HAL
archives-ouvertes.fr

Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes

Ibrahima Faye

▶ **To cite this version:**

Ibrahima Faye. Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Géographie. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2010. Français. <tel-00472200>

HAL Id: tel-00472200
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00472200

Submitted on 9 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention : Géographie

École Doctorale des Sciences de la Mer

présentée par

Ibrahima Birame Ndébane FAYE

Préparée à l'Institut Universitaire Européen de la Mer / Laboratoire Géomer-UMR 6554 Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique

« Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes »

Volume 1

Thèse soutenue le 15 février 2010
devant le jury composé de :

M. Yannick LAGEAT
Professeur des universités, Université de Bretagne Occidentale / *Président*

M. Paul FATTAL
Professeur des universités, Université de Nantes / *Rapporteur*

M. Yves-François THOMAS
Directeur de recherche, CNRS, UMR 8591, LGP Meudon / *Rapporteur*

M. Alain HENAFF
Maître de conférences, Université de Bretagne Occidentale / *Examinateur*

M. Ahmed Ould EL Moustapha SENHOURY
Maître de conférences, Université de Nouakchott / *Examinateur*

M. Amadou Tahirou DIAW
Professeur des universités, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Co-directeur de thèse

Mme Françoise GOURMELON
Directrice de recherche, CNRS, UMR 6554, LETG-Géomer Brest, Directrice de thèse

UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE
INSTITUT UNIVERSITAIRE EUROPÉEN LA MER
École Doctorale des Sciences de la Mer

DYNAMIQUE DU TRAIT DE CÔTE SUR LES LITTORAUX SABLEUX DE LA MAURITANIE A LA GUINEE-BISSAU (AFRIQUE DE L'OUEST) : APPROCHES REGIONALE ET LOCALE PAR PHOTO-INTERPRETATION, TRAITEMENT D'IMAGES ET ANALYSE DE CARTES ANCIENNES

Volume 1

THESE / UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

présentée par Ibrahima Birame Ndébane FAYE

pour obtenir le titre de **DOCTEUR DE l'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE**

Mention : ***Géographie***

Soutenue le 15 février 2010
devant le jury composé de :

M. Yannick LAGEAT, Professeur des universités, Université de Bretagne Occidentale / *Président*
M. Paul FATTAL, Professeur des universités, Université de Nantes / *Rapporteur*
M. Yves-François THOMAS, Directeur de recherche, CNRS, UMR 8591, LGP Meudon / *Rapporteur*
M. Alain HENAFF, Maître de conférences, Université de Bretagne Occidentale / *Examinateur*
M. Ahmed Ould EL Moustapha SENHOURY, Maître de conférences, Université de Nouakchott / *Examinateur*
M. Amadou Tahirou DIAW, Professeur des universités, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Co-directeur de thèse
Mme Françoise GOURMELON, Directrice de recherche, CNRS, UMR 6554, LETG-Géomer Brest, Directrice de thèse

Avertissements

Les produits dérivés de données cartographiques ou photographiques du SHOM et présentés dans cette thèse ont été élaborés dans le cadre d'une convention SHOM – UBO. " © Copyright 2007 SHOM. Réalisé avec l'autorisation du service hydrographique et océanographique de la marine - France - Contrat n°E014/2007".

REMERCIEMENTS

C'est avec plaisir et reconnaissance que nous profitons de ces quelques paragraphes pour témoigner toute notre gratitude et exprimer nos vifs remerciements à toutes les personnes qui ont apporté leur concours à l'aboutissement de ce travail de recherche.

Nous remercions particulièrement notre directrice de thèse, Mme Françoise GOURMELON. Sa très grande disponibilité, son soutien constant, ses critiques fort constructives et ses conseils avisés furent très précieux pour nous tout au long de ces années de recherche.
Notre reconnaissance va aussi à notre co-directeur de thèse, M. Amadou Tahirou DIAW qui malgré la distance a suivi de très près ce travail et nous a toujours réservé un accueil très chaleureux dans son laboratoire lors de nos séjours à Dakar.

