation tandis que les segments 3, 4 et 5 du Sud-Est sont en érosion. Les différences constatées dans les résultats se situent principalement à proximité des structures de protection du littoral. En effet, les taux d'évolution des modèles peuvent différer de ceux des images surtout juste en aval des épis (a) et devant les murs en enrochements (b). Ces zones (a) et (b) sont situées respectivement sur les segments S2 et S4.

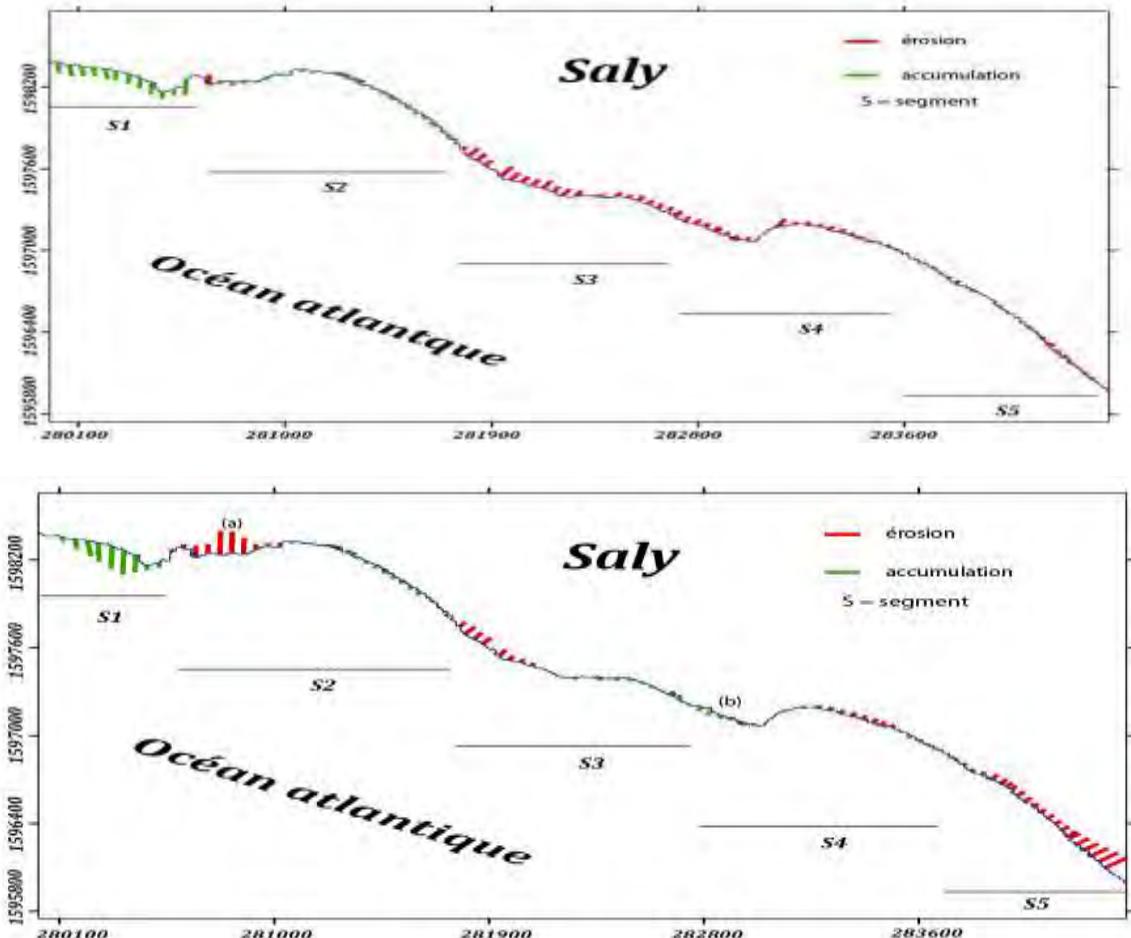


Figure 68 : Changements observés et modélisés sur littoral entre 2003 et 2016. Panneau supérieur : changements observés ; panneau inférieur : changement modélisée

Des différences sont également notées sur les taux d'érosion ou d'accumulation (figure 67). Dans les modèles ShorelineS, ces taux sont majorés ou minorés près des structures de protection côtières. Le taux d'accrétion moyen du segment 1 est de 4,73 m/an sur les images et de 7,17 m/an sur les modèles. Le taux d'érosion moyen du segment S3 est de -3,56 m/an sur les images et de -0,99 m / an sur les modèles. Ce taux d'érosion moyen sur le segment 5 est de -0,60 m/an sur les images et de -2,25 m/an sur les modèles. Les segments S1, S2 et S5 ont des erreurs absolues relatives moyennes (EARM) faibles (0,15 ; 0,07 et 0,7 m/an respectivement). Les coefficients de corrélation (R) sont plus élevés pour les segments S1, S2 et S3 (0,89 ; 0,68 et 0,58 respectivement). Ils sont plus faibles pour les segments S4 et S5 (0,11 et -0,12).

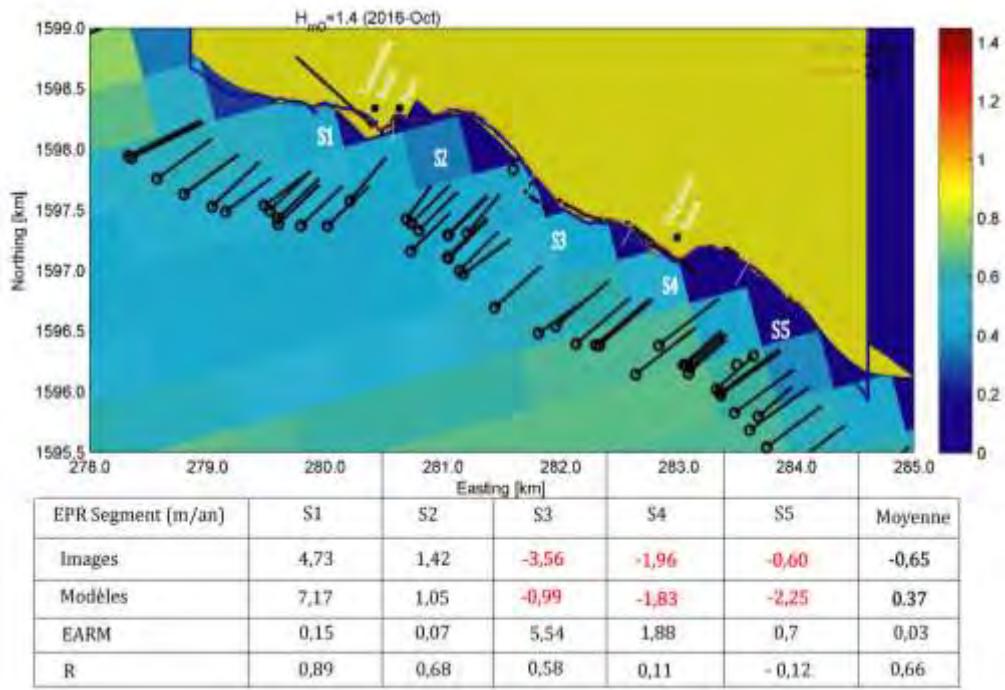


Figure 69 : Taux d'évolution moyens des images et des modèles à Saly entre 2003 et 2016

IV.3.2. Discussion sur les résultats des modèles

ShorelineS reflète bien l'évolution de la ligne de rivage à Saly avec des coefficients de corrélation élevés sur les segments 1, 2 et 3. Pour la période 2003-2016, les segments 1 et 2 du Nord-Ouest sont en accumulation et les segments 3 et 4 du Sud-Est sont en érosion aussi bien sur les images que sur les modèles. Pour la même période, les EARM des lignes de rivages des modèles des segments 1, 2 et 5 sont inférieurs à l'erreur totale de la ligne de rivage sur les images (1,65 m/an). D'après Van Rijn et al. 2003, dans la modélisation, il est préférable que les erreurs du modèle se situent dans la marge d'erreur des valeurs observées. Les EARM élevées des segments 3 et 4 peuvent s'expliquer par le fait que le modèle ShorelineS exagère les processus d'accumulation en face des structures de protection parallèles à la ligne de rivage (murs) et en amont des structures perpendiculaires au rivage (épis). Les phénomènes d'érosion en aval des épis sont aussi exagérés (figure 68). Le modèle ne prend pas en compte les phénomènes d'affouillement qui se produisent à la base des murs de protection.

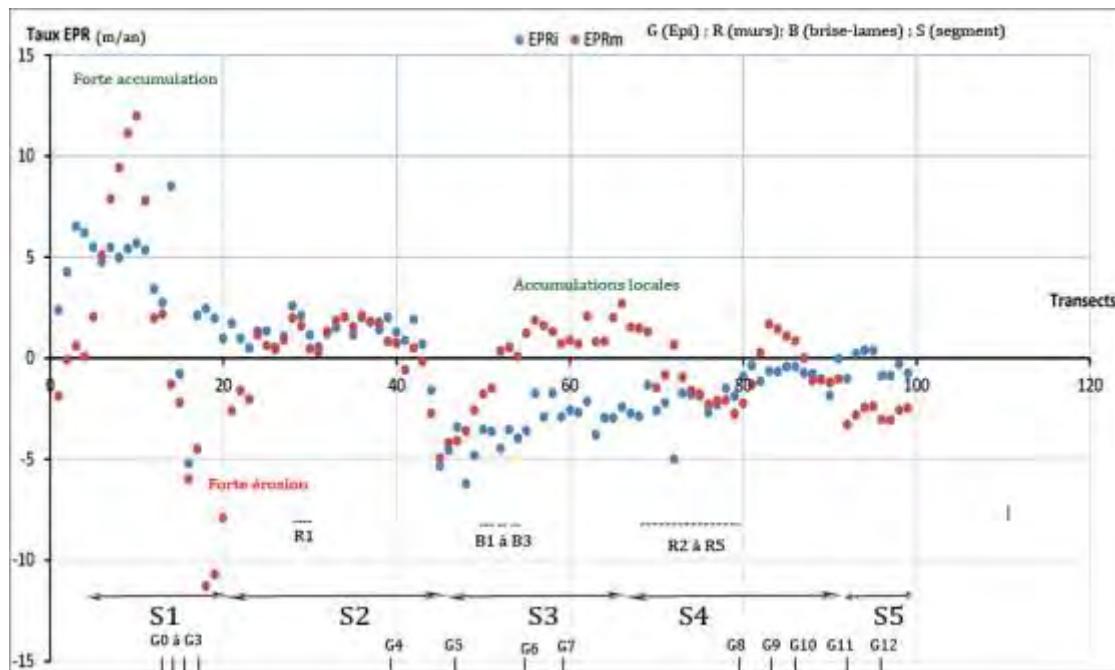


Figure 70 : Evolution de la ligne de rivage des modèles et des images à Saly entre 2003 et 2016

Ses imprécisions pourraient être liées à la manière dont les structures perpendiculaires au rivage sont introduites dans le modèle ShorelineS et à l'approche de contournement choisie. La première approche de contournement suppose que la structure bloque complètement le transport des sédiments du littoral et que le contournement ne se produit que lorsque la structure est remplie de sable (Pelnard-Considère, 1956). Cela augmente les taux d'accumulation en amont et les taux d'érosion en aval de l'épi. En réalité, le sable contourne l'extrémité côté mer de l'épi juste après la construction de la structure si sa longueur est inférieure à la distance de fermeture du profil côtier, comme indiqué dans une deuxième approche (Larson *et al.*, 1987). La manière d'introduire sur le modèle une structure normale comme un épi peut également conduire à des imprécisions. L'épi se situe généralement entre deux points de la grille du trait de côte qui ne sont pas assez proches de lui, ce qui donne une réponse imprécise du trait de côte, soit amont, soit en aval de l'épi (Ghonim, 2019). Cet auteur suggère d'insérer de nouveaux points d'intersection aux points de grille existants sur le trait de côte, si ces points n'existaient pas, et de forcer les points d'insertion à se déplacer uniquement le long de la structure. Cela évite les fortes accumulation et érosion qui se produisent en amont et en aval de la structure et les mouvements irréguliers du trait de côte.

IV.4. Scénarios de protection du littoral

Les scénarios M2 à M6 définis dans le tableau 18 ont été déroulés au cours de cette période pour déterminer les plus aptes à minimiser les effets de l'érosion sur le littoral de

Saly. Un scénario détermine un ensemble des structures de protection littoral intégrées aux fonctions ShorelineS avant son déroulement. Il donne les types de structures utilisés, leurs positions et leurs dimensions. Pour chaque scénario, ShorelineS produit au cours de son exécution plusieurs modèles d'évolution du littoral en fonction du temps.

La qualité d'un modèle d'un scénario est appréciée en fonction du nombre de segments en érosion et de leurs taux d'érosion. Ceci du fait que toute la zone d'étude étant occupée par des installations humaines, les segments qui ont approximativement les mêmes longueurs présentent relativement les mêmes intérêts socio-économiques. Les meilleurs modèles sont ceux avec moins de segments en érosion et à des taux plus faibles. Par exemple un modèle avec un seul segment en érosion indique moins de zones à protéger et évite ainsi la mise en place d'une multitude de structures de protection côtière dont les coûts sont souvent très élevés.

Tableau 18 : Différents scénarios de protection du littoral de Saly entre 2003-2016

Scénario M1 :	Evolution de la ligne de rivage avec les ouvrages de protection actuels
Scénario M2 :	Evolution de la ligne de rivage sans les ouvrages de protection actuels
Scénario M3 :	Evolution de la ligne de rivage avec la réduction des longs épis
Scénario M4 :	Evolution de la ligne de rivage sans les longs épis
Scénario M5 :	Evolution de la ligne de rivage protégée uniquement par des épis
Scénario M6 :	Evolution de la ligne de rivage protégée uniquement par des murs de protection

IV.4.1. Résultats des scénarios

Entre 2003 et 2016, les modèles des scénarios M3 et M5 montrent que seul S3 est en érosion (figure 69). Ces modèles sont plus favorables à la protection du littoral de Saly. Cependant, le taux d'érosion moyen du segment 3 sur le scenario M3 (-1,16 m/an) est inférieur à celui du scenario M5 (-3,60 m/an) sur le même segment. Les taux d'accumulation des segments S1, S2, S4 et S5 sont par contre plus élevés sur M5. Il faut souligner que les pics observées sur les taux d'érosion juste en aval des structures perpendiculaires au rivage (port et ponton) ne sont pas prises en compte dans l'évaluation des modèles de protection car les taux sont exagérés à ces endroits par le modèle ShorelineS comme indiqué précédemment.

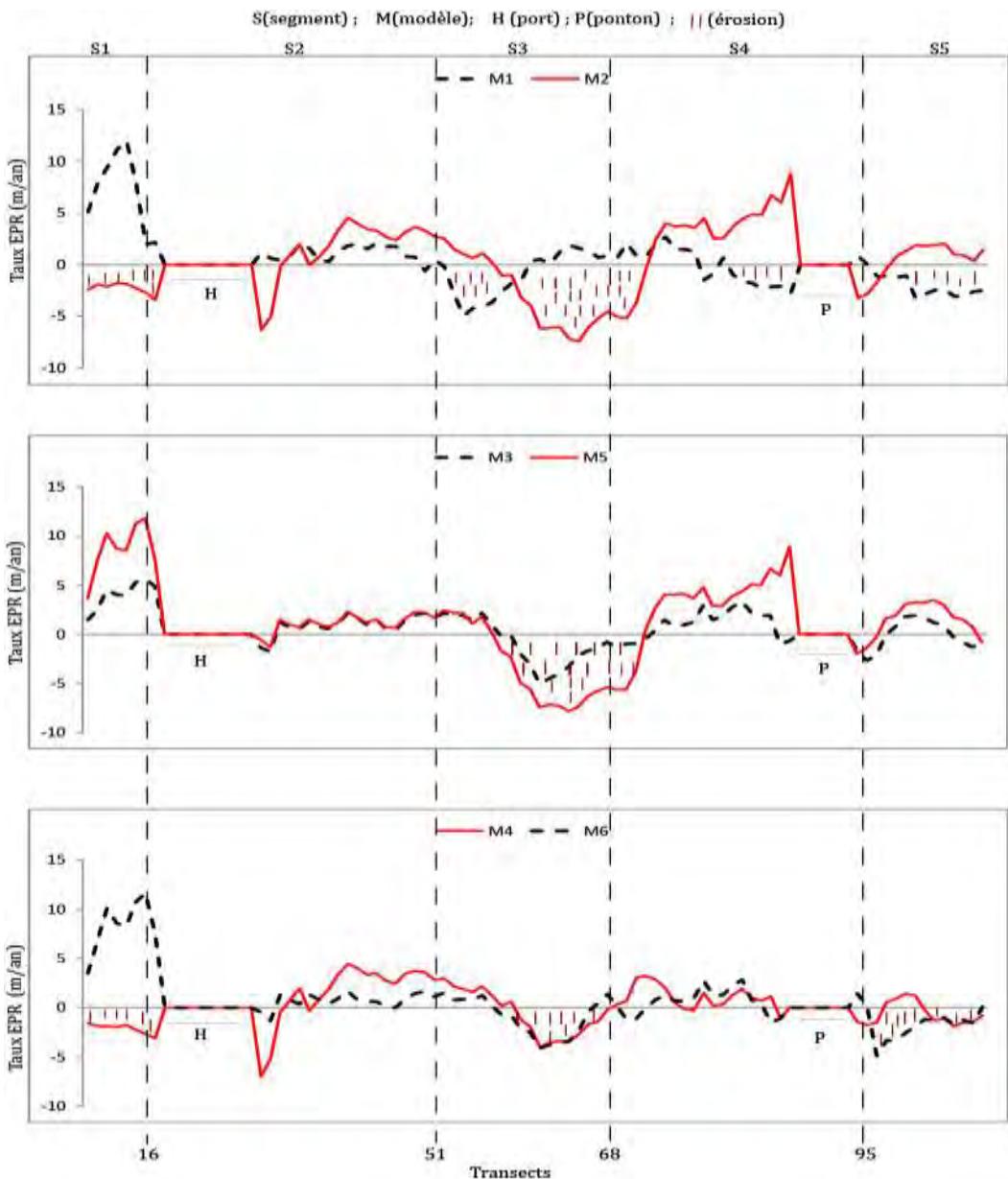


Figure 71 : Courbes d'évolution de la ligne de rivage des modèles des scénarios entre 2003 et 2016

Les scénarios M2, M4 et M6 sont moins favorables à la protection du littoral de Saly. Les modèles M2 ont deux segments (1 et 3) en érosion (figure 70) avec respectivement des taux relativement élevés (-2,95 et -3,13 m/an) (figure 71). Les modèles M4 ont trois segments (S1, S3 et S5) sur cinq en érosion avec des taux d'érosion moyens plus élevés sur le segment 1 (-2,13 m/an). Avec le scenario M6 les segments 3 et 5 s'érodent avec des taux relativement moins élevés de -1,06 et -1,99 m/an, respectivement. Quel que soit le scénario considéré, le segment 2 est en accumulation tandis que le segment 3 est en érosion. Le taux d'accréation du segment 2 est plus élevé pour M2 (1,66 m/an) et le taux d'érosion du segment 3 est plus élevé pour M5 (-3,60 m/an).

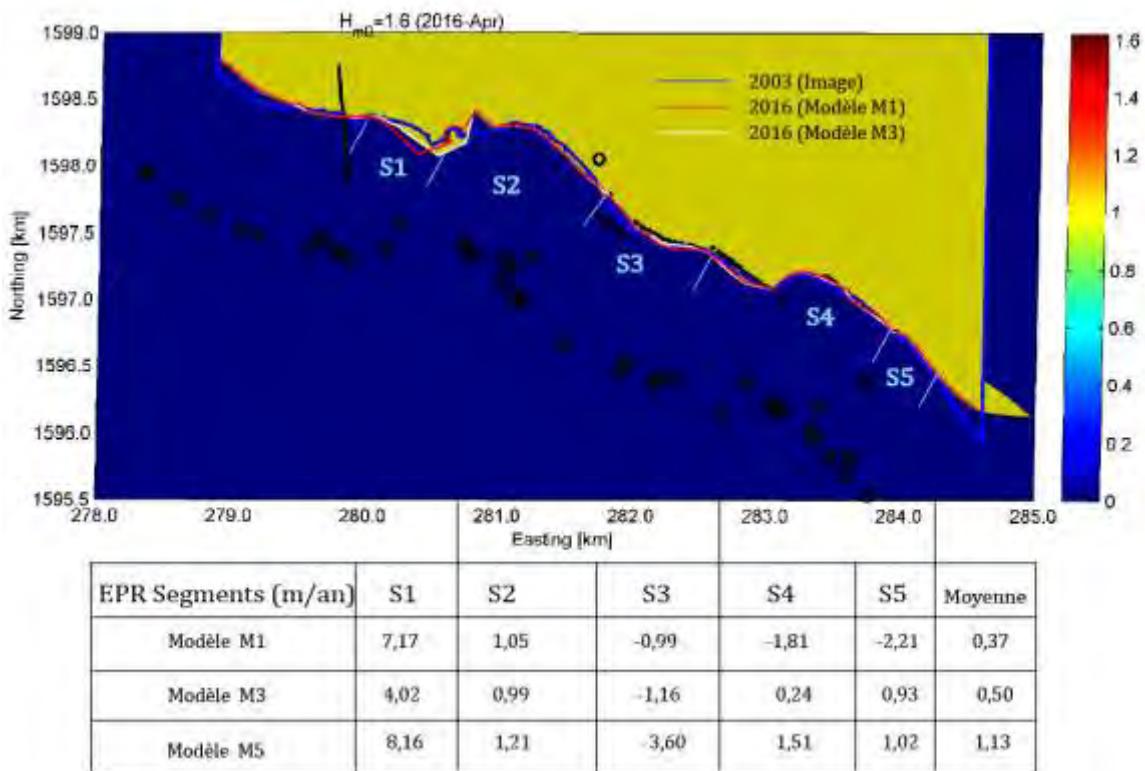


Figure 72 : Taux d'évolution moyens des modèles M1, M3 et M5 entre 2003 et 2016

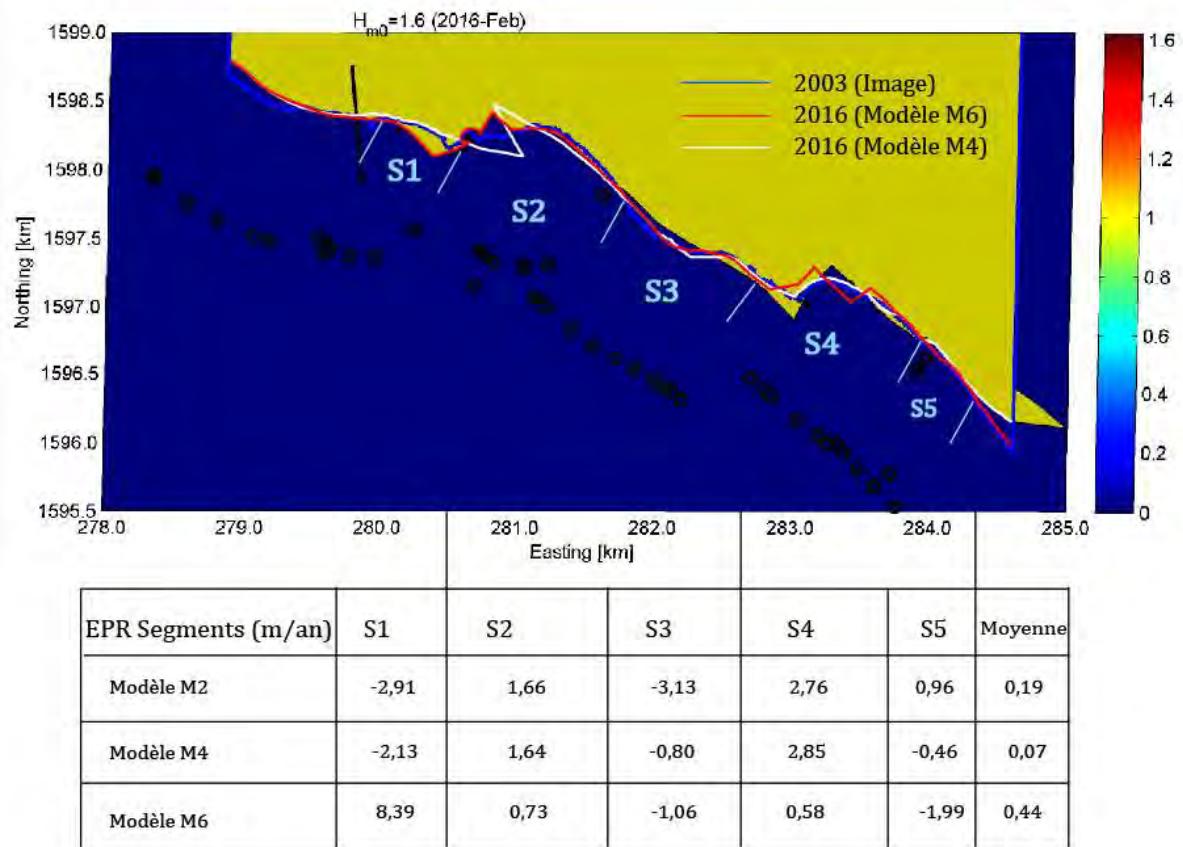


Figure 73 : Taux d'évolution moyens des modèles M2, M4 et M6 entre 2003 et 2016

IV.4.2. Discussion sur les scénarios

Les résultats des scénarios de protection élaborés mettent également en évidence l'érosion sectorielle du littoral et confirment les résultats des images aériennes. Les modèles du scénario M4 ont 3 segments en érosion, tandis que les modèles M2 et M6 présentent chacun 2 segments en érosion (figure 72). Les épis G1 et G5 absentes dans M4 jouent un rôle important dans la protection du littoral qui est soumis à une érosion généralisée sans eux. Avec deux segments en érosion à des taux relativement élevés, le scenario M6 montre que les murs en enrochements R1 à R5 ne sont pas favorables à la protection du littoral. Les murs en enrochements ne protègent que les terres situées immédiatement derrière eux et n'ont aucun effet bénéfique sur les rivages et les plages adjacentes (NU, 1983). Sans structures de protection, comme dans le cas du M2, le littoral de Saly est très menacé car deux segments connaissent une très forte érosion. Cela montre que les structures de protection ont néanmoins des effets bénéfiques sur le littoral.

L'érosion du segment 3 sur les modèles peut s'expliquer par sa position sur le littoral de Saly. Il souffre depuis longtemps des effets aval dérivés des longs épis G1 et G5. Le taux d'érosion plus faible sur M3 montre que la protection de la côte de Saly est meilleure avec seulement des épis (M5) et surtout si certaines d'entre elles sont réduits (M3). Ainsi, le scénario M3 minimisent plus les effets de l'érosion sur le littoral de Saly entre 2003 et 2016.

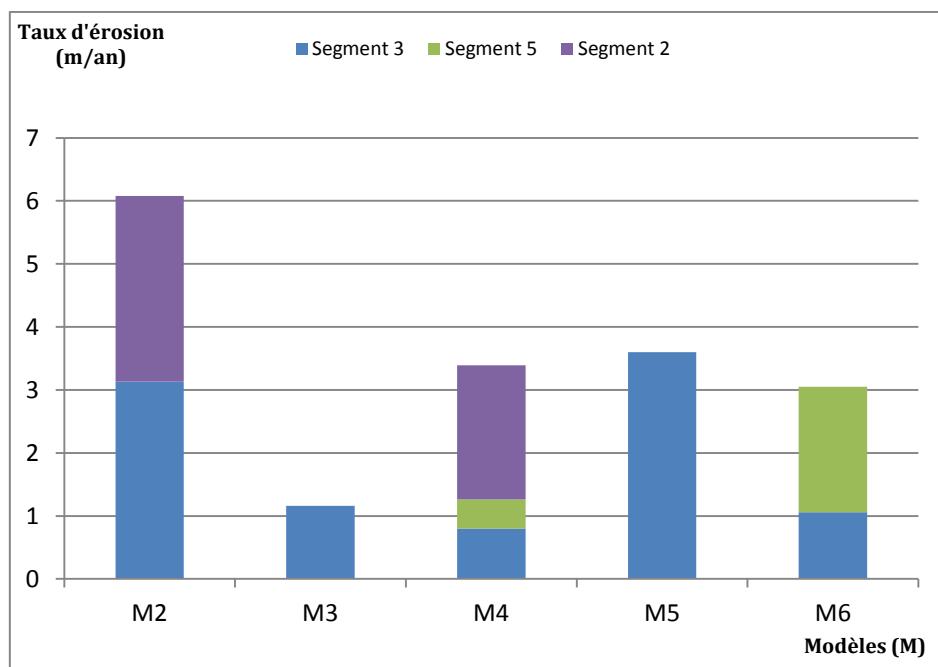


Figure 74 : Taux d'érosion moyen des segments avec les modèles M2 à M6 entre 2003 et 2016

IV.5. Evolution future du rivage

Les modèles du scénario M1 représentant l'évolution du rivage avec les ouvrages de protection actuels et du scénario M3 plus favorable à la protection du littoral de Saly sont projetés pour avoir plus de précisions sur les solutions de protection du littoral. Nous avons limité la projection sur le moyen terme (9 ans et 19 ans) même si les modèles ShorlineS peuvent couvrir des dizaines d'années, du fait de la complexité du milieu littoral qui subit les influences de plusieurs facteurs naturelles ou anthropiques difficiles à appréhender sur le long terme. Les modèles de l'évolution future de la ligne de rivage ne seraient valables que si les dynamiques météo-marins et socio-économiques du littoral de Saly se poursuivent ou varient dans de faibles proportions. Pour ces raisons l'évolution future de la ligne de rivage est étudiée sur deux périodes : 2016-2025 et 2025-2035.

IV.5.1. Résultats des évolutions

Pour la période 2016-2025, les modèles de scénario M1 et M3 montrent que les segments 3 et 5 continueront de s'éroder, bien que les taux d'érosion moyens soient encore plus bas pour le scénario M3 (figure 73). Les taux d'érosion moyens des segments 3 et 5 sont respectivement de -0,29 et -0,85 m/an pour les modèles M1 et de -0,18 et -0,24 m/an pour les modèles M3. Le segment 4 reste érodé pour les modèles M1 pendant cette période (-1,17 m/an).

De 2025 à 2035, les segments 3 et 5 continueront de s'éroder sur les modèles M1 avec des taux d'érosion moyens de -0,10 et -1,38 m/an, respectivement. Pour cette deuxième période, seul le segment 5 reste érodé sur le M3 avec un taux moyen de -2,53 m/an.

