



ETUDE DE SUIVI DU TRAIT DE COTE
ET SCHÉMA DIRECTEUR LITTORAL
DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

ETUDE DE CAS AU SENEGAL

**SUIVI DES PHENOMENES D'EROSION
ET D'ACCUMALTION SUR LE LITTORAL
DE MBOUR A LA POINTE SARENE
DEPUIS 1954**



SUIVIDES PHENOMENES D'EROSION
ET D'ACCUMALTION SUR LE LITTORAL DE
MBOUR A LA POINTE SARENE DEPUIS 1954

Ibrahima FAYE

TABLE DES MATIERES

I.	CONTEXTE DE L'ETUDE.....	4
II.	PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	6
2.1	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	6
2.2	CARACTERISTIQUES ANTHROPIQUES.....	11
III.	APPROCHE METHODOLOGIQUE	13
3.1	LES DONNEES UTILISEES.....	13
3.2	LA LIGNE DE REFERENCE SELECTIONNEE.....	13
3.3	TECHNIQUE D'ACQUISITION DE LA LIGNE DE REFERENCE SELECTIONNEE	15
3.4	METHODE, OUTILS ET TECHNIQUES DE MESURE DES EVOLUTIONS OBSERVEES.....	19
3.5	ESTIMATIONS DES MARGES D'ERREUR.....	20
IV.	EVOLUTION DIACHRONIQUE DE LA POSITION DU TRAIT DE CÔTE DE 1954 A 2007.....	24
4.1	EVOLUTION DE 1954 A 1978 (FIGURE 5)	24
4.2	EVOLUTION DE 1978 A 1997 (FIGURE 6)	24
4.3	EVOLUTION ENTRE 1954, 1978 ET 1997 PAR PHOTO-INTERPRETATION (FIGURE 7).....	28
4.4	COMPARAISON DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE EXTRAIT DES PRISES DE VUE AERIENNES DE 1997 ET DES POINTS GPS RELEVES EN 2007	30
4.5	DISCUSSION SUR LES CAUSES PROBABLES DES EVOLUTIONS OBSERVEES	32
V.	SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS	35
VI.	RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	36
	EVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE DES ENJEUX DE L'EROSION CÔTIERE ENTRE MBOUR ET POINTE SARENE	40
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	41
	LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	46

I. CONTEXTE DE L'ETUDE

L'érosion côtière est l'un des plus graves problèmes écologiques auxquels est confronté le littoral de la zone de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (IBE et AWOSIKA, 1991). Les taux d'érosion estimés par IBE et QUELENNEC (1989) varient de 1,2 à 6 m/an sur les secteurs sableux du Sénégal à la Sierra Léone et atteignent même voire dépassent les 10 m/an au Togo (QUELENNEC, 1987 ; BLIVI, 2005).

Pour les plages sénégalaises, en dehors du secteur de Bel Air dans la Presqu'île du Cap Vert (DIEYE, 2000) ou des systèmes estuariens du Saloum à la Casamance (PNUE/UNESCO/ONU-DAESI, 1985), les cas d'accumulation rapportés dans la littérature sont rares car l'érosion domine largement avec des taux généralement inférieurs à -2,5 m/an (FAYE, 2010). Le recul du trait de côte affecte particulièrement les zones très peuplées des baies de Yoff et de Gorée dans la Presqu'île du Cap Vert¹ ainsi que les plages touristiques de la Petite Côte notamment de Ngaparou à Mbour². Or, l'essentiel de la population, des infrastructures et des activités économiques du pays est concentré sur les zones côtières comme le signale BA (1993). Le littoral sénégalais abrite également des sites de grande valeur patrimoniale comme Saint-Louis inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO ou des aires protégées classées sites Ramsar telles que le Parc National du Djoudj, la Réserve de Faune de Gueumbel ou le delta du Saloum que les changements littoraux pourraient affecter.

Ces enjeux socio-économiques et écologiques de la zone côtière ouest-africaine confrontée actuellement à une crise environnementale dans un contexte de relèvement du niveau marin, de changements globaux et de densification de l'occupation de l'espace littoral ont entraîné la mise sur pied au début des années 2000 d'un grand programme régional de conservation des zones côtières et marines (PRCM). Initié en 2001, il concerne aujourd'hui le littoral de sept pays de la sous-région ouest-africaine : Mauritanie, Sénégal, Gambie, Guinée-Bissau, République de Guinée et Sierra Léone. Cette production est le fruit d'une recherche doctorale entreprise dans le cadre du projet «Bilan prospectif des changements à long terme de l'environnement côtier d'Afrique de l'Ouest», composante recherche du PRCM. L'objectif du «Bilan prospectif» était entre autres la description des changements à long terme des caractéristiques physiques, biologiques et des modes d'utilisation des espaces littoraux ouest-africains. Le niveau scalaire d'approche choisi par les responsables de cette composante était l'échelle régionale pour favoriser la gestion globale des problématiques communes aux différents pays de la sous-région et l'émergence de politiques nationales de planification côtière cohérentes. En inscrivant pleinement nos travaux dans la philosophie du projet «Bilan prospectif», nous nous sommes intéressés à l'évolution des littoraux sableux d'Afrique de l'Ouest de la Mauritanie à la Guinée-Bissau.

¹ Les travaux de DIALLO (1982) ; SALL (1982) ; NIANG-DIOP (1995) ; DIEYE (2000) ; GUERIN (2003) et FALL (2004) indiquent des taux d'érosion oscillant entre -0,9 et -1,8 m/an.

² Les plages touristiques de la Petite Côte perdent -0,45 à -1 m/an d'après les études du C.S.E. (2004) et de DABO (2006)

Notre étude s'envisageait à deux échelles spatiales avec d'une part, une synthèse régionale sur l'ensemble des côtes sableuses et, d'autre part, une étude à grande échelle de cas représentatifs de la diversité des côtes sableuses rencontrées en Mauritanie, au Sénégal, en Gambie et en Guinée-Bissau. C'est dans ce contexte que nous avons été amenés à traiter du segment côtier de Mbour à la Pointe Sarène. C'est une section de côte qui montre des stigmates d'érosion côtière aigus dans certains endroits et qui jusque là à notre connaissance, n'avait pas fait l'objet de recherches approfondies.

Il développe une plage de sable blanc d'une quinzaine de km de long bordée localement par un cordon dunaire. Erigé en unité d'aménagement touristique par la SAPCO depuis les années 70 (SENE-DIOUF, 1993), ce segment côtier subit actuellement une importante pression foncière avec de nombreux aménagements touristiques (résidences secondaires, auberges, hôtels, etc.) qui au demeurant sont menacés de nos jours par l'érosion côtière tout comme les espaces reboisés et les habitations en front de mer en particulier dans la portion de côte allant de Warang à la Pointe Sarène.

Cette anthropisation a eu un certain impact sur l'évolution littorale car le fonctionnement sédimentaire de la partie méridionale de la zone d'étude a été déstabilisé par la construction au début des années 1970 d'un épi au niveau du Club Aldiana de Nianing avec d'une part une accumulation en amont-dérive et d'autre part une érosion en aval-dérive. Notre étude se propose donc de mesurer et d'analyser les phénomènes de progradation et de régression ayant affecté le trait de côte sur l'ensemble du site de 1954 à 2007. L'analyse de la cinématique littorale pose de nombreuses questions d'ordre méthodologique au vu de la diversité des indicateurs utilisés comme trait de côte, des méthodes d'extraction et de suivi de la mobilité du littoral.

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Le secteur concerné par notre étude s'étire du centre de recherche de l'IRD de Mbour à la Pointe Sarène sur un linéaire de 17 km. D'un point de vue géomorphologique, il est constitué d'une plage d'une trentaine de mètres d'envergure moyenne associée localement à des tronçons de dunes bordières. Le tracé d'ensemble de la côte ménage, de part et d'autre d'un saillant localisé au droit de Warang, deux petites anses (Figure 1).

La première fait suite à la convexité formée par le rivage du centre de recherche de l'IRD et s'étend de la petite pointe au nord du débouché du marigot de Mballing jusqu'au sud du village du même nom. Sa direction est nord-nord-ouest – sud-sud-est. Dans cette zone, une dune portant une végétation herbacée saisonnière (Photo 1) domine une plage large en moyenne de 28 m et semée de gros blocs beiges au droit de Mballing. Sur son revers, elle domine le lit d'un marigot temporaire débouchant au droit de Warang.

Au sud de cette localité, s'étire une deuxième petite anse jusqu'à l'exutoire du marigot Thiémassas qui traverse le Club Aldiana. Le cordon dunaire y est discontinu et n'apparaît qu'au droit de la zone reboisée au nord immédiat de la mission catholique de Nianing. La plage, large en moyenne de 31 m, est orientée vers le sud-est entre les deux exutoires des marigots au sud du saillie de Warang.

Son orientation s'infléchit progressivement vers le sud au fur et à mesure que l'on s'éloigne de Nianing. Au sud du Club Aldiana, la côte prend une direction presque nord – sud jusqu'à la Pointe Sarène. Elle présente un cordon dunaire s'élevant à 6 m³, couvert d'herbacés et d'arbustes comme *Calotropis procera*, *Nitraria retusa*, des acacias, des cactus (*Opuntia tuna*), ... auxquels s'ajoutent d'autres espèces plantées dans le cadre des opérations de reboisement au niveau des clubs de vacances à savoir des filaos (*Casuarina equisetifolia*), des cocotiers (*Cocos nucifera*), etc..

L'érosion du front dunaire se traduit par le façonnement ponctuel d'abrupts pouvant atteindre 2 à 3 m au nord de la mission catholique de Nianing (Photo 2) ou au sud immédiat de l'épi du Club Aldiana. Au pied des dunes s'étend une plage de 20 à 40 m de large encombrée parfois de bois flottés, rejetés par les houles et autour desquels se forment de petites accumulations sableuses.

³ Altitude indiquée sur la carte topographique de la JICA, éditée en 1991, feuille Thiès-1c-ND-28-XIV

Photo 1 : Front de dune végétalisé au droit de Mballing. La limite inférieure de végétation marque la limite supérieure de la plage et pourrait être utilisée comme marqueur du trait de côte.



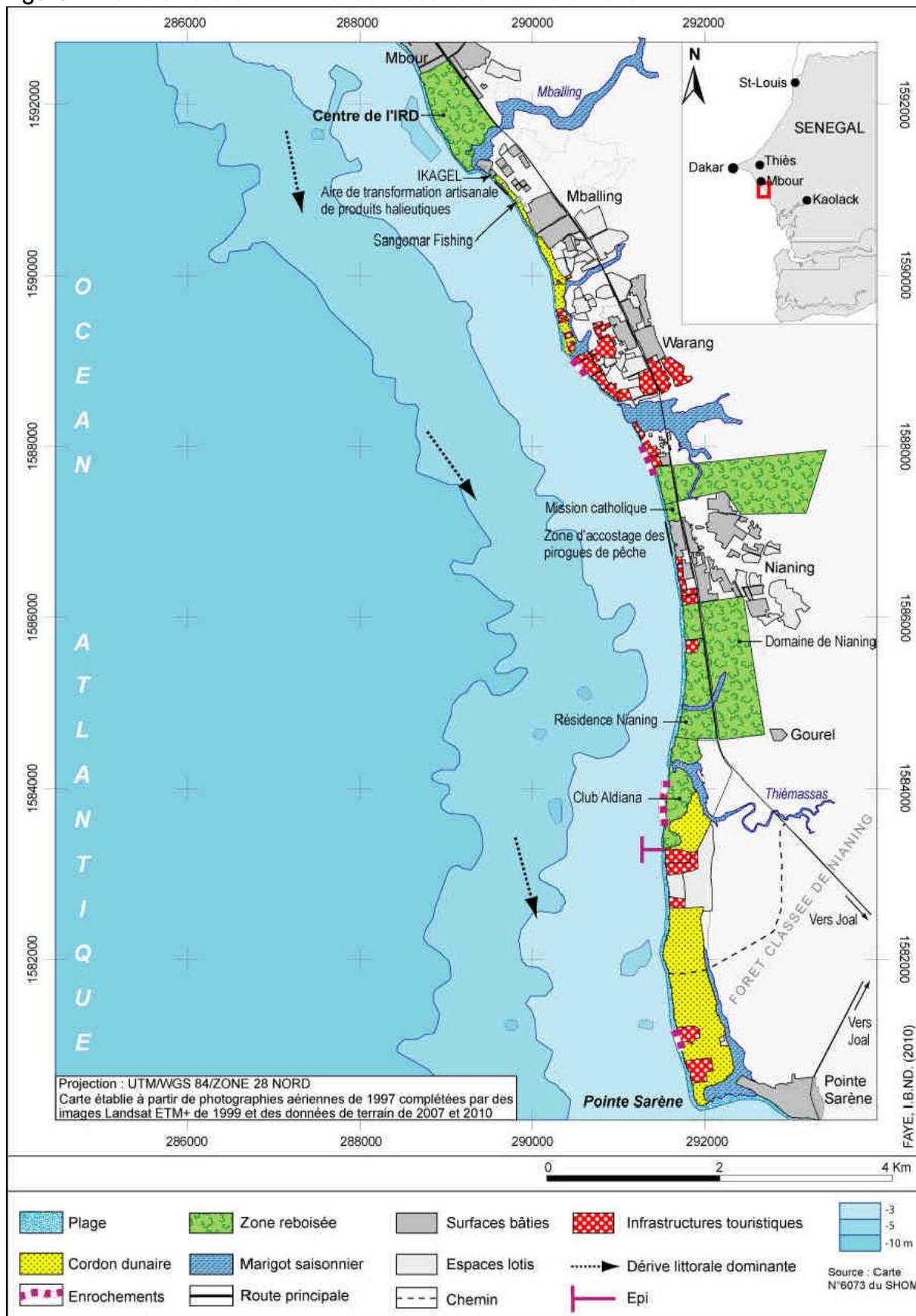
Photo prise en direction du nord, le 21-10-2006.

Photo 2 : Falaise taillée par l'érosion marine dans la dune semi-fixée au droit de la zone reboisée au nord immédiat de la mission catholique de Nianing.



Photo prise en direction du sud, le 10-08-2007.