Nous adressons également nos vifs remerciements aux autres membres du jury :

- M. Yannick LAGEAT pour ses encouragements et l'intérêt qu'il n'a cessé de témoigner à nos travaux depuis le D.E.A. ;
- nos rapporteurs M.M. Paul FATTAL et Yves-François THOMAS pour avoir accepter de juger cette thèse ;
- M. Ahmed SENHOURY, responsable de l'unité de coordination du PRCM pour son accueil et son appui logistique lors de nos séjours en Mauritanie ;
- M. Alain HÉNAFF, qui a guidé nos premiers pas dans les techniques de recherche en géomorphologie littorale à l'époque où nous travaillions sur la Baie d'Audierne. Nous gardons encore un souvenir vivace de ce levé topographique effectué dans le secteur de Trunvel en cette journée d'hiver 2004 sous la neige alors que nous venions tout juste d'arriver en Bretagne ! Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour son soutien moral sans faille durant la longue période de recherche de financement après notre D.E.A., ses encouragements et son appui scientifique inestimable depuis le début jusqu'au dernier jour de la rédaction de cette thèse. Ces quelques années de collaboration nous ont permis aussi d'apprécier ses grandes qualités humaines.

Nous exprimons notre profonde gratitude à M. Alassane SAMBA, ancien coordinateur du Bilan Prospectif. Il a toujours répondu avec diligence et parfois avec abnégation à nos sollicitations diverses et variées. Depuis son départ de la coordination du Bilan Prospectif, il n'a eu cesse de nous motiver, nous pousser à finir nos travaux dans les meilleurs délais.

Un grand merci à tous les membres de Géomer pour leur sympathie et leur aide. Mention spéciale à Manu et Jacqueline qui nous ont initié à la table à numériser, Véro pour les nombreuses photos qu'elle nous a fourni sur la Guinée-Bissau et la Mauritanie, Serge, Mathias, Bernard, Iwan sans oublier nos collègues Pierro, Léna, Nico, Rico, Jean-Marie, Anthony, Damien ainsi qu'aux «anciens géomériens», Mathieu notre compatriote «marocain» et Guillaume.

Nous sommes très reconnaissants envers M. Eric CORNIL et Mme Elisabeth BONDU, responsables de la scolarité de l'IUEM qui nous ont toujours accueillis avec bonne humeur et qui par leur bienveillance ont facilité bon nombre de nos démarches administratives depuis notre arrivée à l'IUEM.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont accordé leur hospitalité en Mauritanie en particulier M.Ameth DIEYE, lors de nos passages à Ndiago, Cécile HENRY-AMAR et Florian BERANGER pour les bons moments passés au quartier Ilot K de Nouakchott.
Nous ne pourrions terminer ces remerciements sans penser à nos proches amis de Brest : Fateh, Ozoré, Rémi, notre «ainé» Omar SARR, son épouse Amy et grand Manel.

Une pensée particulière pour toute la famille restée au pays, Maguèye, nos frères et amis Waly et Alassane.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 9

Première partie : IDENTIFICATION ET SUIVI DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE : ETAT ACTUEL DE LA QUESTION DANS LE MONDE ET EN AFRIQUE DE L'OUEST 13
Chapitre I : Définitions, détection et mobilité du trait de côte 15
Chapitre II : Evolution du trait de côte en Afrique de l'Ouest : état de la question de la Mauritanie à la Guinée-Bissau 52

Deuxième partie : CINEMATIQUE DES LITTORAUX SABLEUX D'AFRIQUE DE L'OUEST : ANALYSE REGIONALE DE LA MAURITANIE A LA GUINEE-BISSAU 75
Chapitre I : Les données disponibles, méthodes de traitement et limites méthodologiques 77
Chapitre II : Les aspects morphologiques du trait de côte en Afrique de l'Ouest : du Cap Blanc (Mauritanie) au Rio Cacine (Guinée-Bissau) 99
Chapitre III : Cinématique des littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau : analyse régionale 127

Troisième partie : CINEMATIQUE DES LITTORAUX SABLEUX D'AFRIQUE DE L'OUEST : ANALYSE LOCALE A PARTIR DE SITES SELECTIONNES EN MAURITANIE ET AU SENEGAL 145
Chapitre I : Les données disponibles à l'échelle locale 147
Chapitre II : Approche méthodologique mise en œuvre pour l'étude de la cinématique du trait de côte dans les sites étudiés 157
Chapitre III : Incertitudes, estimation des erreurs et outil de mesure de la cinématique du trait de côte 171
Chapitre IV : Caractéristiques physiques et anthropiques actuelles des sites sélectionnés 202
Chapitre V : Analyse locale de la cinématique des littoraux de Nouakchott, Ndiago, Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène 228

CONCLUSION GENERALE 261

Références bibliographiques 267
Liste des figures 291
Liste des photos 293
Liste des tableaux 295
Annexes 297
Table des matières 317

INTRODUCTION GENERALE

S'appuyant sur les travaux de la Commission sur l'Environnement Côtier de l'Union Géographique Internationale, BIRD (1985) estimait que le processus de recul du trait de côte affectait à l'époque plus de 70 % des plages de la planète. Plus récemment, BEER (1997) soulignait aussi que l'évolution des littoraux sableux est dominée généralement par une tendance régressive. Les études menées ces dernières années dans les différentes régions du monde montrent que la régression des côtes sableuses est un phénomène planétaire.