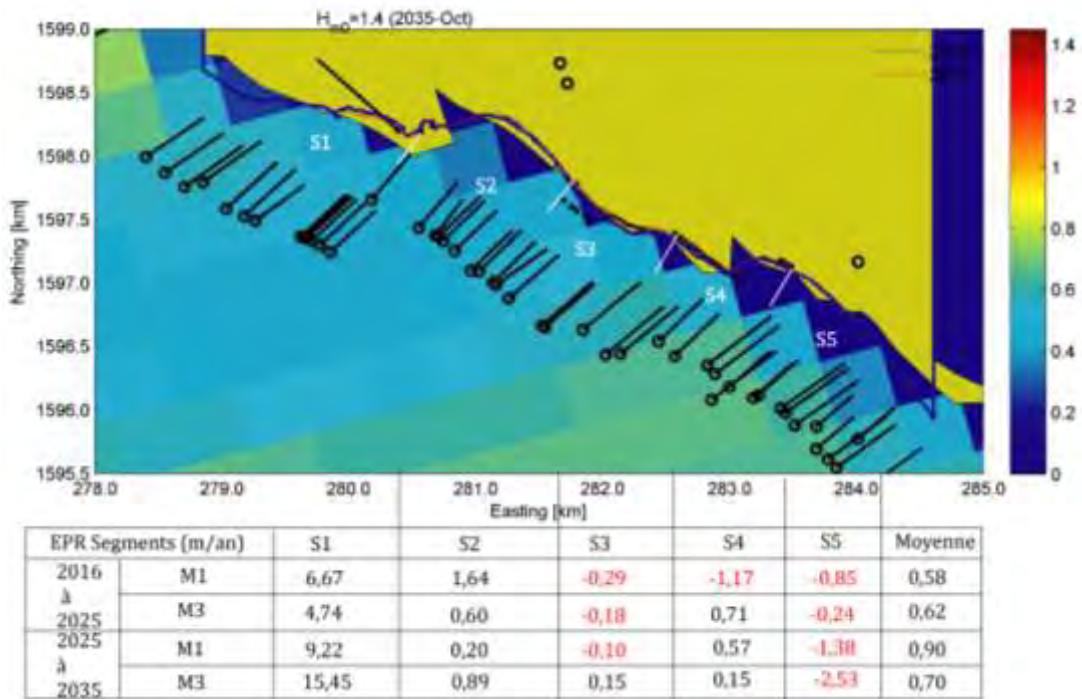


Figure 75 : Taux d'évolution moyens du littoral de Saly entre 2016 et 2035 sans modification de la protection du littoral (M1) et avec réduction des longs épis (M3).

IV.5.2. Discussion sur les évolutions

Pour la période 2003-2016, les segments 1 et 2 du Nord-Ouest sont en accrétion avec respectivement 7,17 et 1,05 m/an. Sur les segments 3, 4 et 5 du Sud-Est, des taux de recul de -0,99, -1,83 et -2,21 m/an ont été enregistrés. Pour l'évolution future du littoral, les modèles montrent que, sans aucune modification des structures de protection actuelles, l'érosion se poursuivra sur les segments 3, 4 et 5 de 2016 à 2025 avec respectivement -0,29 ; -1,17 et -0,85 m/an (figure 74). De 2025 à 2035, les segments 3 et 5 connaîtront encore une érosion avec des taux respectifs de -0,10 et -1,38 m / an. L'érosion côtière à Saly est principalement liée à la longueur des épis G1 et G5 qui augmentent les taux d'érosion dans le secteur Sud-Est de la côte. Les épis longs et hauts prennent plus de temps à se remplir (Nations Unies, 1983). Sur les secteurs en aval, où l'apport en sédiments est relativement faible, les fortes houles mobilisent les sédiments et accélèrent les taux d'érosion en particulier lors des tempêtes.

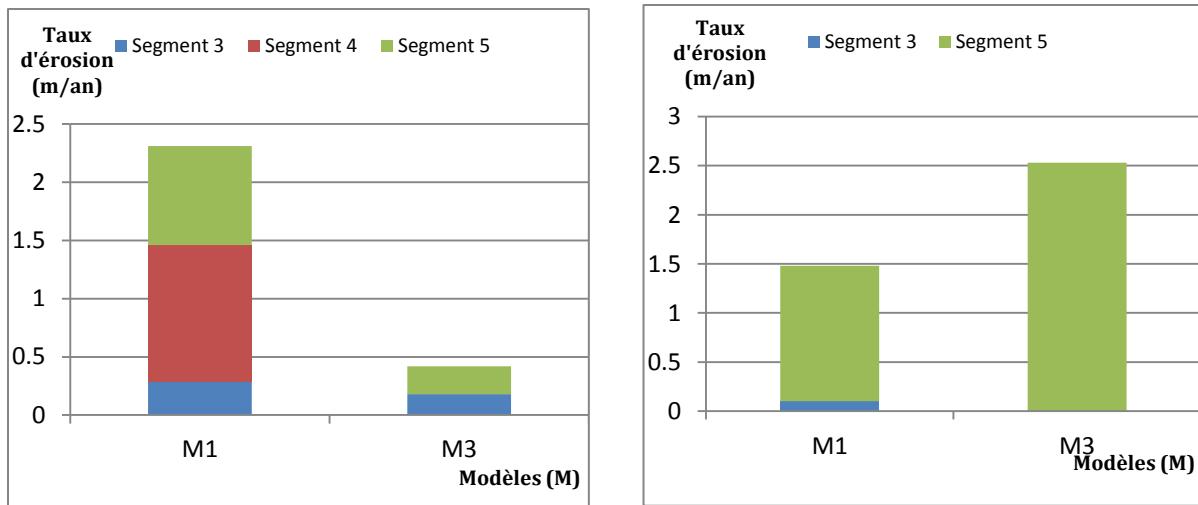


Figure 76: Taux d'érosion des segments avec modèles M1 et M3 entre 2016-2025 (à gauche) et 2025-2035 (à droite)

Les projections du modèle confirment que les épis réduits ont des effets bénéfiques sur la sédimentation littorale du secteur Sud-Est. Selon les modèles M3, de 2016 à 2025, les taux d'érosion des segments 3 et 5 diminueront dans la zone Sud-Est si les longueurs des épis G1 et G5 sont réduites, sans pour autant nuire à la stabilité du secteur Nord-Ouest. D'autre part, si la longueur des épis n'est pas réduite, le segment 4 continuera à s'éroder. De 2025 à 2035, le segment 3 sera stable avec une réduction de la longueur des épis (0,15 m/an). Nous observons la réduction du nombre de segments en érosion pendant les deux périodes avec le scénario M3. Cependant, les prévisions doivent toujours prendre en compte la complexité de l'environnement côtier, influencé par plusieurs facteurs naturels ou anthropiques difficiles à appréhender sur le long terme.

Le segment 4 pourrait devenir vulnérable à l'érosion entre 2016 et 2035 car les modèles montrent une stabilité apparente (accroissements locaux) malgré q'il soit protégé principalement par des murs en enrochements qui subissent des affouillements pouvant mener à leur effondrement. Des études ont montré que la durée de vie moyenne des murs en enrochements au Sénégal ne dépasse pas 13 ans (Ngom, 2012). La présence des brise-lames B1, B2 et B3 sur le segment 3 ne l'empêchera pas de s'éroder si l'état actuel de la protection côtière est maintenu jusqu'en 2035. Seule une réduction de la longueur des épis réduira le processus d'érosion dans ce segment 3 pour la période 2016-2035. Les épis représentent les structures de protection les plus aptes à protéger le littoral de Saly. Cependant, pour atteindre cet objectif, la longueur des épis et l'espacement entre eux doivent être réévalués.

Conclusion partielle

Le modèle ShorelineS a permis de suivre l'évolution historique du trait de côte de Saly entre 2003 et 2016 et de prédire cette évolution entre 2016 et 2035. Il permet aussi de proposer des modèles efficaces et réalistes de protection du littoral. Les plus favorables pour l'engraissement côtier restent ceux avec des épis réduits (M3), un seul segment du littoral étant en érosion à un taux faible. La longueur des épis G1 et G5 accentuent les phénomènes d'érosion à Saly. Une réduction de la longueur de ces épis pourrait constituer une solution transitoire au problème de l'érosion côtière à Saly. La projection du scenario M3 jusqu'en 2025 le confirme, car les taux d'érosion diminueront dans les segments actuellement en érosion. Cela pourrait également réduire ou éviter la vulnérabilité à l'érosion des segments 3 et 4 au-delà de 2025.

Les modèles montrent également à long terme que les brise-lames sont des solutions ayant à court terme un faible impact sur l'érosion côtière, principalement liées à un déficit sédimentaire accentué par des actions anthropiques. Les murs en enrochements ne sont pas adaptés au littoral, car ils sont soumis à un fort affouillement qui les déstabilisent. Une réduction de la longueur et une redistribution des épis par un espacement adéquat entre eux pourrait constituer une solution très prometteuse au problème de l'érosion côtière. Cette solution consiste à délocaliser certains épis et en créer d'autres. Une alimentation en sable peut être associée à ce réseau structuré d'épis afin de minimiser leurs effets érosifs aval dérive. Ce rechargement des plages devrait se faire sur le segment 3, qui est fortement menacé par les processus d'érosion.

CHAPITRE V. STRATEGIES DE PROTECTION DU LITTORAL

Malgré la pertinence du cadrage institutionnel, juridique et la multiplicité des programmes et projets sur la zone côtière Sénégalaise, le problème d'érosion côtière persiste. Cette situation résulte d'une gouvernance matérialisée par une gestion sectorielle des différents problèmes auxquels le littoral fait face. C'est ainsi que la multiplication des ouvrages de protection constitue une réalité sur le littoral de Saly Portudal (Ndiaye, 2016). L'analyse des données recueillies à partir des modèles d'évolution ShorelineS et des images aériennes mettent en exergue une accentuation des phénomènes d'érosion à Saly depuis 1989 et leur continuité avec l'état actuelle de la protection de la côte. Les processus d'érosion sont d'abord liés à un déficit sédimentaire attribué au canyon de Kayar qui piègerait une bonne partie des sédiments transportés par la dérive littorale le long de la côte nord (Niang-Diop, 1995) et à la fixation de sédiments par les constructions sur le rivage puis sont accentuées par une politique de gestion mal entreprise. Certaines protections réalisées aggravent les phénomènes d'érosion au lieu de les atténuer. Les scénarios de protection déroulés avec ShorelineS indiquent que les longs épis G1 et G5 ont eu des impacts négatifs en terme d'érosion sur la partie Sud de Saly. Les modèles déroulés montrent aussi que les murs et les brise-lames pour l'instant n'ont pas donné des résultats satisfaisants. Une analyse objective des stratégies de protection du littoral sénégalais permet de déceler des insuffisances à l'origine de leur inefficacité. Des solutions stratégiques murement réfléchies qui seraient en phase avec les facteurs naturels d'évolution côtière pourraient être proposées aux décideurs pour une gestion à long terme du littoral. La modélisation littorale permet de proposer et de tester des mesures, des méthodes ou des stratégies de protection de la côte en rapport avec les caractéristiques physiques du littoral. Des solutions innovantes pourraient à l'avenir atténuer à long terme les problèmes d'érosion de la côte sans provoquer des dommages importants sur l'environnement ou exiger des dépenses difficiles à supporter pour les pays en voie de développement. Ainsi, pour plus d'efficacité dans la gestion du littoral, la gouvernance du phénomène d'érosion côtière dans un contexte des changements climatiques devrait adopter une nouvelle démarche en intégrant la dimension recherche-action-développement. En effet, comme le souligne le rapport de l'UEMOA (2011), l'information scientifique qui doit faciliter la prise de décision en matière d'aménagement et de politiques concernant les communautés côtières n'est pas pleinement mise à contribution à cause de la faiblesse des interactions entre les décideurs, les techniciens et les chercheurs. Par conséquent, l'implication de toutes ces compétences devient un impératif de gestion pour les décideurs (Ndiaye, 2016). Ce chapitre permettra de revoir les différentes mesures de protection côtière, d'étudier les méthodes de protection réalisées à Saly afin de déceler les insuffisances qu'ils présentent et de proposer des modèles de protection du

littoral en tenant compte de l'expérience du Sénégal sur la protection littorale. Toutes ces analyses nous permettront au terme de ce travail de suggérer des solutions de protection du littoral aussi bien au niveau local que national pouvant être utiles à la planification de la gestion du littoral.

V.1. Différentes mesures de protection côtière

Afin de mieux appréhender l'état de fonctionnement des ouvrages de protection réalisés à Saly, il est nécessaire de présenter les méthodes douces et dures les plus souvent utilisées à travers le monde pour lutter contre l'érosion côtière. Ceci nous permettra, après avoir évalué l'efficacité (succès ou échecs) des ouvrages de protection construits à Saly, de donner des propositions de protection alternatives ou des recommandations sur la protection littorale. Il est à noter que ces mesures de protection ont été surtout prises dans les zones où l'érosion côtière constituait une menace à l'occupation de l'espace par les populations ou un frein au développement de leurs activités économiques. Il existe de nombreuses mesures de protection des côtes qui d'une manière générale entrent dans deux catégories :

V.1.1. Solutions douces

Il s'agit essentiellement de mesures de type législatif, institutionnel, éducationnel et de méthodes qui favorisent l'engraissement naturel des plages par les agents hydrodynamiques. Parmi ces dernières, on peut citer :

➤ Le contrôle de l'utilisation des sols

Il consiste à n'autoriser la construction en bordure de mer que de structures mobiles semi-permanentes ou susceptibles d'être réparées à peu de frais. L'occupation humaine constitue en effet une menace à l'environnement côtier. Le code de l'environnement (loi n°2009-01 du 15 janvier 2001) permet à l'Etat du Sénégal de prendre ce genre de mesure. En son article 69, l'autorisation d'occupation du Domaine Public Maritime ne doit entraver ni le libre accès au domaine public maritime et fluvial, ni la libre circulation sur la grève, ni être source d'érosion et de dégradation du site. Seuls sont autorisés sur les domaines publics maritime et fluvial, à titre d'occupations privatives, les installations légères et démontables. Cependant comme le souligne Ndiaye (2016), ces dispositions ne sont respectés ni par les régulateurs ni par les usagers, ce qui est perceptible à Saly où les constructions sont de haut standing.

➤ La ligne de repli

Elle consiste à n'autoriser des constructions neuves qu'à une distance donnée de la ligne de rivage. Le code du domaine de l'Etat (loi n° 76-66 du 02 juillet 1976) définit le domaine maritime et attribue cent mètres de large à partir de la limite atteinte par les plus fortes marées au domaine national géré par l'Etat du Sénégal. Toutefois à cause

des fluctuations du niveau de la mer, la délimitation du DPM est très délicate (Diedhiou, 2005). Il fait aussi aujourd’hui l’objet d’une grande convoitise, conduisant à une occupation anarchique et souvent en déphasage avec les principes de la réglementation (Faye, 2013). Ndiaye (2016) note une absence de coordination dans la gestion des espaces littoraux qui relève de plusieurs départements ministériels qui ont leur démembrément au niveau local avec des prérogatives sectorielles. C’est le cas du volet aménagement du littoral qui est géré par plusieurs acteurs aux missions différentes : ministère chargée du Tourisme, ministère charge de l’Environnement, ministère de la pêche avec des composantes en son sein, ministère de l’économie et des finances, etc. A côté de ces acteurs de l’échelon central, on peut citer les usagers comme les acteurs du tourisme qui interviennent par exemple à Saly pour sécuriser leurs investissements. La population intervient également comme acteur avec des aménagements de type artisanal (sacs de sable, gravats, etc.).

➤ **Le déplacement de structures menacées**

Dans la mesure du possible, déplacer les bâtiments ou infrastructures déjà réalisés peut être un moyen moins coûteux et définitif plutôt que d’essayer de lutter contre l’érosion qui les menace. Ceci passe par la sensibilisation des populations sur les vrais problèmes que pose l’érosion côtière et l’accompagnement par l’Etat des populations devant être relogées. Selon Ndiaye (2016), l’expérimentation du recul stratégique constitue un sujet de recherche pertinent pour les géographes en ce sens qu’il implique la réorganisation territoriale et une nouvelle façon de concevoir une gestion durable et intégrée des risques côtiers ; ce qui permettra à la plage de Saly Portudal de retrouver un espace plus convenable. Cette plage, gagnée avec la délocalisation des infrastructures et habitats, pourrait recevoir après remblaiement d’autres aménagements souples comme les espaces, lieux de détente et de loisirs. Cependant, ces avantages que présente le recul stratégique se heurtent à des obstacles concrets liés au manque d’espace de recasement et au coût de l’opération. En effet, l’investissement global sur le site de Saly Portudal a dépassé les 100 milliards selon les estimations de la SAPCO. Cet investissement rend difficile toute tentative de délocalisation en ce sens que cela demande d’autres moyens difficiles à mobiliser.

➤ **l’abandon de la cause de l’érosion**

Chaque fois qu’elle est provoquée ou est accélérée par l’intervention humaine, l’extraction de matériaux de construction, la destruction de filaos, les dépôts d’ordures sur les plages, les canaux d’évacuation des eaux usées, les constructions sur le rivage,

il est beaucoup plus simple de remédier à la cause de l'érosion. Le code minier (loi n° 88-06 du 28 août 1988) réglemente entre autres, l'extraction de matériaux de construction (sables, coquillages) en autorisant l'ouverture de carrières d'exploitation de sables. Sur la Petite Côte, en plus des prélèvements frauduleux de sable signalés un peu partout, il existe une carrière d'extraction de sable ouverte par arrêté interministériel n° 00175 du 11 janvier 1994 à la Pointe Sarène, situé à 15 Km au Sud de Mbour. Cette carrière qui devait être temporaire a fonctionné sans interruption pendant plus de six années au point que sur les 50000 m³ que représentait le périmètre d'exploitation à son ouverture, il ne restait que 7500 m³ en 2004 (Cesaraccio et al., 2004). Du fait de la pollution sonore, la carrière fut fermée en mars 2001 avant d'être ré-ouverte 3 mois plus tard sous la pression des acteurs de l'industrie du bâtiment, en juin 2001, pour une durée temporaire d'un an. Selon Cesaraccio et al., (2004), l'exploitation de la carrière de sable de la Pointe Sarène se poursuivait de manière intense en 2003. En 2010 la carrière de la pointe Sarène a été officiellement fermée (Ndoye, 2010).

Le code de l'environnement fixe quant à lui des règles générales de protection de l'environnement. Toutefois ses dispositions ne sont parfois pas respectées car nous avons par exemple noté la présence d'une conduite d'évacuation des eaux vers la mer au niveau du profil P7 alors qu'il existe à Saly un réseau d'évacuation et une station d'épuration des eaux usées (photo 7A). Les structures de lutte contre l'érosion, telles que les épis et les brise-lames peuvent, et c'est habituellement le cas, accélérer l'érosion sur les lignes de rivages adjacentes. La modification de ces structures peut atténuer ou réduire l'érosion (NU, 1983). Une telle solution peut être envisagée à Saly comme le montre cette étude avec les problèmes posés par les longs épis G1 et G5. Leur réduction aurait un impact positif sur l'évolution du littoral.

➤ **les méthodes végétatives**

Elles consistent à stabiliser et à maintenir des dunes de sable par des plantations et/ou des cultures (photo 7B). Les plantations de filaos sont des barrières qui provoquent la création et assurent le maintien des dunes de sables qui peuvent constituer un stock sédimentaire mobilisable en cas d'érosion du littoral. La bande littorale de filaos des Niayes fait partie des mesures de protection les plus réussies par le Sénégal (Ngom, 2012). D'après un constat de Guilcher et Nicholas (1954), la fixation des dunes pour éviter les coupures du cordon littoral constitue une réussite technique incontestable car les résultats ont été concluants. Les plantations de filaos ont été poursuivies entre 1975

et 1989 sur la côte nord de sorte qu'il existe actuellement un « front vert » entre Saint Louis et Dakar, large de 200 m et long de 180 km. Les coûts du reboisement étaient de 351572 Francs CFA à l'hectare. Les cocotiers (*Cocos nucifera*) et les filaos (*Casuarina equisetifolia*) restent des espèces privilégiées pour la fixation de dunes de sables marins car non seulement leurs capacités de piégeage de sédiments sont importantes si les plants sont bien disposés mais aussi leur système racinaire est très développé ; ils ont une grande tolérance aux embruns et leur croissance en hauteur est très rapide. Ces particularités leur permettent de s'adapter aux conditions rudes régnant le long du littoral : vents, abrasion, accumulation de sables, grande intensité de lumière, faiblesse des pluies et submersion périodique par l'eau salée. Des plants de cocotiers et de filaos longent presque tout le littoral de Saly contribuant ces dernières années à ralentir tant soit peu les processus d'érosion. Les racines des arbres enfouies sur le cordon dunaire peuvent retenir des sédiments qui auraient dû être mobilisés par les agents dynamiques.



Photo 7 : Conduite d'évacuation des eaux en mer (A) et Plants de cocotiers et de filaos le long du littoral (B)

➤ l'alimentation des plages

Une plage peut être créée ou agrandit en déposant artificiellement du sable le long du rivage. C'est une méthode de protection qui, de façon planifiée, a été rarement utilisée au Sénégal et pourrait être expérimentée à grande échelle dans le cadre du projet en cours de construction des nouveaux brise-lames à Saly. L'alimentation peut être

considérée comme un moyen naturel de lutter contre l'érosion côtière, car elle remplace artificiellement un déficit du bilan sédimentaire sur une certaine étendue avec un volume de sable correspondant. Cependant, comme la cause de l'érosion n'est pas éliminée, elle se poursuivra le long de la section de plage aménagée. Il est donc inhérent au concept d'alimentation que le sable soit progressivement apporté. Cela signifie que l'alimentation en tant que méthode autonome nécessite normalement un effort d'entretien à long terme (DHI, 2017). Une réalimentation périodique est souvent nécessaire.

Pour estimer l'efficacité du coût d'un projet d'alimentation, il faudrait tenir compte du coût de la réalimentation périodique. La combinaison de l'alimentation de la plage et de structures en dur (épi ou brise-lames) peut être une variante en mesure de fixer le plus longtemps les sédiments sur la plage à aménager et réduire ainsi le volume de sédiments à apporter pour l'alimentation périodique.

Il existe principalement deux méthodes d'alimentation :

- L'alimentation par section : le sable est réparti uniformément le long du rivage dans la zone du projet. Cette méthode plus ancienne peut se faire sur la dune, la haute plage, l'estran, la zone de déferlement ou sur tout le profil côtier (figure 75).
- Le stock d'alimentation : une grande quantité de sable est déposée dans une petite partie du rivage dans la zone du projet et est distribué le long du rivage par l'action des vagues. Cette nouvelle approche appelée « méga-alimentation » utilise les processus naturels d'évolution du rivage et a été expérimentée au Pays bas avec le cas Sand motor et a donné des résultats très prometteurs.

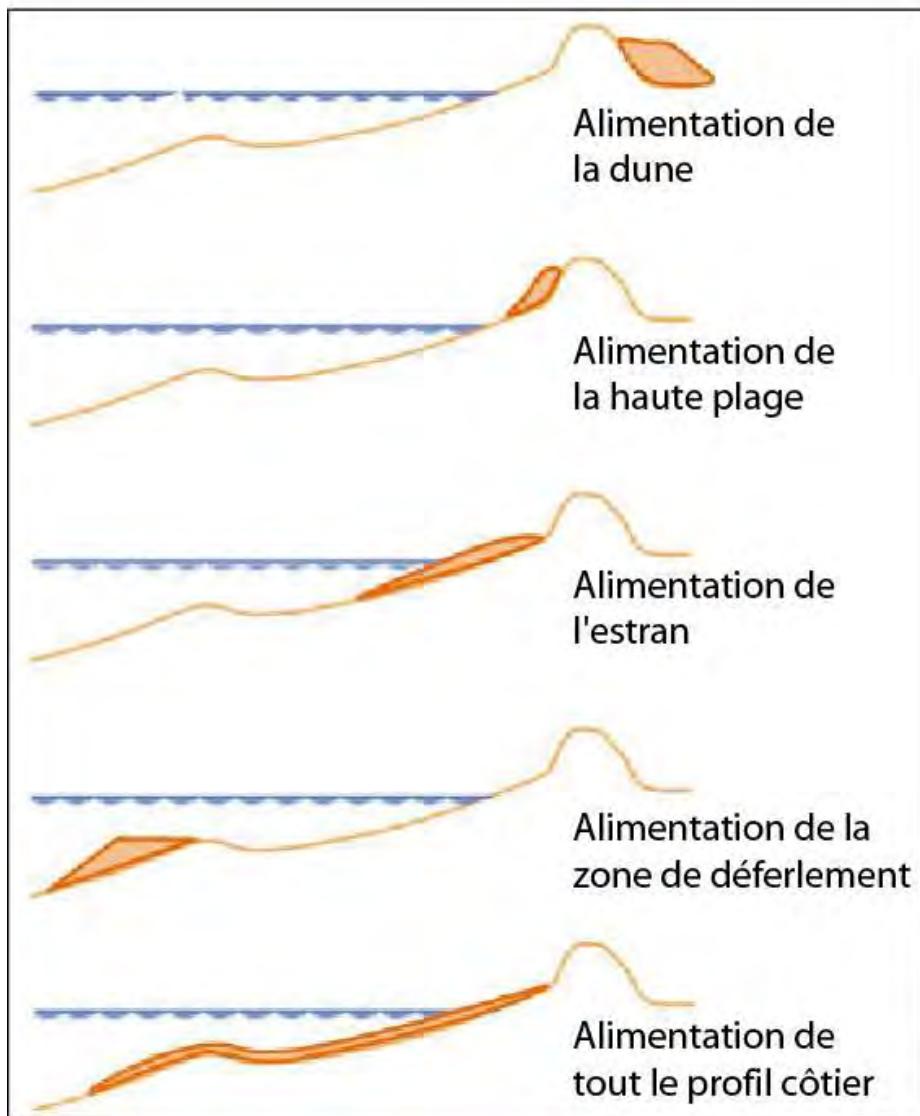


Figure 77 : Types d'alimentation par section des plages (DHI, 2017)

Le succès d'un projet d'alimentation des plages dépend essentiellement des caractéristiques et des volumes de sables apportés. Les caractéristiques du sable doivent être examinées de manière à se rapprocher le plus de celles du sable de la plage à protéger (sable natif). Les matériaux empruntés devraient avoir environ le même diamètre médian que le sable de la plage à alimenter, pour que celle-ci soit stable. Si les matériaux ont des grains trop fins, ils seront transportés rapidement loin de la plage, vers le large ou vers les littoraux adjacents. Les matériaux empruntés qui sont trop grossiers seront transportés vers le large au moment des épisodes de tempêtes et ne peuvent pas revenir sur la plage pendant les périodes où les conditions hydrodynamiques sont moins énergiques. Les sources communes de sables sont les carrières à terre (baies, lagunes, champs de dunes etc) et les emplacements au large

(les plages submergées, les passes de marée etc) (Nations Unis , 1983). Le volume de sable nécessaire pour un projet d'alimentation dépend du profil de la plage souhaité, du surremplissage pour tenir compte de l'érosion ultérieure et du pourcentage de matériaux de remplissage ayant une granulométrie inadéquate. La fréquence de l'alimentation est aussi à prendre en considération lorsqu'on envisage des quantités initiales d'alimentation. Des zones qui ont longtemps été protégées par des structures de protection côtières dures ont souvent perdu leurs plages et développent des profils côtiers escarpés. La forme du profil de ces zones est très loin de celle de leur profil d'équilibre. Pour l'alimentation de telles zones, il faudra d'importants volumes de sable pour rétablir le profil d'équilibre.

Les matériaux empruntés doivent être compatibles avec les besoins écologiques et récréatifs du site (couleur, propreté, granulométrie...). Lorsque les sables sont trop grossiers, l'action des vagues dans le profil nourri peut entraîner la formation d'une rupture de pente submergé le long du rivage, pouvant être dangereux pour les baigneurs car elle peut atteindre plus d'un mètre de hauteur. Des phénomènes morphologiques peuvent causer des difficultés d'utilisation de la plage ainsi que des impacts esthétiques. Il y a aussi plusieurs impacts environnementaux le long du profil côtier nourri, notamment sur la micro-faune et la flore marine des fonds sableux (DHI, 2017). Selon Tomme, 2013, l'utilisation de sédiments grossiers est susceptible d'avoir un effet négatif sur certaines espèces macrobentiques dominantes du haut-estrang des plages à grain fin. Il y a aussi d'autres impacts environnement liés à la présence de sédiments fins en suspension dans l'eau de mer, aux nuisances sonores et à l'interdiction d'accès au site d'alimentation.

V.1.2. Solutions dures

Ce sont des techniques qui nécessitent la construction d'une structure côtière. Il en existe deux grandes catégories :

- les structures qui durcissent la ligne de rivage pour la rendre plus résistante à l'érosion : murs de protection, revêtements et cloisons.

➤ Les revêtements

Ils sont conçus pour protéger la terre ferme des vagues et de l'action des courants. Ce sont des structures de recouvrement (pavage) qui renforcent et reposent sur la plage pour la rendre moins vulnérable à l'attaque des houles. Les revêtements peuvent être perméables ou imperméables, lisses ou rugueux

et sont habituellement construits avec une face en pente. Les matériaux de construction peuvent être en béton, ciment-sol, roches, gabions, tubes etc. Les revêtements sont généralement d'une construction plus légère que les murs de protection et ne sont pas utilisés communément sur les lignes de côte sujettes à l'attaque de fortes vagues (NU, 1983). Au Sénégal on peut donner un exemple de structure en revêtement engageant l'Etat à la porte du millénaire à Dakar mais aussi d'autres exemples à Saly où ils sont l'œuvre de certains propriétaires hôteliers. C'est le cas à l'hôtel Téranga (photo 8).

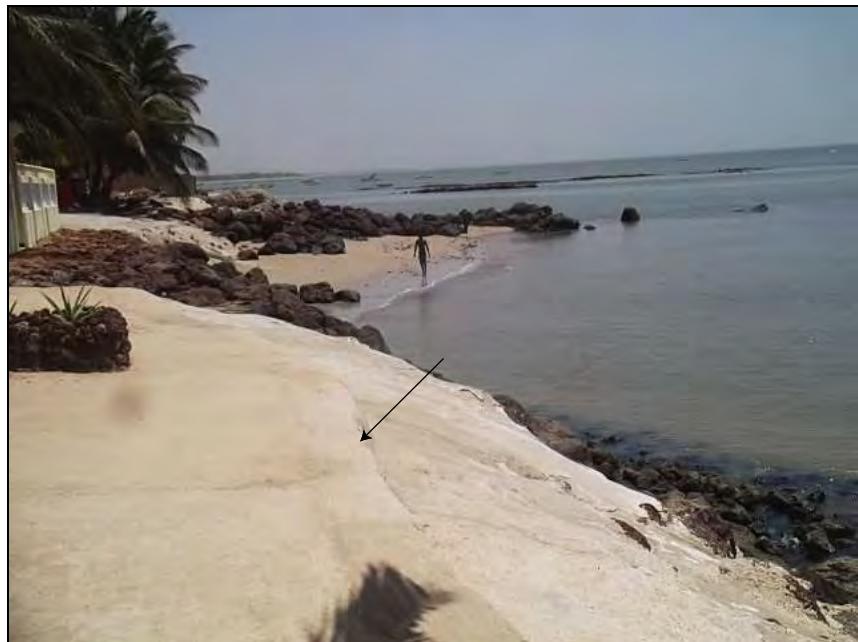


Photo 8 : Revêtement à la plage de l'hôtel Téranga

➤ **Les murs de protection**

Ce sont des structures poids-autonomes conçues pour protéger la terre ferme de l'action des vagues. C'est leur propre poids qui les maintient en position verticale et retient les terres situées derrière eux, bien que le terrain ou le remblai derrière elles puisse, quelques fois assurer un soutien structural. Par conséquent, ils ne protègent que les terres situées immédiatement derrière eux et n'ont pas d'effets bénéfiques sur les lignes de rivage adjacentes, ni sur les terres de l'intérieur, ni sur les plages. Ces murs peuvent être en gabions, en béton, mixtes (gabions surmontés d'un mur en béton) ou en enrochements (figure 76). Suivant les matériaux de constructions utilisés, les murs peuvent être perméables ou imperméables, lisses ou rugueux et leur face peu avoir une

forme concave, convexe, verticale, en pente, en gradins etc. Les formes verticales sont moins efficaces contre l'attaque des fortes vagues et plus propices au débordement des vagues et à l'affouillement. Les murs de protection sont en général le type de structure de durcissement le plus coûteux. Selon les acteurs du tourisme le système de gabionnage pour protéger Saly Hôtel, Filaos et Palm Beach suite aux fortes houles de 2009 a couté près de 19 419 000 FCFA et il n'a pas tenu aux marées de septembre 2011. La protection de Téranga avait couté 150 000 000 FCFA (Ndiaye, 2016).