Figure 1 : Cadre naturel du littoral de Mbour à la Pointe Sarène



Concernant les conditions anémométriques, l'analyse statistique des données de vents enregistrées à la station de Mbour de 1977 à 2006, révèle une nette prédominance des flux d'ouest, d'est et de nord-est avec des vitesses moyennes inférieures à 4 m/s dans 75% des cas (Figure 2).

La distribution fréquentielle des vents dominants durant l'année montre deux saisons mais la provenance et les vitesses des flux ne sont pas du même ordre. Ainsi de décembre à mars, ils sont constitués majoritairement d'alizés continentaux ou harmattans de direction est à nord-est et dans une moindre mesure d'alizés maritimes issus du secteur ouest. Ces vents d'ouest sont très présents toute l'année notamment de mai à novembre et représentent plus de 70% des flux durant l'hivernage⁴ de juin à septembre. Il faut signaler par ailleurs que les vents ont, dans l'ensemble, des vitesses assez faibles, sujettes à caution.

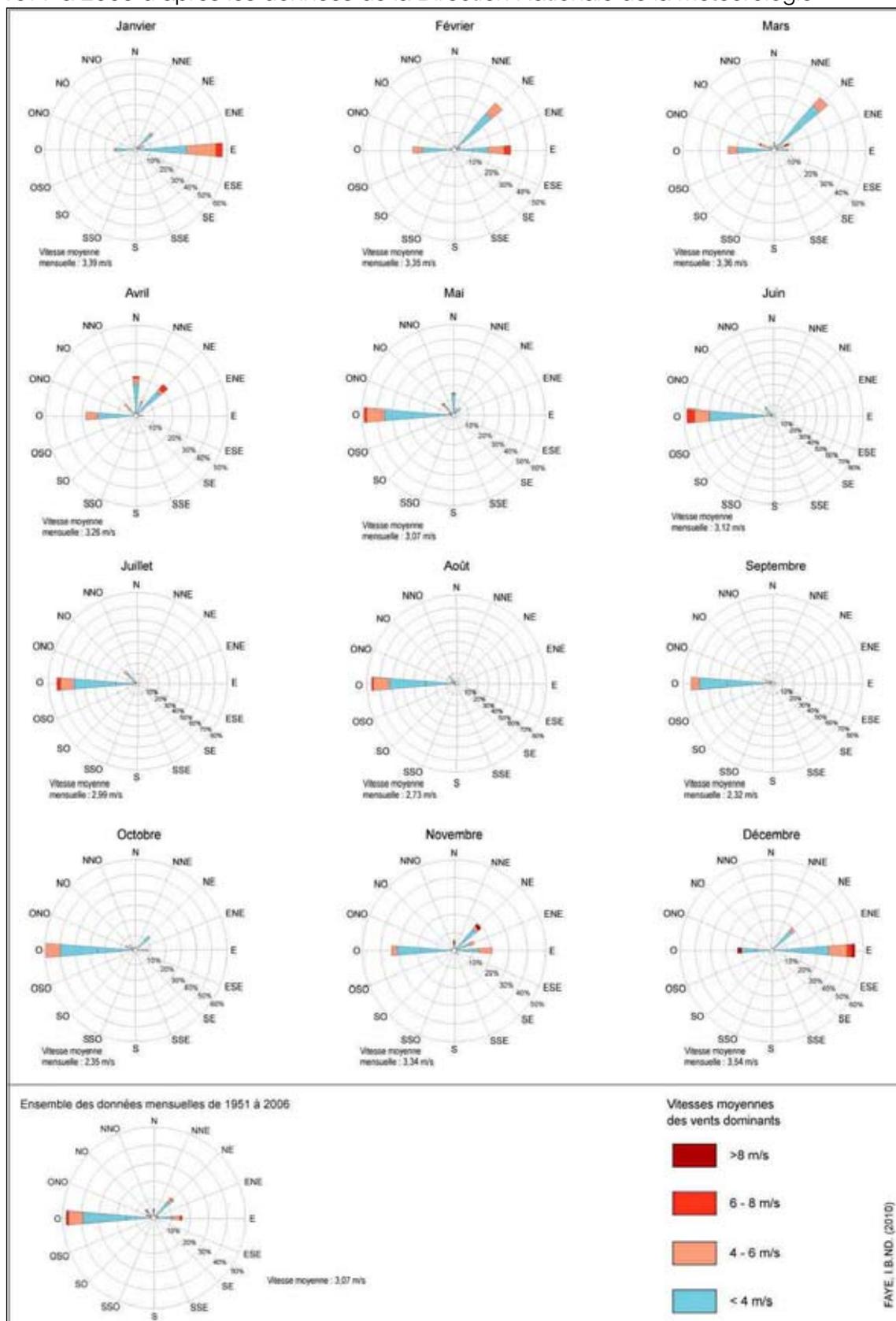
Selon M. Alassane Sidy KANE, responsable des données météorologiques à la Direction de la Météorologie Nationale du Sénégal (communication orale, août 2007), cette caractéristique pourrait être liée au positionnement de la station au centre de recherche de l'IRD dans un environnement boisé. Quoiqu'il en soit, même s'il existe des dunes dans le secteur, la faible largeur des estrans et le couvert végétal dunaire ne favorisent pas la mobilisation des sables par les agents éoliens.

Pour les houles au large de Mbour – Pointe Sarène, leurs caractéristiques sont identiques à celles qui règnent sur la Petite Côte. Le couple dune – plage est soumis essentiellement à l'influence de houles du nord-ouest et du sud-ouest d'une hauteur significative comprise entre 1 et 3 m (THOMAS, 2006). Les houles de nord-ouest peu énergétiques du fait de la diffraction exercée par la Presqu'île du Cap vert dominant toute l'année. A celles là se surimposent des houles du sud-ouest qui elles sont très érosives et s'établissent durant l'hivernage (DE GEFFRIER et MILLIAU, 1946 ; BOUAKAZ, 1980 ; NIANG-DIOP, 1995).

La dérive littorale résultante de ces houles se fait en général vers le sud-est. Elle transporte des quantités de sédiments évaluées par SALL (1982) à 258 000 m³/an au sud de Mbour alors que selon BARUSSEAU (1980 ; 1985), le volume du transit sédimentaire sur toute la Petite Côte varie de 10 à 25 000 m³/an seulement. Elle connaît toutefois une grande disparité spatiale en raison de la variation du tracé du linéaire côtier avec une succession de segments presque rectilignes, de petites baies ou d'anses encadrées par des saillants. Cette «disposition en échelons» (SALL, 1982) contrôlée par la tectonique et l'érosion différentielle font de la Petite Côte une «côte segmentée» partagée entre 3 et 4 cellules (BARUSSEAU, 1980) avec des zones en érosion comme Rufisque, Bargny, Ngaparou, ... et des zones en accumulation comme le montre l'allongement des flèches de Mbodiène (NGAMI-NTSIBA-ANDZOU, 2006) ou de Joal (SY, 2007).

⁴ La moyenne pluviométrique est de 590 mm/an de 1950 à 2003 d'après les données de la Direction Nationale de la Météorologie

Figure 2 : Directions et vitesses moyennes des vents dominants à la station de Mbour de 1977 à 2006 d'après les données de la Direction Nationale de la Météorologie



2.2 CARACTERISTIQUES ANTHROPIQUES

De Mbour à la Pointe Sarène, l'occupation du littoral est constituée de résidences principales et secondaires, de campements touristiques, d'hôtels et de villages de vacances dont le plus important actuellement est le domaine de Nianing créé en 1969, le Club Aldiana ayant fermé en 2007 ses installations ouvertes en décembre 1973. Ce sont les autorités de ce dernier village de vacances qui ont construit un épi à la limite sud du club pour sauvegarder la plage de leur établissement.

Laissé à l'abandon aujourd'hui, il a engendré, comme nous le verrons ultérieurement, une accélération de l'érosion au sud immédiat de l'ouvrage où on observe des falaises de 3,5 m taillées dans la dune bordière. Toutefois, le rôle protecteur de l'épi s'est amoindri de nos jours puisque le club est protégé par un cordon d'enrochement de 900 m de long (Photo 3). On observe également de petites portions de côte enrochées sur une dizaine à une centaine de mètres au nord de Nianing, au droit de quelques résidences secondaires, d'infrastructures touristiques ainsi qu'au nord de la Pointe Sarène.

A ces implantations littorales s'ajoutent une zone de transformation artisanale, deux usines de traitement de produits halieutiques (IKAGEL et SANGOMAR FISH) au sud de l'embouchure du marigot de Mballing (Photo 4), un débarcadère (Photo 5) et une station de carburant piroguier à Nianing.

Photo 3 : Vue du cordon d'enrochement au droit du Club Aldiana.



Photo prise en direction du sud, le 02-08-2007.

Photo 4 : Déchets de produits halieutiques utilisés comme protection contre l'inondation du site de transformation artisanale au sud de l'usine IKAGEL de Mbour.



Photo prise en direction du nord, le 03-08-2007.

Photo 5 : Aperçu du débarcadère de Nianing. Les pirogues halées sur la haute plage masquent le trait de côte et gênent son interprétation sur les images de cette zone.



Photo prise en direction du sud, le 03-08-2007.

III. APPROCHE METHODOLOGIQUE

L'approche méthodologique utilisée dans cette étude fait appel aux techniques de photo-interprétation assistée par ordinateur sous environnement SIG. Elle comprend les étapes suivantes :

- collecte des données photographiques disponibles ;
- sélection d'une ligne de référence ;
- rectification géométrique des images aériennes disponibles ;
- numérisation du trait de côte ;
- mesure de la cinématique littorale et estimation des erreurs.

3.1 LES DONNEES UTILISEES

Le suivi de la mobilité du littoral de notre zone d'étude durant les cinq dernières décennies a été rendu possible par l'exploitation des prises de vues numérisées issues de trois missions de photographies aériennes panchromatiques de l'IGN datant de 1954, 1978 et 1997 (Tableau 1) ainsi que des observations de terrain et des relevés GPS d'août 2007.

Tableau 1 : Missions photographiques utilisées pour le suivi de la cinématique littorale de Mbour à la Pointe Sarène

Date d'acquisition	Références de la mission	Echelle des clichés	Numéro des clichés utilisés	Taille du pixel (m)
1954	AOF 1954 – 079	1/50 000	104 ; 164	1,05
1978	78.ND28 – XIII – XV / 600	1/60 000	163	1,27
14/01/1997	SEN 142 / 200 IGN	1/20 000	0013 ; 0015 ; 0018 ; 0019	0,63

3.2 LA LIGNE DE REFERENCE SELECTIONNEE

Il existe plus d'une douzaine (ROBIN, 2002) à plus d'une trentaine de lignes de référence pouvant matérialiser le trait de côte (BOAK et TURNER, 2005 ; FAYE, 2010). Dans le cadre d'une étude diachronique fondée sur la photo-interprétation, le choix et l'extraction d'une ligne de référence commune aux différentes images est nécessaire. Dans cette optique, les observations de terrain effectuées lors de nos excursions sur le site étudié, l'échelle ainsi que la qualité des photographies aériennes nous ont permis de définir la ligne de référence la plus pertinente pour répondre à la problématique de notre étude.

Ainsi, les images de 1954 et 1978 permettent d'individualiser deux lignes de référence potentielles : la ligne instantanée de rivage et la limite supérieure de la plage. En plus de ces deux lignes présentes sur les images de 1997, la ligne des pleines mers précédant la prise de vue est également discernable. La limite supérieure de la plage a été sélectionnée pour reconstituer la cinématique du littoral de 1954 à 1997 puisque, les dates exactes et les hauteurs des marées étant inconnues, la ligne instantanée de rivage ne peut pas être

utilisée. Le long de ce segment côtier, la limite supérieure de la plage est représentée par le pied de dune assimilable à la limite de végétation dunaire sur les images de 1954 et de 1978 (Photo 6) et partiellement sur les images de 1997 où la plage est délimitée localement par des maisons battues par les vagues à marée haute (Photo 7 et 8).

Photo 6 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite de végétation.

(Extrait d'une photographie aérienne des environs de Warang, mission IGN 8.ND28-XIII-XV/600, cliché n° 163)



Photo 7 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite des maisons.

(Extrait d'une photographie aérienne des environs de Warang, mission SEN 142/200 IGN, 1997, cliché N° 15)

Photo 8 : Maisons battues par les vagues à marée haute.



Photo prise au sud de Warang dans la zone de la photo 7 en direction du sud, le 03-08-2007.

3.3 TECHNIQUE D'ACQUISITION DE LA LIGNE DE REFERENCE SELECTIONNEE

Les prises de vues aériennes étant d'échelles différentes et affectées par de nombreuses déformations rendant leur géométrie imparfaite (STAFFORD et LANGFELDER, 1971 ; DOLAN et al., 1978 ; ANDERS et BYRNES, 1991 ; CROWELL et al., 1991 ; NOVAK, 1992 ; THIELER et DANFORTH, 1994a ; MOORE, 2000 ; PROVENCHER et DUBOIS, 2007), il est nécessaire avant toute comparaison de rechercher un modèle de déformation permettant de corriger ces défauts et de mettre en conformité les images. Cette opération autorise des mesures précises et conditionne la qualité des résultats.

1. La rectification des images

Les paramètres du matériel de prise de vue étant inconnus et en l'absence d'un modèle numérique de terrain permettant de créer des ortho-images, la méthode polynomiale a été retenue pour effectuer la rectification avec le logiciel ENVI. Le redressement des images a été effectué en deux temps. Les images les plus récentes de chaque site ont été rectifiées pour créer un référentiel de base (correction image – carte). Puis, les images anciennes ont été calées sur les images récentes rectifiées (correction image à image).

Pour redresser les images de «référence», les coordonnées de points d'amers (point central de carrefour, angles de trottoirs, de clôtures, de propriétés, etc.) aisément repérables sur les images les plus récentes ont été collectées sur le terrain au moyen d'un GPS (MLR®, modèle SP24 XC) avec une DOP (Dilution of Precision) variant de 1,1 à 1,5 et une ECP (Erreur Circulaire Probable⁵) de 1,9 à 2,8 m lors de l'acquisition des points.