Ainsi en Europe, l'érosion toucherait 40 % des plages de l'Union Européenne (EUROPEAN COMMISSION, 2004) et plus de 50 % des côtes sableuses en France métropolitaine (IFEN, 2006). Aux Etats Unis, au moins 66 % du linéaire côtier sableux du Golfe du Mexique seraient en recul (MORTON *et al.*, 2004), 45 % des plages de la Floride à la Caroline du Nord (MORTON *et al.,* 2005) et 40 % des plages californiennes (HAPKE *et al.*, 2006). En Amérique Latine, au Brésil par exemple, 81 à 84% des plages de l'Etat du Rio Grande do Sul s'éroderaient (ESTEVES *et al.,* 2002 *In* DILLENBURG *et al.*, 2004). Des phénomènes d'érosion ont également été mis en évidence sur les plages indiennes dans la Baie du Bengale (GOPINATH et SERALATHAN, 2005). En Afrique, dans le delta du Nil, l'érosion côtière, exacerbée par les aménagements réalisés sur le Nil (barrages) ou sur les rives de la Méditerranée (port, ouvrage de protection), est l'un des principaux facteurs de la dégradation de l'environnement littoral (FRIHY, 1988 ; BLODGET *et al.*,1991 ; FRIHY *et al.,* 1994 ; FRIHY *et al.*, 1998 ; EL RAEY *et al.,* 1995 ; EL RAEY *et al.,* 1999 ; WHITE et EL ASMAR, 1999 ; EL ASMAR et WHITE, 2002). Sur la côte orientale d'Afrique, l'érosion côtière est documentée sur les plages tanzaniennes de la zone de Dar es Salam (MAKOTA *et al.,* 2004).

Les littoraux ouest-africains constitués en grande partie d'estuaires et de plages n'échappent pas à cette évolution régressive. L'érosion côtière est l'un des principaux problèmes environnementaux auxquels est confronté le littoral de la zone de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (IBE et AWOSIKA, 1991) avec des cas notoires comme le delta de la Volta au Ghana (LY, 1980), les abords du port de Cotonou ou de Lomé dans le Golfe de Guinée (ROSSI, 1988 ; ROSSI, 1989a ; 1989b ; CODJIA et DOMINGO, 1998 ; BLIVI, 2001 ; BLIVI et ADJOUSSI, 2004 ; BLIVI, 2005) ou encore la baie de Port Bouet et le Grand-Lahou près d'Abidjan en Côte d'Ivoire (HAUHOUOT *et al.,* 1997). Un peu plus au nord, les rares cas d'accumulation s'observent aux débouchés des systèmes estuariens du Sénégal à la Guinée-Bissau (PNUE/UNESCO/ONU-DAESI, 1985) car d'une manière générale, l'érosion domine. 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. Or en Afrique de l'Ouest comme sur la plupart des façades maritimes, les dernières décennies sont marquées par une croissance démographique et corrélativement d'une augmentation des activités économiques sur les zones côtières. En effet, toutes les grandes agglomérations ouest-africaines (Nouakchott, Saint-Louis, Dakar, Banjul, Bissau, Conakry, Freetown, Monrovia, etc.) sont localisées sur la côte, foyer privilégié d'immigration et de développement de l'économie maritime notamment dans les secteurs portuaires,

industriels, touristiques, etc. (QUENSIERE *et al.*, 2006). Le littoral ouest-africain abrite également des sites d'intérêt patrimonial, des aires protégées reconnues mondialement telles que le banc d'Arguin, le parc national des oiseaux de Djoudj, le delta du Saloum, l'archipel des Bijagos, etc. que les changements littoraux pourraient affecter.