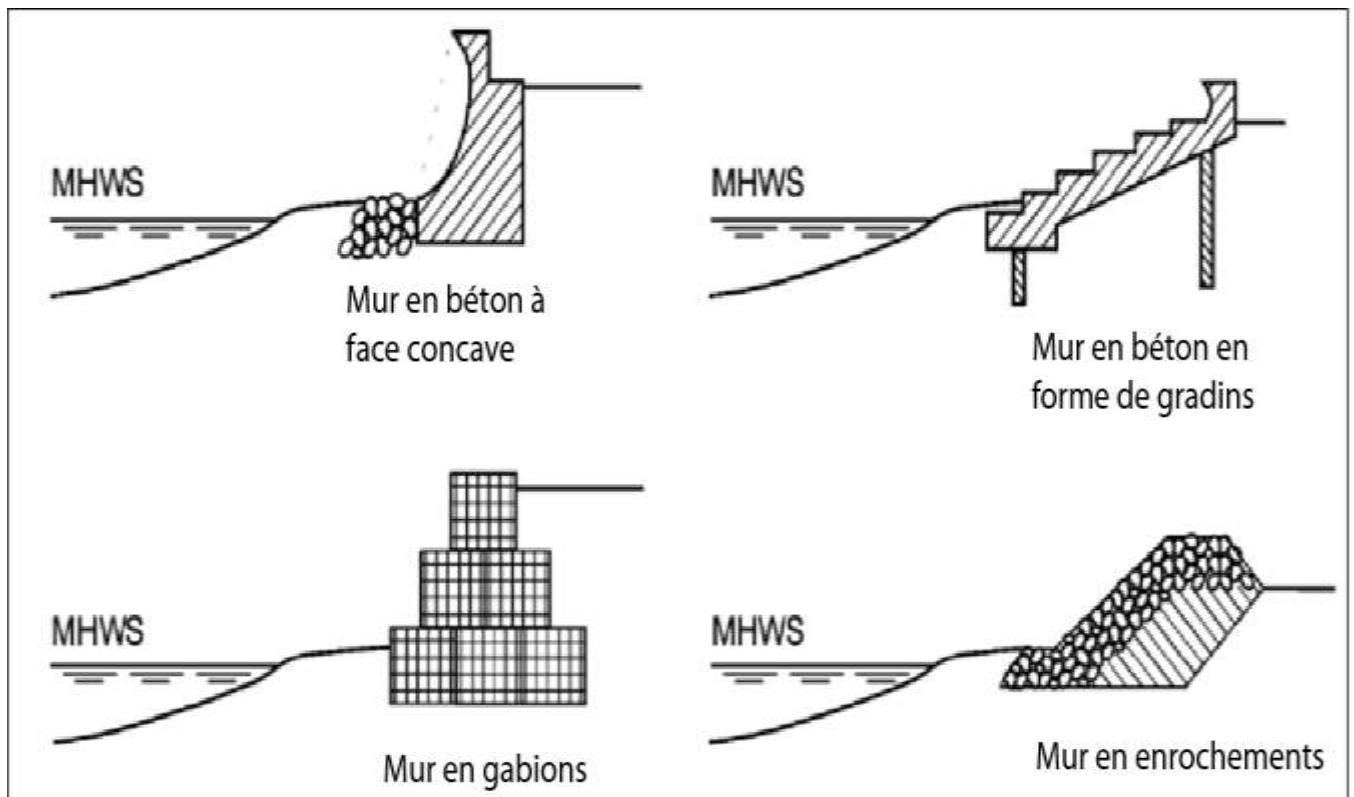


Figure 78 : Exemples de murs de protection (DHI, 2017)

➤ Les cloisons

Elles sont conçues pour retenir les déblais et empêcher le sol de glisser dans l'eau. Elles sont faites de matériaux relativement minces (palplanches en bois, en acier, en aluminium etc.). Elles sont généralement munies d'un système de soutien qui les maintient à la verticale. Du fait de cette verticalité, l'action des vagues y provoque un affouillement grave. Les cloisons ne sont pas habituellement recommandées lorsque l'affouillement est inacceptable. Si on utilise une cloison dans de telles conditions, elle peut être construite de façon à résister à la force des

vagues, mais elle doit être protégée du sapement, ce qui peut être accompli en posant des enrochements à la base. Des cloisons typiques n'ont pas été rencontrées à Saly.

- les structures qui stabilisent la ligne de rivage en altérant les processus côtiers prédominants : épis, brise-lames.

➤ **Les épis**

Ce sont des structures de protection plus ou moins perpendiculaires au rivage conçus pour capter le transit littoral de façon à constituer ou modifier une plage. Il y a un engrassement de la plage située en amont de la dérive littorale et une érosion de la plage à l'aval. Les épis peuvent être construits en bois, en acier, en roche, en béton, en gabions etc. Ils sont les structures les plus controversées, les moins comprises et les plus mal utilisées de toutes les structures de lutte contre l'érosion. Les épis ne devraient être employés que là où l'érosion en aval est acceptable ou sera compensée par une alimentation de la plage ou par des structures supplémentaires de lutte contre l'érosion en aval (NU, 1983). Les effets adverses en aval peuvent être atténués en minimisant la longueur et la hauteur des épis pour réduire le temps de remplissage, ce qui rétablit le contournement naturel du sable (figure 77). L'extrémité d'un épi peut être en forme de courbe, de crochet, d'angle, de T ou de L, dans l'espoir de réduire le recul en aval. Ces solutions de compromis se traduisent par une plus petite plage en amont, mais il se peut qu'elles réduisent aussi les pertes en aval pour les ramener à un niveau acceptable. Les épis sont utilisés de la manière la plus avantageuse sur les plages en érosion immédiatement en amont de barrières naturelles ou artificielles qui arrêtent complètement la dérive littorale. Dans de nombreux cas, les épis ont joué leur rôle et dans d'autres cas, ils n'ont fait aucune différence ou ont en fait aggravé la situation qu'ils étaient censés améliorer (NU, 1983). Les échecs peuvent être attribués à une ignorance des détails des processus littoraux, à des problèmes de dimensionnement, d'orientation ou d'ordre de construction et d'espacement lorsqu'il s'agit d'un réseau d'épis.

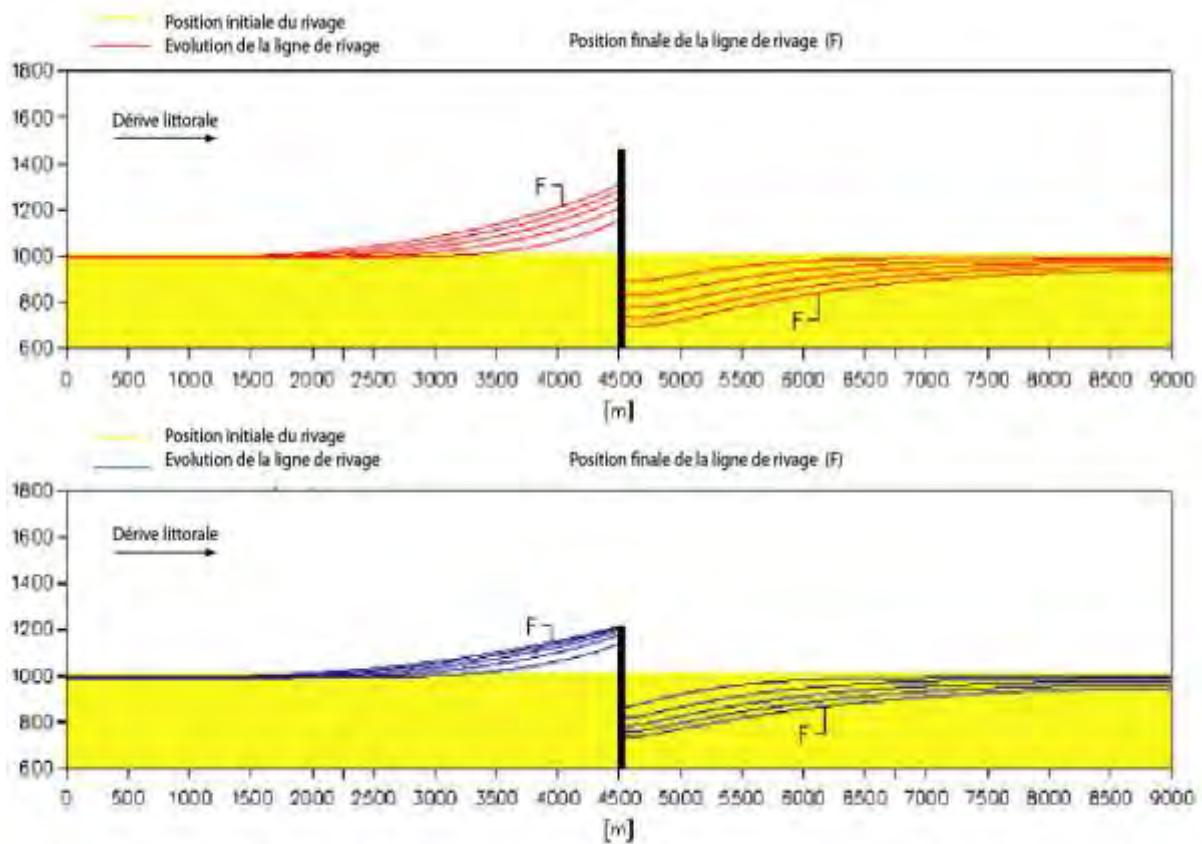
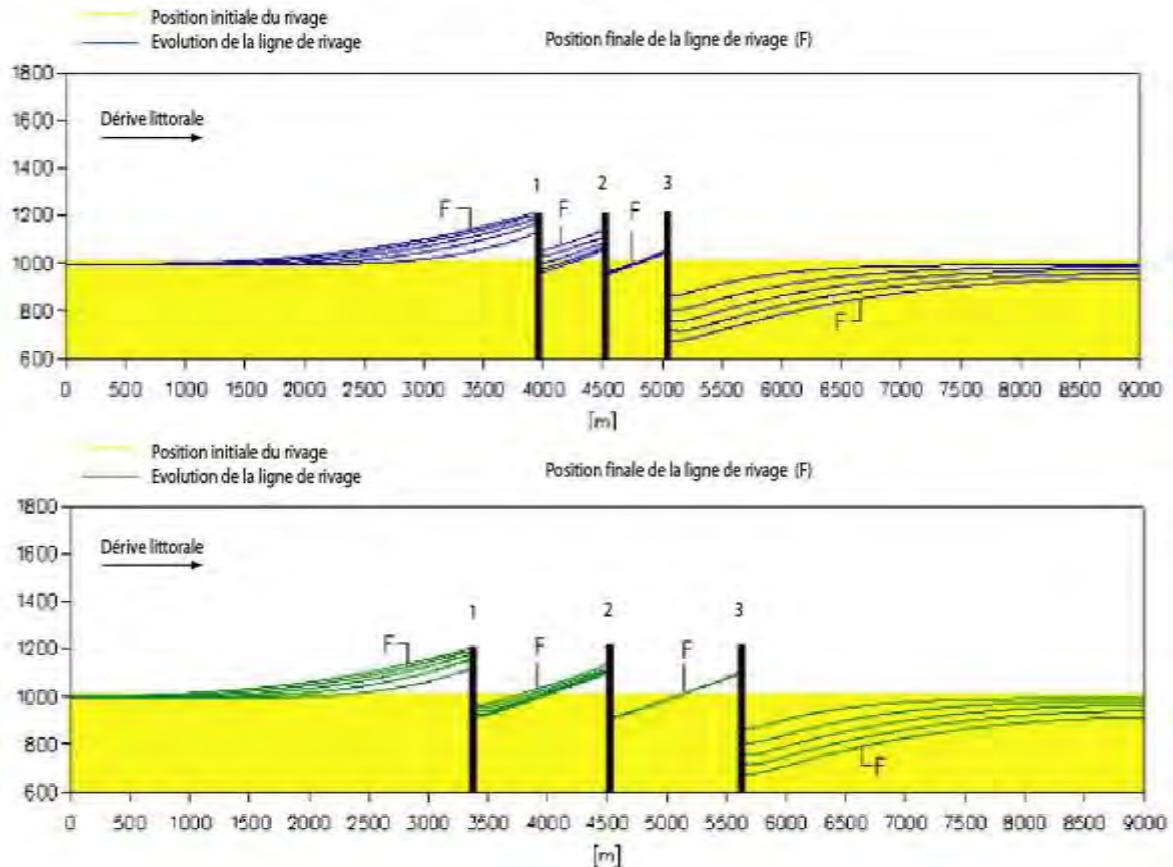


Figure 79 : Modèle d'évolution de la ligne de rivage pour un long (en haut) et un court (en bas) épi dans un climat de vagues modérées obliques (DHI, 2017).

Dans la plupart des cas, un épi à lui seul ne peut assurer une protection adéquate et un réseau d'épis doit être construit pour protéger des sections de rivage plus longues. Outre son aptitude à protéger n'importe quelle longueur de rivage, un réseau d'épis retire un avantage de l'action conjuguée des épis individuels. Le côté en aval de chaque épi bénéficie de l'engrassement qui se produit en amont de l'épi adjacent, ce qui finit souvent par élargir la plage. Cependant, les phénomènes d'érosion s'accentuent en aval des épis situés plus à l'arrière dans le sens de la dérive littorale jusqu'à ce que le contournement des sédiments comble les lacunes entre les épis et apporte vers les épis à l'arrière plus de sédiments. Sur la figure 78 l'influence du contournement des sédiments se manifeste entre les deux premiers épis (1 et 2) qui se remplissent progressivement alors que l'érosion s'accentue juste en aval des épis 2 et 3 surtout. Ces phénomènes de recul en aval d'un réseau d'épis se manifestent plus longtemps si les épis sont trop éloignés. Une attention particulière doit être accordée aux zones en aval d'un réseau d'épis pour éviter les érosions temporaires importantes. Ces dernières peuvent être évitées en associant par exemple à un réseau d'épi une

solution d'alimentation initiale de sable dans ces zones vulnérables. A Saly, pour protéger leurs installations, les hôteliers ont mis en place des épis à l'extrémité aval de leurs parcelles pour constituer des plage. Un nombre important d'épis a été construit constituant finalement un « réseau d'épis ».



➤ Les brise-lames

Ils jouent le rôle de barrière contre les vagues. En réduisant l'énergie des vagues, les brise-lames protègent la ligne de rivage de l'érosion. Entre le brise-lames et le rivage existe une zone à l'abri où la force des agents hydrodynamiques est fortement atténuée. La réduction de l'énergie des vagues diminue aussi le taux de transport littoral et favorise le dépôt. L'avantage d'un brise-lames par rapport à un épi est qu'il est possible de modifier le transport littoral de manière plus douce que pour un épi. De cette manière, il peut y avoir moins d'érosion du côté aval de la structure. Un autre avantage d'un brise-lames comparé à un épi est qu'au large il ne gêne pas l'accès le long de la plage. Un inconvénient pourrait être la qualité moindre des plages et de l'eau en raison de ses effets

d'abri. Par exemple, le piégeage des algues flottantes dans la zone d'abri entraîne leur décomposition et la modification de la qualité de l'eau. Ces algues peuvent aussi s'accumuler sur la plage. Cette situation a été rencontrée en 2013 à Saly au moment de la construction des brise-lames rendant difficile voire impossible le traitement des échantillons prélevés sur la plage sous-marine en face de ces structures. Ces échantillons trop riches en matière organiques dégageaient des odeurs nauséabondes. Il faut signaler que le premier brise-lame a été construit au départ en un seul segment qui par la suite a été coupé en 3 tronçons.

Les brise-lames pour la lutte contre l'érosion sont plus petits et doivent être placés de façon stratégique par rapport aux forces littorales pour être efficaces. Les matériaux utilisés communément pour construire les brise-lames sont les roches, le béton, l'acier, le bois, les sacs de sable, les tubes etc. Les brise-lames peuvent selon leur positionnement être reliés au rivage ou placés au large, ils peuvent être aussi submergés, émergés ou flottants. Il existe plusieurs types de brise-lames dont le choix dépendra des objectifs visés (protection de navires, d'installations portuaires, d'un rivage etc). Les brise-lames au large souvent utilisés dans la protection du rivage occasionnent un dépôt au stade initial en diminuant l'énergie des vagues responsables du transport littoral. A mesure que les matériaux de la dérive littorale se déposent, une projection du rivage vers la mer, appelée salient ou tombolo, se forme dans la zone calme derrière le brise-lame (figure 79). La formation d'un salient ou d'un tombolo dépend de la longueur du brise-lame (L_B) et de sa distance par rapport au rivage (X). La vitesse et l'étendue de l'accroissement du tombolo sont directement proportionnelles à l'ampleur de la diminution de l'énergie des vagues. Cette projection du rivage agit de manière fonctionnelle comme un épi, occasionnant un engrangement en amont et un recul en aval. A mesure que la projection s'agrandit, elle devient de plus en plus efficace comme piège à sable et si on la laisse se développer, elle se raccordera au brise-lame. Lorsque le piège à sable est entièrement rempli, les matériaux de la dérive se déplacent vers le large depuis le brise-lame. Les brise-lames au large, convenablement planifiés et entretenus, peuvent être des moyens très efficaces d'intercepter les matériaux de la dérive littorale. Pour atteindre de tels résultats l'emplacement, l'espacement, la perméabilité et les dimensions de la structure doivent être déterminés avec beaucoup de précision pour bénéficier des effets positifs des brise-lames souvent construits en séries.

Des îles artificielles qui fonctionnent à la manière des brise-lames sont aussi des méthodes très appropriées de lutte contre l'érosion. En plus des trois brise-lames au large

construits à partir de la résidence Safari à Saly (B1 à B3), le projet en cours vise à construire 10 brise-lames au large entre la résidence Safari et l'hôtel Cocotiers.

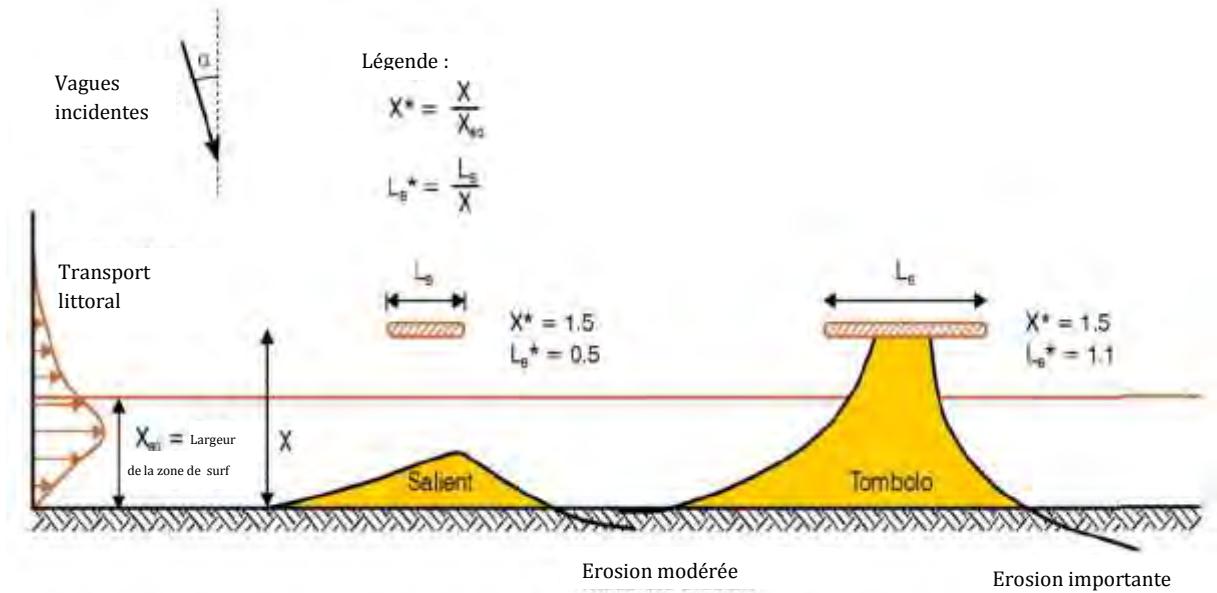


Figure 81 : Définition des caractéristiques d'un brise-lame au large et formes d'accumulation (DHI, 2017)

➤ La combinaison de structures de protection

Bien qu'elle présente plusieurs inconvénients, l'association de différentes méthodes de protection du littoral porte un certain nombre d'avantages dont on devrait essayer de tirer profit dans certaine situation.

L'utilisation de structures altérant les processus côtiers prédominants (épis ou brise-lames au large) et l'alimentation des plages par exemple permet de protéger le rivage (plage) et la côte (arrière-plage ou dunes). L'avantage de cette combinaison est qu'elle minimise les exigences en matière d'alimentation périodique de la plage et les effets de recul en aval. Les épis ou les brise-lames qui modifient les processus littoraux maintiennent le remplissage initial de sable sur les sections de plages à protéger (DHI, 2017). La figure 80 montre l'impact positif sur l'évolution du rivage d'un champs d'épis remplis de sable juste après la construction.

Les promontoires ou « headlands » sont des structures construites à partir du rivage. Ils fonctionnent à la manière des brise-lames reliés au rivage. Ils travaillent en bloquant une partie du transport littoral constituant des plages en amont (épis) tout en réduisant l'action érosive des courants de retours en aval de la structure (brise-lames). Sur cette zone en aval la formation de tombolos est rendue difficile par une partie de la structure qui joue le rôle d'épi. Un promontoire combine les effets positifs des épis et des brise-lames tout en minimisant leurs inconvénients.

Les ports ou les marinas, les plages perchées et les anses artificielles peuvent aussi agir comme des promontoires au-delà de leur utilisation première. La construction de ces structures nécessite la combinaison de plusieurs mesures de protection. Une plage perchée est une plage naturelle ou nourrie située sur un rivage à forte pente et soutenue à sa partie inférieure par une structure immergée. Une anse artificielle est une baie sablonneuse semi-protégée, formée par des digues courbes reliées au rivage, qui est par ailleurs protégé par des revêtements.

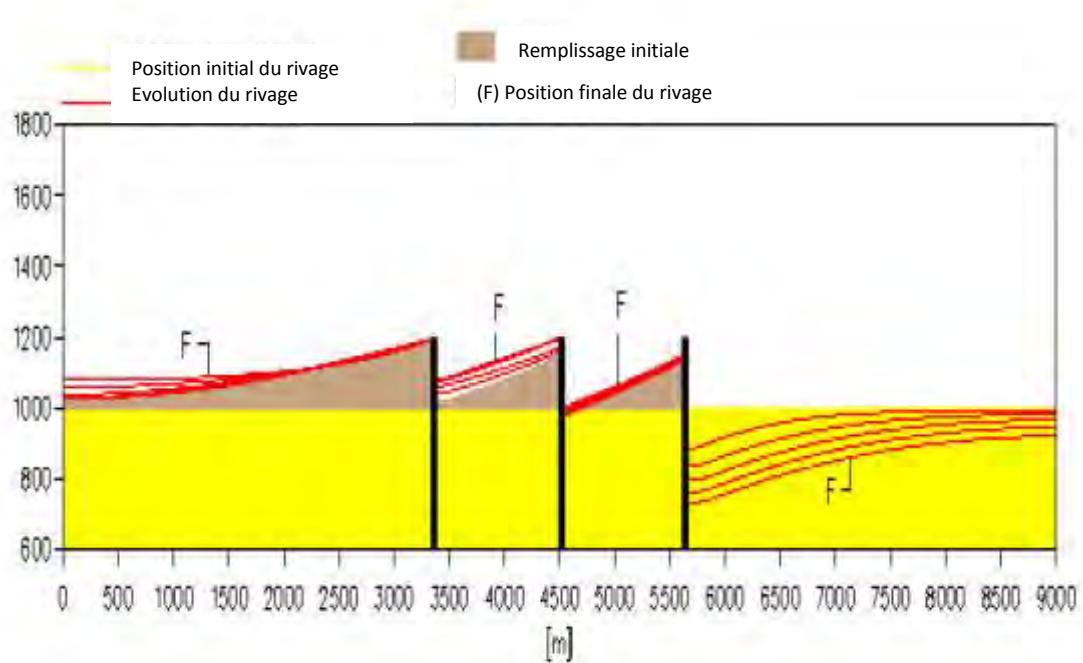


Figure 82 : Modèle d'évolution de la ligne de rivage sur un champ de trois courts épis dans un climat de vagues modérées obliques. Le champ d'épi a été initialement rempli de sable (DHI, 2017)

Un mélange de murs, de revêtements, d'épis et de brise-lames est souvent utilisé dans des zones densément peuplées pour la protection du littoral contre l'érosion chronique. À certains endroits, la protection est coordonnée, mais le plus souvent elle est individuelle, non planifiée et certaines structures inadaptées. Ces zones sont caractérisées par des pertes de plages importantes et des difficultés d'accès au rivage. La beauté naturelle du paysage côtier est perdue et l'érosion se poursuit.

Ces zones nécessitent des solutions urgentes pour sécuriser les populations, les investissements et rétablir le rivage au niveau le plus élevé possible. Cela nécessite un système de gestion du littoral bien coordonné et des techniques de protection bien choisies car la relocalisation des populations n'est pas souvent envisageable pour les raisons économiques et/ou culturelles. Pour ces zones peuplées, essentiellement

privées, il est généralement difficile d'obtenir un consensus en faveur d'une solution globale ou qui nécessite un entretien régulier. En effet, les propriétaires fonciers accordent la priorité à la protection de leur propriété plutôt qu'au rétablissement du système littoral. Par exemple, une solution d'alimentation de la plage associée à un réseau d'épi nécessite généralement une planification globale sur une section plus longue ainsi qu'un entretien régulier. L'aspect le plus difficile d'un tel projet combinant des structures de protection est souvent le processus public et politique, qui doit être mené à bien pour parvenir à un consensus. L'importance de ce processus ne doit pas être sous-estimée dans le processus de planification.

L'accentuation de l'érosion des plages de Saly a engendré une conjugaison de structures de protection avec notamment des épis, des brise-lames, des murs et des protections rudimentaires. La zone est très propice à l'étude des effets d'une combinaison de structures de protection sur un littoral sableux.

V.2. Etude des ouvrages de protection réalisés à Saly

Bien que le rapport INTAC (2011) indique la présence à Saly de plus de 80 ouvrages de protection tout type confondu (rudimentaires et planifiés), chaque propriétaire voulant protéger sa concession ou sa structure à hauteur de ses moyens, nous avons compté en 2016 à Saly pour ce qui est des ouvrages planifiés 13 épis (G0 à G12), 5 séries de murs en béton et en enrochements (R1 à R5) et 3 brise-lames (B1 à B3), construits pour la plupart entre 1998 et 2015. Il s'agira dans ce paragraphe d'évaluer l'état de fonctionnement de ces ouvrages de protection plus structurés, construits grâce à des projets engageant l'Etat du Sénégal et ses partenaires. Ce fonctionnement sera évalué vis-à-vis des processus sédimentaires. En d'autres termes, nous nous intéresserons plus à leur valeur environnementale au lieu de nous appesantir sur des considérations géotechniques. L'impact d'un ouvrage de protection sur une côte peut être déterminé par une comparaison des données morpho-sédimentaires recueillies avant et après la construction de l'ouvrage (tableau 19). Ceci permettra de déterminer les ouvrages de protection les plus favorables à la reconstitution des plages.

Tableau 19 : Caractéristiques des structures de protection répertoriées à Saly de 1998 à 2015 et taux d'évolution sur chaque segment littoral avant et après construction des structures

Type de structure de protection	Longueur de la structure (m)	Distance avec la structure au nord (m)	Années de construction	Segment littoral	Taux d'évolution (m/an)		
					Avant	Après	
-	-	-	-	S1	-2,61	2,57	
Epi	G0	100	-	S2	2,01	1,42	
	G1 à G3	55, 40 & 25	20, 100 & 220				
	G4 à G5	25 & 90	620 & 216				
Mur	R1	100	302	2009			
Epis	G6 et G7	25 & 20	250 & 110	2009	S3	-2,53	-3,56
Mur	R2	425	170	2010			
Brise-lames	B1 à B3	90,90 & 20	50, 40 & 40	2013 à 2014			
Mur	R3	475	250	2011	S4	-2,04	-1,96
Epis	G8	25	25	2014			
	G9 et G10	20 & 25	22 & 65	2015			
Mur	R4 à R5	500 & 200	20 & 60	2015 à 2016			
Epi	G11 à G12	25 & 25	115 & 215	2015	S5	-2,29	-0,60

V.2.1. Epis

Ce sont les premiers ouvrages de protection mis en place à partir de 1998 avec l'accentuation des effets de l'érosion sur la station touristique de Saly. Chaque propriétaire hôtelier, en collaboration avec la SAPCO, a construit un épi à l'extrémité avale de sa parcelle de façon à constituer une plage. Ainsi depuis 1998 un nombre important d'épis a été construit constituant finalement «un réseau d'épis» (Photo 9).



Photo 9 : Epis de la résidence Safari (A ; G5, G6) et Epis construits entre les hôtels Princess et Cocotiers (B, G11, G12)

- Mode de conception

Les paramètres caractéristiques des épis de Saly sont très variables et dépendent souvent des moyens financiers des propriétaires. Les épis rencontrés à Saly en Août 2009 et lors de nos visites et missions sur le terrains à partir de 2014 sont construits pour la plupart avec des blocs de latérite de dimensions variables avec un entassement qui n'a souvent pas été fait sur des bases techniques. Ils ont des longueurs variant entre 20 et 100 m et présentent des espacements parfois très faibles comme au niveau de Saly hôtel et Espadon où les épis sont espacés de 22 à 65 m (G8 à G10). Les épis G0 et G1 de Lamentin et l'épi G5 de Safari présentent les longueurs les plus importantes de 90, 55 et 90 m respectivement. L'épi G0 est complètement saturé et se situe actuellement sur la plage aérienne. L'épi G1 qui se trouve dans le prolongement du côté mer de G0 influence fortement, du fait de sa position, la dynamique littorale à Saly. Il faut aussi noter que les épis G11 et G12 plus récents ont été construits avec des blocs de basaltes.