12 à 19 points de calage ont été saisis par image pour la rectification avec un modèle polynomial du second degré et un ré échantillonnage des pixels selon la méthode du plus proche voisin pour préserver la radiométrie des images originales. La résolution de sortie a été fixée à 1 m correspondant à la moyenne de la taille des pixels des images originales. Cela nous permettait de ne pas trop dégrader les images originales tout en obtenant une bonne résolution spatiale.

Pour valider le calage image à image, les images multi-dates d'un site sont superposées à l'écran et on examine le degré de superposition des contours des éléments remarquables ou des infrastructures présentes sur le littoral ou à proximité (route bitumée, aménagements, ou tout autre élément remarquable). En cas de décalages, des points de calage sont ajoutés ou supprimés s'ils présentent une erreur RMS (Root Mean Square) trop élevée. Dans la plupart des cas, une simple RST (Rotation, Scaling, Translation) suffit pour obtenir une superposition satisfaisante des images afin de les assembler et extraire les lignes de référence.

L'ECP désigne le rayon du cercle contenant 50% des positions calculées par le récepteur.

2. La photo-interprétation et la numérisation des lignes de référence

L'interprétation visuelle et la numérisation des lignes de référence sur les images aériennes ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcView GIS 3.2a suivant les principes édictés par CHEVALIER (1971), BAKIS et BONNIN (2000) et PROVENCHER et DUBOIS (2007) (reconnaissance des objets, analyse et interprétation, synthèse de l'information par modélisation des contours).

La première phase a consisté donc à étudier les images en vue de reconnaître ce que l'on observe (plage, dune, végétation, aménagements côtiers, etc.). Cette opération dépend beaucoup de la connaissance du terrain, de l'échelle et de la qualité des prises de vue. Une fois cette phase de reconnaissance terminée, on commence la numérisation de la ligne de référence directement à l'écran sur fond des images redressées. En fonction des

⁵ L'ECP désigne le rayon du cercle contenant 50% des positions calculées par le récepteur.

contrastes, on choisit les pixels attribuables à la ligne de référence sur la base d'une convention fixe. Ainsi, la limite supérieure de la plage est placée à l'interface entre :

- les pixels noirs et les pixels blancs lorsqu'il s'agit de la limite de végétation dense (Photo 9) ou des aménagements (maisons, ouvrage de défense) (Photo 10); - la limite entre les pixels blancs et les pixels gris foncés en présence d'une végétation dunaire herbacée sèche (Photo 11).

Photo 9 : Interface limite de végétation dense /haute plage

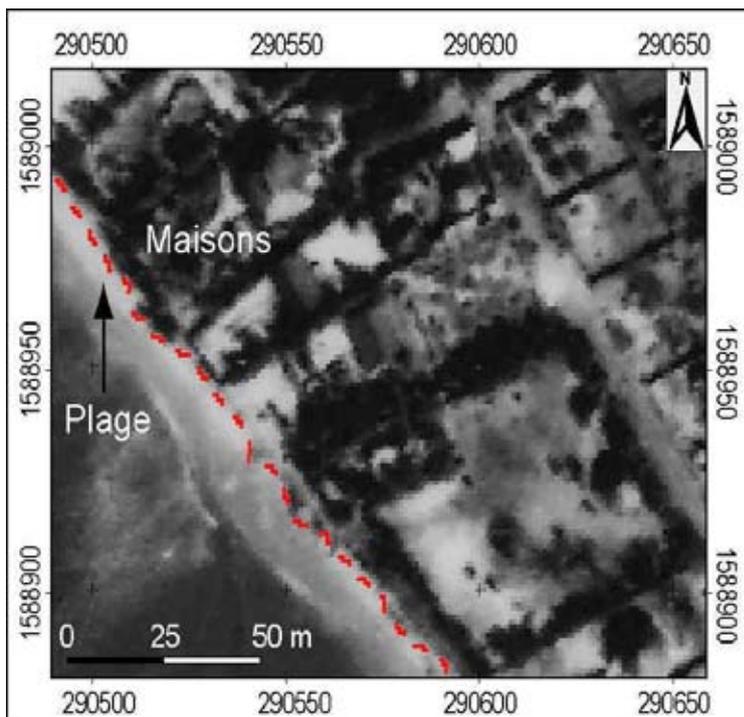
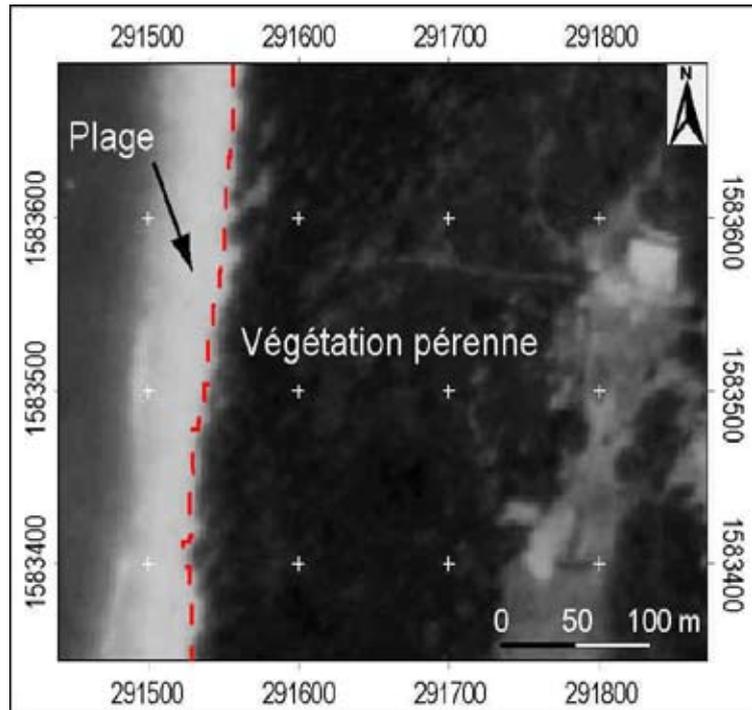
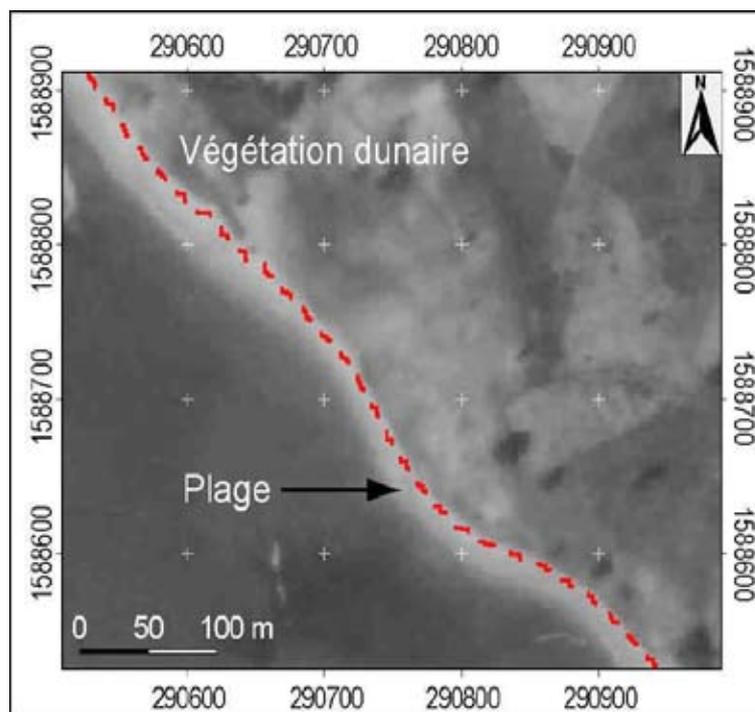


Photo 10 : Interface limite de végétation dense /haute plage

Photo 11 : Interface limite de végétation dunaire herbacée sèche / haute plage



Outre les lignes de référence, l'occupation du front de mer (dunes, habitat, réseau routier, installations touristiques, culture, unité industrielle) a été également numérisée pour constituer une seconde couche d'information vectorielle. Après l'opération de saisie, un attribut⁶ est affecté à chaque élément numérisé. En complément, lors des campagnes de terrain, des informations relatives aux indicateurs de la limite supérieure de la plage (limite de végétation, limite des maisons, etc.) ont été enregistrées au GPS. Ces observations ont été effectuées en vue de projeter ces points GPS sur les photographies aériennes afin de vérifier si les tendances évolutives observées par l'interprétation des images multi-dates se maintiennent ou s'inversent entre 1997 et 2007.

⁶ Pour les lignes de référence, il s'agit de la nature de l'entité numérisée (limite de végétation, des maisons, ou pied de dune), de sa longueur et du degré de fiabilité de la numérisation (certaine, incertaine). Pour l'occupation des littoraux, la nature et la surface de chaque entité sont spécifiées.

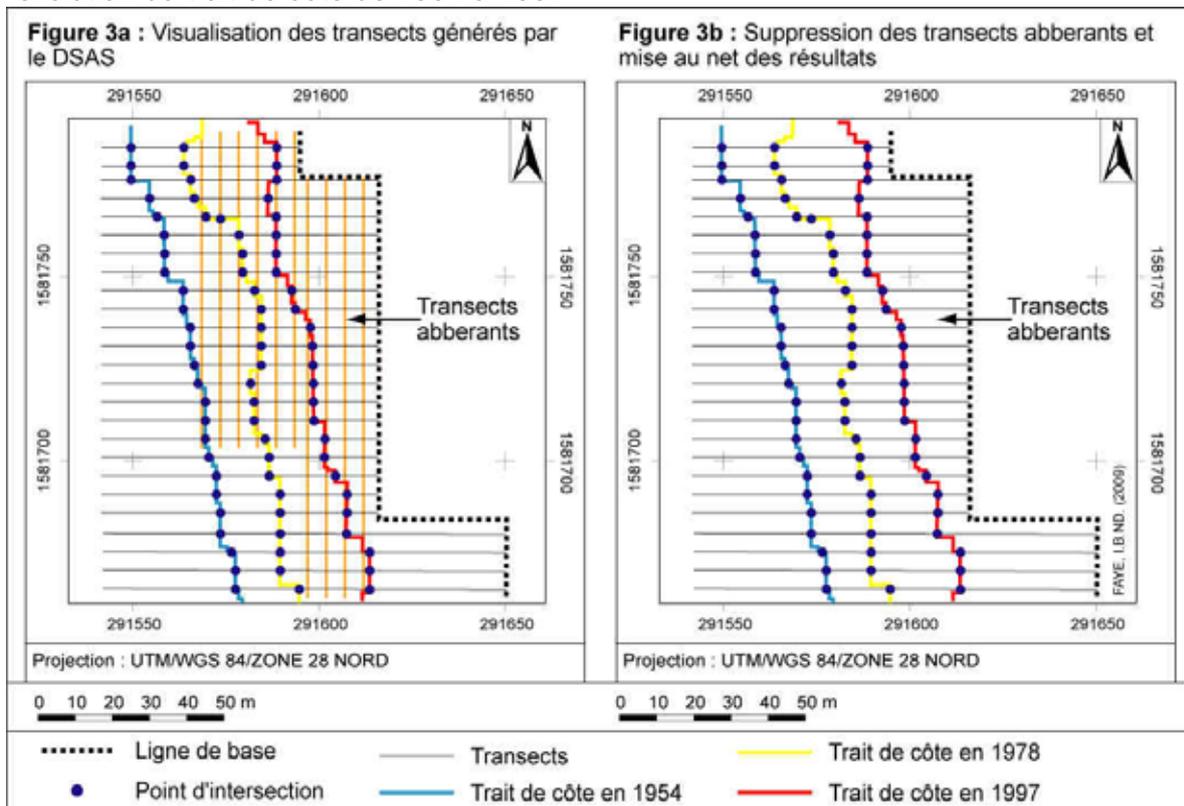
3.4 METHODE, OUTILS ET TECHNIQUES DE MESURE DES EVOLUTIONS OBSERVEES

Les évolutions linéaires ont été mesurées automatiquement grâce au programme DSAS version 2.2.1 (THIELER et al., 2004) suivant des transects perpendiculaires aux lignes à comparer. Ces transects terre/mer, espacés de 5 m, sont générés à partir d'une ligne de base (Figure 3a). Le DSAS mesure les distances entre les points d'intersection des transects et des traits de côte, calcule les taux d'évolution le long de chaque transect et restitue les résultats sous forme de tables attributaires.

L'estimation de la cinématique littorale et la cartographie des taux d'évolution sont basées sur l'analyse de ces tables attributaires. Pour appréhender l'évolution temporelle de la position du trait de côte, nous avons choisi deux indices proposés par le DSAS : l'indice EPR (End Point Rate) pour évaluer l'évolution entre l'emplacement de deux traits de côte successifs et le LR (Linear Regression) pour estimer les taux d'évolution de chaque site sur l'ensemble de la période d'étude. Pour rappel, la régression linéaire d'usage très répandu dans la littérature est considérée comme la meilleure méthode pour estimer les tendances évolutives du littoral sur le long terme (DOLAN et al., 1991 ; FENSTER et al., 1993).

Les zones qui présentaient une tendance positive ou négative homogène ont été regroupées en secteurs. Ce regroupement produit une ségrégation naturelle du rivage en segments (BYRNES et HILAND, 1994). Par la suite, les mesures de distance et les taux d'évolution concernant ces segments de côte ont été moyennés pour cartographier l'évolution diachronique de la position de la limite supérieure de la plage.

Figure 3 : Exemple de transects et d'une ligne de base générés par le DSAS pour mesurer l'évolution du trait de côte de 1954 à 1997



3.5 ESTIMATIONS DES MARGES D'ERREUR

En dépit du redressement des images aériennes et de l'automatisation des mesures, il demeure un certain nombre d'incertitudes qu'il convient d'évaluer afin de faire la part des décalages dus au traitement des données et ceux liés à une réelle cinématique du littoral (DURAND, 1998, 2000 ; GAILLOT et CHAVEROT, 2001 ; ROBIN, 2002). Trois sources d'erreurs ont été répertoriées : la collecte des amers sur le terrain, le géo référencement des images et la numérisation des lignes de référence.