L'avancée de la mer se traduit parfois par des phénomènes brutaux ayant un certain retentissement dans la presse sénégalaise par exemple comme ce fut le cas lors de la submersion du cimetière de Rufisque en juillet 2007 (DIA, 2007 ; FAYE B.B., 2007). Ce fut le cas aussi des destructions d'infrastructures et d'habitats nécessitant la relocalisation des populations de Djiffère à la suite de la rupture de la flèche de Sangomar en 1989 (LO, 1996). En Gambie, l'érosion côtière a déjà détruit des cimetières, des hôtels, des maisons et menace actuellement de nombreuses infrastructures côtières à Banjul (BARROW, 1994 ; HEIJBOER, 2000 ; RUË, 2002).

Avec l'élévation actuelle et future du niveau de la mer, ces problèmes d'érosion devraient s'aggraver surtout sur les côtes sableuses ouest-africaines déjà en recul (IBE et AWOSIKA, 1991 ; NIANG-DIOP, 1993 ; DENNIS *et al.,* 1995) comme ailleurs dans le monde (LEATHERMAN *et al.,* 2000a ; PASKOFF, 2000a ; 2000b ; PASKOFF, 2001 ; LEATHERMAN *et al.,* 2003 ; ZHANG *et al.*, 2004). Par exemple, une élévation du niveau de la mer de 1 mm/an entraînerait, en un siècle, selon le principe de Bruun, un recul de 264 à 839 m[1] sur les plages gambiennes (JALLOW *et al.,* 1999).

L'importance socio-économique et écologique de la zone côtière d'Afrique occidentale en général et des littoraux sableux en particulier dans un contexte de crise environnementale justifie de mener une réflexion sur le fonctionnement, l'évolution ainsi que la gestion de l'utilisation des ressources de l'espace littoral. C'est dans cette optique qu'a été initié en 2001, le Programme Régional de Conservation des Zones Côtières et Marines en Afrique de l'Ouest (PRCM, www.prcmarine.org) dont la première phase concernant tous les pays côtiers situés de la Mauritanie à la Sierra Léone se déclinait en sept composantes : appui à la création et à la co-gestion des Aires Marines Protégées, espèces et habitats, gestion des pêches, tourisme durable, hydrocarbures et qualité des eaux, recherche, communication.

Cette thèse s'insère dans la composante «recherche» du PRCM intitulée «Bilan prospectif des changements à long terme de l'environnement côtier d'Afrique de l'Ouest». L'objectif du «Bilan prospectif» était de décrire les changements à long terme des littoraux, leurs caractéristiques physiques, biologiques et leurs modes d'utilisation. L'échelle d'analyse régionale est retenue pour favoriser la compréhension du système côtier global, privilégier des choix de gestion communs aux sept pays[2] de la sous-région et l'émergence de politiques nationales de planification côtière cohérentes. En inscrivant pleinement nos travaux dans le cadre du «Bilan prospectif», nous nous sommes intéressés à l'étude de la dynamique des littoraux sableux d'Afrique de l'Ouest, situés de la

[1] Le principe de BRUUN (1962 ; 1983 ; 1988) est très contesté actuellement par une partie de la communauté scientifique qui remet en cause la fiabilité de ses estimations (ANDREW *et al.,* 2004).
[2] Mauritanie, Sénégal, Cap Vert, Gambie, Guinée-Bissau, Guinée, Sierra Léone

Mauritanie à la Guinée-Bissau. Soutenue par la Fondation Internationale du Banc d'Arguin (FIBA), notre étude s'envisage à deux échelles spatiales. Elle est fondée d'une part, sur une synthèse régionale des côtes sableuses et, d'autre part sur une étude à grande échelle de sites répartis dans plusieurs pays concernés par le PRCM (Mauritanie, Sénégal, Gambie, Guinée-Bissau). L'objectif est de mettre en évidence et de mesurer les phénomènes d'érosion et d'accumulation intervenus depuis plusieurs décennies à ces deux échelles.

L'évaluation des variations spatio-temporelles de la position du trait de côte à l'échelle régionale et locale pose de nombreuses questions d'ordre méthodologique relatives au choix de l'indicateur à utiliser, à la façon de l'extraire et de mesurer sa mobilité à différentes échelles et à partir de données hétérogènes.

De manière à traiter ces questions, ce mémoire s'organise en trois parties.

La première partie, consacrée à la synthèse bibliographique, dresse un état de l'art concernant les définitions du trait de côte, les techniques d'extraction ainsi que les méthodes spatiales utilisées pour le suivi et l'analyse de sa mobilité dans le monde et en Afrique de l'Ouest.