- Etat de fonctionnement

Sur le segment 1, nous constatons une inversion des tendances de la dynamique littorale qui passent d'une situation en érosion (-2,61 m/an) à une situation en accumulation (2,57 m/an) suite à la construction à partir de 1998 des épis du Port (G0 à G3) (tableau 19). Ces

derniers retiennent en amont, sur le segment 1 d'importantes quantités de sédiments. Cependant les effets négatifs en aval dérive de ces épis du Port poussent les propriétaires hôteliers situés plus au Sud, sur le segment 2 à renforcer leur protection. Ainsi sous l'autorisation de la SAPCO, ont été mis en place entre 2006 et 2007 le mur en enrochements R1 du village des Baobolong et l'épi G4 à hauteur de la résidence Cristalline. A la même période, a été aussi mis en place l'épi G5 à la résidence Safari sans autorisation de la SAPCO (CSE, 2005). Le taux d'érosion qui était sur l'ensemble du segment 2 de -2,01 s'élève à 1,42 m/an après la construction de ces ouvrages. Les épis ont eu des impacts très positifs sur les segments Nord 1 et 2. Toutefois à partir de 2007, les effets en aval dérive conjugués de tous ces épis installés au Nord accentuent très fortement les phénomènes d'érosion sur le Sud de Saly. Suite aux effets dévastateurs des houles de septembre 2009, l'État en collaboration avec les propriétaires hôteliers entreprend de renforcer la protection des segments 3 et 4 mais cette fois-ci l'accent est surtout mis sur une solution avec des murs. Les épis G6 et G7 sont néanmoins installés en 2009 sur le site mais du fait de leur proximité avec G5 et de leur espacement réduit, ils n'ont pas donné des résultats satisfaisants. Toujours dans le but de réduire les taux d'érosion qui s'amplifient de plus en plus au Sud, trois épis ont été réalisés en 2015 entre les hôtels Princess et Cocotiers, avant que celui du milieu ne soit enlevé après quelques mois de fonctionnement pour ne laisser que les épis G11 et G12. La dynamique littorale évaluée entre 2003 et 2016 présentait un faible taux d'érosion, juste un an après leur construction (-0,66 /an). Les épis ont donc eu des effets bénéfiques sur les segments S1, S2 et S5. Les caractéristiques morphologiques des profils P1 à P4 du segment 2, confirment à l'échelle annuelle les effets positifs des épis. Les profils ont des formes convexes-rectilignes avec des estrans plus larges et des bilans sédimentaires positifs. Les profils présentent aussi des sables plus fins et mieux classés.

L'ensemble des épis construits à Saly forme un « réseau » qui pose en fait des problèmes d'espacements entre épis, d'ordre de construction et de dimensions. Quelques remarques sur les caractéristiques techniques des structures permettent de se prononcer sur l'état de fonctionnement du « réseau d'épis ». Mais comme nous l'avons souligné un peu plus haut nous n'insisterons pas sur ces considérations géotechniques.

Un espacement approprié des épis est nécessaire pour qu'un réseau d'épis soit efficace. Les épis trop espacés produisent un recul excessif sur les segments de côte en aval. Des épis qui sont trop près l'un de l'autre produisent un transport net de sable au large, augmentant ainsi l'érosion (Nations Unies, 1983). A Saly, les épis sont parfois trop rapprochés les uns des autres comme à l'hôtel Savana avec un espacement de 22 m entre les épis G8 et G9 (tableau

19). Même si le choix d'un espacement approprié pour l'emplacement d'un épi dans un réseau dépend du site, il est recommandé selon le Shore Protection Manuel (CERC, 1984) de placer les épis entre 2,5 et 4 longueurs d'épis des structures adjacentes afin de réduire les impacts sur les plages en aval dérive. Par exemple l'épi G8 qui a une longueur de 25 m devait être espacé de G9 d'au moins 62.5 m.

Il est de coutume de construire simultanément tous les épis d'un réseau. Mais si, pour des raisons économiques, on ne peut pas le faire, on peut construire l'un après l'autre les épis en commençant par celui qui est à l'extrémité en aval suivant le sens de la dérive littorale. Après la construction d'un épi, on le laisse atteindre sa configuration stable avant de passer à l'épi suivant. Cela réduit les dégâts en aval de la dérive littorale et fournit également des indications pratiques quant à l'emplacement approprié de l'épi suivant (NU, 1983). Ainsi la construction d'épis individuels devait commencer par le Sud, du côté de Grand Mbour en direction du Nord puisque la direction de la dérive littorale dominante est globalement Nord-Sud. Or ceci n'a pas été le cas car la construction d'épis s'est faite de manière très désordonnée et parfois sans autorisation.

Les épis rencontrés ont des longueurs variant de 20 à 100 m. Les plus longues structures se retrouvent devant les plus grands et plus somptueux hôtels. Mais le problème est que ceci accélère l'érosion en aval de la dérive littorale du fait que les épis longs et hauts mettent plus de temps à se remplir. La situation de l'érosion alarmante au Sud est due aux longs épis du secteur Nord-Ouset en particulier G1 et G5. D'où encore la nécessité de réglementer la construction des épis afin de minimiser la longueur et la hauteur de certains d'entre eux. La longueur et la hauteur d'un épi ne doivent dépendre que de la morphologie du rivage originel, de la ligne de rivage désirée et de la dérive littorale. Tous ces manquements font que le « réseau » d'épis de Saly ne fonctionne pas de façon adéquate.

V.2.2. Murs

Les murs ont été construits à Saly à partir de 2009 surtout sur les segments 3 et 4 qui ont plus subi les contrecoups des longs épis du Nord. Il s'agit d'abord des murs en enrochements (R2) de l'hôtel Teranga puis des murs en béton de Saly hôtel (R3) (photos 10). Ces derniers ont été précédés sur le site par des murs en gabions. Entre 2015 et 2016, la protection entre les hôtels Espadon et Princess a été renforcée par des murs en enrochements (R4) et (R5). Ce type de structure de protection est actuellement le plus répandu le long du littoral de Saly.



Photo 10 : Exemples de murs en enrochements (R3) et en béton à Saly Hôtel

- Mode de conception

Les enrochements des murs de protection n'ont souvent pas été disposés sur des bases techniques (protection à la base, noyau interne, chapeau, agencement des roches etc). Les murs R2 de Téranga sont constitués de blocs de latérite d'un diamètre d'environ 1m mis en place par le Génie Militaire avec des chargeuses à benne. C'est une série de murs alignés sur une longueur d'environ 425 m. Les murs en enrochements R3 de Saly hôtel sont constitués de blocs de basalte d'environ 1 à 2 mètre de diamètre. Ces murs ont été le fruit d'un partenariat public-privé entre la SAPCO, la Mairie de Saly, le Ministère chargé de l'Environnement, les hôteliers et le Génie Militaire (Ndiaye, 2016). Ces derniers forment plusieurs rangées et occupent toute la plage sur une longueur de 475 m. Les murs R4 et R5 récemment construits entre les hôtels Espadon et Princesse sont constitués par des blocs de latérites d'environ 1 m de diamètre et sont l'œuvre des hôteliers en collaboration avec la SAPCO. Ce sont des séries de murs alignées sur des longueurs de 500 et 200 m.

- Etat de fonctionnement

Les murs de protection n'ont pas eu les résultats escomptés. Les taux d'érosion sont importants sur les segments 3 et 4 avant et après la construction de ces structures. Ils passent de -2,53 à -3,56 m/an sur le segment 3 et de 2,04 à 2,49 m/an sur le segment 4. Les murs ne

protégeant que les terres situées immédiatement derrière eux, il se produit des pertes de plage devant les structures et sur les rivages adjacents. Ils accentuent ainsi les phénomènes d'érosion qu'ils sont censés régler. Ils occupent en plus toute la plage et empêchent ainsi les activités récréatives. Les profils P5 à P7 présentent sur cette zone témoignent des tendances érosives sur ce secteur. Les formes concaves dominent sur ces profils à estrans faibles. Les bilans sédimentaires sont négatifs et des sables moyens moins biens classés que ceux du secteur Nord-Ouest sont présents au Sud-Est. Toutes ces caractéristiques morphologiques peuvent être interprétées comme étant des signes d'érosion.

V.2.3. Brise-lames

Dans le cadre de mise en œuvre du projet *Adaptation à l'érosion côtière* financé par les fonds d'adaptation au changement climatique piloté par la CSE qui est l'accréditeur au niveau national, il a été envisagé en 2011 la construction de 9 brises lames immergés entre les hôtels Téranga et Espadon. Le CEREEQ a été le maître d'ouvrage délégué.

- Mode de conception

Les 9 brise-lames prévus devaient se situer à 120 m du rivage, avoir des longueurs de 90 m, espacés de 60 m et avoir une largeur de crête de 5 m (figure 81). Les enrochements devaient être des blocs de basaltes ou de grès indurés de 1 à 4 tonnes. En 2013 un brise-lames raccordé à l'épi Safari a d'abord été construit en un segment avant d'être coupé en deux tronçons de 20 (B1) et 90 m (B2) en 2014. Au cours de la même année, un deuxième brise-lames de 90 m (B3) a été construit. Ces brise-lames espacés d'environ 40 m sont constitués de blocs de basaltes. Il faut donc noter que sur les 9 brise-lames prévus, deux respectant les longueurs indiquées sur le projet ont été effectivement construits. Le troisième brise-lames la plus petite mesure 20 m de longueur (photo 11).

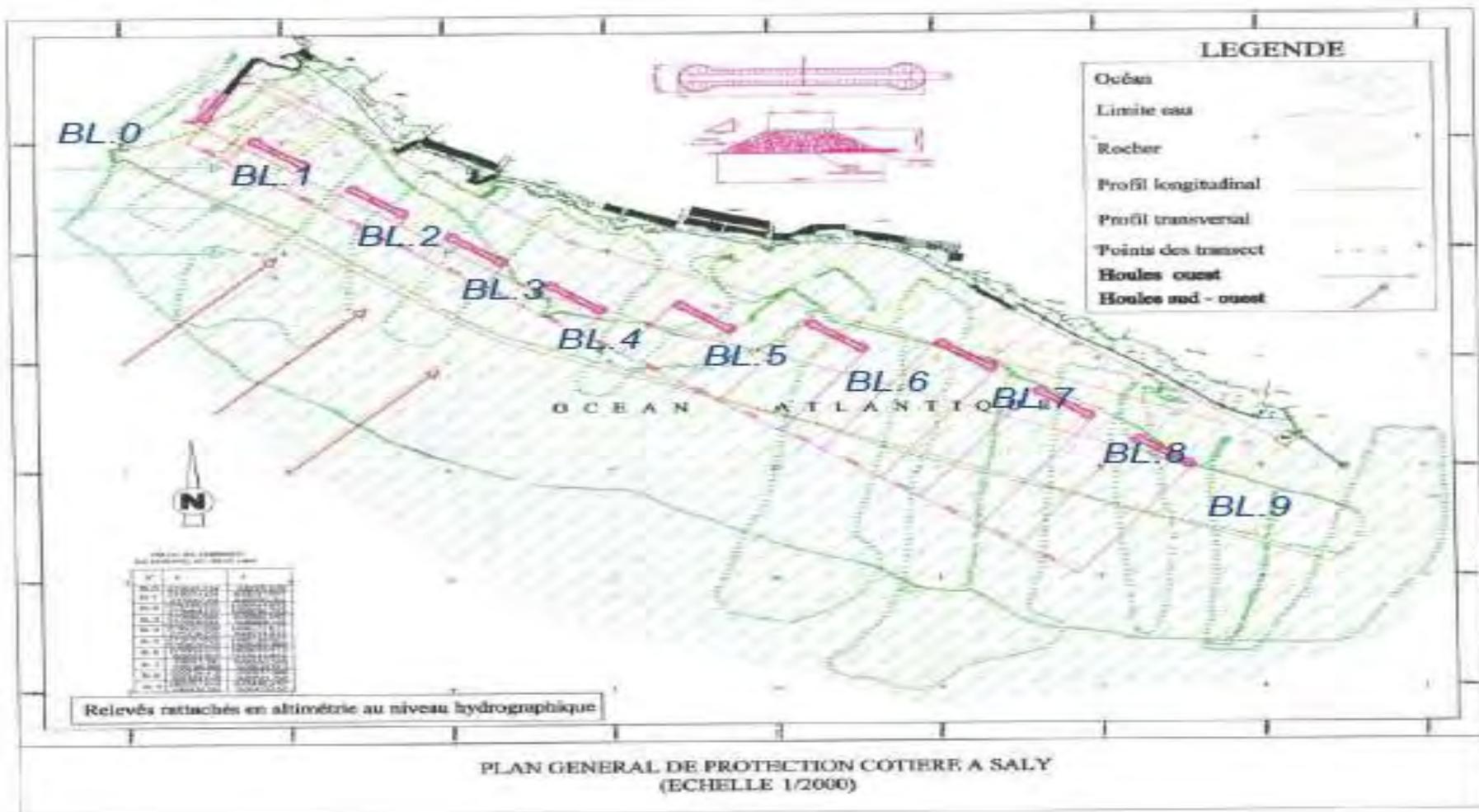


Figure 83 : Plan général de protection côtière à Saly (2013)



Photo 11 : Les brises lames réalisés en 2013 à Saly

- Etat de fonctionnement

Les brise-lames n'ont pas eu pour le moment des effets significatifs sur l'évolution historique de la ligne de rivage réalisée juste deux ans après leur mise en place (2016). Pour la période 2003-2016 les taux d'érosion restent importants sur le segment 3 (-3,56 m/an). Il faut signaler qu'à cette date, leur nombre (3) insuffisant, ne leur permettaient pas d'avoir des impacts positifs remarquables sur tout le segment 4. Le profil P5 en face des brise-lames présente en moyenne en 2014 des estrans larges, une forme concave, des pentes faibles et un bilan sédimentaires négatifs de -28,88 mm³/an. ces caractéristiques morphologiques indiquent à l'échelle annuelle (2014) une érosion des plages en face des brise-lames. Entre 2014 et 2016, les brise-lames n'ont pas permis de reconstituer les plages qu'ils étaient censés protéger. Ces insuffisances pourraient être liées au nombre de brise-lames construits (si nous considérons seulement la longueur du segment 3 qui devait être protégé, 200 m de brise-lames sur un linéaire côtier de 1,5 km semble insuffisant). La construction des brise-lames dans la zone d'érosion en aval de l'épi G5 peut aussi expliquer leur inefficacité sur le court terme. En effet la plage en face des brise-lames qui devait connaître une accumulation subit les effets d'érosion en aval dérivé de l'épi G5.

Toutefois les brise-lames peuvent avoir sur le long terme des impacts positifs sur la reconstitution des plages. En effet aux cours des évènements tempétueux particulièrement érosifs, les brise-lames servent à atténuer les fortes houles qui arrivent sur le rivage. Les effets destructeurs des houles décennales estimées à une hauteur de 3,4 à 5 m peuvent être minimisés par les brise-lames. Les brise-lames seraient ainsi utiles à la protection de certaines

plages du littoral. L'efficacité des brise-lames sur l'évolution du rivage ne peut être bien évaluée que sur le long terme.

V.2.4. Interactions entre les ouvrages de protection

Le littoral de Saly est principalement protégé par des épis, des murs et des brise-lames. La combinaison de plusieurs structures de protection a souvent des impacts négatifs sur l'évolution du littoral car les structures sont parfois inadaptées et non coordonnées. Les effets d'accumulation en amont dérive des épis G6 à G10 peinent à se manifester car ils sont sous l'ombre des longs épis G1 et G5 qui captent en amont une grande partie des sédiments véhiculés par la dérive littorale. Les brise-lames B1 à B3 sont aussi placés dans la zone de recul en aval de l'épi G5. Les murs de protection sont utilisés à Saly pour freiner ce recul en aval dérive dans les segments 3 et 4. Etant donné que la dérive littorale est pauvre en sédiments dans ces zones et très érosive, les structures qui durcissent la ligne de rivage comme les murs ne sont pas adaptées à ces zones car le risque lié à l'affouillement est très élevé. Le départ de sédiments à la base des murs les rend instables et conduit à leur affaissement. Les murs de protection ne peuvent pas lutter contre les effets adverses en aval dérive des épis. Pour arriver à minimiser le recul, il est possible d'agir sur la hauteur, la perméabilité, la longueur, la forme, l'orientation et l'emplacement des épis d'un réseau. L'alimentation des plages dans la zone de recul en aval est aussi une solution largement utilisée à travers le monde malgré les inconvénients liés à un entretien régulier et aux coûts financiers. Les solutions de la protection côtière à Saly doivent aller dans le sens de gérer le recul en aval des épis ou dans le sens de ne pas créer de recul en aval. Ce seront donc des solutions avec des épis ou des solutions sans des épis. Il s'agira dans tous les cas, de combiner des structures de protection du même type ou d'associer plusieurs types de protection. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet de construction en cours de réalisation des nouveaux brise-lames et d'épis associés à un rechargement des plages.

V.3.5. Nouveaux ouvrages de protection

Dans le cadre de la réalisation du Projet de Croissance et de Développement des Exportations (PCDE) financé par la banque mondiale dont l'APIX est le maître d'ouvrage délégué, il a été initié le projet de restauration, de protection et de l'entretien des plages de Saly. Après étude, la mission Egis assistant à maître d'ouvrage a retenu la solution de protection par des brise-lames, des épis et un rechargement de plage (Egis, 2017). Ainsi ont été proposées sur 3 segments très vulnérables à l'érosion qui correspondent approximativement à nos segments (2, 3 et 4) les mesures de protection suivantes (figure 82) :

- 6 épis dont deux en T, un en L et trois plongeants ;
- 10 brise-lames de 120 m de long, espacés de 80 m à 120 m du rivage ;
- Un rechargement de sable sur tous ces segment pour créer une berme de 20 m.

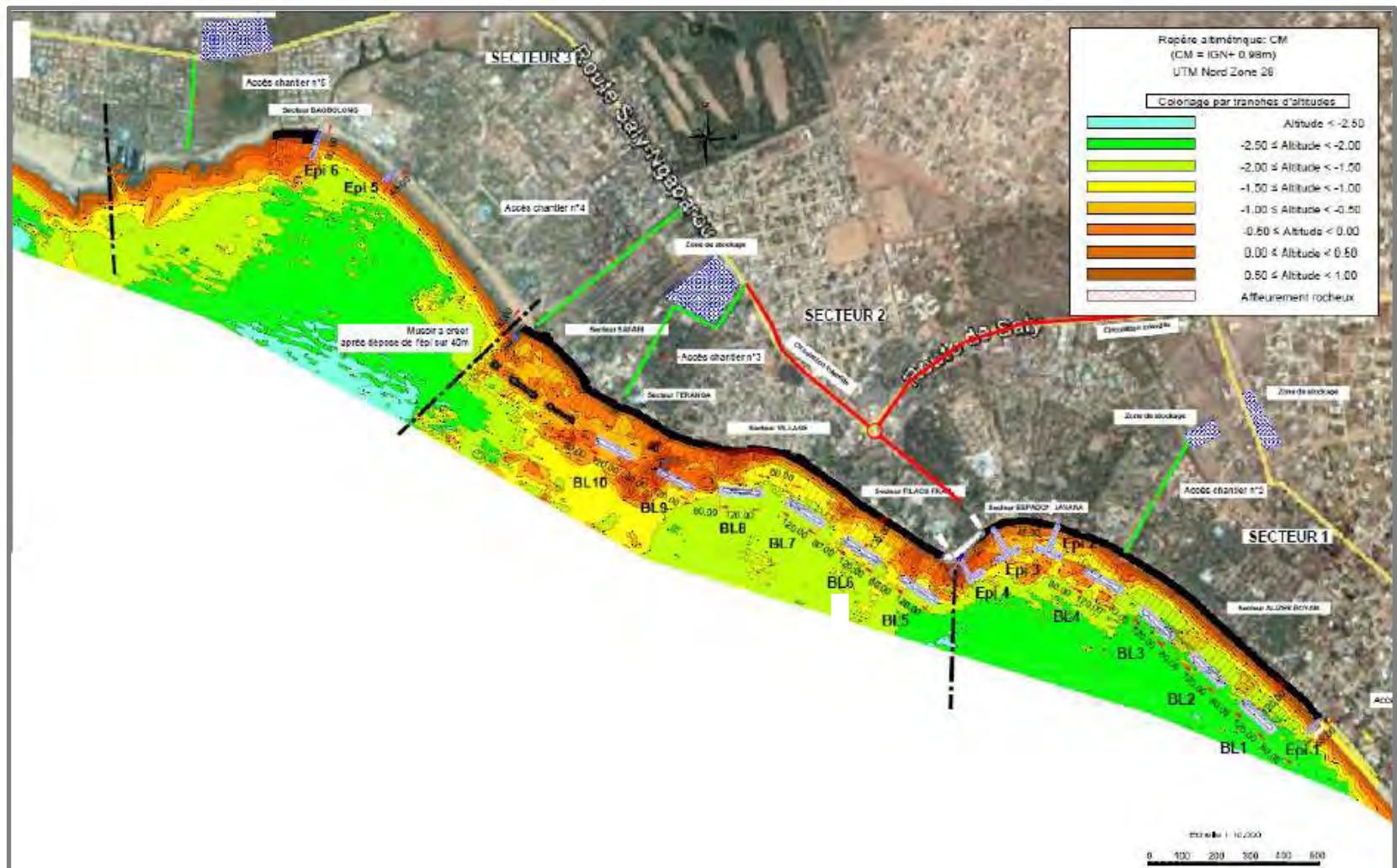


Figure 84 : Les propositions d'aménagements de protection par segment de l'Avant Projet Spécifique (APS) (Egis, 2017)

Les travaux de construction de ces nouveaux ouvrages de protection ont commencé en 2019 avec toutefois des réserves émises par Egis sur la qualité et les quantités de sables disponibles en mer, les travaux de prospection du sable de rechargement n'étant pas très concluants. Les résultats de la campagne de carottages conduisent à une incertitude sur l'épaisseur de la couche de sédiments disponible et son extension globale. En effet, les carottes devaient être prélevées sur une profondeur de l'ordre de 90 cm qui n'a jamais pu être atteinte par les plongeurs travaillant au fond. La raison de cette limitation n'est pas connue (Saly-Rapport, 2017).

Les modèles ShorelineS nous permettront d'évaluer l'efficacité sur le long terme de cette nouvelle protection.

V.3. Modèles de protection ShorelineS du littoral de Saly

Les résultats obtenus avec les scénarios du modèle ShorelineS montrent que les murs de protection ne sont pas adaptés à la protection du littoral. Les brise-lames n'empêchent pas pour le moment aux segments qu'ils sont censés protéger de connaître des taux d'érosion entre 2014 et 2016. La protection du littoral de Saly est meilleure avec des épis et surtout si la longueur de certains d'entre eux est réduite. Sans les épis, plusieurs segments du littoral présenteraient des taux d'érosion plus élevés (tableau 20). ShorelineS apporte des informations utiles à la protection côtière et permet par ailleurs de proposer des modèles de protection du littoral. Pour gérer ou empêcher le recul de la ligne de rivage à Saly, deux types de combinaisons de structures de protection peuvent être réalisées :

Tableau 20 : Taux d'évolution des segments avec les modèles M1 à M6 entre 2003 et 2016

Segments	S1	S2	S3	S4	S5
Images aériennes	5,08	1,46	-3,64	-2,44	-0,88
Modèles M1	5,46	1,10	-1,09	-0,14	-0,29
Modèles M2	-2,44	1,59	-3,37	0,71	0,97
Modèles M3	3,03	1,16	-1,66	0,22	0,23
Modèles M4	-2,39	2,02	-0,63	-0,28	-0,65
Modèles M5	5,40	1	-3,82	1,70	1,85
Modèles M6	5,2	0,67	-1,12	-0,23	-2,03

V.3.1. Modèles avec un seul type de protection

Les résultats obtenus sur l'évolution historique de la ligne de rivage et sur les modèles d'évolution ShorelineS permettent de proposer deux types de combinaisons avec un seul type de structure : une protection du littoral avec uniquement des épis (réseau d'épi bien structuré) et une protection du littoral avec uniquement des brise-lames (série de brise-lames).

V.3.1.1. La série de brise-lames

Les brise-lames sont utilisés pour atténuer l'action des fortes houles sur l'évolution du rivage. Ils présentent plusieurs avantages par rapport aux épis et peuvent donner des résultats satisfaisants sur la lutte contre l'érosion côtière s'ils sont bien placés, espacés et dimensionnés. C'est un type de protection qui a été proposé en 2011 à Saly avec « l'étude économique et spatiale de la vulnérabilité et de l'adaptation des zones côtières aux changements climatiques au Sénégal » sur trois sites pilotes (Saint-Louis, Rufisque/Bargny et Saly) (Banque Mondiale, Egis International, 2013). Trois brise-lames ont été construits de 2013 à 2014 et 10 sont en cours de construction. Avec le modèle ShorelineS, nous avons simulé un scénario M7 qui représente l'évolution de la ligne de rivage protégée uniquement par des brise-lames. Ceci permet de statuer sur l'impact de ce type de protection sur l'évolution à long terme du rivage. Ainsi des hôtels Lamentin à Cocotiers, nous avons introduit sur ShorelineS 27 brise-lames aux caractéristiques inspirées de l'existant : 90 à 120 m de long, espacés de 40 à 60 m et situés à 120 m du rivage. L'annexe VI donne la position des extrémités Nord et Sud de chacun de ces 27 brise-lames.

Pour la période 2016-2025 les modèles du Scénario M7 montrent 4 segments en érosion (S1, S2, S3 et S5) (figure 83). Seul S4 connaît un taux moyen d'accumulation important de 2,84 m/an. Le taux moyen d'érosion est plus élevé pour S5 (-2,5 m/an). Entre 2025 et 2035, les phénomènes d'érosion continuent dans les S2, S3 et S5 alors que la situation s'inverse pour S1 qui enregistre un fort taux d'accumulation. Le segment S4 est toujours en accumulation durant cette période.

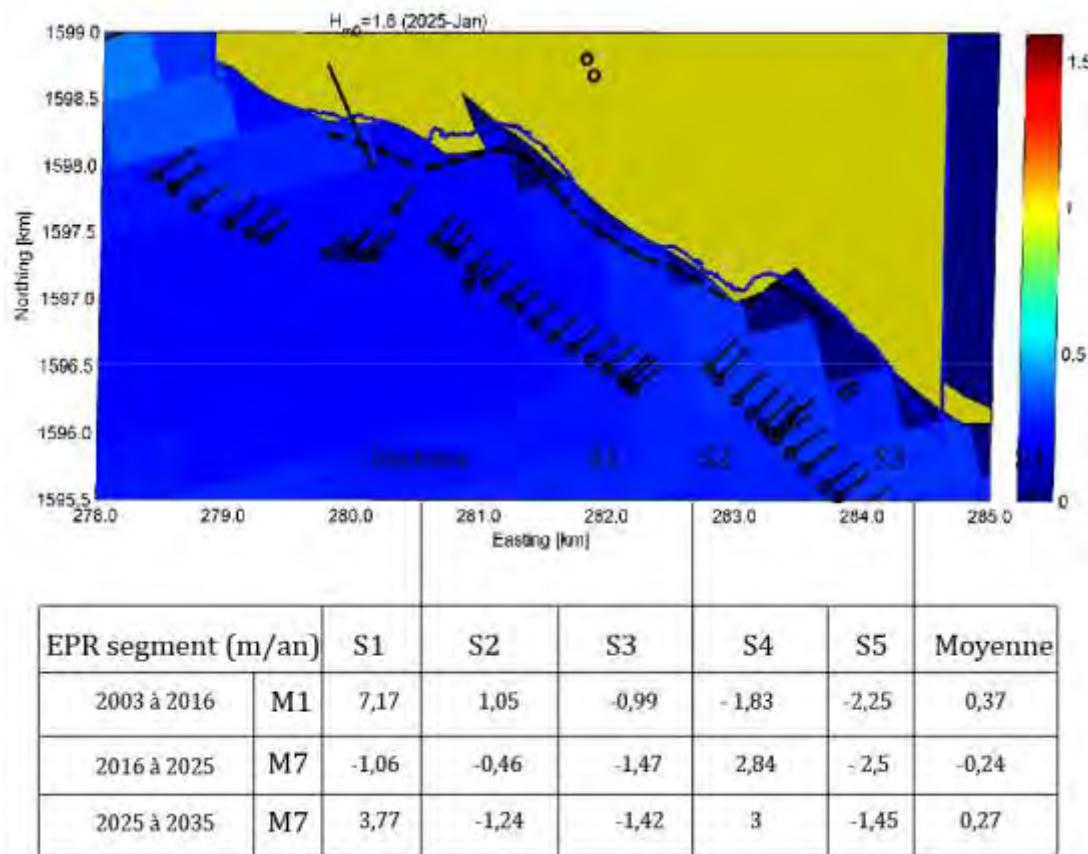


Figure 85 : Taux d'évolution moyen de la ligne de rivage entre 2016 et 2035 sans modification de la protection côtière (M1) et avec une série de brise-lames (M7)

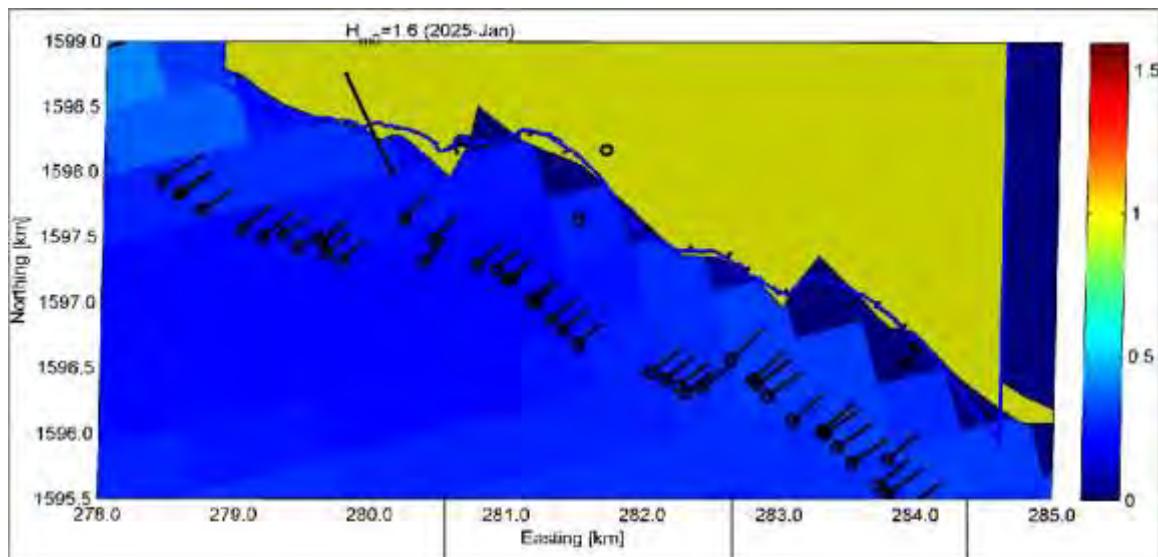
Cette évolution montre qu'avec des houles de 1 à 2 m, les brise-lames sont des structures de protection qui ont des effets relativement faibles sur l'évolution du littoral. Les brise-lames qui sont destinés à réduire l'énergie des houles sur le rivage ont des impacts beaucoup plus significatifs au moment des épisodes de tempêtes lorsqu'ils minimisent l'action érosive des fortes houles. A long terme si nous prenons en compte les événements tempétueux, les brise-lames peuvent effectivement atténuer les processus d'érosion à Saly.

V.3.1.2. Le réseau structuré d'épi

L'épi représente la première méthode de protection préconisée par les hôteliers de Saly. Il permet de constituer rapidement une plage sans occuper une partie importante du rivage. Il est aussi moins coûteux qu'un mur de protection ou un brise-lame. Les structures se sont multipliés depuis 1998 et leur construction s'est faite de façon désordonnée au point qu'il existe un réseau non structuré d'épis à Saly. Les positions, les espacements et les dimensions des épis n'ont pas été bien évalués.