1. Les erreurs liées à la collecte des amers sur le terrain

Cette incertitude est déterminée par la précision du GPS utilisé pour collecter les points de calage sur le terrain. Selon les spécifications techniques du fabricant, le modèle utilisé est précis à 3 m RMS en mode 2 D (X, Y). Pour valider la précision communiquée par le fabricant, il conviendrait de comparer les mesures GPS avec celles d'un GPS différentiel ou avec les coordonnées de bornes géodésiques (AUGUST et al., 1994 ; MORTON et MCKENNA, 1999).

Nous avons ainsi comparé les mesures GPS avec les coordonnées de trois bornes géodésiques de l'IGN. Sur 363 mesures effectuées au GPS au niveau de ces points géodésiques, l'écart moyen quadratique (moyenne quadratique de la somme des carrés des écarts en x et y entre chaque position enregistrée par le GPS et les coordonnées des points géodésiques) est de 3,92 m.

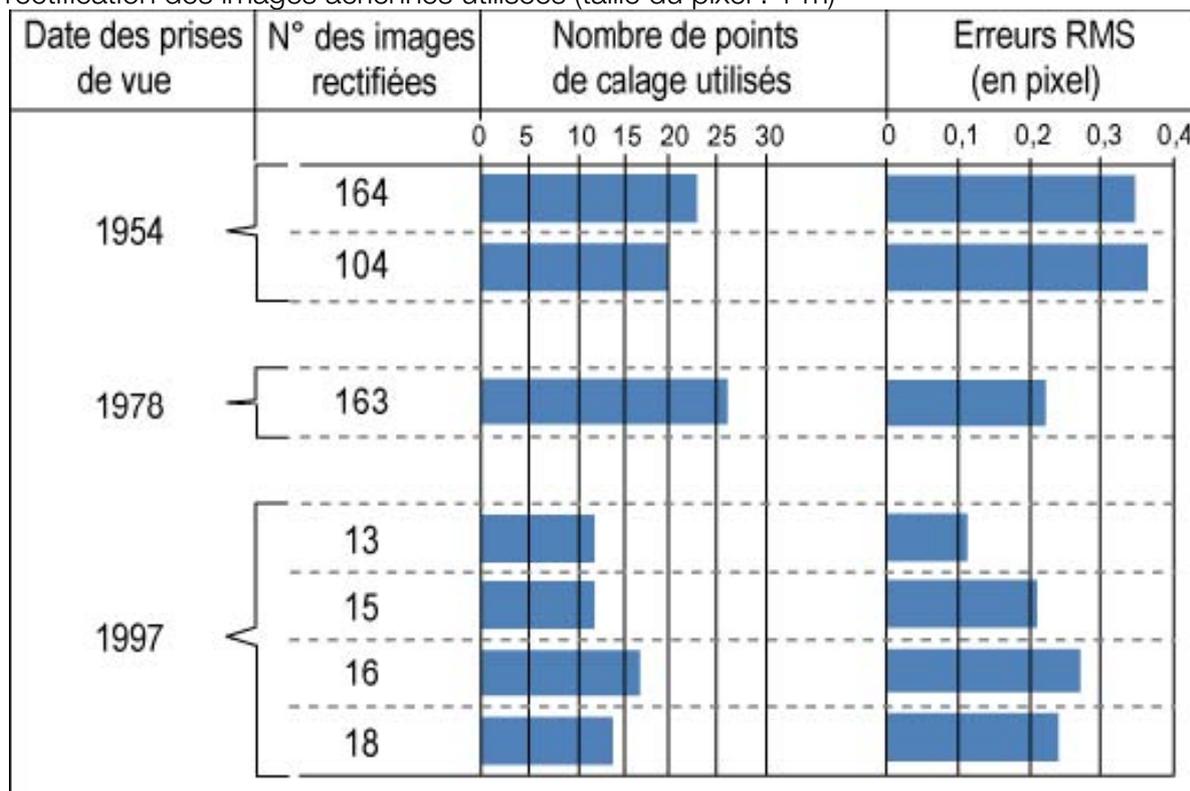
La précision de la localisation dépend de la position et du nombre de satellites disponibles au moment de l'enregistrement, du temps de mesure et de la présence d'obstacles aux alentours susceptibles de perturber la trajectoire ainsi que l'acquisition du signal. Afin de minimiser cette erreur, toutes nos mesures ont été acquises en présence d'au moins dix satellites et les amers sélectionnés sont localisés préférentiellement dans des zones dégagées. Sur cette base, nous pouvons donc estimer l'incertitude liée à la position du GPS à environ ± 4 m.

C'est une erreur systématique qui affecte les images de base et se propage de façon constante sur les autres images antérieures, mais elle ne constitue pas une source de décalage supplémentaire lorsque l'on compare deux images géo référencées l'une par rapport à l'autre.

2. Les erreurs liées au géo référencement des images aériennes

Généralement, malgré la petite échelle des clichés de 1954 et 1978, les erreurs RMS des images redressées étaient inférieures ou égales à 0,4 pixel (Figure 4). Toutefois, COYNE et al. (1999), DURAND (2000) estiment qu'il faut ramener cette erreur à ± 1 pixel, soit 2 pixels si on compare deux images calées l'une par rapport à l'autre.

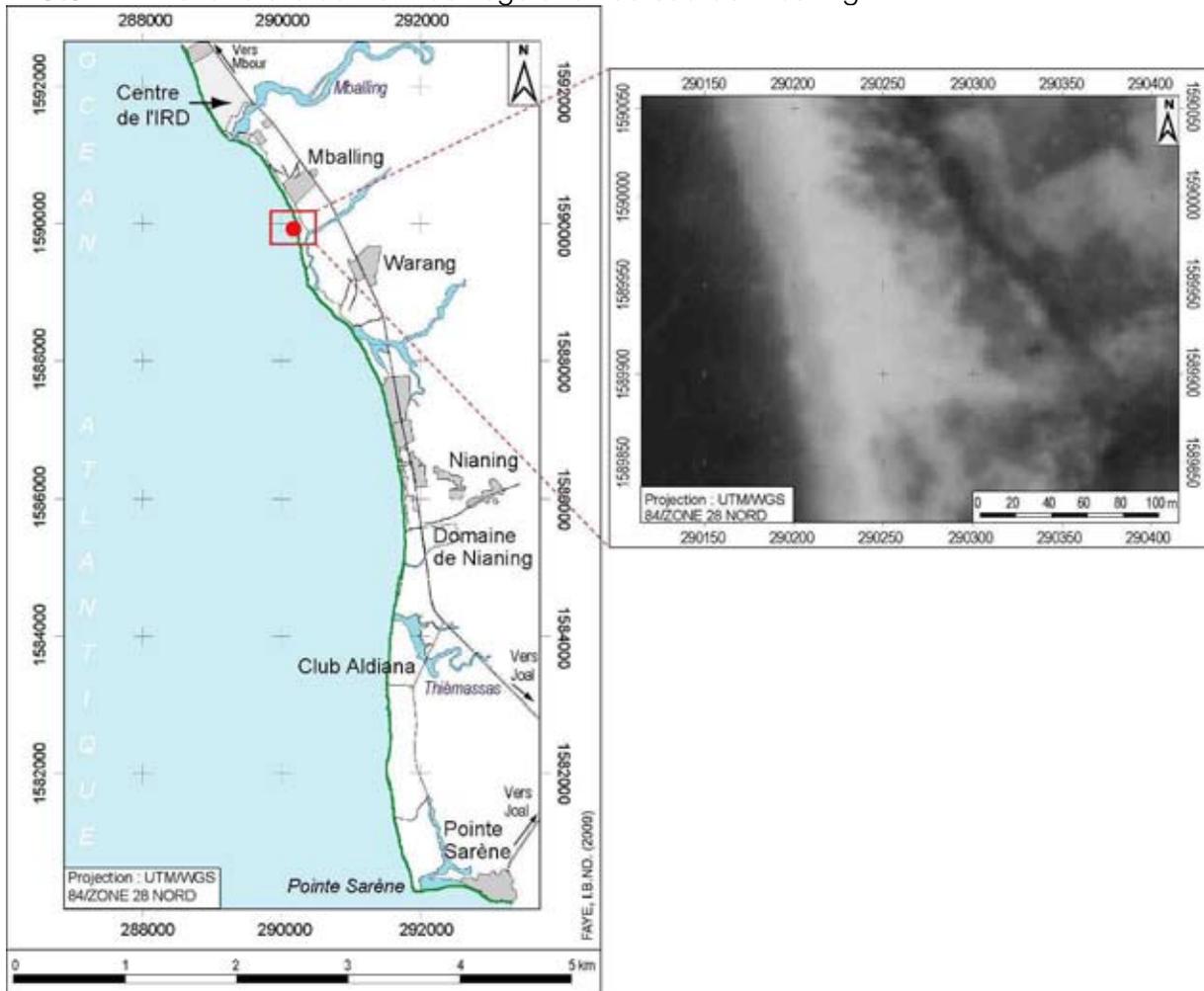
Figure 4 : Nombre de points de calage utilisé et erreurs RMS correspondantes lors de la rectification des images aériennes utilisées (taille du pixel : 1 m)



3. Erreurs liées à la numérisation des lignes de référence

La précision de la numérisation des indicateurs du trait de côte par photo-interprétation assistée par ordinateur dépend de plusieurs facteurs dont l'expérience du photo-interprète, son appréciation de la ligne de référence elle-même conditionnée par la résolution et la qualité radiométrique des images (MOORE, 2000 ; BOAK et TURNER, 2005). Par conséquent, la ligne acquise par cette méthode est approximative. Dans le but de réduire la portée de cette incertitude sur les taux d'évolution, ont été exclues des mesures, les zones où les lignes de référence étaient trop ambiguës, donc difficiles à tracer du fait d'un front de végétation très échancré (images de 1978 notamment, Photo 12). Sur les prises de vue des autres missions, la limite de végétation ou limite supérieure de la plage est bien marquée.

Photo 12 : Echancrure du front de végétation au sud de Mballing.



(Extrait d'une photographie aérienne, mission IGN78.ND28-XIII-XV/600, cliché n°163)

Dans tous les secteurs où les lignes de référence étaient suffisamment nettes pour être numérisées, la précision de l'interprétation a été estimée après les opérations de numérisation. En effet, comme l'ont indiqué plusieurs auteurs, le positionnement du trait de côte au moment de la phase de numérisation par un même opérateur peut être extrêmement variable dans le temps (THIELER ET DANFORTH, 1994a ; COYNE et al, 1999 ; DURAND, 2000 ; FLETCHER et al., 2003). Cette précision dépend de la perception de l'information par la personne à un moment donné.

Elle peut aussi relever de considérations techniques, comme le type d'ordinateur, de la luminosité d'écran, etc., qui donnent à l'opérateur une vision différente des objets. Evaluer l'erreur relative au processus de numérisation reste délicate car cela revient à mesurer le degré de subjectivité du photo-interprète. Nous nous sommes inspirés de la démarche de COYNE et al. (1999) et de FLETCHER et al. (2003) qui consiste à répéter la numérisation plusieurs fois pour estimer la marge d'erreur induite lors de la numérisation à l'écran. Pour ce faire, dans un premier temps, pour chaque type de ligne de référence et selon la netteté des images, des segments représentatifs ont été numérisés à plusieurs reprises (4 à 10 fois) à quelques jours d'intervalles.

Dans un deuxième temps, les différentes lignes numérisées ont été comparées. Ce processus a permis de calculer les écart-types et les variations moyennes des décalages enregistrés lors du positionnement des lignes de référence (Tableau 2). D'après THIELER et DANFORTH (1994a) ; MOORE et GRIGGS (2002), l'erreur induite par l'opérateur lors de la numérisation suit une distribution normale.

Nous avons ainsi fixé l'erreur de positionnement à la valeur correspondant à la borne supérieure de l'intervalle compris entre la moyenne plus ou moins deux écart-types qui concentre 95% des écarts constatés pour chaque date. On a additionné ensuite la valeur obtenue et la taille du pixel (limite de résolution des images) pour définir l'erreur commise en matière de positionnement des lignes de référence numérisées conformément aux recommandations de MOORE et GRIGGS (2002).

Tableau 2 : Précision de la numérisation des lignes de référence et estimation de l'erreur sur les images de 1954, 1978 et 1997

Date des prises de vue	Ligne de référence	Nombre de mesures	Moyennes des écarts (m)	Ecart-type (m)	Moyenne +2 écarts-types (m)	Marge d'erreur (moyenne +2 écarts-types + taille du pixel) (m)
1954	Limite supérieure de la plage	663	0,89	0,22	1,33	2,33
1978		617	1,04	0,32	1,68	2,68
1997		641	0,51	0,27	1,05	2,05

Globalement, nous avons obtenu une précision de 2 à 2,6 m.

4. Synthèse des erreurs et définition de la marge d'erreur globale

Compte tenu des incertitudes liées à la précision du GPS, au calage des images et à l'extraction des lignes de référence, avant le calcul des taux d'évolution, une marge d'erreur globale et par période a été définie. Cette marge d'erreur est le résultat du cumul de l'ensemble des erreurs qui ont été estimées précédemment (Tableau 3) et permettent de filtrer les valeurs d'évolution inférieures à la marge d'erreur pour retracer les fluctuations pluri-décennales de la position du trait de côte dans notre site d'étude.

Tableau 3 : Estimation de la marge d'erreur globale

Période d'étude	Ligne de référence	Marge d'erreur (m)
1954 – 1978	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation	±11,01
1978 – 1997	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation (1978) et/ou à la limite des maisons (1997)	±10,73
1954 – 1997	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation (1954, 1978) et/ou à la limite des maisons (1997)	±14,06

IV. EVOLUTION DIACHRONIQUE DE LA POSITION DU TRAIT DE CÔTE DE 1954 A 2007

L'évolution spatio-temporelle du linéaire côtier retracée à partir de l'interprétation d'images aériennes de 1954, 1978 et 1997 laisse apparaître une tendance évolutive contrastée dans l'espace et dans le temps.