La deuxième partie est réservée à l'analyse régionale. Elle commence par une présentation des données existantes, des lignes de référence sélectionnées, des traitements appliqués pour cartographier la morphologie du trait de côte et positionner les lignes de référence. Les marges d'erreurs associées sont estimées puis les résultats sont présentés. Ils concernent d'une part, l'analyse quantitative et qualitative des modifications qui ont été observées sur certains tronçons de plages du Sénégal à la Guinée-Bissau et, d'autre part, la description des caractères morphologiques du trait de côte régional sur laquelle s'appuie la sélection de sites représentatifs de la diversité morphologique des côtes sableuses rencontrées.

La troisième partie traite de la cinématique de ces sites. Elle est structurée à l'identique de la deuxième partie avec, tout d'abord, une présentation des données cartographiques et photographiques disponibles et des lignes de référence retenues. Ensuite sont abordés successivement, les méthodes utilisées pour la rectification géométrique des données cartographiques et photographiques mobilisées, l'extraction des lignes de référence, l'estimation des marges d'erreur inhérentes, les caractéristiques physiques et anthropiques des sites étudiés et enfin l'analyse des variations spatio-temporelles du linéaire côtier.
La conclusion générale expose les principaux résultats obtenus et les replace dans un contexte plus général en les comparant aux tendances mises en évidence par les études antérieures. Elle souligne également les limites et les perspectives de cette étude.

Première partie : IDENTIFICATION ET SUIVI DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE : ETAT ACTUEL DE LA QUESTION DANS LE MONDE ET EN AFRIQUE DE L'OUEST

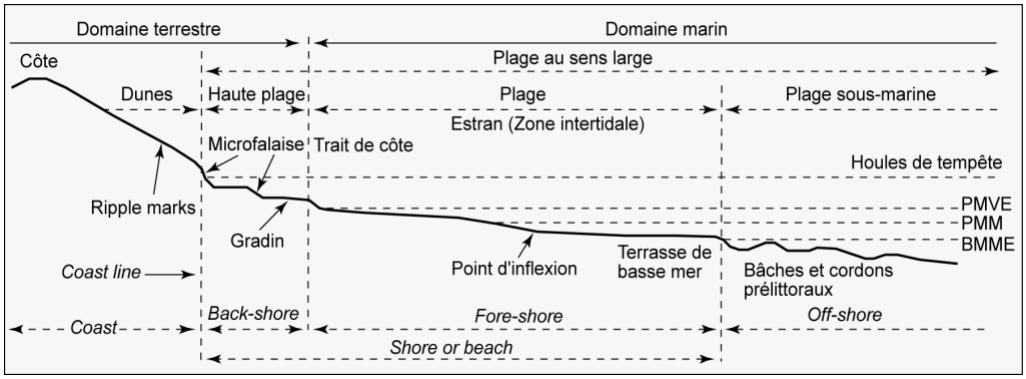
L'analyse de la cinématique littorale requiert avant tout le choix d'un indicateur du trait de côte, la mise au point d'une méthode d'extraction et de suivi adaptée au marqueur utilisé selon le type de côte, le matériel et les données disponibles. Cette première partie, axée sur l'état de l'art concernant ces différents aspects à l'échelle mondiale et en Afrique de l'Ouest, a pour principal objectif de nous guider dans le choix d'une ligne de référence ainsi que d'un protocole méthodologique efficace pour l'extraction et l'analyse de l'évolution du linéaire côtier de notre zone d'étude. Pour ce faire, elle se décline en deux chapitres. Le premier chapitre portant sur des considérations méthodologiques générales doit nous aider à effectuer un choix préliminaire d'indicateur du trait de côte ainsi que de méthodes de détection et de mesure de sa mobilité parmi ceux qui sont proposés dans la littérature. Il constitue un prélude au deuxième chapitre consacré au bilan des connaissances méthodologiques et cinématiques acquises sur la mobilité du trait de côte des rivages sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau. Le but de ce deuxième chapitre est de dresser un état des lieux de la dynamique littorale d'une manière générale et de l'érosion côtière en particulier.