Nous avons simulé avec ShorelineS un scénario M8 qui représente l'évolution de la ligne de rivage avec un réseau structuré d'épi. En effet en partant du Sud vers le Nord, il est possible d'introduire dans le modèle un épi, de l'exécuter pour voir avec le temps la configuration de la ligne de rivage avant de passer à l'épi suivant. Ceci permet de savoir l'emplacement approprié de l'épi suivant afin de réduire les effets du recul en aval dérive à l'intérieur du réseau d'épis. En d'autres termes la position de chaque épi du réseau a été minutieusement choisie en relation avec l'épi situé juste en aval par rapport au sens dominant de la dérive littorale. Ce choix est aussi basé par ailleurs sur la forme du rivage. C'est une protection à une échelle globale du littoral de Saly. Ainsi 13 épis ont été introduits sur le modèle ShorelineS afin d'évaluer à long terme leur impact sur l'évolution de la ligne de rivage. Les épis ont des longueurs comprises entre 40 et 50 m et des espacements de 200 à 400 m en moyenne. L'annexe VII indique la position des extrémités offshore et onshore de chaque épi.

Pour la période 2016-2025, les segments S3 et S5 des modèles du Scénario M8 enregistrent de faibles taux d'érosion (-0,87 et -0,3 m/an respectivement) alors que les segments S1, S2 et S4 sont en accumulation (figure 84). S1 présente le taux d'accumulation le plus élevé (3,85 m/an). Entre 2025 et 2035, les taux d'accumulation s'accentuent sur S1 et S4, S3 se stabilise et S2 et S5 connaissent de très faibles taux d'érosion (-0,71 et -0,58 m/an respectivement).



EPR segment (m/an)	S1	S2	S3	S4	S5	Moyenne	
2003 à 2016	M1	7,17	1,05	-0,99	-1,83	-2,25	0,37
2016 à 2025	M8	3,85	1,04	-0,87	0,83	-0,3	0,64
2025 à 2035	M8	8,14	-0,71	0,03	1,64	-0,58	0,99

Figure 86 : Taux d'évolution moyen de la ligne de rivage entre 2016 et 2035 sans modification de la protection côtière (M1) et avec un réseau structuré d'épis (M7)

Par rapport aux modèles du scénario M7, le nombre de segment en érosion et les taux ont diminué fortement sur les modèles du scénario M8. Le réseau structuré d'épis apporte une meilleure protection que la série de brise-lames. Il permet de protéger le segment 3 qui dans tous les scénarios est en érosion. C'est surtout le segment 5 en aval du réseau qui connaît une érosion continue. Le scénario M8 protège plus de segments du littoral avec moins de structures comparé aux modèles des autres scénarios. Leur utilisation devrait toutefois s'accompagner de mesures d'atténuation du recul en aval du réseau qui se produit sur le segment 5. Etant donné que les taux d'érosion sont faibles à ce niveau, un rechargement de sables permet d'éviter le recul du segment. Les quantités de sables à utiliser sur ce segment 5 devraient aussi être moins importantes que ceux estimés sur les propositions Egis ou plusieurs sections du littoral doivent être rechargées. En effet sur ce projet, trois segments devront recevoir au total 455308 m³ de sable pour obtenir une largeur de berme de 20 m juste après la mise en plage des ouvrages.

V.3.2. Modèles avec différents types de protection

Les épis et les brise-lames sont des structures de protection qui peuvent être bénéfiques sur les plages sur le court terme et sur le long terme. Ainsi les combinaisons entre épi et brise-lames ont été retenues dans cette partie.

V.3.2.1. Le réseau structuré et la série de brise-lames

Dans le but d'améliorer la protection du littoral avec le réseau structuré d'épis introduit dans ShorelineS, nous avons associé à ce réseau une série de 27 brise-lames allant des hôtels Lamentin à Cocotiers. Le scénario M9 ainsi constitué vise à évaluer l'impact d'une combinaison d'épis et de brise-lames bien placés sur l'évolution de la ligne de rivage. Les positions des épis et des brise-lames considérés sont indiqués par les Annexes VI et VII.

De 2016 à 2025, les segments 1 et 2 des modèles du scénario M9 sont en accumulation alors que les segments 3 à 5 présentent de faibles taux d'érosion. Le taux d'accumulation est plus important sur le segment 1 (4,42 m/an). Entre 2025 et 2035 tous les segments sont en accumulation à l'exception du segment 5 qui connaît un taux moyen d'érosion très faible (-0,37 m/an) (figure 85).

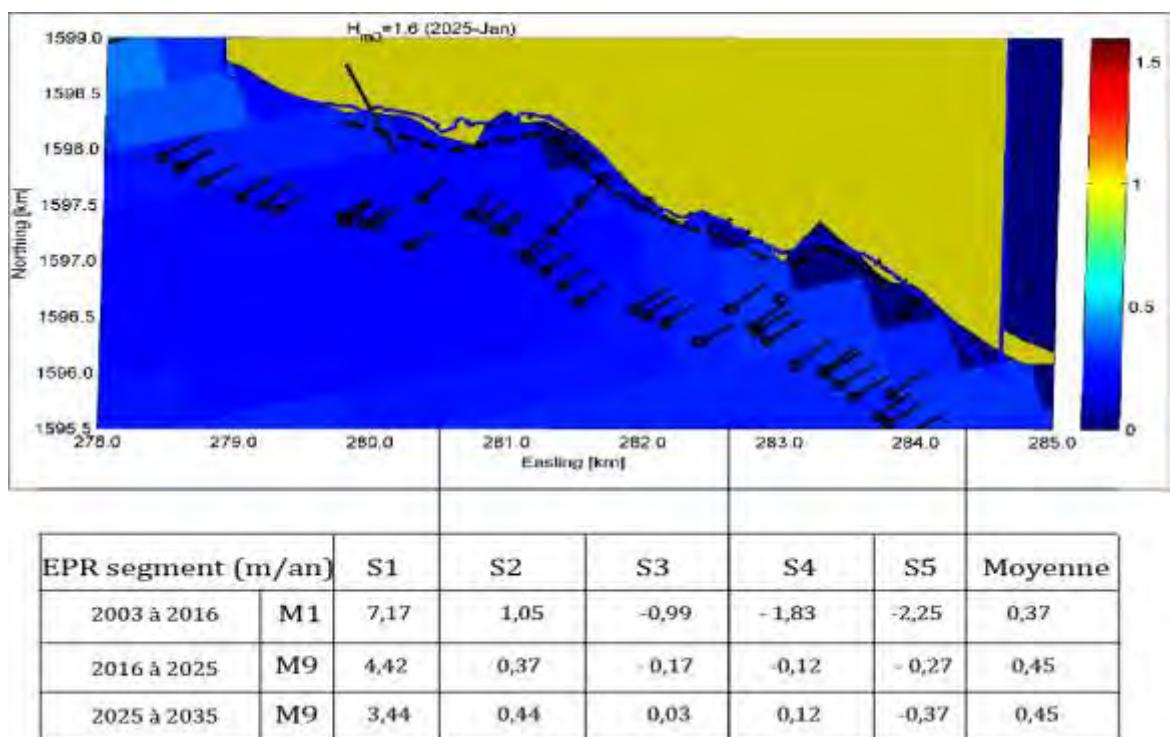


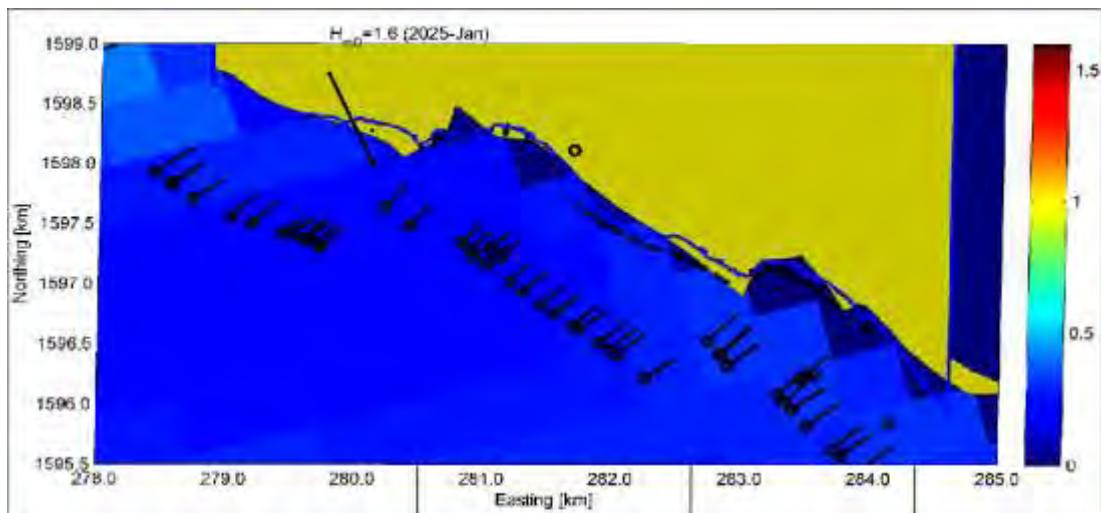
Figure 87 : Taux d'évolution moyen de la ligne de rivage entre 2016 et 2035 sans modification de la protection côtière (M1) et avec une série de brise-lames plus un réseau structuré d'épis (M7)

Comme les modèles du scénario M8, les modèles du scénario M9 réduisent le nombre de segment en érosion et les taux. La combinaison entre un réseau structuré d'épi et une série de brise-lames est aussi une solution à la protection du littoral. Pendant les périodes de beau temps, les épis peuvent constituer en amont les plages en piégeant les sédiments véhiculés par les courants de dérive et lors des épisodes de tempêtes, les brise-lames peuvent empêcher le départ des sédiments en réduisant l'énergie des vagues. Les inconvénients des modèles M9 sont liés au nombre important d'ouvrages de protection à mettre en place et au recul en aval dérive de la dernière structure.

V.3.2.2. Les épis et les brise-lames proposés par Egis

Une combinaison entre des épis et des brise-lames proposée par Egis est en cours de réalisation (Annexe VIII). Après la mise en place des structures, la protection doit être renforcée par un rechargement de sable sur certaines sections vulnérables du littoral. Nous avons introduit dans le modèle ShorelineS un scénario M10 constitué par les épis et les brise-lames proposés par Egis afin d'étudier leur impact sur l'évolution de la ligne de rivage. Cette solution de protection est l'option choisie par l'Etat du Sénégal et témoignera relativement de ce fait de l'évolution future de la ligne de rivage. Il faut signaler que dans ses propositions, Egis prévoit d'enlever toutes les structures de protection situées entre la résidence Safari et l'hôtel Cocotiers, en particulier les sacs de sables, les épis G6 à G12 et les murs de protection R2 à R5 qui n'ont plus d'intérêt selon le projet. L'épi G5 sera aussi réduit passant d'une longueur de 90 à 50 m.

De 2016 à 2025, les segments 3 et 5 des modèles du scénario M10 sont en érosion alors que les segments 1, 2 et 4 sont en accumulation. Le taux d'accumulation moyen est plus élevé sur le segment 1 (6,70 m/an) et le taux d'érosion moyen est plus élevé sur le segment 3 (-1,39 m/an). Entre 2025 et 2035, l'érosion continue sur les segments 3 et 5 et l'accumulation continue sur les segments 1 et 4 alors que le segment 2 entre en érosion avec un taux d'érosion moyen très faible (-0,41 m/an) (figure 86).



EPR segment (m/an)	S1	S2	S3	S4	S5	M	
2003 à 2016	M1	7,17	1,05	-0,99	-1,83	-2,25	0,37
2016 à 2025	M10	6,70	0,70	-1,39	1,98	-0,23	1,03
2025 à 2035	M10	9,94	-0,41	-1,14	1,76	-0,56	1,03

Figure 88 : Taux d'évolution moyen de la ligne de rivage entre 2016 et 2035 sans modification de la protection côtière (M1) et avec les brise-lames plus les épis proposés par Egis (M7)

Les modèles du scénario M10 présentent moins de brise-lames que ceux du scénario M9. La position et le nombre d'épis sont aussi différents dans ces deux solutions qui combinent des brise-lames et des épis. Ces différences peuvent expliquer les processus d'érosion observés sur les segments 2 et 3 du scénario M10. En effet sur le scénario de la solution d'Egis, les épis 4 et 5 sont éloignés l'un de l'autre sur le segment 3 de même que les épis 5 et 6 du segment 2. Les brise-lames sont aussi absents sur ce dernier segment. La protection proposée par Egis représente néanmoins une solution pour le littoral de Saly car il est prévu dans le projet de procéder à des rechargements de sable sur ces segments en érosion. Il faut toutefois que ce rechargement soit fait de manière périodique car les sédiments qui seront apportés sur la plage seront constamment mobilisés par les agents dynamiques.

V.4. Planification de la protection du littoral

Les zones géographiques du littoral sénégalais à savoir la côte nord, la côte rocheuse de Dakar et la Petite Côte se singularisent par des caractéristiques géomorphologiques, hydrodynamiques et socio-économiques à l'origine de lignes de rivage particulièrement instables. Celles-ci présentent des zones à hauts risques nécessitant chacune en ce qui la concerne une stratégie de gestion des processus d'érosion. Les ouvrages de protection dans leur majorité, n'ont pas toujours donné des résultats satisfaisants, comme c'est le cas à Saly. Dans un contexte d'élévation du niveau marin lié au changement climatique, l'érosion des côtes sénégalaises continue d'inquiéter les populations. Et lorsque les processus d'adaptation ne sont pas fondés sur de bonnes informations ou l'attention prêtée à la planification et la conception est insuffisante, la conséquence peut être l'inadaptation, c'est-à-dire des mesures possiblement coûteuses et inadéquates à plus long terme qui, en fin de compte, accentuent les vulnérabilités aux changements climatiques (Bernatchez et Dubois, 2008; Brown *et al.*, 2011; Bernatchez et Fraser, 2012; GIEC, 2013, 2014). À court terme, les mesures inadaptées risquent aussi d'empêcher la mise en œuvre d'activités plus appropriées à l'avenir en consommant les ressources financières dont on dispose et en occupant des terres de valeur. Une planification stratégique et opérationnelle plus aboutie permettrait de résoudre les problèmes d'érosion côtière. La planification stratégique renvoie à une prévision qui se déroule sur un pas de temps déterminé avec un plan d'action répondant aux questions « Que fait-on ? Pourquoi ? Comment ? ». Tandis que la planification opérationnelle spatiale permet de rendre effective cette planification stratégique sur un territoire donné en répondant aux questions « Où fait-on quoi ? » (Le Visage, 2011). Des solutions basées sur l'analyse des données scientifiques obtenues au cours de cette étude et des expériences du Sénégal et des Pays bas sur la protection côtière sont dans cette partie proposées aux décideurs pour les permettre de soutenir sur le long terme des politiques et pratiques de lutte contre l'érosion des côtes. Nous nous intéressons aux Pays bas car au-delà de leur longue expérience sur la protection côtière, les modèles ShorelineS y ont été développés et utilisés avec succès.

V.4.1. Planification stratégique

De la conception d'un aménagement à sa réalisation, il existe plusieurs étapes sur lesquelles interviennent différents acteurs. Les initiateurs du projet interviennent d'abord : les maîtres d'ouvrage publics ou privés et les bureaux d'étude. Ils proposent en se basant sur une planification nationale ou locale le projet et font les études d'impacts nécessaires. Ensuite généralement suivent trois types de contrôle : un contrôle administratif, un contrôle social et

un contrôle spécifique pour la décision. Le contrôle spécifique ou expertise doit pouvoir fournir un avis neutre et objectif, son point de vue apparaissant normalement détaché d'intérêts économiques et politiques, ce qui devrait lui conférer une place importante et légitime. Malgré leur rôle fondamental, scientifiques et experts ne sont que rarement consultés, si ce n'est que dans la phase de réalisation de l'étude d'impact par les bureaux d'études. L'expertise reste rare et demeure davantage une possibilité qu'une réalité, alors même qu'un milieu complexe comme le littoral le justifierait (Choblet, 2005). Les scientifiques et les experts devraient pourtant intervenir tout le long de la procédure jusqu'à la prise de décision. Avant la conception des aménagements ils devraient participer activement au niveau national à l'élaboration de programmes consensuels de protection du littoral. Des approches stratégiques de lutte contre l'érosion des côtes doivent être adoptées en relation avec les caractéristiques physiques du littoral et les spécificités régionales. Ces stratégies consistent à opter pour des principes, des mesures et des méthodes efficaces à la protection du littoral acceptés avec un large consensus par l'ensemble des acteurs.

Le Sénégal a passé plusieurs années pour mettre en place des stratégies de gestion de son espace littoral. Cette situation peut s'expliquer par le fait que le littoral n'est pas analysé comme espace spécifique. C'est dans ce contexte que les premiers documents comme le PNAT (Plan National d'Aménagement du Territoire) suivi du PNAE (Plan National d'Action pour l'Environnement), du PANA (Plan National d'Action pour l'Adaptation) et du PGIZC (Plan de Gestion Intégrée des Zones côtière) etc. ont été élaborés (Ndiaye, 2016). Selon cet auteur ces documents de planification stratégique nationale souffrent d'une prise en compte insuffisante des problèmes de l'érosion des côtes (PNAT et PNAE), d'une non-application sur le territoire (PANA) et d'un caractère non exhaustif, limité à 4 sites pilotes qui n'ont pas les mêmes priorités (PGIZC). Des plans ou schémas de protection bien ficelés couvrant l'ensemble des zones vulnérables du littoral devraient être proposés aux décideurs pour les pousser à n'autoriser que des aménagements compatibles avec les orientations des programmes. Dans un document unique d'aménagement intégré du littoral, des solutions innovantes qui ne demandent qu'à être financées et mises en œuvre peuvent même être établis pour protéger le littoral sur le long terme. Ceci permet d'éviter, d'avoir recours après certaines catastrophes à des protections d'urgence. Cette planification nationale qui demande plusieurs compétences et expériences permet aussi d'éviter qu'un nombre réduit de scientifiques et d'experts proposent des solutions immédiates dont les impacts sur les évolutions morphologiques, écologiques et socio-économiques du littoral ne sont pas bien évalués sur le long terme. Il existe dans certains pays avancés dans la protection littorale des

pratiques innovantes de protection des côtes basées sur de nouvelles connaissances scientifiques. La modélisation littorale contribue largement à l'acquisition de ces connaissances et la validation des solutions de protection.

Les principales recommandations pour la protection future contre l'érosion et les inondations comprennent la surélévation et le renforcement des structures de protection existantes. Des projets avancés d'alimentation des plages et des dunes visant à protéger les littoraux de l'érosion et des inondations et à améliorer l'écosystème ont déjà été mis en œuvre, comme par exemple aux Pays Bas avec les «Projets Ecoshape» ou « Construire avec la nature» (*Sand motor* et *The Hondsbosche Zeewering*) (DHI, 2017). La *Hondsbossche Zeewering* ou digue marine Hondsbossche, est une digue constituée de 40 millions de m³ de sable. Elle est longue de 5,5 km et se situe près de Petten dans la province de la Hollande-Septentrionale. Le Sand motor est une « méga-alimentation » des plages situé sur la partie Sud des Pays bas, entre Scheveningen et Hoek van Holland (figure 87 ; photo 12). Au cours de ce projet pilote exécuté en 2011, 21,5 millions de m³ de sable prélevés dans la mer du nord à des profondeurs supérieures à -20 ont été déposés sur 2,5 km du rivage, créant une péninsule appelée Sand moteur. Le sable apporté au rivage est redistribué par le vent, les vagues et les courants et se répand progressivement sur les plages adjacentes en érosion au fur et à mesure que la structure se dégrade. C'est une alimentation à grande échelle des plages qui devrait permettre de les protéger de l'érosion et des submersions pour une période de 20 ans à 50 ans. Les études montrent qu'entre 2011 et 2014, la péninsule s'est érodée d'environ 300 m, soit environ 100 m/an, et le sable s'étend le long des côtes sur une longueur d'environ 4 km reconstituant progressivement les plages. Les résultats obtenus jusqu'à présent indiquent que la ligne de rivage avance en amont et en aval de Sand Motor. Ce moteur de Sable est plus efficace, économique et respectueux de l'environnement que les alimentations sectorielles qui se faisaient tous les trois à cinq ans pour atténuer le recul de la ligne de rivage depuis les années 1970 (tableau 21). Cette approche innovatrice de la protection littorale préserve la flore et la faune, crée un environnement temporaire pour des activités de loisirs et utilise la nature pour se protéger de la mer. Les modèles ShorelineS qui retracent l'évolution de Sand motor correspondent très bien aux observations réalisées sur le terrain (figure 88). C'est dire que la modélisation littorale contribue pleinement à l'étude de l'évolution des littoraux et apporte beaucoup à la recherche de solutions de protection de ces environnements plutôt fragiles.



Figure 89 : Localisation de Sand motor sur la côte de la Hollande méridionale (Delfland).

En rouge, les WeaK Links : les zones alimentées en 2008-2009. Source: Taal et al, (2016)

Tableau 21 : Les avantages et les inconvénients d'une solution de méga-alimentation sur les plages

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Une grande partie du rivage n'est pas influencée par les travaux d'épandage ; - les impacts écologiques sont réduits sur les rivages adjacents ; - plusieurs formes littorales peuvent se développer à partir du stock initial (flèche littorale, lagune, bancs de sable, dunes, microfalaises...) ; - le stock initial favorise des activités récréatives ; - le stock initial permet d'étudier les actions morphogènes des agents de la dynamique littorale ; - le coût lié au transport du m³ de sable vers une seule section du rivage peut être réduit ; 	<ul style="list-style-type: none"> - La protection fournie est inégalement répartie le long du rivage à protéger ; - le recul en aval temporaire peut se former juste après le dépôt du stock qui agit à la manière d'un épi ; - les pentes abruptes qui se développent autour du stock initial peuvent être dangereuses pour les nageurs ; - le danger lié aux courants d'arrachement ou « rip currents » qui peuvent se former là où le stock modifie brusquement la direction du rivage ; - les coûts financiers initiaux importants liés aux quantités de sable à apporter.



Photo 12 : Projet pilote Sand Motor en juillet 2011 (A) et en septembre 2014 (B). Photos De Joop van Houdt / Ministère des travaux publics et de l'environnement des Pays Bas.

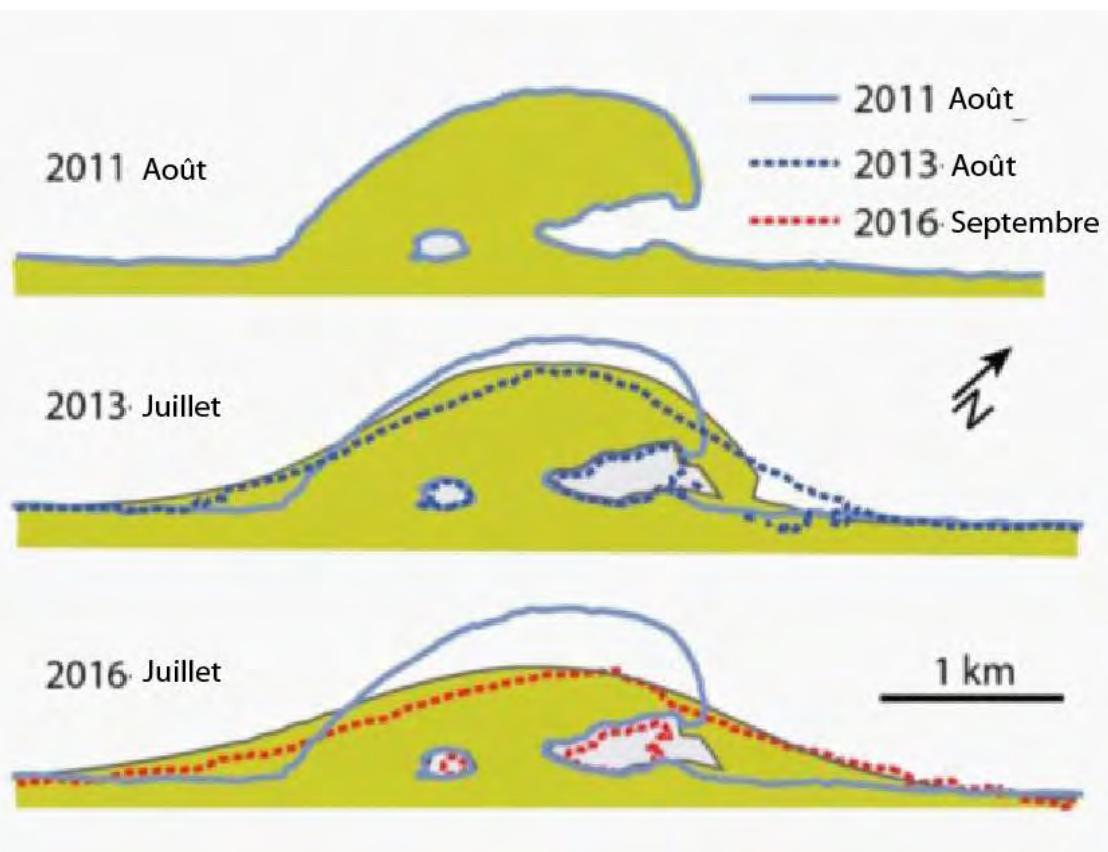


Figure 90 : Validation du modèle ShorelineS pour le sable Moteur, Delfland, Pays-Bas (Roelvink, 2018 b)

Quelle soit sectorielle ou à grande échelle, l'alimentation en sable est une méthode couramment utilisée pour augmenter le volume de sédiment sur une plage (Hamm *et al.*, 2002). C'est une méthode naturelle de protection des plages qui améliore leur valeur esthétique et favorise des activités récréatives. Elle est à présent largement utilisée à travers le monde sur les plages où l'érosion côtière constituait une menace à l'occupation de l'espace par les populations et à leurs activités économiques. Lorsque la société modifie l'environnement avec des conséquences néfastes sur le budget des sédiments littoraux (déficit sédimentaire), il devient impératif de remédier à l'érosion des plages en apportant un volume égal de sable dans le système sous la forme d'une alimentation des plages (PCZMP, 2001). Remplacer le sable perdu est la manière la plus rapide et la plus sûre de restaurer les plages. Les opérations de méga-alimentation des plages et comme par ailleurs la création d'îles artificielles qui fonctionnent à la manière des brise-lames sont entre autres des méthodes appropriées de protection du littoral. Ce sont des méthodes qui s'inspirent des processus côtiers naturelles. Elles devront à l'avenir occuper une place importante dans la gestion du littoral car elles permettent de préserver l'environnement et d'allier la protection et le loisir.

Les analyses précédentes sur la protection côtière au Sénégal, au Pays bas et les résultats obtenus au cours de cette étude permettent de suggérer des principes, des mesures, des pratiques ou des méthodes de protection qui entrent dans le cadre d'une planification stratégique du littoral sénégalais. Peuvent aider à la protection du littoral :

- **Un renforcement des structures dures de protection existantes sur certaines zones.** Si les structures arrivent à jouer pleinement leur rôle, c'est-à-dire de protéger les terres situées derrière elles sans provoquer un recul excessif du rivage sur les littoraux adjacents, les surélever et les renforcer augmenteraient leur durée de vie et les aiderait à affronter des conditions hydrodynamiques plus fortes attendus dans un contexte d'élévation du niveau marin. Les structures de protection qui durcissent la ligne de rivage tels que les murs, les revêtements doivent être placées dans les zones où l'affouillement est acceptable ou évitable par des mesures de protection alternatives. Ces structures devraient être déconseillées sur les rivages utilisés à des fins récréatives. Elles occupent toute la plage et empêche le passage.
- **Une optimisation des caractéristiques physiques des structures de protection dures** pour tirer profit aux mieux des effets bénéfiques de chacune d'elles, que ça soit à Saly ou ailleurs. Cela passe par exemple par une réduction de la longueur de certaines structures comme les épis très longs, à une modification de leur position, de leur orientation ou de leur perméabilité entre autres pour minimiser leurs effets néfastes sur

la protection côtière. L'optimisation peut aussi tout simplement consister à démolir certaines structures jugées avec une large unanimité inadaptées ou inefficaces à la protection côtière. Le port de plaisance de Saly avec ces longs épis pose beaucoup de problèmes à la protection côtière en détruisant les plages au Sud. Il empêche ainsi plus d'activités récréatives qu'il n'en crée en jouant son premier rôle. L'optimisation devra aussi consister à n'autoriser la construction de murs, de revêtement et de cloisons que s'ils protègent complètement des longueurs importantes du rivage. Les structures trop courtes provoquent beaucoup de dégâts sur les rivages adjacents qui sont parfois liés à des terres avec une valeur économique importante voir supérieure à celle de la zone que les structures sont censées protéger. Le revêtement de la porte du millénaire par exemple, ne couvrant pas toute la plage de Kousoum, accentue les phénomènes d'érosion au niveau de la partie centrale de cette petite baie avec comme conséquence des glissements de terrain qui, à long terme, peuvent menacer la corniche (Ngom, 2012).

- **Une promotion des mesures qui favorisent le fonctionnement naturel du système littoral.** Les transports littoraux cross-shore ou longshore ne devraient pas être totalement interrompus car ils contribuent en permanence à un rééquilibrage du bilan sédimentaire sur les sections du littoral. Par exemple, la mise en place d'épis ne devrait être autorisée que si le recul en aval qu'ils génèrent est acceptable ou minimisé par d'autres mesures complémentaires de protection. La construction sur le rivage basée sur le concept « les pieds dans l'eau » devrait être interdite lors des aménagements sur le littoral en particulier pour de nouvelles stations touristiques. Les constructions sur le cordon dunaire retiennent des quantités importantes de sédiments utiles à l'équilibre du système littoral. Les constructions neuves ou les bâtiments et les installations devront être implantés à une distance sûre de la ligne de rivage à déterminer de façon unanime. Vue les vitesses d'évolution des littoraux, les cent mètres de large à partir de la limite atteinte par les plus fortes marées attribués au DPM sont souvent insuffisants. Une grande partie du cordon dunaire devrait être débarrassée de toute construction afin de pouvoir rééquilibrer la plage en cas d'érosion.
- **Une promotion des méthodes de protection du rivage qui s'inspirent des processus côtiers naturelles :** brise-lames, végétations et alimentation des plages etc. Sur les littoraux où les plages ne peuvent pas engraisser de façon naturelle à cause d'un manque d'apports sédimentaires, des brise-lames à la manière des écueils

rocheux aideraient à atténuer l'énergie des houles notamment au moment des épisodes de tempêtes particulièrement érosives. Les plantations de filaos ou de cocotiers peuvent favoriser l'engraissement naturel des rivages sableux ayant à leur disposition d'importantes quantités de sédiments. La végétation des dunes retient des quantités importantes de sédiment. Les alimentations par section de rivage qui sont moins chères en terme d'investissement doivent être effectuées en y prêtant beaucoup d'attention pour réussir les premières expériences et passer si les compétences et les coûts financiers sont réunis à une alimentation à grande échelle (méga-alimentation) qui utilise les facteurs naturels d'évolution du rivage.