4.1 EVOLUTION DE 1954 A 1978 (FIGURE 5)

La comparaison des positions de la limite de végétation entre 1954 et 1978 laisse apparaître une alternance de secteurs en pro gradation et de segments en érosion. Sur l'ensemble des 2221 transects analysés le long des 17 km de côte étudiés, le bilan est négatif, en moyenne -0,64 m/an. En effet, 75 % du littoral sont en érosion (12,8 km, 1646 transects) et seulement 25 % sont en pro gradation (4,2 km, 575 transects). C'est au droit des espaces reboisés, à savoir le centre de l'IRD de Mbour, le domaine de Nianing et le Club Aldiana, que l'on enregistre des avancées du littoral.

Au droit du centre de l'IRD, le taux de progression est de 0,60 m/an mais la marge d'erreur affecte 53 % des mesures. Le reboisement de la dune après 1954 semble avoir contribué à la stabilisation et à la progression de la dune bordière. Il en est de même au droit du Club Aldiana et du domaine de Nianing avec un taux de 0,67 m/an. Toutefois, à la différence du premier secteur, les valeurs inférieures à la marge d'erreur représentent 75 % des mesures. En plus du reboisement de la zone, cette avancée est à mettre au crédit de l'épi construit en 1971 à l'extrémité méridionale du club pour préserver la plage de ce lieu de villégiature.

Quant aux sections de côte en érosion, elles concernent, d'une part, un long segment allant du sud du centre de l'IRD jusqu'au domaine de Nianing et d'autre part un deuxième secteur s'étirant du sud de l'épi du Club Aldiana à la Pointe Sarène. Les vitesses de recul varient entre -0,7 et -1 m/an dans ces zones. Au cours de cette période, la zone de Warang et le sud immédiat de l'épi semble être les zones les plus vulnérables à l'érosion marine.

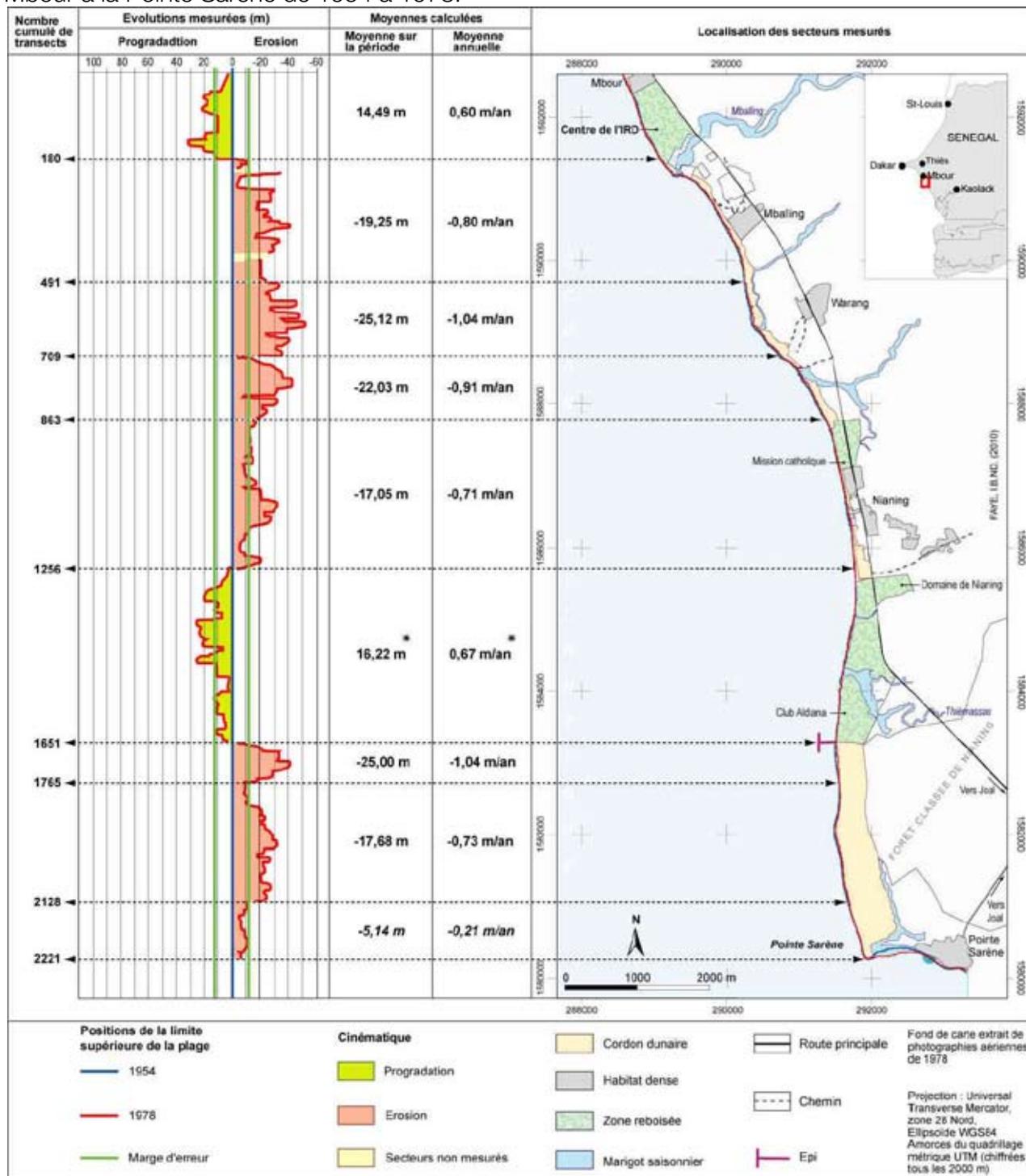
4.2 EVOLUTION DE 1978 A 1997 (FIGURE 6)

Au regard de la courbe d'évolution de la figure 6, la côte laisse apparaître une succession des sections en érosion et en pro gradation comme dans la période précédente. Le bilan global est aussi négatif (-1,14 m/an sur 2128 transects analysés), mais à la différence de la période d'étude précédente, les transects en pro gradation ne concernent plus que le secteur allant du sud de la Résidence Nianing à l'épi du Club Aldiana, soit 1,6 km (227 transects) alors que les secteurs en érosion couvrent 15,1 km au total (1901 transects).

En d'autres termes, 9,5 % de linéaire sont en accumulation et 90,4 % en recul. Seul le secteur au nord immédiat de l'épi du Club Aldiana est en pro gradation avec un taux de 0,81 m/an. Cependant la marge d'erreur englobe 84 % des valeurs d'évolution. Apparemment, l'épi a continué de jouer son rôle en favorisant l'engraissement de la plage de l'hôtel.

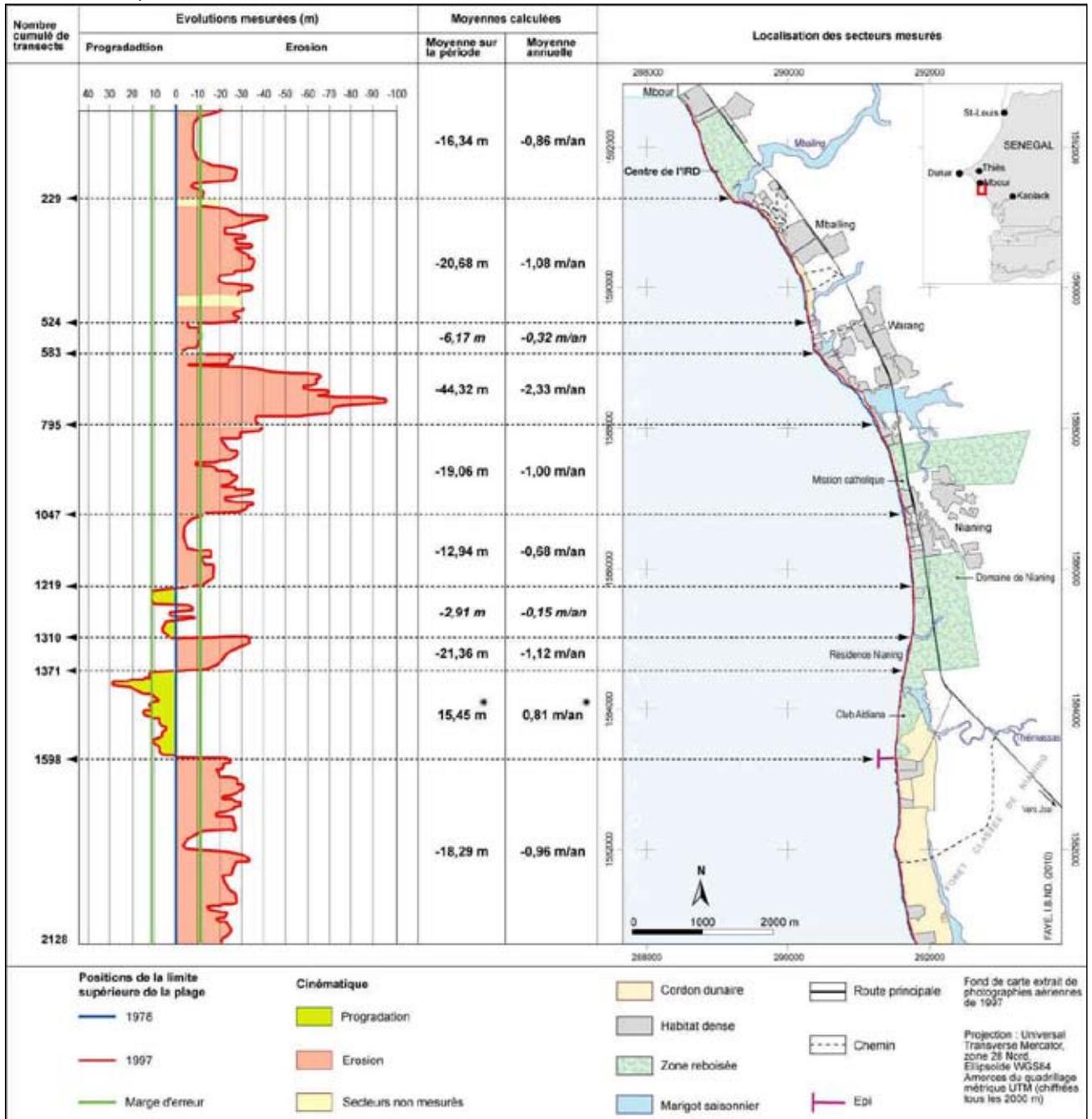
On observe également au nord de la Résidence Nianing, un secteur de transition où les traits de côte se chevauchent, ce qui se traduit par une évolution très faible (-2,91 m). Dans tous les autres secteurs, le recul est manifeste, particulièrement au sud de Warang (-2,33 m/an) et au droit de la Résidence Nianing (-1,12 m/an). En dehors de cette zone, des secteurs avec des taux d'érosion de l'ordre du mètre s'observent entre Mballing et Warang (-1,08 m/an) ainsi qu'au nord de la mission catholique de Nianing (-1,00 m/an). Le taux d'érosion est aussi voisin de 1 m du sud de l'épi du Club Aldiana jusqu'aux environs de la Pointe Sarène (-0,96 m/an). Les vitesses de recul les plus faibles sont localisées dans les secteurs de Nianing et du centre de l'IRD (-0,6 à -0,8 m/an).

Figure 5 : Evolution sectorielle de la limite supérieure de la plage (limite de végétation) de Mbour à la Pointe Sarène de 1954 à 1978.



(En italique les secteurs où l'ensemble des mesures sont inférieures à la marge d'erreur. Les astérisques concernent les segments où plus de ¾ des mesures tombent dans la marge d'erreur)

Figure 6 : Evolution sectorielle de la limite supérieure de la plage (limite de végétation et/ou des maisons) de Mbour à la Pointe Sarène de 1978 à 1997.



(En italique les secteurs où l'ensemble des mesures sont inférieures à la marge d'erreur. Les astérisques concernent les segments où plus de ¾ des mesures tombent dans la marge d'erreur)

4.3 EVOLUTION ENTRE 1954, 1978 ET 1997 PAR PHOTO-INTERPRETATION (FIGURE 7)

Les taux obtenus par régression linéaire à partir des écarts entre les traits de côte de 1954, 1978 et 1997 indiquent une évolution moyenne de -0,76 m/an pour les 16,6 km couverts par ces trois entités linéaires. Néanmoins, deux tendances se distinguent. Les secteurs en progradation s'étirent sur 3,5 km et se localisent au droit du centre de l'IRD de Mbour, du domaine de Nianing et du Club Aldiana.