Chapitre I : DEFINITIONS, DETECTION ET MOBILITE DU TRAIT DE CÔTE

Dans un article paru dans la revue *Hydro International* en 2001 sous le titre *«Where is the shoreline ? The answer is not as simple as one might expect»*, PARKER mettait en exergue toute la délicatesse de localiser et de positionner une limite entre la terre et la mer dans un espace aussi dynamique que le littoral. Cette difficulté pratique se double également d'une confusion sémantique selon BIRD (2007) qui souligne que dans la littérature anglo-saxonne et américaine en particulier, les termes *shoreline* et *coastline* sont souvent considérés comme synonymes alors qu'il faut les distinguer. En effet d'après cet auteur, l'expression *shoreline* désigne la limite du plan d'eau en fonction des fluctuations du jet de rive et de la marée, c'est-à-dire en français la ligne instantanée de rivage alors que *coastline* renvoie à la limite atteinte par les pleines mers de vives-eaux d'équinoxe et pouvant être matérialisée selon le type de côte par le pied de falaise ou la limite de la végétation terrestre donc, en français, à la notion de trait de côte. Toutefois, la définition même de ce concept de trait de côte censé représenter la frontière linéaire entre les domaines maritime et terrestre est problématique et sujette à controverse en raison de la grande diversité des critères d'identification (géomorphologie, marée, végétation, etc.). Pour GUILCHER (1951), le trait de côte correspond à la *«ligne des plus hautes mers»* par temps calme (**Figure 1**). Cette définition est proche de celle de ROUBERTOU et BONNEVAL (1965) qui dans les mers à marée assimilent le trait de côte à la *«ligne des plus hautes mers possibles, résultant du jeu normal de la marée astronomique et des autres causes de variation du niveau de la mer mais compte non tenu des variations accidentelles dues à certains phénomènes météorologiques exceptionnels».* BAULIG (1956) quant à lui considère le trait de côte comme la *«limite entre la côte et le rivage, …* (limite qui) *se déplace avec l'état de la mer et avec la marée»*. Encore plus récemment par exemple, BOAK et TURNER (2005) ont recensé 19 traits de côte génériques à partir de 45 indicateurs relevés dans environ quatre-vingt publications. Cette diversité de lignes de référence se traduit, en conséquence, par la mise au point de nombreuses méthodes directes ou indirectes pour détecter et extraire un trait de côte sur un document iconographique ou sur le terrain afin de retracer l'évolution historique du linéaire côtier.

Ce premier chapitre tente de passer en revue les lignes de référence proposées dans la littérature, les techniques mobilisées pour son extraction et le suivi de sa position dans l'optique d'identifier celles qui pourraient être applicables aux littoraux ouest-africains.

Figure 1 : Profil schématique d'une côte sableuse et terminologie anglo-saxonne équivalente d'après SHEPARD (1973) *In* BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR (2002)



I – LES LIGNES DE REFERENCE UTILISEES EN GEOMORPHOLOGIE LITTORALE

Les différentes lignes utilisables en cinématique côtière ont fait l'objet de plusieurs synthèses (KRAUS et ROSATI, 1997 ; MORTON et SPEED, 1998 ; BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR, 2002 ; 2003 ; ROBIN, 2002 ; BOAK et TURNER, 2005) dont nous nous sommes largement inspirés. Parmi les lignes indiquées, peu d'entre elles correspondent au trait de côte tel que le définit BIRD (2007). En fait, ce ne sont que des indicateurs de base pour analyser l'évolution d'un rivage donné. Nous les avons rangés en sept catégories selon les entités auxquelles elles se réfèrent (ruptures de pente, limites de végétation, niveaux instantanés de marée, datums marégraphiques, entités virtuelles, surface de la plage, conditions météorologiques).

1 – Les lignes de référence géomorphologiques

Ces entités linéaires font référence à des ruptures de pente situées dans la zone supratidale, intertidale ou subtidale (**Figure 2**).