- **L'implication de plus de scientifiques et d'experts dans la planification de la protection des côtes.** Des cadres de travail qui réunissent plusieurs compétences et expériences permettent de discuter des nouvelles mesures de protection et d'éclairer les décideurs sur différents impacts potentiels. Les nouvelles connaissances développées à partir des environnements qui présentent des évolutions similaires ou des zones qui présentent les mêmes types de protection améliorent les réponses apportées aux problèmes que pose la protection côtière. En ce sens la modélisation littorale joue un rôle important car elle permet de représenter et d'anticiper sur l'évolution des différentes formes littorales sur le court, moyen et long terme.
- **Un document national de planification stratégique qui couvre intégralement le littoral sénégalais.** Il devra s'intéresser exclusivement au littoral dont une définition sera retenue de façon unanime. A ce titre une ligne de rivage de référence pourrait aussi être choisie et servirait de ligne de base à toutes les études liées à l'évolution du littoral. Cette ligne de rivage de base est particulièrement importante car elle permet d'harmoniser les résultats issus de diverses études et aide à déterminer dans le cas d'un suivi annuel de l'évolution du littoral des zones vulnérables qui nécessitent en urgence une protection même si on sait que l'érosion n'a pas commencé en même temps partout. A Saly par exemple la ligne de rivage de 1978 au moment où le littoral connaissait une évolution naturelle peut servir de référence à toutes les études qui pourront se faire sur le site. Même si des données globales sur des images aériennes sont souvent rares au Sénégal, des études permettraient de choisir une ligne ou quelques lignes de références nationales. Ce document posera clairement les principes, les options, le type de protection et les orientations recommandées sur la protection côtière au Sénégal.
- **Des documents de planification opérationnelle qui s'intéresseront au trois zones**

géographiques déterminées : la côte nord, la côte sud et la côte rocheuse de Dakar. Ces documents préciseront les orientations recommandées dans le document national de planification stratégique en fonction des particularités de ces différentes zones géographiques. Les mesures et les types de protection appropriés à chaque zone géographique seront établis avec beaucoup de détails.

V.4.2. Planification opérationnelle et spatiale

Il existe des disparités régionales et locales sur les instruments de planification utilisés dans les villes côtières au Sénégal. Si certaines villes disposent d'assez de documents de planification qui sont parfois incohérents, d'autres n'en demeurent pas moins loties en instruments de planification. A Saint-Louis, on assiste à une planification au niveau régional, communal et de quartier, tel n'est pas le cas pour la ville de Saly Portudal qui n'a pas encore connu la mise en place de document devant prendre l'ensemble des préoccupations de développement. Cette situation s'explique par le caractère récent de la ville qui a été érigée en commune en 2008 (Ndiaye, 2016). Selon cet auteur, le seul document de planification disponible au niveau régional est le PRDI qui, du reste, n'intègre pas la problématique de l'érosion côtière, ni dans sa phase diagnostique ni dans sa phase perspective. Cette situation montre que l'érosion côtière n'était pas prise en charge par les autorités régionales malgré son caractère alarmant sur les sites de la Petite Côte tel que Saly Portudal. Avec l'avènement de l'Acte 3 de la Décentralisation qui implique une suppression des régions au profit d'une départementalisation intégrale, le PRDI est devenu caduque. Il se pose ainsi la nécessité d'un plan départemental pour prendre en compte les préoccupations spécifiques de cette entité. Le PGIZC présente un caractère opérationnel puisqu'il propose des solutions concrètes sur certaines localités fortement menacées par l'érosion mais sa portée est nationale car il est établi à partir de quatre sites pilote aux caractéristiques physiques complètement différentes (Saint- Louis, Dakar, Mbour et Diogué). Si nous portons l'intérêt sur la zone littorale, il serait plus pertinent d'établir pour chacune des zones géographiques déterminées, à savoir la côte nord, la côte rocheuse de Dakar et la côte sud, un plan opérationnel de protection de son littoral. Chaque zone se singularise par des caractéristiques physiques qui commandent des types de protection bien définis. Chaque document précisera avec beaucoup de détails ce qu'il y a lieu à faire et la manière de le faire sur chaque zone, sur chaque ville.

La côte sud présente des rivages qui subissent une forte pression anthropique alors qu'ils sont parcourus par une dérive littorale relativement faible en sédiments. D'où leur sensibilité vis-à-vis de l'érosion qui est particulièrement manifeste dans plusieurs zones du littoral. En

effet, ce littoral contrairement à celui du Nord du Sénégal, ne peut plus engrasser de façon naturelle à cause du déficit de sédiments. Certaines des zones d'érosion du littoral sud ont été protégées soit par des épis soit par des murs en gabions, en béton ou en enrochements soit récemment par des brise-lames. Mais l'expérience a montré que ce sont les épis qui constituent la forme de protection la plus efficace et la plus adaptée au littoral sud (Ngom, 2012). Les insuffisances que présentent les épis sont dues soit à une étude de projet incomplète, soit à un non-respect des paramètres de conception. Une optimisation des caractéristiques physiques des épis, à travers des réseaux structurés d'épis, remplis initialement de sable juste après construction pour minimiser les effets aval dérive, permettrait d'avoir des solutions très prometteuses aux problèmes d'érosion qui se pose sur le littoral sud. Les scénarios M9 et M10 avec des épis et des brise-lames proposent des modèles appropriés à la protection de littoral de Saly. Sur ces modèles, des épis inefficaces réalisés entre 1998 et 2016 sont enlevés, d'autres sont réduits et de nouveaux épis sont mis en place à des positions jugées plus favorables à l'engrassement du littoral. Dans ces scénarios, la protection est aussi renforcée sur les zones les plus menacées par des brise-lames et un rechargement de sable.

Sur la côte nord, la ligne de rivage est à la fois sous le contrôle d'une dérive littorale présentant une importante charge sédimentaire et d'un système dunaire longeant le littoral. La charge sédimentaire est plus importante dans la zone au Nord de Kayar que dans la zone au Sud à cause de l'effet de piégeage du canyon de Kayar. Les dunes littorales sont très représentées le long du littoral nord et constituent un stock sédimentaire mobilisable en cas d'érosion. C'est un stock sédimentaire qui, à priori, devrait jouer un rôle important et de façon naturelle dans les problèmes d'érosion en mobilisant les sédiments vers les zones d'érosion (effet tampon). Ces dernières devraient être périodiques et se déplacer dans le temps et dans l'espace. Mais récemment si des problèmes d'érosion persistent à Saint Louis, au Nord du village de Cambérène et à Yoff, c'est surtout à cause des actions anthropiques qui s'accentuent sur le littoral. Celles-ci provoquent un déficit sédimentaire qui déstabilise l'équilibre naturel des plages.

L'évolution du rivage de la côte rocheuse de Dakar est principalement sous le contrôle de la nature lithologique des terrains constituant ses falaises. Certaines roches sédimentaires et volcano-sédimentaires tendres sont très vulnérables à l'attaque des houles qui sont les principaux agents morphodynamiques (Ngom, 2012). C'est le cas des tufs volcaniques de la plage Pasteur et des attapulgites de la plage de Rebeusse au niveau desquels l'érosion marine est particulièrement manifeste. Des études particulières à ces deux zones géographiques permettront d'y proposer des modèles de protection littoraux. Toutefois, au vu des

caractéristiques physiques des côtes et des protections déjà existantes, nous pouvons annoncer que les méthodes végétatives qui retiennent les quantités importantes de sable sont appropriées sur la côte nord alors que les structures qui durcissent la ligne de rivage en la rendant plus résistante le sont pour la côte rocheuse de Dakar. Le modèle ShorelineS est en mesure d'aider à proposer des modèles de protection très précis de la côte nord et de la côte rocheuse de Dakar.

Conclusion partielle

Il existe plusieurs mesures et méthodes de protection de la côte. Chacune d'elle a sur le littoral, des effets bénéfiques mais aussi des effets négatifs. La connaissance des processus littoraux, la compréhension du mode de fonctionnement et le respect des paramètres de conception de chaque structure sont des préalables nécessaires à une réussite de la protection littorale. Certains épis réalisés à Saly ont pu engraisser les plages en amont alors que d'autres ont été carrément inefficaces. Les brise-lames apportent sur le court terme une faible protection littorale. Les murs de protection sont instables, provoquent des pertes de plages, endurcissent le rivage et sont de ce fait inadaptés à la protection du littoral.

Les modèles des scénarios avec un réseau structuré d'épis apporte une meilleure protection que ceux avec une série de brise-lames. Les modèles des scénarios de protection ShorelineS qui utilisent la combinaison d'épis et de brise-lames bien positionnés ont donné des résultats satisfaisants. Sur ces modèles, seuls quelques sections du rivage subissent une érosion qui peut être arrêtée par un rechargement de sable bien localisé. Il existe donc des solutions à la protection du littoral de Saly. Mais pour que ces solutions s'inscrivent sur le long terme, elles devraient être bien structurées dans un cadre globale de planification stratégique et opérationnelle. C'est une approche qui permet d'anticiper et de coordonner les décisions qui concernent la protection littorale à l'échelle nationale ou locale.

CONCLUSION GENERALE

Enseignements de la thèse

Les calcaires paléocènes et les argiles de l'éocène inférieur du substratum de Saly sont recouverts de formations dunaires qui sont d'âge ogolien vers l'intérieur tandis que, quand on se rapproche de la côte on trouve un cordon littoral actuel et la plage. Les caractères morphologiques et la couverture sédimentaire du plateau continental n'agissent pas en faveur d'une accentuation des phénomènes d'érosion à Saly contrairement à l'élévation du niveau marin et les particularités socio-économiques. L'énergie des houles est réduite par la morphologie du plateau continental. Les variations spatio-temporelles des houles et courants ne seraient pas à l'origine des phénomènes d'érosion signalés à Saly depuis 1989. L'influence du niveau marin sur le recul du trait côte à Saly, de l'ordre de 3% est faible. Les apports sédimentaires au rivage sont aussi faibles. Les sédiments disponibles sur le cordon littoral sont retenus par les constructions. Ce qui peut être à l'origine d'un déficit sédimentaire car ne contribuent plus à l'équilibre des plages.

L'évolution historique de la ligne de rivage met en exergue un contraste très marquant entre un secteur Nord-Ouest en accumulation et un secteur Sud-Est en érosion. Le littoral de Saly connaît entre 1954 et 1989, une accumulation généralisée avec des taux plus élevés sur le secteur Nord-Ouest. Ceux-ci seraient dues à une évolution naturelle du littoral. Entre 1989-2016, tout le littoral de Saly est en érosion à l'exception du segment 1 sur lequel se font sentir les effets des longs épis du Port. Le taux d'évolution moyen de cette dernière période est égal à -1,15 m/an. L'érosion généralisée pourrait être liée à la forte anthropisation du littoral. Actuellement les plages les plus vulnérables à l'érosion sont situées sur la partie sud du littoral de Saly entre la résidence Safari et l'hôtel Cocotiers malgré la présence de brise-lames, de murs en enrochement et d'épis.

L'évolution morphosédimentaire annuelle du rivage montre que les profils P1 à P4 du secteur Nord-Ouest présentent des estrans plus larges, des pentes plus faibles, des formes rectilignes ou convexes et présentent aussi tous un bilan sédimentaire positif. Leurs sédiments sont surtout représentés par des sables fins et des sables très fins, platykurtiques, très carbonatés et aussi à skewness et classements moins variables. Les profils P6 à P9 du secteur Sud-Est présentent des estrans avec des largeurs faibles, des pentes plus importantes, des formes concaves ou rectilignes et des bilans sédimentaires souvent négatifs. Les sédiments des profils P5 à P9 sont des sables fins, très fins et moyens, plus carbonatés et avec des

classements, des skewness et des kurtosis plus variables.

Le modèle ShorelineS a permis de suivre l'évolution historique du trait de côte de Saly entre 2003 et 2016 et de prédire cette évolution entre 2016 et 2035. Le modèle montre qu'avec l'état actuel de la protection côtière les taux d'érosion s'accentueront sur les segments 3 et 5 de 2016 à 2025 avec des taux respectifs de -1,49 et -0,76 m/an. De 2025 à 2035, le segment 2 entrera en érosion avec un taux de -1,40 m/an et le segment 1 connaîtra un taux d'accumulation de 3,91 m/an. Les modèles d'évolution ShorelineS les plus favorables à un engrangissement du littoral restent ceux avec des épis réduits (M3), un seul segment du littoral étant en érosion avec un taux faible. La longueur de certains épis à Saly accentue les phénomènes d'érosion. Une réduction de la longueur des épis G1 et G5 pourrait être une solution transitoire au problème de l'érosion côtière à Saly. La projection du scenario des modèles M3 jusqu'en 2025 le confirme car les taux d'érosion diminueront sur les segments actuellement en érosion. Les modèles du scenario (M7) avec un réseau structuré d'épis apportent une meilleure protection que ceux avec une série de brise-lames (M6). Les modèles de protection ShorelineS (M8 et M9) qui utilisent la combinaison d'épis et de brise-lames bien positionnés ont donné des résultats satisfaisants. Seuls quelques sections du rivage subissent une érosion qui peut être arrêtée par un rechargement de sable bien localisé.

Réponses à la problématique

- Les modèles sans structures de protection côtière indiquent un littoral très menacé avec plusieurs segments qui présentent de forts taux d'érosion. Les murs de protection ne sont pas adaptés à la protection du littoral. Les brise-lames n'arrêtent pas sur le court terme les processus d'érosion du littoral. La protection du littoral de Saly est meilleure avec des épis bien dimensionnés.
- L'érosion des plages de Saly serait déclenchée par un déficit sédimentaire lié à la fixation des quantités importantes de sédiments du cordon littoral par les constructions sur le rivage. Puis elle s'est accentuée à cause des tentatives inadéquates de protection du littoral notamment par de longs épis qui intensifient les taux d'érosion sur le secteur au Sud-Est.
- Une réduction de la longueur et une redistribution des épis favorisant un espacement adéquat entre eux pourraient constituer une solution prometteuse au problème de l'érosion côtière. Cette solution consiste à délocaliser des épis et à en créer de nouveaux. Une alimentation en sable peut être associée à ce réseau structuré d'épis

afin de minimiser les effets en aval dérive. Cette alimentation de la plage devrait être faite sur le secteur Sud-Est, qui est plus menacé par les processus d'érosion.

- La combinaison entre un réseau structuré d'épis et une série de brise-lames peut être aussi une solution à la protection du littoral de Saly. La protection proposée par Egis qui associe des brise-lames et des épis représente aussi une solution pour le littoral de Saly. Sur cette proposition d'Egis, le nombre réduit de brise-lames et l'espacement large entre certains épis augmentent les segments en érosion et donc la quantité de sédiments susceptibles d'être apporté pour recharger les plages.

Perspectives de recherche

Les modèles ShorelineS ont permis de suivre l'évolution de la ligne de rivage de Saly entre 2003 et 2016 et de prédire jusqu'en 2035 ce qu'elle pourrait être. Ils permettent également de comprendre les causes de l'érosion côtière et de proposer des solutions de protection littorale. Ces solutions combinent plusieurs structures.

- des **études approfondies** permettent de déterminer avec plus de précisions les positions et les paramètres de **conception des ouvrages**, d'identifier les **sources** de sable et de déterminer les **quantités de sédiments** à mobiliser dans le cadre d'un rechargeement des plages ;
- une bonne évaluation du **transport des sédiments littoraux** aiderait aussi dans la recherche de solution de protection littorale. Les **modèles de vague**, les **modèles de surcote**, les **modèles de transport des sédiments** et les **modèles d'évolution du trait de côte** peuvent contribuer chacun en ce qui le concerne à ces études ;
- le **modèle ShorelineS apporte beaucoup** à l'étude de **l'évolution des littoraux** et à la recherche de **solutions de protection** côtière. Il pourrait aidé à simuler l'évolution de la ligne de rivage d'une plage protégée par des épis, des brise-lames et un rechargeement en sable.

BIBLIOGRAPHIE

AAGAARD, T., KROON, A., ANDERSEN, S., SORENSEN, R.M., QUARTEL, S., VINOTHER, N. (2005) - Intertidal beach change during storm conditions. Egmond, the netherlands, Marine Geology, 218 (1-4), 65-80.

ALMAR, R. (2009) - Morphodynamique littorale haute fréquence par imagerie vidéo. Thèse doctorat, ED-Sciences et Environnements, Université Bordeaux 1, 262 p.

ANGNUURENG, B.D., APPEANIN GADDO, K., WIAFE, G., (2013) - Impact of sea defense structures on downdrift coasts: The case of Keta in Ghana. Academia Journal of Environmental Sciences, 1(6), 104-121, ISSN: 2315-778X.

ASHTON, A. D., MURRAY, A.B. (2006) - High-angle wave instability and emergent shoreline shapes. Modeling of sand waves, flying spits, and capes, J. Geophys. Res., 111, F04011, doi:10.1029/2005JF000422.

ASHTON, A.D., GIOSAN, L. (2011) - Wave-angle control of delta evolution. Geophys. Res. Lett. 38 (13), 1-6.doi: 10.1029 / 2011GL047630.

ASHTON, A. D., NIENHUIS, J., ELLS, K. (2016) - On a neck, on a spit: controls on the shape of free spits. Earth Surf. Dyn., 4 (1), 193-210, doi: 10.5194 / esurf-4-193-2016.

BAKKER, W. T. (1969) - The Dynamics of a Coast with a Groyne System, in Proceedings of the 11th International Conference on Coastal Engineering. ASCE, London, United Kingdom, pp. 492–517.

BANQUE MONDIALE, EGIS INTERNATIONAL (2013). Etude économique et spatiale de la vulnérabilité et de l'adaptation des zones cotières aux changements climatiques au Sénégal.

BARUSSEAU, J.P (1980) – Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous l'action des houles entre Saint Louis et Joal (Sénégal). Ass. Sénég. Et. Quatern. Afr. Bull. Liaison, Dakar, 58-59, 31-39, 2 fig., 3 tab.

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. 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.

BEACH, R.A., STERNBERG R.W. (1992) - Suspended sediment transport in the surf zone: Response to incident wave and longshore current interaction. Marine Geology, 108, 275-294, 0025-3227.

BELLION, Y., GUIRAUD, R. (1982). Les coupures (lacunes, discordance) dans la série sédimentaire post-paléozoïque du bassin Sénégalaïs - In: 10è Ann Sci Terre (Paris), p. 40 livre en dépôt à la Soc. Géol. France.

BELLION Y.J.C. (1987) - Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, TaouiJenni, lullemmeden, Tchad). Thèse Etat, Univ.Avignon et Pays du Vaucluse, 302 p., 125 fig., 13 tab., 1 pl., 1 ann.

BELLION Y. (1989) - Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudéni, Iullemeden, Tchad). Thèse Université d'Avignon, 292 p.

BERNATCHEZ, P., DUBOIS, J.-M.M. (2008) - Seasonal quantification of coastal processes and cliff erosion on fine sediment shorelines in a cold temperate climate, north shore of the St. Lawrence maritime estuary, Quebec; Journal of Coastal Research, vol. 24, no 1A, p. 169–180.

BERNATCHEZ, P., FRASER, C. (2012) - Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width trends, Québec, Canada; Journal of Coastal Research, vol. 28, no 6, p. 1550–1566. doi :10.2112/JCOASTRES-D-10-00189

BERTIN, X., K. LI, A. ROLAND, Y. ZHANG, J. BREILH, ET E. CHAUMILLON (2014) - A modeling based analysis of the flooding associated with xynthia, central bay of biscay, Coastal Engineering, 94 (212), 80_89, doi :10.1016/j.coastaleng.2014.08.013.

BLANC, J.J. (1973) - Recherches sédimentologiques sur la protection du littoral à la presqu'île de Giens (Var). Rapport final.

BLOTT, S. (2000) - Instructions on the Use of the GRADISAT Program. Department of geology, university of London.

BRIÈRE, C. (2005) - Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée: l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet. PhD. Thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour.

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.

BROWN, S., NICHOLLS, R., VAFEIDIS, A., HINKEL, J., WATKISS, P. (2011) - Sea-level rise: the impacts and economic costs of sea-level rise on coastal zones in the EU and the costs and benefits of adaptation; ClimateCost Project, Technical Policy Briefing Note 2, 43 p.

BRUUN, P. (1962) - Sea level rise as a cause of shore erosion. J. of Waterways and Harbours

Division (ASCE) 88, 116-130.

CALLAGHAN, D. P., SAINT-CAST, F., NIELSEN, P., BALDOCK, E. (2006) - Numerical solutions of the sediment conservation law; a review and improved formulation for coastal morphological modelling, Coastal Engineering, 53 (7), 557_571, doi :10.1016/j.coastaleng.2006.03.001.

CALLIARI, L.J. (1994) - Cross-Shore and Longshore Sediment Size Distribution on Southern Currituck Spit, North Carolina: Implications for Beach Differentiation. Journal of Coastal Research, 10, 360-373.

CANTAGREL J.M., LAPPARTIENT J.R., TESSIER F. (1976) - Nouvelles données géochronologiques sur le volcanisme ouest africain. 4ème RA.S.T., Paris, 13-16 Avril 1976, 93.

CARTER, R.W.G. (1988) - Coastal environments - An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastline. Carter (ed.), Elsevier 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.

CENTRE DE SUIVI ECOLOGIQUE (CSE), (2004). Rapport sur l'état de l'environnement au Sénégal, 231 p., 60 fig., 30 onglets, 28 cadrés.

CENTRE DE SUIVI ECOLOGIQUE (CSE), (2005). Etude d'impact environnemental du projet Marina Port Saly de Saly Portudal, 117 p., 14 fig., 41 tab., 65 photos., 7 annexes.

CERC. (1984). Shore Protection Manual, 4th ed. , U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, U.S. Government Printing Office, Washington, D. C.

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 / Impact of sand extractions on coastal dynamics (Sarène Point beach, Senegal). In: Géomorphologie : relief, processus, environnement, Janvier-mars, vol. 10, n°1, pp. 55-63.

CHAUHAN, O.S., (1992) - Laminae and grain-size measures in beach sediments, East Coast Beaches, India. J. Coastal Research, 8, 172-182.

CHOBLET, C. (2005) - Espace littoral et décisions d'aménagement, Limites et potentialités des études d'impact et des enquêtes publiques. Exemple du littoral atlantique français. Thèse géographie, univ Nantes (France) ; 424 p, 68 fig, 34 tab, 9 photos, 2 graph.

CISS G. (1983) - Le développement touristique de la Petite Côte sénégalaise, thèse de 3ème cycle en Géographie, Université de Bordeaux III.

CORMIER-SALEM, M.C., 1999. The mangrove: an area to be cleared for social scientists. *Hydrobiologia*, 413, 135–142.

COURTAUD, J. (2000) - Dynamiques geomorphologiques et risques littoraux cas du tombolo de giens (Var, France méridionale). Ph.D. dissertation, Université Aix-Marseille I.

CROWELL, M., DOUGLAS, B.C., LEATHERMAN, S.P. (1997) - On forecasting future U.S. shoreline positions - a test of algorithms: *Journal of Coastal Research*, v. 13, n. 4, pp. 1245-1255.

CROWELL, M., LEATHERMAN, S.P., BUCKLEY, M.K. (1991) - Historical shoreline change : Error analysis and mapping accuracy, *J. Coast. Res.*, 839–852.

DABO, B. (2004) - Erosion côtière au Sénégal: l'exemple de Mbour. Thèse de doctorat, Département de Géologie, Université Dakar.CAD, 150 p, 58 fig, 61 onglets, 8 photos.

DEBENAY, J- P., BELLION, Y. (1983) – Le Quaternaire récent des microfalaises de Mbodiène (Sénégal) : stratigraphie, variation du niveau marin. *Bull. liaison Ass. Sénégal. Et Quatern. Afr.* , Dakar, n°70-71, 73-81, 4 fig.

DEHOORNE, O., DIAGNE, A.K. (2008). Tourisme, développement et enjeux politiques : l'exemple de la Petite Côte (Sénégal). *Études caribéennes*, 15 pages.

DEIGAARD, R., FREDSOE, J., HEDEGAARD, I. B. (1986 a) - Mathematical Model for Littoral Drift, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 112(3):115–128.

DE WINTER, R. C., GONGRIEP, F., RUESSINK, B. G. (2015) - Observations and modeling of alongshore variability in dune erosion at Egmond aan Zee, the Netherlands, *Coast. Eng.*, 99, 167–175.

DHI (Danish Hydraulic Institute) (2017) - Shoreline Management guidelines. Danish coasts and climate adaptation project, Flooding risk and coastal protection, Financed by Danish council for strategic research, 462 p. de Winter, R. C., F. Gongriep, and B. G. Ruessink (2015), Observations and modeling of alongshore variability in dune erosion at Egmond aan Zee, the Netherlands, *Coast. Eng.*, 99, 167–175.

DWARS, HEEDERIK et VERHEY INGENIEURS CONSEILS (1979) - *Rappon sur l'étude de la protection du rivage de la Petite Côte*. Ministère Equipement, Rép.Sénégal, 92 p., 24 fig., 5 tab., 28 ph., 2 ann.

DIADHIOU, Y.B. (2018) - Littoral senegalais : dynamique actuelle du milieu, modelisation et approche de la gestion des risques liés au changement climatique (de Joal à Palmarin, Petite Côte, Sénégal). Thèse de doctorat unique, ED. Eau Qualité et Usage de l'Eau, UCAD, 225 p, 48 fig, 9 photos, 48 tab.

DIAW, A.T. (1997) - Evolution des environnements littoraux en Sénégal. Géomorphologie et télédétection. Paris, France : Université Paris-I / Panthéon-Sorbonne, Ph.D. thèse, 270p.

DIEDHIOU A. (2005) - Etude critique des modes de délimitation du Domaine Public. ENEA, Mémoire, 67p.

DIOUF M. B. (1989) - Sédimentologie, minéralogie, et géochimie des grès carbonatés quaternaires du littoral sénégalo-mauritanien. Thèse Océanologie, Univ. Perpignan, 237 p.

DOLAN, R., FENSTER, M.S., HOLME, S.J. (1991) - Temporal analysis of shoreline recession and accretion: Journal of Coastal Research, v. 7, pp. 723-744.

DOLAN, R., HAYDEN, B., HEYWOOD, J. (1978) - A new photogrammetric method for determining shoreline erosion, Coast. Eng., 2, 21–39.

DOMAIN, F. (1976) - Les fonds de pêche du plateau continental ouest africain entre 17°N et 12°N. Doc.CRODTIISRA., Dakar, 61, 20 p., 3 fig., 1 ann., 2 pl.h.t.

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 / ISRA / CRODT, Paris, 17 p.

DUCASSE, O., DUFAURE, Ph., FLICOTEAUX, R. (1978) - Le passage de l'Eocène inférieur à l'Eocène moyen dans la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal occidental). Révision micropaléontologique et synthèse stratigraphique. Cah. Micropal., 1, Paris, p. 3-49, 7 fig., 10 pl.

DURAND, P., HEURTEFEUX, H. (2006) - Impact de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un cordon littoral lagunaire : une méthode d'évaluation. Exemple des étangs de Vic et de Pierre Blanche (littoral méditerranéen, France). Zeitschrift für Geomorphologie N.F, 50, 2, 221-244.

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.

EGIS (2017) - Mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage pour la réalisation des travaux physiques de restauration, protection et entretien des plages de saly – Sénégal. Avant projet détaillé (APD), 188p.

ELOUARD, P., ROSSO, J.C. (1977) - Biogéographie et habitat des mollusques actuels

laguno-marins du delta du Saloum (Sénégal). Géobios, Lyon, 10, (2), 275-299.

ELOUARD, P., FAURE, H., HEBRARD, L. (1967) - Quaternaire de la région de Mbour. Cong. Panafr. Préhistoire, Dakar, Brochure-Guide de la Petite Côte, 31-33.

ELOUARD, P., BRANCART, R, HEBRARD, L. (1976 b) - Notice explicative de la carte géologique de la presqu'île du Cap Vert au 1/20000. Bargny. Dir.Mines et Géologie, Min.DévIndustr.Environ., Dakar, 43 p., 8 fig., 1 carte h.t.

ESTEVES, L.S., TOLDO JR., E.E., DILLENBURG, S.R., TOMAZELLI., L.J. (2002) - Erosion côtière à court et à long terme dans le sud Brésil. Dans: Cooper, J.A.G. et Jackson, D.W.T. (eds), Actes du 7ème Symposium international sur les côtes (ICS) 2002 (Templepatrick, Irlande du Nord). Journal of Coastal Research, numéro spécial n° 36, p. 273-282.

FAYE, A., (2013) - Le domaine maritime public de la commune de Saly Portudal de 1989 à 2012: approche de la limitation, de l'utilisation des sols et du SIG. Dakar, Sénégal: Université Cheikh Anta Diop, mémoire de maîtrise, 115 p.

FAYE A. (1983) - Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du horst de Ndiass (Sénégal occidental). Thèse 3ècycle, Univ. Dakar, 160 p.

FAYE, G. (1988) - La région de Mbour-Saly étude de géomorphologie littorale. Mémoire de Maîtrise de Géographie, UCAD, 138 p, 12 tab, 44 fig.

FAYE, I.B., (2010) - Dynamique de la côte sur Sandy Littorals de Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest): Régional et Approche locale par photo-interprétation, image Traitement et analyse de cartes anciennes. Brest, France : Université de Brest, Ph.D. mémoire, 314p.

FLETCHER, C., ROONEY, J., BARBEE, M., LIM, S.C., RICHMOND, A.B. (2003) - Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii, J. Coast. Res., 106–124.

FLICOTEAUX, R., LATIL-BRUN M. V., MICHAUD, L. (1988) - Histoire de la subsidence post-rift du bassin côtier mauritano sénégalo- guinéen. Relation avec l'amincissement crustal pendant la période Jurassique à Crétacé inférieur. Comparaison avec l'évolution des marges péri-atlantiques au niveau de l'Atlantique central et équatorial (côte Est des U.S.A., Sud-Sahara, Côte d'Ivoire et plateau du Demerara). Jour. Afr. Earth Sc., 7-2D, p. 345:-359.

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.

FREDSOE, J., DEIGAARD, R. (1992) - Mechanics of Coastal Sediment Transport, Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific.

FRENCH, J., PAYO, A., MURRAY, B., ORFORD, J., ELIOT, M., COWELL, P. (2016) - Complexité appropriée pour la prévision du comportement géomorphique côtier et estuarien aux échelles décennale à centenaire, *Geomorphology*, 256, 3–16.

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.

GIEC/IPCC, (2007) - Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Pachauri, R.K et Reisinger, A. ed. Giec, Genève, Suisse , 113 p.

GIEC [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat] (2013) - Glossaire; dans Changements climatiques 2013: les éléments scientifiques; contribution du Groupe de travail I au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, T.F. Stocker, D. Quin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Migdley (éd.); Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, p. 1447–1465.

GIEC [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat] (2014) - Résumé à l'intention des décideurs; dans Changements climatiques 2014: conséquences, adaptation et vulnérabilité; contribution du Groupe de travail II au Cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea et L.L. White (éd.); Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, p. 1–32.

GHONIM, E.M. (2019) - Modélisation de l'évolution des côtes Développement et évaluation avancés du modèle côtier des côtes, mémoire de maîtrise WSE-CEPD.18.03.

Griggs, G.B. (2005 a) - California's retreating coastline: Where do we go from here? In: Magoon, O.T.; Converse, H.; Baird, B., and Miller-Henson, M. (eds.), California and the World Ocean, 2002 Conference Proceedings, American Society of Civil Engineering (Reston, Virginia), pp. 121–125.