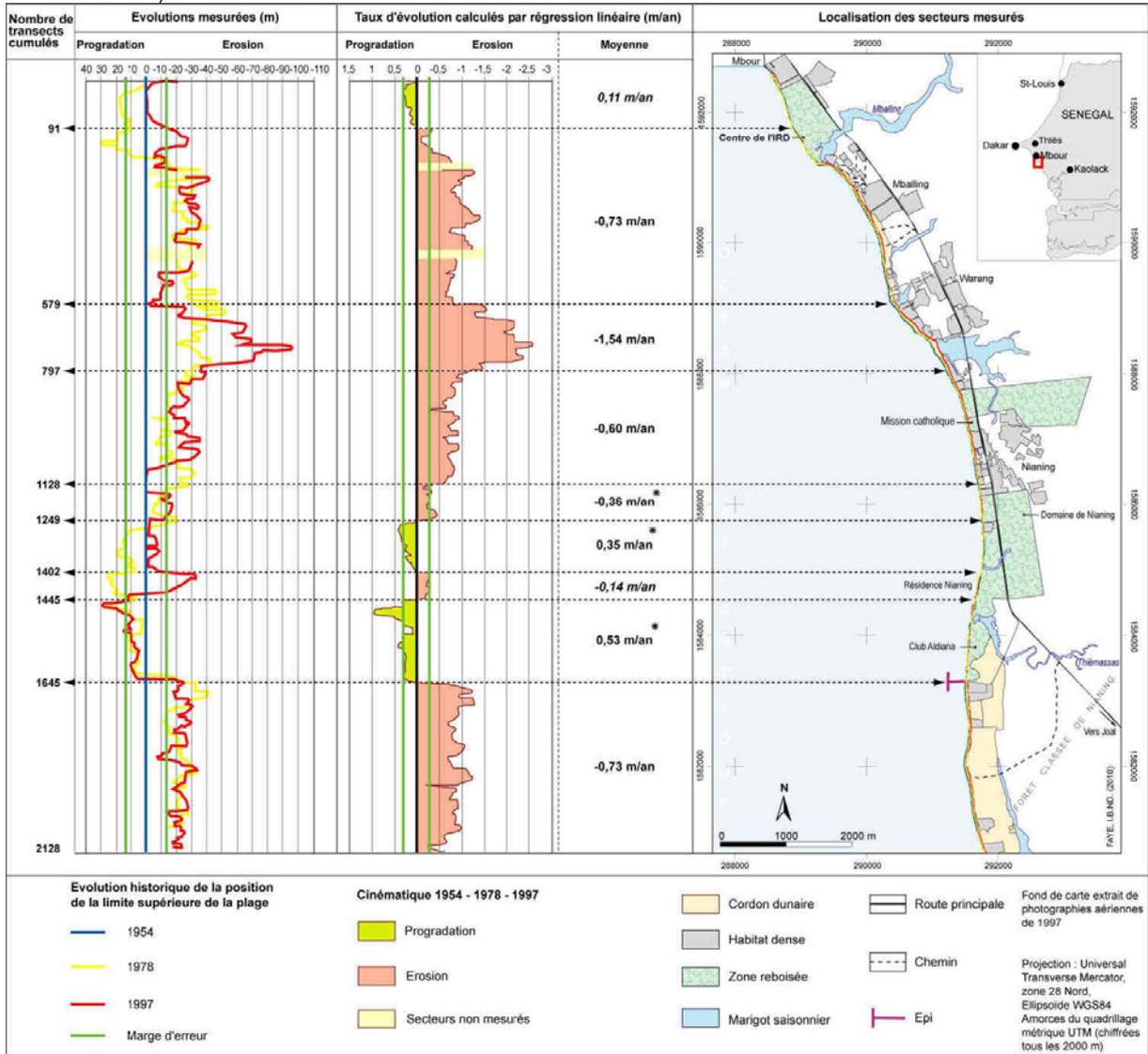
Dans ces secteurs reboisés, même si les calculs montrent des bilans positifs, les valeurs d'évolution sont faibles (0,17 m/an en moyenne) et la marge d'erreur (0,32 m/an) concerne, par exemple, 100 % des taux au niveau du centre de l'IRD de Mbour, 86 % au droit du domaine de Nianing et 78 % au droit du Club Aldiana. Les deux premiers secteurs (centre de l'IRD et domaine de Nianing) ont alterné une phase de progradation (1954-1978) suivie d'une phase d'érosion (1978-1997) tandis que le segment au droit du Club Aldiana est en progression ininterrompue depuis 1954. Cependant, la forte proportion de la marge d'erreur limite la foi que l'on peut accorder aux taux d'évolution.

Il faut signaler aussi que la végétation qui nous a servi de repère dans ces secteurs sur les images de 1978 et 1997 est artificielle, donc son évolution peut être le résultat d'activités anthropiques (reboisement ou destruction) indépendamment des variations du bilan sédimentaire côtier. Les secteurs en érosion (-0,82 m/an en moyenne) représentent 13,1 km de linéaire côtier et concernent la section de côte allant de la moitié sud du centre de l'IRD jusqu'au nord du domaine de Nianing ainsi que le sud de l'épi du Club Aldiana.

Dans la première zone, c'est aux abords de Warang que l'on trouve les taux d'évolution les plus élevés, soit -1,54 m/an. De part et d'autre de ce secteur, les vitesses d'érosion sont de -0,73 m/an entre Mballing et Warang et de -0,60 m/an du sud de Warang à Nianing. Au sud de l'épi du Club Aldiana, le littoral a reculé de -0,73 m/an entre 1954 et 1997. Au total donc, ce sont 21 % du linéaire côtier étudié qui ont progressé alors que 79 % ont reculé de 1954 à 1997.

Si on compare les deux périodes d'étude, dans les secteurs en érosion, on constate une accélération des vitesses d'érosion. Entre 1954 et 1978, les taux d'érosion étaient compris entre -0,6 m/an et -1,04 m/an alors qu'entre 1978 et 1997, ils oscillaient entre -0,6 m/an et -2,33 m/an. Il n'existe pas de travaux antérieurs portant sur notre secteur, mais les taux obtenus sont supérieurs à ceux proposés par DABO (2006) pour la zone de Mbour à Saly. Cet auteur avait évalué le recul de cette portion de littoral jouxtant notre zone d'étude à -0,45 m/an en utilisant des photographies aériennes de 1946 à 2001.

Figure 7 : Evolution sectorielle de la limite supérieure de la plage (limite de végétation et/ou des maisons) de Mbour à la Pointe Sarène de 1954 à 1997.



(En italique les secteurs où l'ensemble des mesures sont inférieures à la marge d'erreur. Les astérisques concernent les segments où plus de 3/4 des mesures tombent dans la marge d'erreur)

4.4 COMPARAISON DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE EXTRAIT DES PRISES DE VUE AERIENNES DE 1997 ET DES POINTS GPS RELEVES EN 2007

Les écarts entre les points relevés au GPS en août 2007 et le trait de côte de 1997 laissent à penser que la tendance constatée en 1997 se poursuit (érosion sur tout le littoral, sauf au nord immédiat de l'épi du Club Aldiana). Dans les zones habitées, les décalages varient entre -1 et -4 m au droit du centre de l'IRD de Mbour, -1,5 et -6,5 m entre Mballing et Warang, -2 et -13,73 m à Nianing, -1 et -3,64 m au domaine de Nianing, +1 et + 4,6 m au droit du Club Aldiana.

Au sud de ce secteur par contre, le long de la dune bordière, les écarts sont très importants (Figure 8). Le renflement du tracé du rivage que l'on peut observer sur les images de 1954, 1978 et 1997 semble avoir été considérablement érodé durant ces 10 dernières années. Dans cette zone, nous avons observé en août 2007 de nombreux filaos déracinés sur le haut de plage (Photo 13), preuves, d'une évolution régressive du littoral. De même, nous avons constaté la destruction ou la dégradation de quelques maisons à Nianing (Photo 14). Lors d'une récente visite de terrain en juillet 2010, un peu plus au sud de ce village à quelques centaines de mètres au nord de la Pointe Sarène, la présence sur le front de mer d'un enrochement et de constructions effondrées sur la plage (Photo 15) suggère une intense activité érosive dans ce secteur.

Figure 8 : Comparaison entre les positions de la limite supérieure de la plage extraite des images aériennes de 1997 et celle levée au GPS en juillet 2007 au sud de l'épi du Club Aldiana

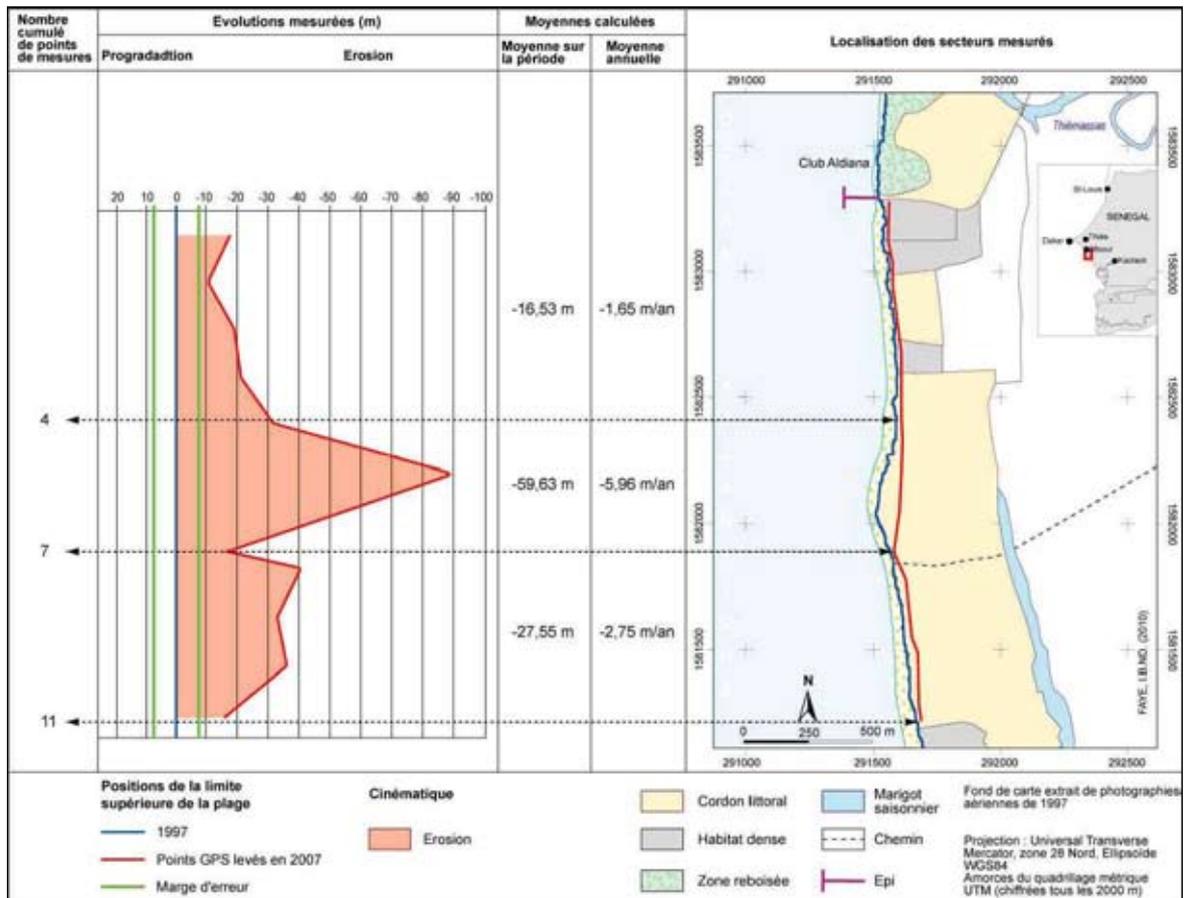


Photo 13 : Filaos déracinés au sud de l'épi du Club Aldiana.



Photo prise en direction du nord, le 03-08-2007.

Photo 14 : Effondrement de maisons en front de mer à Nianing sous l'effet de l'érosion côtière.



Photo prise en direction du sud, le 03-08-2007.

Photo 15 : Dégradation d'infrastructures touristiques à proximité de la Pointe Sarène du fait de la régression du trait de côte.



Photo prise en direction du nord, le 01-07-2010

4.5 DISCUSSION SUR LES CAUSES PROBABLES DES EVOLUTIONS OBSERVEES

Les tendances évolutives observées depuis 1954 peuvent avoir une origine naturelle et/ou anthropique. Pour ce qui est des facteurs naturels, les phénomènes d'érosion enregistrés sur l'ensemble du site de Mbour à la Pointe Sarène trouvent une part d'explication dans le déficit sédimentaire affectant la Petite Côte dont le volume du transit sédimentaire ne dépasse pas 25 000 m³ /an selon BARUSSEAU (1980) alors que 450 000 m³ transitent annuellement sur la côte au nord de la presqu'île du Cap Vert. Par ailleurs, il n'existe aucun stock sédimentaire (champ dunaire, cours d'eau,...) susceptible d'alimenter en sédiments le littoral de la Petite Côte au moment où les petits marigots côtiers saisonniers débouchant sur l'Atlantique sont en cours d'assèchement suite à la baisse de la pluviométrie. D'un point de vue temporel, la comparaison des périodes d'étude laisse apparaître une recrudescence des phénomènes érosifs entre 1954 – 1978 et 1978 – 1997 : -0,64 m/an contre -1,14 m/an.

Les phénomènes d'accumulation, en revanche, ont connu une tendance inverse. Dans la première période étudiée (1954 – 1978), deux segments de côte étaient en progradation (Centre l'IRD de Mbour, domaine de Nianing – Club Aldiana) alors que dans la deuxième période (1978 – 1997), seul le rivage devant le Club Aldiana était en pro gradation, les autres zones étaient en érosion.

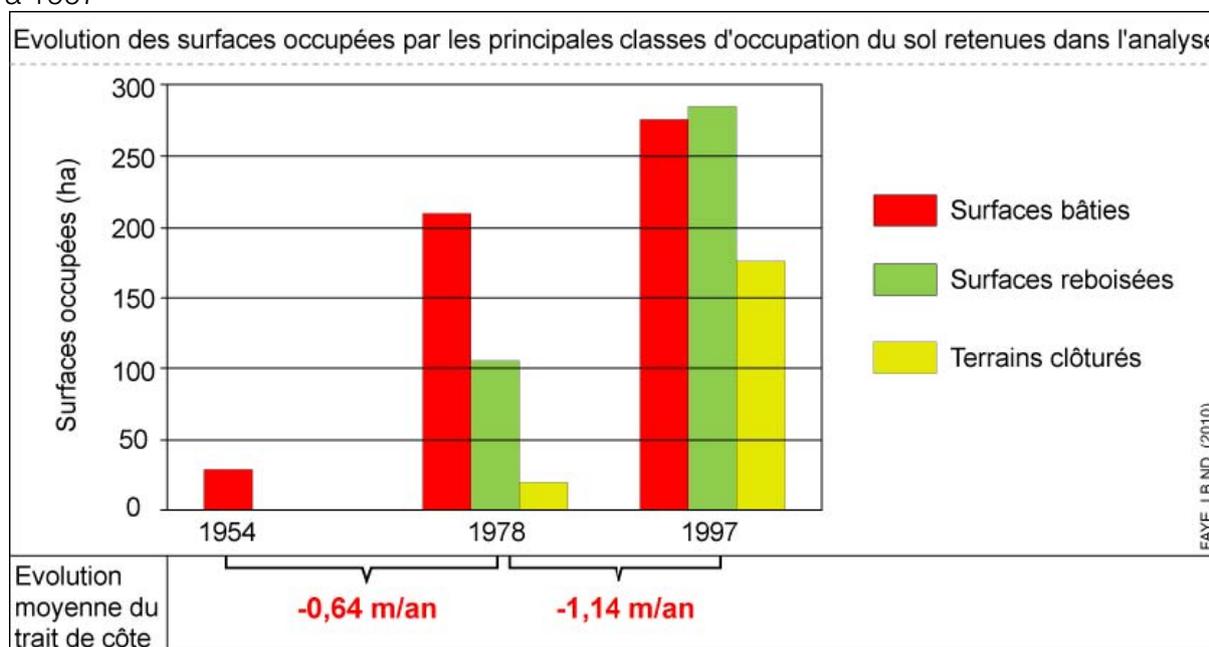
Cette accentuation des phénomènes d'érosion entre les périodes d'étude résulterait peut-être d'une augmentation de l'énergie de houle ou d'une fréquence accrue des houles du sud-ouest qui ont un effet dévastateur sur la côte comme mentionné précédemment. Toutefois, le manque de données sur les conditions d'agitation ne permet pas de confirmer cette hypothèse.