Pour les plages bordées de cordons dunaires, trois lignes de référence géomorphologiques sont utilisables : le pied de dune, le haut de la dune et la crête de dune (**Figure 2a**). Le pied de dune *(dune foot, dune toe)* marque la limite supérieure de la haute plage. Il est localisé à la jonction entre la pente relativement abrupte du front dunaire et celle de la haute plage qui est beaucoup plus douce (GUILLÉN *et al.*, 1999). Le pied de dune est parfois assimilé aussi à une ligne de dune *(dune line)* (STAFFORD et LANGFELDER, 1971 ; HEALY, 1991 ; MORTON *et al.,* 1993 ; KRAUS et ROSATI, 1997), à la base de la falaise dunaire si le front de dune est sapé par les vagues (BYRNES et HILAND, 1994 ; MCBRIDE *et al.*, 1995 ; BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR, 2002 ; 2003) ou à une limite de végétation lorsque le front dunaire est végétalisé (GAILLOT *et* CHAVEROT, 2001 ; HOEKE *et al.,* 2001 ; BATTIAU-QUENEY *et al.,* 2003 ; DOMINGUEZ *et al.,* 2005). STAFFORD et LANGFELDER (1971) notent que le pied de dune est un bon indicateur d'érosion mais il est peu apte à traduire une accrétion sur le court terme, car son érosion survient brutalement en général par à-coups, surtout lors des tempêtes alors que son accrétion est un processus lent. De plus, il n'est pas détectable lorsque les dunes sont peu développées, basses ou étalées. Un autre facteur limitant l'utilisation de cette ligne, est le glissement de matériel sur le front dunaire qui peut créer un tablier d'éboulis à sa base et masquer ainsi le pied de dune. Dans ce cas, on peut utiliser le sommet de la falaise dunaire *(dune top edge)* qui peut correspondre aussi à une limite de végétation (THORNTON *et al.,* 2006). En présence d'un massif dunaire avec un alignement de crêtes dunaires, la ligne de crête *(dune crest line, crest of the dune)* côté mer est utilisable comme marqueur du trait de côte (PAJAK et LEATHERMAN, 2002 ; ZUZEK *et al.,* 2003).

Concernant les côtes à falaises ou les plages adossées à des falaises, le haut de falaise et le pied de falaise sont les deux lignes de référence géomorphologiques les plus fréquemment utilisées (**Figure 2b**). Le haut de falaise *(Bluff top, cliff top, top of the cliff)*, correspond à la lisière du sommet

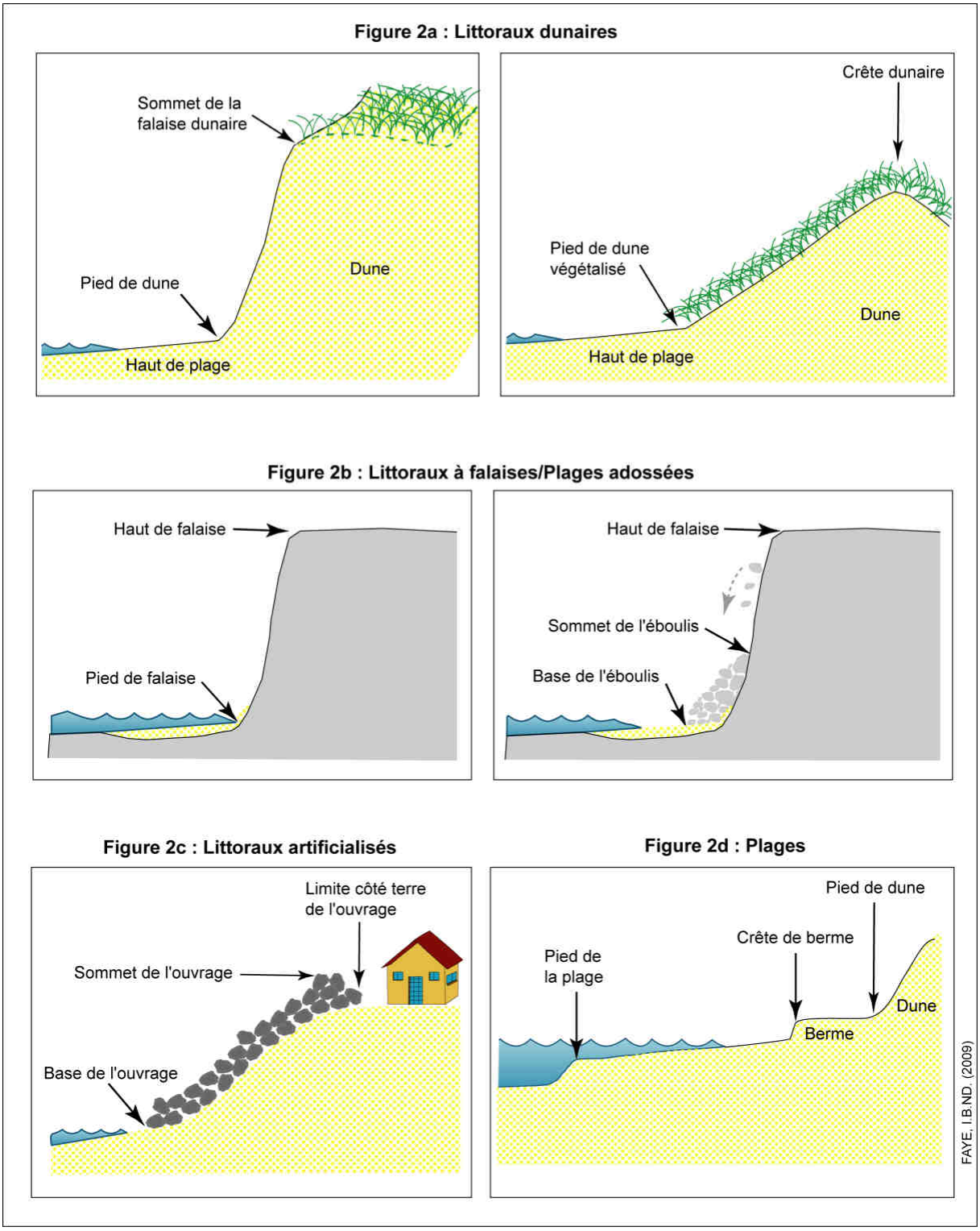
de la falaise (CROWEL *et al.,* 1991 ; DONG et CHEN, 1999 ; MOORE *et al.,* 1999 ; MOORE et GRIGGS, 2002 ; ZUZEK *et al.,* 2003 ; HAPKE et REID, 2007). C'est une rupture de pente matérialisée quelquefois par une limite de végétation (LE BERRE *et al.*, 2005). Lorsque la falaise est affectée par des mouvements de masse (effondrement, éboulement), la ligne de référence peut-être placée au «*contour de la cicatrice d'arrachement*» (ROBIN, 2002), au sommet de l'éboulis (PRIEST, 1999) ou au pied de l'éboulis (BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR, 2002 ; 2003). Dans les secteurs à falaises vives, sans encoches, régulièrement battus par les vagues et débarrassés des matériaux éboulés, le pied de falaise *(cliff toe, bluff toe)* constitue une alternative optimale par rapport au sommet de falaise pour positionner le trait de côte (MOORE *et al.,* 1999 ; GUY, 1999 ; ZUZEK *et al.,* 2003 ; BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR, 2002 ; PAJAK et LEATHERMAN, 2002). A l'instar du pied de dune, il représente une ligne de transition entre la falaise et le haut estran ; c'est l'ados de la plage si la falaise domine un estran sableux (ROBIN, 2002).