Griggs, G.B. (2005 b) - The impacts of coastal armoring. *Shore and Beach*, 73(1), 13-22.

GRINSTED A., MOORE J.C., JEVREJAVA S., 2009. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Climate Dynamics*, vol. 34, 461-472.

GUILCHER, A., NICOLAS, J.P. (1954) - Observations sur la Langue de Barbarie et les bras du Sénégal aux environs de Saint-Louis. BullInj.C.O.E.C., Paris, VI (6), 227-242,9 pl.

HAGGETT P., (1973) - Analyse spatiale en géographie humaine, Armand Colin, Paris, 390 p.

HALL, M.J., PILKEY, O.H., (1991) - Effets de la stabilisation dure sur largeurs de plages sèches pour le New Jersey. *Journal of Coastal Research*, 7 (3), 771-785.

HAPKE, C.J., HIMMELSTOSS, E.A., KRATZMANN, M., LIST, JH., THIELER, E.R. (2010) Évaluation nationale des changements de rivage: Changements historiques de rivage le long des côtes de la Nouvelle-Angleterre et du centre du littoral de l'Atlantique: Rapport du dossier public de la US Geological Survey, 2010-1118, 57 p.

HAMM, L., CAPOBIANCO, M., DETTE, H., LECHUGA, A., SPANHOFF, R., STIVE, M. (2002) - A summary of European experience with shore nourishment. *Coastal Engineering* 47, 237 – 264. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00127-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00127-8).

HANSON, H., KRAUS, N. C. (1989) – GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change, Report 1:Technical Reference (US Army Eng.Waterways Experiment Station, Coastal Eng. Res. Cent., Vickburg,Mississippi, 1989).

HEBRARD, L. (1966) - Les formations tertiaires et quaternaires de l'isthme de la presqu'île du Cap Vert (Feuille Thiaroye, *Sénégal*).

HEBRARD, L. (1978) - Contribution à l'étude géologique du Quaternaire du littoral mauritanien entre Nouakchott et Nouadhibou 18°-21° Latitude Nord. Participation à l'étude des désertifications du Sahara. *Doc. Lab. Géol. Fac. Sci.*, Lyon, 71, 210 p.

HOAN, L. X., HANSON, H., LARSON, M., KATO, S. (2011) - A mathematical model of spit growth and barrier elongation: Application to Fire Island Inlet (USA) and Badreveln Spit (Sweden), *Estuar. Coast.Shelf Sci.*, 93, 468–477, doi:10.1016/j.ecss.2011.05.033, 2011.

HUGHES, M. G., MASSELINK, G., BRANDER, R. W. (1997) - Flow velocity and sediment transport in the swash zone of a steep beach. *Marine Geology*, 138(1-2), 91-103.

IARE (1996) Le Tombolo Occidental de Giens - Synthèse des connaissances- Analyse globale et scenarios d'aménagement et de gestion. Rapport final.

IBE., A. C. (1991) – "National Assessment and effect of Sea Level Rise on the Nigerian Coastal Zone". Unpublished report to the University of Maryland, 31p.

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.

INTAC. Projet d'INTégration du Changement Climatique dans le développement durable au Sénégal). (2011) - Étude sur la vulnérabilité du secteur du tourisme à Saly et ses implications socio-économiques pour l'économie locale au niveau de la station. Rapport d'étude.mars. 2011, 40 p. multigr.

JEVREJAVA, S., MOORE J. C., GRINSTED, A. (2012) - Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios. *Global and Planetary Change* vol. 80–81, 14–20.

JOHNSON, D.R., BARTON, E.D., HUGHES, P., MOOERS, C.N.K. (1975) - Circulation in the Canary Current upwelling region off Cabo Bojador in August 1972. *Deep Sea Res.*, Oxford, 22 (8), 547-558, 8 fig., 2 tab.

JOHNSON, H., ZYSERMAN, J (2002) - Controlling spatial oscillations in bed level update schemes, *Coastal Engineering*, 46 (2), 109_126, doi :10.1016/S0378-3839(02)00054-6.

JONAH, F.E., MENSAH, D., EDZIYIE, E.A., AGBO, R.E., BOATENG, D.A. (2016) - L'érosion côtière au Ghana: causes, politiques et la gestion. *Coastal Management*, 44 (2), 116-130.

KACZMAREK, L., R. OSTROWSKI, Z. PRUSZAK, ET G. ROZYNSKI. (2005) - Selected problems of sediment transport and morphodynamics of a multi-bar nearshore zone, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62 (3 SPEC. ISS.), 415_425, doi :10.1016/j.ecss.2004.09.006.

KAERGAARD, K., FREDSOE, J. (2013) - A numerical shoreline model for shorelines with large curvature, *Coast. Eng.*, 74, 19–32.

KAMPHUIS, J. W. (1991) - Alongshore Sediment Transport Rate, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 117(6):624–640.

KHATIB, R., LY, A., SOW, E., SARR, R. (1990) – Rythmes sédimentaires liés aux variations eustatiques globales au Campanien et au Maastrichien du Sénégal. Révision stratigraphique de la série du crétacé terminal du Cap de Naz. *C.R. Acad. Sci. T. 311, Série II*, p. 1089-1095, Paris.

KRISTENSEN, S. E. (2013) - Marine and Coastal Morphology: medium term and long-term area modelling. Kgs.Lyngby: Technical University of Denmark (DTU).

LAPPARTIENT, J.R., MONTEILLET, J. (1980) – Le gisement fossilifère sénonien supérieur des carrières de Paki (Sénégal). *Bull. Inst. Fond. Afr. Noire*, 3, 42A, p. 431-439.

LARSON, M., HANSON, H., KRAUS, N. C. (1987) - Solutions analytiques d'un modèle à une ligne pour le changement de rivage près des structures côtières. *Journal des techniques des voies navigables, des ports, des côtes et des océans*, 123 (4), 180-191. doi: doi: 10.1061 / (ASCE) 0733-950X (1997) 123: 4 (180).

LE VISAGE, C. (2011) - « Instruments de planification spatiale en mer et sur le littoral Nouvelle solution, ou nouveau problème? » Association LittOcean Stratégies Mer et Littoral Rencontres halieutiques de Rennes 13-14 octobre 2011.

LEREDDE, Y. (2011) - Contributions de l'océanographie physique côtière à la caractérisation des risques côtiers. HDR, Univ.Montpellier 2, 122p.

LEROUX, M. 5(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.

LIGER, J-L. (1979) - Structure profonde du bassin côtier sénégalo-mauritanien. Interprétation de données gravimétriques et magnétiques. Trav. Lab. Sei. Terre, Marseille-St Jérôme, Sér. a,n° 16, 158 p., 60 fig., 4 tab.

LUIJENDIJK, A. P., RANASINGHE, R., DE SCHIPPER, M.A., HUISMAN, B.A., SWINKELS, C.M., WALSTRA, D.J., STIVE, M.j. (2017) - The initial morphological response of the Sand Engine: A process-based modelling study, Coast. Eng., 119, 1–14.

MALOU, R. (2004) - Impact du climat sur les ressources en eaux souterraines en zone Soudano-Sahélienne. Thèse de doctorat d'Etat en sciences naturelles de géologie appliquée, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 153 p.

MARTINS, K.A., PEREIRA, P.S., (2014) - L'érosion côtière à Pau Amarelo Beach, au nord-est du Brésil. Dans: Silva, R. et Strusińska-Correia A. (eds.), Erosion côtière et Gestion le long des côtes en développement: cas sélectionnés. Journal of Coastal Research, numéro spécial n ° 71, p. 17-23. Masselink, G., and J.A. Puleo, Swash-zone morphodynamics, Continental Shelf Research, 33 :1, 661{680, 2006.

MASSE, (1968) - Contribution à l'étude des sédiments actuels du plateau continental de la région de Dakar. 81 p. 38 pl.

Masselink, G., Puleo, J.A. (2006) - Swash-zone morphodynamics, Continental Shelf Research, 33 :1, 661{680, 2006.

MEPN (Ministère de l'environnement et de la protection de la nature) (2006) - Plan d'Action Nationale pour l'Adaptation aux Changements Climatiques. 60p, 11 fig, 28 tab.

MTTA (Ministère du tourisme et des transports aériens du Sénégal) (2000) - «Note explicative sur les statistiques du tourisme au niveau de la Petite Côte (1988 a 1999) », Dakar, ministère du tourisme et des transports aériens du Sénégal.

MICHEL, P., ELOUARD, P., FAURE, H. (1968) - Nouvelles recherches sur le Quaternaire récent de la région de Saint-Louis (Sénégal). Bull. Inst. Fond. Afr. Noire, Dakar, Ser. A, t.XXX, p. 1-38.

MICHEL, P. (1962) - Quaternaire in Notice de la carte géologique du Sénégal au 1/500000. Dakar.

MITTELSTAEDT. E. (1983) - The upwelling area off Northwest Africa - A description of phenomena related to coastal upwelling. *Prog.Oceanogr.*• Oxfool. 12.307331, 17fig.

MOORE, L.J. (2000) - Techniques de cartographie des rives. *Journal of Coastal Research*, 16, p. 111-124.

MORTON, R.A. (1991) - Cartographie exacte du rivage: passé, présent, et futur. Actes du Coastal Sediments '91 (Seattle, États-Unis) USA), pages 997-1010.

MURRAY, A. B. (2007) - Réduction de la complexité des modèles pour l'explication et la prédiction, *Geomorphology*, 90 (3), 178-191.

NATIONS UNIS (1983) - Technologies pour la lutte contre l'érosion des côtes. 143 p., 54 fig., 2 ann.

NARDARI, B. (1993) - Analyse de la houle sur les côtes du Sénégal. Application à Sangomar Point. Rapport de stage UTIS, ISRA / ORSTOM, Dakar, 31 p.

NDIAYE, M. (2016) - Dynamique, vulnérabilité socio-économique et gouvernance de Saly Portudal et du littoral de la langue de Barbarie au Sénégal. Thèse de doctorat, EDSHS, St. Louis Univ.GB, 342 pages, 61 figures, 24 onglets, 19 images.

NDOUR, A. (2015) - Evolution morpho-sédimentaire et impacts des ouvrages de protection sur le littoral de Rufisque, Petite Côte, Sénégal. Thèse de doctorat en géoscience, Université Cheikh Anta Diop de Dakar , 242 p.

NDOYE, A. (2010) - Etude et cartographie du phénomène de l'érosion côtière sur le littoral de Ngaparou à Mbour ; Exemple de l'hôtel Teranga et du village de Saly. Mémoire IST, 72 p, 47 fig, 5tab.

NGOM, H. (2012) - Expérience du Sénégal dans les structures de protection du littoral. UCAD, Mémoire de la DEA de géologie, 100p.

NGOM, H.; NDOUR, A., AND NIANG, I., (2018) - Impacts of protective structures on sandy beaches: Example of the Saly balnear station, Petite Côte, Senegal. In: Almar, R.; Almeida, L.P.; Trung Viet, N., and Sall, M. (eds.), *Tropical Coastal and Estuarine Dynamics. Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 81, pp. 114-121. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

NIANG-DIOP, I. (1994) - « Les problèmes environnementaux de la côte du Sénégal » ; in Ecodécision, janvier 1994, pp. 40-43.

NIANG-DIOP, I. (1995) - La petite côte du Sénégal, érosion du Exemple de Rufisque: Passé-Présent-Futur. Angers, France : Université d'Angers, Environnements sédimentaires UFR, Ph.D. mémoire, 285p.

NIANG-DIOP, I (2003) - Etude d'impact sur l'environnement du projet portual du port de plaisance de Saly. Rapport, 20 p., 2 fig., 4 tab, 13 photos.

NORDSTROM, K.F. (2000) - Plages et dunes des côtes aménagées. Cambridge: Cambridge University Press, 356p.

OTTMAN, F. (1965) - Introduction à la géologie marine et littorale. Ed. Masson, Paris, 259 p.
PASKOFF, R. (2001) - Elévation du niveau de la mer et les espaces côtiers-Institut océanographique, Paris, 190 p. 72 fig.

PASKOFF, R., (1993) - Côtes en danger. Masson (Ed.), 250 p.

PASKOFF, R. (2001) - Elévation du niveau de la mer et les espaces côtiers-Institut océanographique, Paris, 190 p. 72 fig.

PELNARD-CONSIDÈRE, R. (1956) - Essai de théorie de l'évolution des formes de rivage en sable et en galets. Les Energies de La Mer: Compte Rendu Des Quatrièmes Jours de L'hydraulique, Paris 13, 14 et 15 Juin 1956; Question III (Rapport 1, 74-1-10).

PNUE. (1983) – Lutte contre l'érosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre. 174p, 3 ann.

PRLEC-UEMOA. (2010) - Shoreline Monitoring Study and West African Littoral's Guiding Scheme. Toward a regional plan for coastline risk prevention. WAMU, 55p.

RAHMSTORF. S, (2007) - A semi-empirical approach to future sea-level rise. Science 315, p 368–370.

RANASINGHE, R. W. M. R. J. B., CALLAGHAN D., ROELVINK D. (2013) - Does a more sophisticated storm erosion model improve probabilistic erosion estimates? In Coastal Dynamics 2013: 7th International Conference on Coastal Dynamics, Arcachon, France, 24-28 June 2013.Bordeaux University.

REBERT, J.F. (1983) - Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. Doc.sciencr., CRODT/ISRA, Dakar, 89, 99 p., 47 fig.

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 Ven). Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Bordeaux 1, n01561, 145 p., 57 fig., 7 tab., 2 ph., 1 pl., 4 ann.

ROELVINK, J. A., VAN BANNING, G.K.F.M. (1995) - Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics, Oceanogr. Lit. Rev., 11(42), 925.

ROELVINK, J.A. (2006) - Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coast. Eng.* 53(2–3), 277–287. doi:10.1016/j.coastaleng.2005.10.015.

ROELVINK, D., RENIERS, A., VAN DONGEREN, A., VAN THIEL DE VRIES, J., MCCALL, R., LESCINSKI, J. (2009) - Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering* 56(11–12) 1133-1152.

ROELVINK, D., RENIERS, A.J.H.M., VAN DONGEREN, A., VAN THIEL DE VRIES, J., LESCINSKI, J., MCCALL, R. (2010) - XBeach model description and manual. Report June, 21, Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.

ROELVINK, D. (2017) - Coastline modelling: the next generation? in Netherland Center for Coastal research (NCK), 2017. Books abstracts, 110 p.

ROELVINK, D., COSTAS, S. (2018) - Coupling nearshore and aeolian processes: XBeach and Duna process-based models. *Subm. Env. Modelling and Software.*

ROELVINK, D., HUISMAN, B., ELGHANDOUR, A. (2018 a) - Efficient modelling of complex coastal evolution at monthly to century time scales. Sixth International Conference on Estuaries and Coasts (ICEC-2018), August 20-23, 2018, Caen, France.

ROELVINK, D., MCCALL, R., MEHVAR, S., NEDERHOFF, K., DASTGHEIB, A. (2018 b) - Improving predictions of swash dynamics in XBeach: The role of groupiness and incident-band runup. *Coastal Engineering* 134 103-123.

ROGER, J., DUVAIL, C., BARUSSEAU, J.P., NOEL B.J., NEHLIG, P., SERRANO, O. (2009) -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.

ROLAND, A., ZHANG, Y., WANG, H., MENG, Y., TENG, Y., MADERICH, V., BROVCHENKO, I., DUTOUR-SIKIRIC, M., ZANKE, U. (2012) - A fully coupled 3d wave-current interaction model on unstructured grids, *J. Geophys. Res.*

ROMAN, R., SORNAY, J. (1983) – Ammonites, Inocérames et Echinides du Crétacé Supérieur de Paki (Sénégal). *Bull. Mus. Natn. Hist. nat.*, Paris. 4°sér., 5, section C, n°1, p. 3-23.

RUSSELL, P.E. (1993) - Mechanisms for beach erosion during storms, *Cont. Shelf Res.*, 13, 1243{1265, 1993.

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.

SAKHO, I. (2011) - Evolution et fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune de la Somone, Petite Côte, Sénégal. Thèse de doctorat géologie Univ Rouen (France)/univ CAD de Dakar (Sénégal), 252p, 171 fig, 4 tab.

SALL, M. (1982) - Dynamique actuelle et morphogenèse au Sénégal. Strasbourg I, France: Université Louis Pasteur, Ph.D.thèse, 604p.

SALY-RAPPORT, (2017) - APD, Mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage pour la réalisation des travaux physiques de restauration, protection et entretien des plages de SALY – SENEGAL, 188p.

SARNTHEIN, M., TIIIEDE, J., PFLAUMANN, u., ERLENKEUSER, H., FÜTTERER, D., KOÜPMANN, R, LANGE, R, SEMOLD, E. (1982) - Atmospheric and oceanic circulation patterns off 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, 26 fig., 2 tab.

SARR B. (2000) - Contribution à l'étude hydrogéologique des aquifères de l'ouest du bassin du Sénégal. In« Thèse de doctorat de 3^e cycle, Université de Dakar », 192 p.

SARR, R. (1982) - Etude géologique et hydrogéologique de la région de Joal-Fadiouth (Sénégal). Thèse 3^e cycle, Univ. Dakar, 191 p.

SARR, R. (1995) - Etude biostratigraphique et paléoenvironnementale des séries d'âge Crétacé Terminal à Eocène moyen du Sénégal occidental. Systématiques et migration des ostracodes. Thèse Etat ès sciences, Univ. Dakar, Fac. Sci., 339 p., 27 pl.

SAUFRASE (Société d'Architecture et d'Urbanisme Franco-Sénégalaise pour l'Aménagement du Territoire) (1998) - Projet de marina à Saly Sénégal. Expertise hydraulique et sédimentologique.

SOGREAH INGENIEURS 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.

SOULSBY, R. (1997) - Dynamics of Marine Sands, Thomas Telford Publications, ISBN 072772584X.

SOW, EH. (1992) - Etude sédimentologique et révision chronostratigraphique du Crétacé

terminal du horst de Ndiass (Sénégal occidental). Thèse 3^e cycle, UnivDakar, 145 p., 40 fig., 11 tab., 9 pl.ph., 1 ann.

SPENGLER A. de, CASTELAIN J., CAUVIN J., LEROY M. (1966) - Le bassin secondaire et tertiaire du Sénégal. Symp. New Delhi 1964, coord. D. REYRE, p. 80-94.

STEETZEL, H. J., AND WANG, Z. B. (2003) - Development and application of a large-scale morphological model of the Dutch coast, phase 2: formulation and application of the PonTos-model version 1.4, Technical report, National Institute for Coastal and Marine Management/Rijkwaterstaat-RIKZ.

SUANEZ S., FICHAUT B., SPARFEL L., 2007. Méthode d'évaluation du risque de submersion des côtes basses appliquée à la plage du Vougot, Guissény (Bretagne). Géomorphologie : relief, processus, environnement, Vol. 4, mis en ligne le 01 janvier 2010.

SYVITSKI, J. P., VÖRÖSMARTY, C. J., KETTNER, A. J. & GREEN, P. (2005) - Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. Science, 308, 376-380.

TAAL, M.D., LÖFFER, M.A.M., VERTEGAAL, C.T.M., WIJSMAN, J.W.M., VANDER VALK, L., TONNON, P.K. (2016) - Développement de Sand motor. Rapport de suivi et d'évaluation (MEP), 62p.

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. (1954 a) – Notice explicative de la feuille Dakar-Est. Carte géol. de l'A.O.F. au 1/200.000, Dakar. 88 p.

TESSIER, F. (1954 b) - Notice explicative de la feuille Thiès-ouest. Carte géol. de l'A.O.F. au 1/200.000, Dakar. 86 p.

THAN, V.V. (2015) - Modélisation d'érosion côtière : application à la partie ouest du tombolo de Giens. Thèse de mathématiques, unvi Aix Marseille, 398p, 197 fig, 8 photos et 89 tab.

THIELER, E. R., DANFORTH, W.W. (1994) - Historical shoreline mapping (I): Improving techniques and reducing positioning errors, J. Coast. Res., 549–563.

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.

TINE, D. (2012) – Gestion durable des ressources marines et côtières dans l'espace de Mbour/Saly : cas des pêcheries. UCAD, CHAIRE-UNESCO, MASTER II GIDEL, 109p.

TOMME, J.V., VANDEN, S., SPEYBROECJ, J., DEGRAER, S., VINCX, M. (2013) – Macrofaunal sediment selectivity considerations for beach nourishment programmes. Marine Environmental research 84 (2013) 10-16.

TURMINE, V. (2000) - Dynamique littorale entre Mbour et Joal (Petite Côte- Sénégal), Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université Paris VII- Denis Diderot, 255 p.

TURMINE, V. (2001) - Les variations spatio-temporelles des marais à mangrove et de leur hydrodynamisme en Afrique de l'Ouest entre la Petite Côte et la Guinée (Géomorphologie et Télédétection), D.E.A en Géomorphologie, Université Paris VII- Denis Diderot, 123 p.

UEMOA (2011). Etude de suivi du trait de côte et schéma directeur du littoral de l'Afrique de l'Ouest, Projet de mise en place de l'observatoire du littoral ouest africain (OLOA), 33pages.

UDDEN, J.A. (1914) - Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, **25**, 655-744.

VAN RIJN, L.C., WALSTRA, D.J.R., GRASMEIJER, B., SUTHERLAND, J., PAN, S. AND SIERRA, J.P. (2003) - The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models, Coastal Engineering, Vol. 47, p. 295-327

VAN RIJN, L. C. (2014) - A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle. Coastal Engineering, 90, 23-39. doi:10.1016/j.coastaleng.2014.04.008.

VARENNE, F. (2013) - Modèles et simulations dans l'enquête scientifique : variétés traditionnelles et mutations contemporaines.

VILLARET, C. (2004) - Modélisation du transport littoral. VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, Compiègne, 7-9 septembre 2004.

VITUOSEK, S., BARNARD, P.L., LIMBER, P., ERIKSON, L., COLE, B. (2017) - A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change, *J. Geophys. Res. Earth Surf*, 122, 782–806, doi:10.1002/2016JF004065.

VOITURIEZ, B., CHUCHLA, R. (1978) - Influence of the Southern Atlantic Central Water on the distribution of salinity and oxygen in the northeast tropical Atlantic Ocean. *Deep Sea Res.*, Oxford, 25 (1), 107-117, 9 fig.

WAELES, B. (2005) - Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la Seine. Thèse, Univ Caen Basse-Normandie, 230 p.

WARNER, J. C., ARMSTRONG, B., HE, R., ZAMBON, J. B. (2010) - Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system, *Ocean Model.*, 35(3), 230–244.

WARREN, I. R., BACH, H. (1992) - MIKE 21: A modelling system for estuaries, coastal waters and seas, *Environ. Softw.*, 7(4), 229–240.

WENTWORTH, C.K. (1922) - A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392

WOOSTER, W.S., BAKUN; A., McLAIN, D.R. (1976) - The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *J MarRes.*, New Haven, 34 (2), 131-141, 6 fig.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Echelles spatio-temporelles de l'hydro-morphodynamique littorale. Description de différents processus morphodynamiques (en rouge) associés à une échelle spatiale, une échelle temporelle et les processus hydrodynamiques correspondants (en bleu). Les boites représentent les 3 grandes gammes d'échelles des processus littoraux : l'échelle instantanée, évènementielle (ou court terme) et l'échelle moyen à long terme. Les flèches verticales entre les boites représentent des interactions (Almar, 2009).....	3
Figure 2: Principaux types de côtes au Sénégal (Sall, 1982, modifiée)	4
Figure 3 : Relations simplifiées entre les différentes composantes du littoral.....	11
Figure 4 : Localisation de la zone d'étude (Google Earth image, 2015) (Ngom <i>et al.</i> , 2018). 13	
Figure 5: Vitesses moyennes annuelles et directions des vents au sol à Mbour de 2002 à 2010 Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal (Diadhiou, 2018).. 15	
Figure 6 : Valeurs moyennes mensuelles des paramètres climatologiques (de Janvier (J) 1968 à Décembre (D) 2008) à la station de Mbour (T= température ; P= pluviométrie et HR= humidité relative)	16
Figure 7: Evolution des cumuls pluviométriques annuels à la station de Mbour de 1968 à 2003	17
Figure 8: Evolution des températures moyennes annuelles à la station de Mbour de 1968 à 2003	18
Figure 8 : Variations saisonnières des courants généraux sur le littoral ouest-africain (d'après Shom, 1981, in Cormier-Salem, 1999)	20
Figure 9: Modèles de propagation des houles le long du littoral sénégalais (Nardari, 1993).. 21	
Figure 11: Le réseau hydrographique de Yène à Palmorin	26
Figure 12 : Vues de la partie Nord de Saly en 1954 (A) et en 2007 (B)	27
Figure 13 : Superficie (%) des classes d'occupation du sol de 1989 à 2012 (Faye, 2013)..... 30	
Figure 14 : Le Bassin sédimentaire sénégal-mauritano-guinéen dans son cadre régional (Roger <i>et al.</i> , 2009)	33
Figure 15 : Carte géologique de la presqu'île du Cap-Vert (d'après Ducasse <i>et al.</i> , 1978).... 35	
Figure 16 : Coupe du Crétacé supérieur de la falaise du Cap de Naze (Roger <i>et al.</i> , 2009).... 37	
Figure 17 : Coupe de la falaise de Ngazobil (Roger <i>et al.</i> , 2009)..... 40	
Figure 18 : Carte des formations du Plio-quaternaire de la région de Mbour-Joal (Sarr, 1982)	41
Figure 19: Carte des domaines structuraux du Sénégal occidental (Roger <i>et al.</i> , 2009)..... 44	
Figure 20: Bancs et affleurements rocheux sur le plateau continental sénégalais (Domain, 1977).....	46
Figure 21 : Couverture sédimentaire de la Petite Côte (Turmine, 2001)	48
Figure 22 : Coupe géologique de Gandigal à Nianing (Elouard <i>et al.</i> , 1967)..... 49	
Figure 23 : Sondage de reconnaissance SCII à Marina Saly (Saufrase,1998)	50
Figure 24 : Découpage morphologique du rivage de Saly (UAT : Unité d'Aménagement Touristique) (Google Earth image, 2015)	51
Figure 25 : Principales unités morphologiques d'une plage sableuse et ses agents dynamiques (d'après Ottman, 1965).	52
Figure 26 : Les principaux facteurs d'évolution du littoral..... 56	
Figure 27 : Répertoire Matlab contenant le script runEFshow.m	58
Figure 28 : Climat de vagues offshore schématisé..... 58	

Figure 29 : Variations moyennes des séries temporelles de hauteurs de vagues (Hm0), de périodes (Tp) et de directions (dir) (1978-2016) le long de la côte de Saly (ERA-Intérim, http://apps.ecmwf.int/datasets/)	60
Figure 30 : Les fréquences des houles au large de la côte de Saly.....	60
Figure 31: Hauteur moyenne significative des houles au large de la côte de Saly	61
Figure 32 : Périodes moyennes des houles significatives au large de la côte de Saly	61
Figure 33 : Évolution saisonnière de la direction de la houle au large de la côte de Saly (Egis, 2017).....	61
Figure 34 : Évolution saisonnière de la hauteur significative la houle au large de Saly (Egis, 2017).....	62
Figure 35 : Hauteurs moyennes des houles sur la côte de Saly.....	63
Figure 36 : Hauteurs moyennes des houles sur la côte de Saly.....	63
Figure 37 : Directions moyennes des houles au large de 200°N (Sud).....	64
Figure 38 : Directions moyennes de houles au large de 270° N (Nord)	64
Figure 39 : Schéma des échanges sédimentaires à prendre en compte dans le bilan sédimentaire d'une portion de littoral (Leredde, 2011).....	68
Figure 40 : Organigramme des méthodes utilisées pour déterminer les taux d'évolution de la ligne de rivage	79
Figure 41 : Positions des repères arrière fixes des différents profils de plage	82
Figure 42: Evolution de la ligne de rivage de 1954 à 1989.....	87
Figure 43: Taux d'évolution de la ligne de rivage entre 1954 à 1989	87
Figure 44: Evolution de la ligne de rivage de 1989 à 2016.....	89
Figure 45 : Evolution des taux d'érosion entre 1989 et 2016	89
Figure 46 : Relations entre structures de protection et évolution de la ligne de rivage entre 1989 et 2016	90
Figure 47 : Profils mensuels de plage (P1 à P4)	95
Figure 48 : Comparaison des profils mensuels de plage (P1 à P4)	97
Figure 49 : Profils mensuels de plage P5 à P9	100
Figure 50 : Comparaison des profils mensuels de plage P5 à P9	103
Figure 51 : Evolution de la moyenne Mz (en μm) au niveau du Mi- estran de P1 à P4	107
Figure 52 : Evolution de la granulométrie moyenne le long des profils de P1 à P4 avec HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement	108
Figure 53 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques des profils P1 à P4 avec HP = haute plage ; ME = mi-estran ; MER = mer ; DFMT = Déferlement	108
Figure 54 : Evolution de la moyenne Mz (en μm) au niveau du Mi- estran pour P5 à P9....	112
Figure 55 : Evolution de la granulométrie moyenne le long du profil pour P5 à P9 HE = haut estran ; BE = bas estran ; Dflmt = Déferlement	112
Figure 56 : Diagramme de dispersion Mz-sigma en fonction des unités morphologiques des profils P5 à P9 avec HP = haute plage ; ME = mi-estran ; MER = mer ; DFMT = Déferlement	113
Figure 57: Diagramme de dispersion Mz-sigma des estrans des profils P1 à P9.....	114
Figure 58: Modification du profil de la plage d'un rivage à une profondeur de fermeture déterminée. D_C = profondeur de fermeture du profil de plage ; D_B = hauteur de la berme de plage (Ghonim, 2019).	120