Concernant les facteurs anthropiques, nous avons essayé de rechercher des corrélations entre l'évolution du trait de côte et l'anthropisation. La figure 9 qui synthétise les résultats montre une progression des trois principales classes d'occupation du sol (surfaces bâties, surfaces reboisées, terrains clôturés) dans la bande de terre retenue pour notre analyse⁷.

Les surfaces bâties ont considérablement augmenté entre 1954, 1978 et 1997 de même que les terrains lotis, symbole d'une pression foncière accrue sur le littoral aux dépens des dunes littorales ; on a enregistré parallèlement une accélération de la vitesse d'érosion du littoral. Ce «boom» immobilier peut avoir un impact négatif sur le bilan sédimentaire de la côte dans la mesure où le sable marin est un matériau de construction très prisé par les promoteurs et les particuliers.

On note également une extension très importante des surfaces reboisées entre 1978 et 1997. Signalons au passage que ces périmètres qui ont fait l'objet de reboisement pour fixer le cordon dunaire correspondent en général à des secteurs en pro gradation ou à faible évolution durant la période 1954 – 1997.

Figure 9 : Evolution du trait de côte et des principales classes d'occupation du sol de 1954 à 1997



⁷ Une bande de 2 km à partir du trait de côte (limite supérieure de la plage)

V. SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS

Période	Tendance évolutive observée	Taux d'évolution	Causes probables	Conséquences socio-économiques
1954 – 1978 – 1997	<p>► Accumulation (centre de l'IRD et du domaine de Nianing à l'épi du Club Aldiana)</p>	0,17 m/an	<p>Stabilisation du cordon dunaire littorale par le reboisement Blocage du transit sédimentaire par l'épi en amont-dérive</p>	<p>Maintient du tourisme balnéaire et des activités annexes (guide, vente d'objets d'arts, etc.)</p>
	<p>► Erosion (du sud du centre de l'IRD de Mbour à Nianing et du sud de l'épi du Club Aldiana à la Pointe Sarène)</p>	-0,82 m/an	<p>Déficit sédimentaire global affectant la Petite Côte, absence de stock sédimentaire qui exclu toute possibilité d'apports sédimentaires dans un contexte d'assèchement des marigots côtiers, accroissement des surfaces bâties sur le littoral et du prélèvement de sable marin sur la plage, déficit sédimentaire en aval dérive du fait du blocage de la dérive par l'épi du Club Aldiana, contournement de l'extrémité des cordons d'encrochement par les vagues déferlant à la côte</p>	<p>Destruction ou dégradation de concessions, d'infrastructures touristiques, ..., hypothèque du tourisme balnéaire et des activités annexes, inondation des concessions côtières, des dépressions d'arrière cordon dont certaines font actuellement l'objet de lotissement dans la zone de Warang en particulier, érosion du cordon dunaire, déracinement des espèces végétales reboisées pour fixer les dunes littorales</p>
	<p>► Accélération de la vitesse d'érosion du littoral entre les périodes 1954 – 1978 et 1978 – 1997 ► Réduction des phénomènes de progradation entre ces deux périodes</p>	<p>► Erosion 1954 – 1978 : -0,64 m/an 1978 – 1997 : -1,14 m/an</p>	<p>Accentuation du déficit sédimentaire le long du littoral Augmentation probable de l'énergie et de la fréquence accrue des houles surtout de sud-ouest</p>	

VI. RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Les réponses à l'érosion marine peuvent prendre plusieurs formes (IBE et QUELENNEC, 1989 ; PASKOFF, 2000a ; 2000b ; PASKOFF, 2004) :

- l'inaction : revient à accepter l'avancée de la mer et laisser libre court au phénomène naturel. C'est une option envisageable sur les portions de côte peu occupées. Toutefois, dans les sections de côte très aménagées, ou faisant l'objet de futurs plans d'aménagements, il pourrait être nécessaire de prendre quelques mesures de gestion et de protection ;
- le repli stratégique : c'est la meilleure solution d'après PASKOFF (2000b), elle passe par des politiques d'adaptation à travers le déménagement et la reconstruction des aménagements exposés hors de portée des flots mais aussi l'adoption de politiques de réglementation des aménagements côtiers et des usages de l'espace littoral d'une manière générale. Cela nécessite a priori la définition de set-back lines (ligne de repli) et l'instauration d'un zoning du littoral. Les résultats de cette étude pourraient être utilisés dans cette optique ;
- le rechargement sédimentaire des plages : l'alimentation artificielle en sédiments afin d'exhausser et de préserver le profil des plages est une stratégie de réponse efficace mais très coûteuse. Elle a déjà été mise en œuvre dans certains pays ouest-africains comme la Gambie ou le Ghana. L'un des principaux problèmes qu'elle pose est la disponibilité d'un gisement de sédiments d'une granulométrie compatible avec celle de la plage. Cela peut-être parfois problématique d'où le développement de nouveaux procédés d'alimentation pour maintenir l'équilibre sédimentaire des plages. Ces derniers visent à retenir les sédiments susceptibles d'être emportés par les courants actifs durant le déferlement. Parmi ces nouvelles techniques, déjà éprouvées sur certains littoraux de la planète, on peut retenir les systèmes Ecoplage® et Stabiplage® élaborés par des firmes françaises et qui tendent à inhiber l'action érosive des courants de la nappe de retrait. Ecoplage® un système mécanique mis au point par la société du même nom. Equipé de drains qui drainent l'eau du jet de rive, il est enterré sous la plage et permet de filtrer les particules en suspension dans la lame d'eau qui déferle et qui s'infiltrer. La plage est ainsi alimentée en sédiments par ces rétentions. Le Stabiplage® de la société Espace Pur est aussi un système mécanique conçu sur mesure et constitué d'ouvrages de forme longitudinale cylindrique, perméables, faits en matériaux géocomposites et injectés de particules sédimentaires. Tout en assurant le captage, l'accumulation et le maintien en place des sédiments, il s'intègre bien dans le paysage puisqu'il peut être installé sous la plage ou le pied de dune pour protéger, consolider le cordon dunaire. Les expériences menées avec ces deux systèmes sur des plages françaises et indiennes ont donné des résultats satisfaisants (VITTAL HEDGE, 2004 ; CARIOLET et al., 2008 ; FATTAL et WALKER, 2008) ;

- la protection «dure» : elle fait appel à des ouvrages de défense passive de type murs, perrés, digues, enrochements, etc. ou des ouvrages de défense active, type épis, brise-lames, récifs artificiels, etc.. Leur usage peut se justifier dans les zones à forts enjeux socio-économiques. Toutefois, l'expérience a montré que ces ouvrages ne sont que des solutions passagères qui souvent aggravent ou déplacent les problèmes d'érosion dans les zones voisines non protégées. Même s'ils mettent à l'abri les infrastructures menacées, ils réclament un entretien régulier (renforcement, exhaussement) pour leur permettre de jouer efficacement leur rôle.
- A ces différentes options de lutte contre l'avancée de la mer, PASKOFF (2004) mentionne une autre attitude possible à savoir la contre-attaque par le biais de remblaiement, d'endiguement et d'aménagement de terre-pleins pour gagner des surfaces sur l'océan. C'est une option courante dans les petits états ou les pays à espace vital très réduits (Monaco, Singapour, Japon, etc.). Cette un choix financièrement très coûteux dont l'opportunité peut paraître contestable dans nos pays sous-développés qui ne manquent pas d'espace.

De toute cette gamme de mesures palliatives aux problèmes d'érosion, les usagers de l'espace littoral de Mbour à la Pointe Sarène ont déjà mis en pratique quelques-unes d'entre elles pouvant servir d'exemples futurs en tenant compte de leurs impacts environnementaux :

- la défense lourde, «dure» avec des structures composées essentiellement d'enrochements (Photo 16) qui semblent être efficaces au droit des luxueux établissements qu'ils protègent tout comme leurs variantes constituées de murs renforcés par des enrochements, surtout dans le secteur de Warang où l'érosion a pris des propositions inquiétantes (Photo 17);
- la fixation des dunes littorales par des actions de reboisement comme en témoigne les nombreux espaces reboisés présents sur le front de mer ;
- l'adaptation à travers des constructions sur pilotis (Photo 18) pour les abriter de l'invasion marine ;
- l'abandon des constructions touchées par l'érosion marine (Photo 19);
- le laisser-faire, stratégie que l'on retrouve dans la zone de Mballing, de Nianing et du sud de l'épi du Club Aldiana à la Pointe Sarène excepté le petit cordon d'enrochement à quelques centaines de mètres au nord de celle-ci. Dans ces secteurs, il faudrait également adopter des mesures préventives soutenues par la concertation, la sensibilisation des usagers de l'espace littoral à la vulnérabilité et aux risques inhérents à l'érosion côtière ; opter donc pour la gestion du phénomène ou le repli stratégique plutôt que la résistance «dure»⁸. En effet, au vu des impacts négatifs constatés des ouvrages de protection comme les enrochements ou les épis ainsi que du coût économique de leur entretien, ces mesures de protection sont à proscrire sauf peut-être pour les hôtels, les infrastructures touristiques dont l'activité est intrinsèquement liée à la préservation des plages environnantes.

⁸ Cela passe avant tout par une évaluation du coût économique des enjeux de l'érosion côtière (Cf. Avant-projet, p.38)

Photo 17 : Aperçu d'un mur renforcé par un cordon d'enrochement.
Photo prise à Warang en direction du nord, le 01-07-2010.



Photo 18 : Campement touristique sur pilotis pour éviter les submersions marines.
Photo prise à Warang en direction du nord, le 03-08-2007.

Photo 19 : Concessions abandonnées au bord d'une plage en forte érosion.
Photo prise au sud de l'épi du Club Aldiana en direction du sud, le 03-08-2007.



Aussi en termes de perspectives, cette étude constitue la première menée sur ce segment de côte comme nous l'avons signalé précédemment.

Basée essentiellement sur des méthodes d'observation indirecte de l'évolution côtière sur le long terme, elle doit être complétée, affinée par une analyse de la cinématique littorale sur le court terme avec des mesures de terrain, en particulier des levés topographiques de la position du trait de côte combinés à un suivi morpho-sédimentologique des plages selon une périodicité à définir (mensuelle, saisonnière, etc.).

Ce suivi est conditionné par l'acquisition d'appareils de topographie comme un DGPS ou un Scanner laser terrestre dont l'usage pourrait être mutualisé dans le cadre d'un futur observatoire régional du littoral.

EVALUATION SOCIO-ECONOMIQUE DES ENJEUX DE L'EROSION CÔTIÈRE ENTRE MBOUR ET POINTE SARENE

Contexte

L'évolution régressive du trait de côte prend des proportions inquiétantes dans certaines portions de côte entre Mbour et Pointe Sarène. Il s'agit surtout des secteurs de Warang, Nianing et du sud du club Aldiana qui présentent de forts enjeux socio-économiques au vu de l'importance des aménagements côtiers présents ainsi que de la pression démographique et foncière accrue que subit cette zone. Il est donc nécessaire de mener une analyse de la valeur économique des biens et des populations menacées par l'érosion côtière ; cette analyse devant servir de support à une éventuelle politique de gestion du risque d'érosion et éventuellement de relocalisation des populations si nécessaire.

Missions du consultant

- Etablissement d'un état des lieux de l'occupation et de l'utilisation de l'espace littoral
- Cartographie des surfaces vulnérables et des biens menacés par l'érosion côtière⁹
- Estimation de la valeur de ces biens
- Analyse socioculturelle des liens entre les populations locales et leur espace afin de déceler, d'anticiper des réticences éventuelles et de mieux identifier des zones de relocalisation potentielles

Etude des investissements prioritaires à réaliser en cas de relocalisation-Réflexion sur le zonage de l'espace littoral

Profil du consultant

Cabinet ou bureau d'études pluridisciplinaires ayant des compétences éprouvées en analyse spatiale, SIG, dynamique côtière, économie et sociologie

Livrables

- Etat de référence de l'occupation des sols et une estimation du coût économique des enjeux de l'érosion côtière, d'une éventuelle relocalisation des populations exposées et des aménagements menacés
- Proposition de stratégies de gestion du recul du linéaire de côte et de préservation des zones côtières encore vierges de tout aménagement

Durée prévisionnelle

6 à 8 mois après le démarrage de l'étude avec des réunions d'étape mensuelles entre le consultant et le maître d'œuvre pour assurer un bon suivi des travaux

⁹ Les résultats de ce travail peuvent être utilisés comme input pour cerner l'évolution régressive du linéaire côtier

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERS F.J., BYRNES M.R. (1991) Accuracy of shoreline change rates as determined from map and aerial photographs. *Shore and Beach*, vol. 59, n°1, p. 17 -26.

AUGUST P., MICHAUD J., LABASH C., SMITH C. (1994) GPS for environmental applications: accuracy and precision of locational data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, vol. 60, n°1, p. 41 -45.

BA A. (1993) La gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal. In (DIAW A.T., BA A., BOULAND P., DIOUF P.S., LAKE L.-A., MBOW M.-A., NDIAYE P., THIAM M.D., Eds) *Gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal : Actes de l'atelier de Gorée 27-29 juillet 1992*. UICN, ISRA, IFAN, p. 15 -22.

BAKIS H., BONIN M. (2000) *La photographie aérienne et spatiale*. Collection Que sais-je? Presses Universitaires de France, Paris, 127 p.

BARUSSEAU J.P. (1980) Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous l'action des houles entre Saint-Louis et Joal (Sénégal). *Bulletin de Liaison, ASEQUA*, n°58-59, p. 61 -39.