Figure 59 : Schéma illustrant l'évolution de la ligne de rivage par rapport à une ligne de référence fixe ($i + x$ = coordonnées le long de la côte modifiées simultanément en fonction de la ligne de référence	121
Figure 60 : Schéma conceptuel d'une boucle dans Delft 3D (Roelvink, 2006).....	122
Figure 61 : Schéma du CEM illustrant la discréétisation du plan dans des cellules. Pour les vagues d'orientation et de hauteur données, les sédiments sont transportés le long du littoral en fonction de l'angle d'incidence des vagues et les quantités de cellules sont ajustées en fonction des gradients de flux. Notez également que le transport littoral ne se produit pas dans la zone "ombrée" (Ashton <i>et al.</i> , 2016)	125
Figure 62 : Schémas illustrant des sections du rivage (en rouge) et	126
Figure 63 : Schéma illustrant la libre circulation des points de grille dans ShorelineS en fonction de l'angle d'incidence des houles et de leur hauteur au déferlement. Q = transport longitudinale, i = coordonnée d'un point de grille et n = vecteur déplacement (Ghonim, 2019)	127
Figure 64 : Modèle bathymétrique de la Petite Côte.....	128
Figure 65 : Directions des vagues sur la côte à Saly pour des directions des houles au large de 20 ° N.	129
Figure 66 : Répertoire Matlab contenant l'ensemble des fichiers utilisés par le modèle ShorelineS	130
Figure 67 : Organigramme général du modèle ShorelineS (Ghonim, 2019)	131
Figure 68 : Changements observés et modélisés sur littoral entre 2003 et 2016. Panneau supérieur : changements observés ; panneau inférieur : changement modélisé	133
Figure 69 : Taux d'évolution moyens des images et des modèles à Saly entre 2003 et 2016	134
Figure 70 : Evolution de la ligne de rivage des modèles et des images à Saly entre 2003 et 2016.....	135
Figure 71 : Courbes d'évolution de la ligne de rivage des modèles des scenarios entre 2003 et 2016.....	137
Figure 72 : Taux d'évolution moyens des modèles M1, M3 et M5 entre 2003 et 2016.....	138
Figure 73 : Taux d'évolution moyens des modèles M2, M4 et M6 entre 2003 et 2016.....	138
Figure 74 : Taux d'érosion moyen des segments avec les modèles M2 à M6 entre 2003 et 2016.....	139
Figure 75 : Taux d'évolution moyens du littoral de Saly entre 2016 et 2035 sans modification de la protection du littoral (M1) et avec réduction des longs épis (M3).	141
Figure 76: Taux d'érosion des segments avec modèles M1 et M3 entre 2016-2025 (à gauche) et 2025-2035 (à droite).....	142
Figure 77 : Types d'alimentation par section des plages (DHI, 2017).....	152
Figure 78 : Exemples de murs de protection (DHI, 2017)	155
Figure 79 : Modèle d'évolution de la ligne de rivage pour un long (en haut)	157
Figure 80 : Modèle d'évolution de la position de la ligne de rivage sur un réseau de courts d'épis avec un spacement différent (600 m en haut et 1200 m en bas) dans un climat de vagues modérées obliques (DHI, 2017).	158
Figure 81 : Définition des caractéristiques d'un brise-lame au large et formes d'accumulation (DHI, 2017)	160
Figure 82 : Modèle d'évolution de la ligne de rivage sur un champ de trois courts épis dans un climat de vagues modérées obliques. Le champ d'épi a été initialement rempli de sable (DHI, 2017).....	161
Figure 83 : Plan général de protection côtière à Saly (2013)	169

Figure 84 : Les propositions d'aménagements de protection par segment de l'Avant Projet Spécifique (APS) (Egis, 2017)	173
Figure 85 : Taux d'évolution moyen de la ligne de rivage entre 2016 et 2035 sans.....	176
Figure 86 : Taux d'évolution moyen de la ligne de rivage entre 2016 et 2035 sans.....	178
Figure 87 : Taux d'évolution moyen de la ligne de rivage entre 2016 et 2035 sans modification de.....	179
Figure 88 : Taux d'évolution moyen de la ligne de rivage entre 2016 et 2035 sans modification	181
Figure 89 : Localisation de Sand motor sur la côte de la Hollande méridionale (Delfland)..	185
Figure 90 : Validation du modèle ShorelineS pour le sable Moteur, Delfland, Pays-Bas (Roelvink, 2018 b).....	186

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques en eau profonde des houles longues au large des côtes sénégalaises (Nardari, 1993)	22
Tableau 2 : Reculs prévisionnels dus à l'élévation du niveau marin à Saly	67
Tableau 3 : Caractéristiques des supports numériques utilisés	78
Tableau 4 : Erreurs associées aux supports numériques utilisés.....	80
Tableau 5 : Formules et échelles de Folk et de Ward (1957).....	85
Tableau 6 : Classes granulométriques utilisées dans GRADISAT (modifié à partir de Udden, 1914 et Wentworth, 1922).....	85
Tableau 7 : Largeurs mensuelles des unités morphologiques des profils P1 à P4 en 2014 ; HP = haute plage, E = estran et ZD = zone de déferlement	93
Tableau 8: Mouvements verticaux des unités morphologiques des profils P1 à P4 (Exprimés en m ³ par m linéaire de plage).....	96
Tableau 9 : Largeurs mensuelles des unités morphologiques des profils P5 à P9 ; HP = haute plage, E = estran et ZD = zone de déferlement	99
Tableau 10 : Mouvements verticaux des unités morphologiques des profils P5, P7 et P9 (Exprimés en m ³ par m linéaire de plage)	101
Tableau 11 : Mouvements verticaux des unités morphologiques des profils P6 et P8 (Exprimés en m ³ par m linéaire de plage)	102
Tableau 12 : caractéristiques morphologiques des estrans des profils P1 à P9.....	104
Tableau 13 : Variations mensuelles des moyennes des indices granulométriques sur les profils P1 et P2 avec M ₁ et M ₂ modes principal et secondaire et N ₁ et N ₂ pourcentages principal et secondaire.....	106
Tableau 14 : Variations mensuelles des moyennes des principaux indices granulométriques sur les profils P3 et P4 avec M ₁ et M ₂ modes principal et secondaire et N ₁ et N ₂ pourcentages principal et secondaire.....	107
Tableau 15 : Variations des moyennes des principaux indices granulométriques sur les profils P5, P7 et P9 avec M ₁ M ₂ et M ₃ modes principal et secondaire et N ₁ , N ₂ et N ₃ pourcentages principal et secondaire.....	110
Tableau 16 : Variations des moyennes des principaux indices granulométriques sur les profils P6 à P8 avec M ₁ M ₂ et M ₃ modes principal et secondaire et N ₁ , N ₂ et N ₃	110
Tableau 17 : caractéristiques granulométriques des estrans des profils P1 à P9.....	113
Tableau 18 : Différents scénarios de protection du littoral de Saly entre 2003-2016	136
Tableau 19 : Caractéristiques des structures de protection répertoriées à Saly de 1998 à 2015 et taux d'évolution sur chaque segment littoral avant et après construction des structures... ...	163
Tableau 20 : Taux d'évolution des segments avec les modèles M1 à M6 entre 2003 et 2016	174
Tableau 21 : Les avantages et les inconvénients d'une solution de méga-alimentation sur les plages.....	185

LISTE DES PHOTOS

<u>Photo 1 : La plage de la partie Sud de Saly prise le 23 février 2014 5 (A) ; La même plage le 26 Août 2014 après de fortes houles (B)</u>	13
<u>Photo 2 : Principales unités morphologiques sur la plage</u>	53

<u>Photo 3 : Affleurements rocheux sur la plage sous-marine</u>	53
<u>Photo 4 : (A) Le matériel topographique ; (B) Le porte-mire</u>	81
<u>Photo 5 : plages juste en aval (A) et en amont (B) de l'épi de la résidence Safari</u>	91
<u>Photo 6 : Mur en enrochement (R1) de la résidence les Baobolongs.....</u>	115
<u>Photo 7 : Conduite d'évacuation des eaux en mer (A) et Plants de cocotiers et de filaos le long du littoral (B).....</u>	150
<u>Photo 8 : Revêtement à la plage de l'hôtel Téranga.....</u>	154
<u>Photo 9 : Epis de la résidence Safari (A ; G5, G6) et Epis construits entre les hôtels Princess et Cocotiers (B, G11, G12).....</u>	164
<u>Photo 10 : Exemples de murs en enrochements (R3) et en béton à Saly Hôtel</u>	167
<u>Photo 11 : Les brises lames réalisées en 2013 à Saly.....</u>	170
<u>Photo 12 : Projet pilote Sand Motor en juillet 2011 (A) et en septembre 2014 (B).....</u>	186

TABLE DES MATIERES

Résumé	iii
INTRODUCTION GENERALE	1
Contexte scientifique et problématique	2
Hypothèses et Objectifs de recherche.....	5
Méthodologie et organisation de la thèse	7
CHAPITRE I. PRESENTATION DU CADRE D'ETUDE	10
I.1. Cadre géographique	11
I.1.1. Localisation de la zone d'étude	12
I.1.2. Caractéristiques climatiques.....	13
I.1.2.1. Circulation atmosphérique	14
I.1.2.2. Eléments du climat	14
I.1.2.2.1. Vents	16
I.1.2.2.2. Précipitations.....	17
I.1.2.2.3. Humidité relative.....	18
I.1.2.2.4. Température	18
I.1.3. Caractéristiques hydrodynamiques	19
I.1.3.1. Circulation océanique.....	19
I.1.3.2. Houles et courants de houle	20
I.1.3.3. Marées et courants de marée	22
I.1.3.4. Niveau marin et ses variations	23
I.1.3.5. Réseau hydrographique	25
I.1.4. Particularités socio-économiques.....	27
I.1.4.1. Population	27
I.1.4.2. Aménagements	28
I.1.4.3. Activités économiques	30
I.2. Cadre géologique	32
I.2.1. Contexte géologique.....	32
I.2.2. Formations géologiques	34
I.2.2.2. Crétacé terminal	35
I.2. 2.3. Paléogène	37
I.2.2.4. Néogène.....	39
I.2. 2.5. Quaternaire	41

I.2.3. Structures tectoniques	43
I.2.4. Plateau continental	44
I.2.4.1. Caractères morphologiques	45
I.2.4.2. Couverture sédimentaire	46
I.2.5. Morphologie du littoral	48
I.2.5.1. Dunes rouges	50
I.2.5.2. Cordons littoraux	50
I.2.5.3. Plage	51
Conclusion partielle	54
CHAPITRE II. PRINCIPAUX FACTEURS D'EVOLUTION DU LITTORAL	55
II.1. Agents hydrodynamiques	56
II.1.1. Données disponibles	56
II.1.1.1. Acquisition	57
II.1.1.2. Traitement	57
II.1.2. Action des houles	59
II.1.3. Action des courants	65
II.1.4. Influence du niveau marin	66
II.2. Quantités de sédiments disponibles	67
II.2.1. Origine des sédiments	68
II.2.2. Budget sédimentaire	69
II.3. Facteurs anthropiques	70
II.3.1. Modifications de l' hydrodynamisme littorale	70
II.3.2. Modifications des quantités de sédiments disponibles	71
II.4. Dynamique littorale	73
II.4.1. Phénomène d'accumulation	73
II.4.2. Phénomène d'érosion	74
Conclusion partielle	75
CHAPITRE III. EVOLUTIONS HISTORIQUE DE LA LIGNE DE RIVAGE ET MORPHOSÉDIMENTAIRE DU LITTORAL	76
III.1. Méthodes d'étude de l'évolution de la ligne de rivage	77
III.1.1. Acquisition des données numériques	78
III.1.2. Traitement des supports numériques	78
III.2. Méthodes de détermination des caractéristiques topographiques	81
III.2.1. Levés topographiques	81
III.2.2. Tracé des profils de plage	82

III.3. Méthodes de calcul des paramètres sédimentologiques	83
III.3.1. Prélèvement des échantillons.....	83
III.3.2. Traitement des échantillons	83
III.4. Evolution historique de la ligne de rivage de 1954 à 2016.....	86
III.4.1. De 1954 à 1989.....	86
III.4.2. De 1989 à 2016.....	88
III.5. Evolution morphosédimentaire du littoral.....	92
III.5.1. Analyse des données morphologiques.....	92
III.5.1.1. Profils du secteur Nord-Ouest	92
III.5.1.1.1. Caractères morphologiques	92
III.5.1.1.2. Mouvements sédimentaires	96
III.5.1.2. Profils du secteur Sud-Est.....	98
III.5.1.2.1. Caractères morphologiques	98
III.5.1.2.2. Mouvements verticaux	101
III.5.2. Analyse des paramètres granulométriques	104
III.5.2.1. Profils du secteur Nord-Ouest	104
III.5.2.2. Profils du secteur Sud-Est.....	109
Conclusion partielle.....	117
CHAPITRE IV. MODELES DE PROTECTION ET EVOLUTION FUTURE DE LA LIGNE DE RIVAGE.....	118
IV.1. Modèles d'évolution du trait de côte.....	119
IV.1.1. Modèles empiriques	119
IV.1.2. Modèles de type processus.....	122
IV.1.3. Modèles agrégés	123
IV.2. Présentation du modèle ShorelineS.....	125
IV.2.1. Caractéristiques du modèle	125
IV.2.2. Climat des vagues.....	128
IV.2.3. Configuration des modèles	129
IV.3. Validation du modèle ShorelineS.....	131
IV.3.1. Présentation des résultats des modèles	131
IV.3.2. Discussion sur les résultats des modèles	134
IV.4. Scénarios de protection du littoral.....	135
IV.4.1. Résultats des scénarios	136
IV.4.2. Discussion sur les scénarios	139
IV.5. Evolution future du rivage.....	140

IV.5.1. Résultats des évolutions	140
IV.5.2. Discussion sur les évolutions	141
Conclusion partielle.....	143
CHAPITRE V. STRATEGIES DE PROTECTION DU LITTORAL	144
V.1. Différentes mesures de protection côtière	147
V.1.1. Solutions douces	147
V.1.2. Solutions dures	153
V.2. Etude des ouvrages de protection réalisés à Saly	162
V.2.1. Epis	163
V.2.2. Murs.....	166
V.2.3. Brise-lames	168
V.2.4. Interactions entre les ouvrages de protection.....	171
V.2.5. Nouveaux ouvrages de protection	172
V.3. Modèles de protection ShorelineS du littoral de Saly.....	174
V.3.1. Modèles avec un seul type de protection	175
V.3.1.1. La série de brise-lames	175
V.3.1.2. Le réseau structuré d'épi.....	176
V.3.2. Modèles avec différents types de protection.....	179
V.3.2.1. Le réseau structuré et la série de brise-lames	179
V.3.2.2. Les épis et les brise-lames proposés par Egis	180
V.4. Planification de la protection du littoral	182
V.4.1. Planification stratégique	182
V.4.2. Planification opérationnelle et spatiale	190
Conclusion partielle.....	192
CONCLUSION GENERALE	193
Enseignements de la thèse	193
Réponses à la problématique	194
Perspectives de recherche.....	195
BIBLIOGRAPHIE	196
ANNEXES	I

Evolution morphosédimentaire et modèles de protection ShorelineS du littoral sableux de Saly, Petite Côte, Sénégal

Résumé :

L'évolution historique de la ligne de rivage de 1954 à 2035 a été suivie à l'aide d'images aériennes et de modèles d'évolution morphodynamique ShorelineS. Une surveillance mensuelle en 2014 d'une série de 9 profils de plage renseigne aussi sur l'évolution morphosédimentaire du littoral. Les résultats montrent un déséquilibre sédimentaire considérable entre un secteur nord-ouest en accumulation et un secteur sud-est en érosion, séparés par l'épi de la résidence Safari. La combinaison de différentes structures de protection inhibe la manifestation des effets positifs de certains d'entre eux. Dans le secteur sud-est, les brise-lames réduisent légèrement les taux d'érosion qui est toujours affecté par les courants de retours associés aux épis du secteur nord-ouest. Les murs en enrochement occupent les plages récréatives et sont sujets à un affouillement et à une submersion qui les rendent instables. La comparaison des taux d'évolution mesurés et simulés pour la période 2003-2016, montre que les épis sont beaucoup plus favorables que les murs ou les brise-lames à l'accumulation des plages sableuses. Toutefois la longueur de certains épis accentue les phénomènes d'érosion. Une réduction de la longueur des épis G1 et G5 pourrait être une solution transitoire au problème de l'érosion de la côte. Un réseau structuré d'épis qui prend en compte les caractéristiques physiques du littoral pourrait aussi stabiliser à long terme les plages de Saly. La combinaison épis et brise-lames des modèles des scénarios M3, M8 et M10 sur lesquels la position et la longueur des épis sont mieux évalués minimisent les effets de l'érosion sur la côte plus que les autres. Seules quelques sections du littoral subissent encore une érosion qui peut être arrêté par un rechargement de sable bien localisé.

Mots clés : *Saly, côtes sableuses, évolution de la ligne de rivage, évolution morphosédimentaire , images aériennes, profils de plage, modèles ShorelineS, DSAS, érosion, accumulation, structures de protection.*

Thesis title: Morphosedimentary evolution and ShorelineS protection models of the sandy littoral of Saly, Petite Côte, Senegal

Abstract

The historical evolution of the coastline from 1954 to 2035 was followed by aerial images and ShorelineS morphodynamic evolution models. A monthly monitoring in 2014 of a series of 9 beach profiles also provides information on the morphosedimentary evolution of the coastline. The results show a considerable sedimentary imbalance between a northwestern sector generally in accumulation and a southeastern sector under erosion separated by the groyne of the Safary residence. The combination of different protective structures inhibits the manifestation of positive effects of some of them. In the southeastern sector, breakwaters slightly reduce the erosion rates of the beach which are still affected by the return flows associated with the groynes of northwestern sector. Riprap walls occupy recreational beaches and are subject to scour and submersion that make them unstable. Comparison of measured and simulated change rates for the 2003-2016 period, shows that groynes are much more favorable than the breakwaters or seawalls for accretion on the sandy coast of Saly. However, the length of some groynes accentuates erosion phenomena. A reduction in the length of the G1 and G5 groynes could be a transitional solution to the problem of coastal erosion. A well-sized and structured groynes field that takes into account the physical characteristics of the coast could in the long term stabilize the sandy beaches of Saly. The groynes and breakwaters combination of the M3, M8 and M10 scenario models, where the position and length of the groynes are better evaluated, minimizes the effects of erosion on the coast more than the others do. Only few sections of the coastline are still subject to erosion, which can be stopped by well-localized sand nourishment.

Key words : *Saly, Sandy beaches, Shoreline evolution, morphosedimentary evolution , aerial images, beach profiles, ShorelineS models, DSAS, erosion, accretion, protective structures.*

ANNEXES

Annexe I : Pentes et formes mensuelles des unités morphologiques des profils P1 à P4

HP=haute plage, E= estran et ZD= zone de déferlement, CV=convexe ; CC=concave ; R=rectiligne

Profils					P1				P2		P3					P4
MOIS	HP	E	ZD	FR	HP	E	ZD	FR	HP	E	ZD	FR	HP	E	ZD	FR
Déc					2,41	5,25	15,2	CV	3,85	5,58	6,53	R	2,34	5,59	8,48	R
Jan	3,26	9,86	2,26	CVR	2,5	6,44	4,45	CVR	4,20	5,24	4,11	R	3,36	7,75	4,35	R
Fév	3,64	8,94	3,46	CVR	3,18	5,68	5,83	CVR	4,19	4,32	9,2	CV	3,09	5,31	3,62	R
Mar	1,65	5,88	2,62	CVR	3,43	5,55	4,91	M	4,57	5,62	5,18	R	2,92	4,77	5,78	R
Avr	2,95	8,30	2,36	CVR	2,56	6,32	4,57	CVR	4,86	5,37	4,39	R	2,29	5,78	5,03	R
Mai	1	5,05	2,37	CVR	2,01	5,79	5,31	CVR	2,72	8,52	3,28	CC	1,77	5,51	2,97	R
Juin	3,25	6,59	3,85	CVR	2,61	6,88	4,01	CVR	4	6,48	5,63	R	1,27	5,49	4,84	R
Juil	2,62	8,21	3,71	CVR	1,76	6,42	8,7	CV	3,02	6,61	3,54	CC	1,29	6,96	3,67	R
Aoû	2,61	6,52	2,59	CVR	1,82	3,97	3,98	CVR	3,86	6,67	4,45	R	0,45	7,34	4,60	R
Sept	2,79	6,68	2,88	CVR	1,93	5,17	4,8	CVR	3,18	7,18	5,02	R	0,98	7,40	3,77	R
Nov	2,43	8,79	2,21	CVR	1,52	9,29	4,55	CVR	3,73	4,34	9,39	CV	2,65	4,87	5,73	R
Déc	2,76	7,68	1,58	CVR	1,20	8,90	5,2	CC	3,65	6,11	5,28	R	3,17	4,35	6,5	R
Moy	2,41	6,87	2,49	CVR	2,24	6,3	5,98	CVR	3,81	6	5,5	R	2,13	5,92	4,94	R

Annexe II : Pentes et formes mensuelles des unités morphologiques des profils P5 à P9 ,

HP=haute plage, E= estran et ZD= zone de déferlement, CV=convexe ; CC=concave ; R=rectiligne

Profils	P5				P6				P7				P8				P9			
MOIS	HP	E	ZD	FR	HP	E	ZD	FR	HP	E	ZD	FR	HP	E	ZD	FR	HP	E	ZD	FR
Déc	5	3,96	16,48	CC	11,98	7,07	9,30	CV	7,90	11,11	2,02	CC	3,14	5,56	15,3	CV-CC		-	-	-
Jan	7	4,22	5,79	CC	11,97	7,23	7,44	CV	11,76	9,62	2,36	CC	5,62	8,11	4,73	R	-	-	-	-
Fév	6,97	5,91	2,07	CC	11,27	4,77	8,12	R	12,07	7,61	3,53	CC	6,28	8,09	8,82	R	5,94	8,81	8,20	R
Mar	6,10	3,19	5,37	CC	14,22	5,79	8,36	R	13,31	9,36	4,28	CC	5,21	8,58	6,50	R	6,20	7,47	10,26	R
Avr	5,92	3,71	7,60	CC	13,90	6,43	8,86	R	14,11	9,98	3,44	CC	5,53	7,91	10,29	R	6,84	6,18	8,85	R-CV
Mai	5,88	3,04	11,40	CC	13,11	6,69	14,66	R	12,11	12,08	8,26	R	3,94	10,46	10,78	CR	6,50	6,61	14,54	R-CV
Juin	6,59	8,36	3,20	CC	9,9	7,67	6,57	R	9,98	13,19	2,06	CC	3,31	11,07	13,21	CC-CV	5,13	8,63	8,79	CV-R
Juil	5,82	4,38	4,75	CC	11,34	7,48	9,38	R	14,07	12,79	4,26	CC	3,49	10,59	9,77	R	5,32	8,02	17	CV
Aoû	3,35	5,22	5,83	CC	13	9,59	4,72	R	2,89	13,15	3,20	CC	-	7,44	4,52	C	-	6,81	9,5	R
Sept	8,47	2,29	4,03	CC	9,48	8,90	3,82	CV	16,92	10,31	3,51	CC	3,30	11,51	6,86	R	5,14	5,58	8,11	CV
Nov	5,20	3,61	6,43	CC	13,14	6,33	6,02	CV	18,05	11,02	3,10	CC	4,22	9,99	4,51	CV-R	4,57	8,22	13,20	CV
Déc	6,07	3,24	4,73	CC	12,07	6,34	8,66	R	19,02	11,16	3,02	CC	3,94	11,93	9,52	R	5,47	9,03	7,9	R
Moy	6,03	4,26	6,47	CC	12,11	7,02	7,99	R	12,68	10,94	3,58	CC	4,36	9,27	8,73	R	5,67	7,53	10,63	R

Annexe III : Pourcentages de carbonates des unités morphologiques des profils P1 à P4

HP=haute plage, E= estran et ZD= zone de déferlement uniformiser ZD ou DEMT

Profils	P1				P2				P3				P4				MT
	Mois	HP	ME	MER	DFMT	HP	ME	MER	DFMT	HP	ME	MER	DFMT	HP	ME	MER	DFMT
Déc	20,32	23,05	52,87	44,78	19,83	17,47	19,02	19,29	45,91	20,43	27,99	22,93	22,73	19,61	29,38	22,69	18,90
Février	25,71	29,2	23,93	21,19	21,09	23,41	54,19	18,44	30,93	34,92	71,38	21,41	29,01	23,69	36,11	19,14	29,28
Avril	21,91	24,01	33,73	24,17	20,73	55,51	19,76	24,13	28,49	20,93	43,24	19,26	26,8	20,81	26,94	-	30,03
Juin	17,31	16,72	67,22	24,03	17,54	19,78	35,52	21,7	22,87	31,93	51,73	25,42	33,86	16,34	52,61	20,51	23,63
Août	15,74	23,54	25,77	19,7	24,45	14,21	26,91	25,26	15,71	52,06	66,75	17,83	26,21	14,63	46,27	21,75	22,70
Nov	22,95	22,5	51,24	17,35	30,33	18,17	24,75	33,27	34,01	17,99	20,34	17,91	25,4	18,07	21,63	19,5	26,63
MS	20,65	23,17	42,46	25,2	22,32	33,17	30,02	23,68	29,65	29,71	46,9	20,79	30,8	18,85	35,49	20,71	MMS 27,29

Annexe IV : Pourcentages de carbonates des unités morphologiques des profils P5 et P7

Profils	P5				P7				MT
Mois	HP	ME	MER	DFMT	HP	ME	MER	DFMT	MMT 32,46
Décembre	22,73	60,87	17,99	21,95	24,7	16,13	34,12	15,81	26,78
Février	32,83	58,75	66,23	62,69	23,87	20,79	46,39	11,97	40,43
Avril	25,3	12,64	60,05	33,99	14,38	23,05	39,88	12,61	27,75
Juin	22,57	11,79	61,44	62,17	27,9	13,63	40,82	19,12	32,43
Août	22,45	13,21	61,11	24,93	40,3	12,74	27,29	28,09	41,26
novembre	25,03	14,9	38,79	44,59	26,55	21,59	18,79	19,11	26,16
MS	25,15	28,69	50,93	41,72	26,28	17,98	34,54	17,78	MMS 30,38

Annexe V : Pourcentages de carbonates des unités morphologiques des profils P6, P8 et P9

Profils	P6				P8				P9				MT
Mois	HP	ME	MER	DFMT	HP	ME	MER	DFMT	HP	ME	MER	DFMT	MMT 32,79
Décembre	38,01	15,41	43,93	17,19	22,24	14,23	43,57	15,39	-	-	-	-	26,24
Février	24,69	45,64	67,77	47,25	30,01	16,34	41,16	23,58	15,35	23,23	44,53	17,27	33,06
Avril	42,21	16,74	65,13	37,48	27,12	52,61	13,27	18,57	21,81	13,16	62,91	69,11	36,67
Juin	46,97	12,68	49,49	22,7	35,6	13,63	57,97	37,07	20,31	17,21	49,72	18,53	31,82
Août	-	19,23	53,03	16,25	-	41,71	17,55	38,46	21,82	19,72	60,86	32,65	32,12
novembre	48,97	32,51	61,01	61,65	33,24	12,88	44,33	15,97	39,29	18,73	57,23	16,58	36,86
MS	40,17	23,7	56,72	33,75	29,64	25,23	36,3	24,84	23,83	18,41	55	30,82	MMS 33,20

Annexe VI : Coordonnées géographiques des brise-lames des modèles du scénario M7

	Extrémité nord		Extrémité sud			Extrémité nord		Extrémité sud	
	X	Y	X	Y		X	Y	X	Y
BL1	279752,94	1598258,762	279890,52	1598213,78	BL15	281851,09	1597539,09	281941,04	1597557,61
BL2	279967,25	1598187,32	280081,02	1598144,99	BL16	281959,57	1597478,23	282068,04	159409,44
BL3	280128,65	1598187,32	280258,29	1598086,78	BL17	282099,79	1597390,92	282221,5	1597327,42
BL4	280208,56	1598068,26	280432,92	1598010,05	BL18	282253,25	1597308,9	282385,55	1597274,51
BL5	280525,52	1597994,17	280668,4	1598023,28	BL19	282435,82	1597258,63	282565,46	1597203,07
BL6	280700,15	1598031,21	280824,5	1598065,61	BL20	282607,8	1597181,9	282734,8	1597113,11
BL7	280872,13	1598081,49	281001,77	1598118,53	BL21	282779,78	1597076,07	282909,8	1597004,63
BL8	281059,98	1598113,24	281205,5	1598137,05	BL22	283068,17	1596943,78	283181,94	1597044,32
BL9	281255,77	1598102,65	281366,9	1598028,57	BL23	283224,28	1597078,71	283343,34	1597105,17
BL10	281393,36	1597991,53	281485,96	1597912,15	BL24	283359,21	1597086,65	283449,17	1597033,73
BL11	281501,84	159789,82	281581,21	1597795,74	BL25	283470,34	1597017,86	283555,01	1596962,3
BL12	281594,44	1597774,57	281673,81	1597700,49	BL26	283576,17	1596949	283666,13	1596882,92
BL13	281687,04	1597674,03	281718,79	1597642,28	BL27	283674,07	1596867,61	283774,61	1596787,67
BL14	281742,61	1597623,76	281821,98	1597557,61					

Annexe VII : Coordonnées géographiques des épis des modèles du scénario M8

Extrémité offshore				Extrémité onshore				Extrémité offshore				Extrémité onshore			
X		Y		X		Y		X		Y		X		Y	
E1	280583,73	1598141,81	280580,55	1598205,31	E8	282583,98	1597335,36	282622,08	1597386,16						
E2	280818,68	1598195,79	280802,8	1598238,65	E9	282725,27	1597232,17	282761,78	1597278,21						
E3	281115,54	1598289,45	281136,18	1598345,01	E10	283066,58	1597035,32	283030,07	1597102						
E4	281380,66	1598152,92	281426,69	1598197,37	E11	283384,08	1597124,22	283420,6	1597189,31						
E5	281756,89	1597751,29	281807,69	1597800,5	E12	283687,3	1596959,12	283733,34	1597009,92						
E6	282001,37	1597527,45	282031,53	1597575,07	E13	283884,15	1596790,85	283928,6	1596835,3						
E7	282303	1597381,4	282235,22	159743,96											

Annexe VIII : Coordonnées géographiques des ouvrages en enrochements en construction à Saly

Implantation des ouvrages (voir plans de détail des ouvrages pour connaître la position exacte des points d'implantation)						
	Extrémité 1 E1		Extrémité 2 E2		Extrémité 3 E3	
Ouvrage	X	Y	X	Y	X	Y
Brise-Lames	BL1	283878.7273	1596666.7016	283955.4279	1596596.1408	
	BL2	283731.5490	1596802.0952	283808.2496	1596731.5344	
	BL3	283584.4403	1596937.4244	283661.1409	1596866.8636	
	BL4	283420.6452	1597051.3443	283512.0304	1597001.2388	
	BL5	282887.1207	1597029.7624	282973.5092	1596971.4628	
	BL6	282720.9243	1597141.9174	282807.3128	1597083.6178	
	BL7	282555.4170	1597253.9936	282641.8055	1597195.694	
	BL8	282360.1252	1597290.1548	282463.956	1597281.1558	
	BL9	282173.2777	1597344.2402	282266.2375	1597297.1203	
	BL10	281993.3316	1597435.4097	282086.2914	1597388.2898	
Epi plongeant	EPI 1	284104.1321	1596627.6439	284069.6555	1596594.9695	
	EPI 5	281402.7833	1598216.3577	281371.0126	1598186.7943	
	EPI 6	281183.7873	1598330.3326	281161.2185	1598254.6249	
Epi en "T"	EPI 2	283335.2148	1597193.6840	283280.4610	1597116.7669	283331.0253
	EPI 3	283138.7494	1597190.2020	283164.9409	1597088.2271	283211.6429
Epi en "L"	EPI 4	283048.7622	1597088.5353	283080.2403	1597032.0211	283099.8863
						1597042.9631

Annexe A : Illustrations des phénomènes d'érosion à Saly



Photo I : Etat de la plage entre les profils P8 et P9



Photo II : Etat de la plage au profil P8



à

Photo III : Etat de la plage sur le profil P7



Photo IV : Etat de la plage entre les profils P7 et P6



Photo V : Etat de la plage entre les profils P7 et P6



Photo VI : Etat de la plage au profil P6

X

Annexe B : Articles publiés

1. Ngom, H.; Ndour, A., and Niang, I., 2018. Impacts of protective structures on sandy beaches: Example of the Saly balnear station, Petite Côte, Senegal. In: Almar, R.; Almeida, L.P.; Trung Viet, N., and Sall, M. (eds.), *Tropical Coastal and Estuarine Dynamics. Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 81, pp. 114-121. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.
2. Coastal erosion and ShorelineS protection models on the sandy beach of Saly, Petite Côte, Senegal (soumis)