BARUSSEAU J.P. (1985) Phénomènes d'érosion des côtes en Afrique de l'ouest (Sénégal et Mauritanie). Processus de sédimentation et d'érosion sur le littoral. In (CECCALDI H.J., CHAMPALBERT G., Eds) *Actes du colloque pluridisciplinaire franco-japonais d'océanographie. Vie marine, Fascicule 1 / Océanographie physique et dynamique sédimentaire*. Annale Fondation Océanographique Ricard, Marseille, p. 63 -74.

BLIVI A. (2005) Erosion côtière dans le golfe de Guinée en Afrique de l'ouest : exemple du Togo. Document électronique, www.nesda.kabissa.org/Rapports/Erosion.pdf, consulté le jeudi 17 avril 2008.

BOAK E. H., TURNER I. L. (2005) Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n°4, p. 688 -703.

BOUAKAZ A. (1980) Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais (sud de la Presqu'île du Cap Vert). Thèse de Doctorat en Géologie et applications au domaine marin, Université de Bordeaux 1, Bordeaux, 145 p. + Annexes.

BYRNES M. R., HILAND M.W. (1994) Shoreline position and nearshore bathymetric change. In (KRAUS N.C., GORMAN L.T., POPE J., Eds) *Kings Bay coastal and estuarine monitoring and evaluation program*. Army Corps of Engineers Technical Report, CERC-94-9, p. 61 -143.

CARIOLET J.-M., SUANEZ S., CAROL F., MAGNE R. (2008) Evaluation de la technique STABIPLAGE® mise en place sur deux plages du Finistère : les Sables Blancs à Plobannalec-Lesconil-Loctudy et Boutrouilles à Kerlouan. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14 – 16 octobre 2008, Sophia Antipolis, p. 201 – 210.

CHEVALIER R. (1971) La photographie aérienne. Collection U2. Librairie Armand Collin, Paris, 233 p.

COYNE M.A., FLETCHER C. H., RICHMOND B.M. (1999) Mapping coastal erosion hazard areas in Hawaii: Observations and errors. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 28, p. 171 -184.

CROWELL M., LEATHERMAN S., BUCKLEY M.K. (1991) Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, vol. 7, n°3, p. 839 -852.

C.S.E. (2004) Etude et cartographie du phénomène d'érosion côtière dans la zone de Saly Portudal. Rapport SAPCO, Dakar, 28 p.

DABO B. (2006) Erosion côtière au Sénégal : l'exemple de Mbour. Thèse de Doctorat de Troisième cycle en Géosciences, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 150 p.

DE GEFFRIER M.G., MILLIAU M.J. (1946) Mission hydrographique de la Guinée française, de la Mauritanie et du Sénégal. *Annales Hydrographiques*. 3e série, tome seizième, années 1938-1939, Service hydrographique de la Marine, Paris, Imprimerie Nationale, p. 119 -183.

DIALLO S. (1982) Evolution géomorphologique du littoral sur la Petite Côte à Rufisque. Mémoire de Maîtrise, Université de Dakar, Dakar, 124 p.

DIEYE A. (2000) Traitement informatique de photographies aériennes combiné à l'utilisation de systèmes d'information géographique pour l'étude de la ligne de rivage entre Rufisque et Bel Air durant la période 1968 -1997. Mémoire de D.E.A en Géosciences, Option : Environnements sédimentaires, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 64 p.

DOLAN R., HAYDEN B. P., HEYWOOD J. (1978) A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, vol. 2, p. 21 -39.

DOLAN R., FENSTER M. S., HOLME S.J. (1991) Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, vol. 7, n°3, p. 723 -744.

DURAND P. (1998) Cinématique d'un littoral sableux à partir de photographies aériennes et de cartes topographiques. Exemple du littoral d'Argelès -Plage à Saint -Cyprien (Roussillon -France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°8, p. 155 -166.

DURAND P. (2000) Approche méthodologique pour l'analyse de l'évolution des littoraux sableux par photo-interprétation. *Photo-Interprétation*, n°2000/1-2, p. 3 -18.

FALL B. (2004) Le littoral de Yoff. Evolution morphosédimentaire et changements à long terme de la ligne de rivage. Thèse de Doctorat de troisième cycle de Géosciences. Option : Environnements sédimentaires, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 165 p.

FATTAL P., WALKER P. (2008) Le drainage de plage : une méthode douce de stabilisation d'un littoral meuble – Etude de cas aux Sables d'Olonne (Vendée). Xèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 14 – 16 octobre 2008, Sophia Antipolis, p. 243 – 252.

FAYE I. B. ND. (2010) La dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux d'Afrique de l'ouest. Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Thèse de Doctorat, Ecole doctorale des Sciences de la Mer, Institut Universitaire Européen de la Mer – Université de Bretagne Occidentale / Brest, 393 p.

FAYE I. B. ND., HENAFF A., GOURMELON F., DIAW A.T. (2008) Evolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation. *Norois*, N°208, 2008/3, p. 11–27.

FENSTER M. S., DOLAN R., ELDER J. F. (1993) A new method for predicting shoreline positions from historical data. *Journal of Coastal Research*, vol. 9, n°1, p. 147 -171.

FLETCHER C.H., ROONEY J.J., BARBEE M., LIM S.C., RICHMOND B. (2003) Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 106 -124.

GAILLOT S., CHAVEROT S. (2001) Méthode d'étude des littoraux à faible évolution. Cas du delta du Golo (Corse) et du littoral du Touquet (Pas -de -Calais) en France. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n°1, p. 47 -54.

GUERIN K. (2003) Dynamique du littoral sableux de Tiaroye à Bargny (Baie de Gorée - Sénégal). Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université de Paris 1 -Panthéon -Sorbonne, Paris, 142 p.

IBE A.C., QUELENNEC R.E. (1989) Methodology for assessment and control of coastal erosion in West and Central Africa. *UNEP Regional Seas Reports and Studies* n°107, 107 p.

IBE A.C., AWOSIKA L.F. (1991) Sea level rise impact on african coastal zone. In (OMIDE S.H., JUMA C., Eds) *A change in the weather: african perspectives on climate change*. Nairobi, Kenya, African center for technology studies, non paginé.

MOORE L. J. (2000) Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, vol. 16, n°1, p. 111 -124.

MOORE L. J., GRIGGS G.B. (2002) Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, vol. 181, n°1-3, p. 265 -283.

MORTON R. A., MCKENNA K.K. (1999) Analysis and projection of erosion hazard areas in Brazoria and Galveston counties, Texas. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 106 -120.

NGAMI-NTSIBA-ANDZOU P. (2006) Evolution de la lagune de Mbodiène (Petite Côte, Sénégal). Approche par analyse morpho-sédimentaire et Télédétection. Thèse de Doctorat de Troisième cycle de Géosciences, Option : Environnements sédimentaires, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 214p.

NIANG-DIOP I. (1995) Erosion côtière sur la Petite Côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque. Passé, présent, futur. Thèse de Doctorat Géologie, Université d'Angers, Angers, 475 p.

NOVAK K. (1992) Rectification of digital imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 58, n°3, p.339 -344.

PASKOFF R. (2000a) Les plages et l'élévation du niveau de la mer : risques et réponses. In (PASKOFF R., Ed) Le changement climatique et les espaces côtiers. L'élévation du niveau de la mer : risques et réponses. Actes du colloque d'Arles 12 et 13 octobre 2000. La documentation française, p. 14 -19.

PASKOFF R. (2000b) Le changement climatique, l'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers : synthèse et perspectives. In (PASKOFF R., Ed.) Le changement climatique et les espaces côtiers. L'élévation du niveau de la mer : risques et réponses. Actes du colloque d'Arles 12 et 13 octobre 2000. La documentation française p. 88 -91.

PASKOFF R. (2001) L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers. Le mythe et la réalité. Institut Océanographique, collection «Propos», 190 p.

PASKOFF R. (2004) Côtes en danger. L'harmattan, Paris, 247 p.

PNUE/UNESCO/ONU-DAESI (1985) Erosion côtière en Afrique de l'ouest et du centre. UNEP Regional Seas Reports and Studies n°67, 248 p.

PROVENCHER L., DUBOIS J.-M.M. (2007) Précis de télédétection. Volume 4. Méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image. Presses de l'université du Québec / Agence universitaire de la Francophonie, Québec, 468 p.

QUELENNEC R.E. (1987) Erosion côtière en Afrique de l'ouest et du centre : causes naturelles et anthropiques, prospective et conséquences pour la protection et l'aménagement du littoral. Nature et Ressources, vol. XXIII, n°3-4, p. 2 – 9

ROBIN M. (2002) Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. In (BARON-YELLES N., GOELDNER-GIONELLA L., VELUT S., Ed.) Le littoral, regards, pratiques et savoirs. Etudes offertes à Fernand VERGER. Edition Rue d'Ulm / Presses universitaires de l'Ecole Normale Supérieure, Paris, p. 95 -115.

SALL M. (1982) Dynamique et morphogénèse actuelles au Sénégal Occidental. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université Louis PASTEUR-Strasbourg 1, Strasbourg, 604 p.

SENE-DIOUF B. (1993) L'aménagement des zones touristiques de la Petite Côte et de la Basse Casamance : impacts spatiaux et socio-économique d'une occupation littorale linéaire. In (DIAW A.T.,

BA A., BOULAND P., DIOUF P.S., LAKE L.-A., MBOW M.-A., NDIAYE P., THIAM M.D., Eds) Gestion des ressources côtières et littorales du Sénégal : Actes de l'atelier de Gorée 27-29 juillet 1992. UICN, ISRA, IFAN, p. 395-411.

STAFFORD D.B., LANGFELDER J. (1971) Air photo survey of coastal erosion. Photogrammetric Engineering, vol. 37, p. 565 -575.

SY C. (2007) Impact du quai de pêche sur l'évolution du littoral de Joal. Thèse de Doctorat de Troisième cycle de Géosciences, Options : Environnements sédimentaires, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 153 p.

THIELER E.R., DANFORTH W.W. (1994a) Historical shoreline mapping (I): Improving techniques and reducing positioning errors. Journal of Coastal Research, vol. 10, n°3, p. 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 ArcView. USGS / PEROTSYSTEMS, 30 p.

THOMAS Y.-F. (2006) Climatologie des vagues au large du littoral d'Afrique de l'Ouest de 8 à 22°N – 12 à 26°W. Données ICOADS . Rapport Programme Régional de Conservation de la Zone Côtière et Marine en Afrique de l'Ouest, Nouakchott, 147 p.

VITTAL HEDGE (2004) Coastal protection along Karnataka coast – Few case studies. Workshop on coastal protection measures, 5th and 6th November 2004, p.120 – 134

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Photo 1 : Front de dune végétalisé au droit de Mballing. La limite inférieure de végétation marque la limite supérieure de la plage et pourrait être utilisée comme marqueur du trait de côte.	7
Photo 2 : Falaise taillée par l'érosion marine dans la dune semi-fixée au droit de la zone reboisée au nord immédiat de la mission catholique de Nianing.	7
Figure 1 : Cadre naturel du littoral de Mbour à la Pointe Sarène.	8
Figure 2 : Directions et vitesses moyennes des vents dominants à la station de Mbour de 1977 à 2006 d'après les données de la Direction Nationale de la Météorologie	10
Photo 3 : Vue du cordon d'enrochement au droit du Club Aldiana.	11
Photo 4 : Déchets de produits halieutiques utilisés comme protection contre l'inondation du site de transformation artisanale au sud de l'usine IKAGEL de Mbour.	12
Photo 5 : Aperçu du débarcadère de Nianing. Les pirogues halées sur la haute plage masquent le trait de côte et gênent son interprétation sur les images de cette zone.	12
Tableau 1 : Missions photographiques utilisées pour le suivi de la cinématique littorale de Mbour à la Pointe Sarène.	13
Photo 6 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite de végétation.	14
Photo 7 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite des maisons.	14
Photo 8 : Maisons battues par les vagues à marée haute.	15
Photo 9 : Interface limite de végétation dense /haute plage.	17
Photo 10 : Interface limite de végétation dense /haute plage	17
Photo 11 : Interface limite de végétation dunaire herbacée sèche / haute plage.	18
Figure 3 : Exemple de transects et d'une ligne de base générés par le DSAS pour mesurer l'évolution du trait de côte de 1954 à 1997	19
Figure 4 : Nombre de points de calage utilisé et erreurs RMS correspondantes lors de la rectification des images aériennes utilisées (taille du pixel : 1 m).	21
Photo 12 : Echancre du front de végétation au sud de Mballing.	22
Tableau 2 : Précision de la numérisation des lignes de référence et estimation de l'erreur sur les images de 1954, 1978 et 1997	23
Tableau 3 : Estimation de la marge d'erreur globale.	23

Figure 5 : Evolution sectorielle de la limite supérieure de la plage (limite de végétation) de Mbour à la Pointe Sarène de 1954 à 1978.	26
Figure 6 : Evolution sectorielle de la limite supérieure de la plage (limite de végétation et/ou des maisons) de Mbour à la Pointe Sarène de 1978 à 1997.	27
Figure 7 : Evolution sectorielle de la limite supérieure de la plage (limite de végétation et/ou des maisons) de Mbour à la Pointe Sarène de 1954 à 1997.	29
Figure 8 : Comparaison entre les positions de la limite supérieure de la plage extraite des images aériennes de 1997 et celle levée au GPS en juillet 2007 au sud de l'épi du Club Aldiana.....	30
Photo 13 : Filaos déracinés au sud de l'épi du Club Aldiana.	31
Photo 14 : Effondrement de maisons en front de mer à Nianing sous l'effet de l'érosion côtière.....	31
Photo 15 : Dégradation d'infrastructures touristiques à proximité de la Pointe Sarène du fait de la régression du trait de côte.....	32
Figure 9 : Evolution du trait de côte et des principales classes d'occupation du sol de 1954 à 1997	33
Photo 16 : Impact des ouvrages de défense sur le littoral de Mbour à la Pointe Sarène.	34
Photo 17 : Aperçu d'un mur renforcé par un cordon d'enrochement.	38
Photo 18 : Campement touristique sur pilotis pour éviter les submersions marines.....	38
Photo 19 : Concessions abandonnées au bord d'une plage en forte érosion.....	38