Sur les littoraux artificialisés (**Figure 2c**), dotés d'ouvrages de défense, plusieurs solutions sont proposées suivant les cas de figure : la limite côté mer (MORTON et SPEED, 1998 ; COYNE *et al.,* 1999) ou côté terre (MOORE *et al.,* 1999) des structures de protection, la crête des enrochements ou le sommet du remblai (GUY, 1999). Ces lignes de référence sont cependant inaptes à montrer une quelconque cinématique dans ce type de côte dans la mesure où les ouvrages de défense ont pour vocation de figer le rivage et sont modifiables par les hommes (BOAK et TURNER, 2005).

Au niveau de la plage aérienne, la crête de berme marque la position approximative des pleines mers ordinaires selon KRAUS et ROSATI (1997) (**Figure 2d**). Toutefois, son utilisation comme référence pour le suivi de l'évolution du rivage est déconseillée par MORTON et SPEED (1998) en raison de son instabilité sur le court terme qui fait qu'elle n'est pas toujours visible. Lorsque la plage présente des gradins avec plusieurs crêtes de berme, la crête du dernier replat sommital doit être utilisée comme référence (NATESAN et SUBRAMANIAN, 1994). Il en est de même en présence d'une accumulation de galets présentant une forme identique (BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR, 2002 ; 2003).

Dans la zone subtidale, le pied de plage *(Beach toe, toe of the beach)* (**Figure 2d**) est fréquemment utilisé pour le suivi de la cinématique de certains littoraux hawaïens où la plage se termine par un palier dont la crête marque une rupture de pente correspondant au pied de plage et à la position approximative du niveau des plus basses mers moyennes (COYNE *et al.,* 1999 ; NORCROSS *et al.*, 2002 ; FLETCHER *et al.*, 2003 ; GENZ *et al.,* 2007). En l'absence d'un profil de plage sous marine, la visibilité de cette ligne est commandée par la clarté, la transparence de l'eau ainsi que le niveau de la marée puisqu'elle n'est détectable qu'à marée basse et dans des eaux très claires (COYNE *et al.,* 1999 ; FLETCHER *et al.,* 2003).

Figure 2 : Représentation schématique de quelques exemples de lignes de référence géomorphologiques

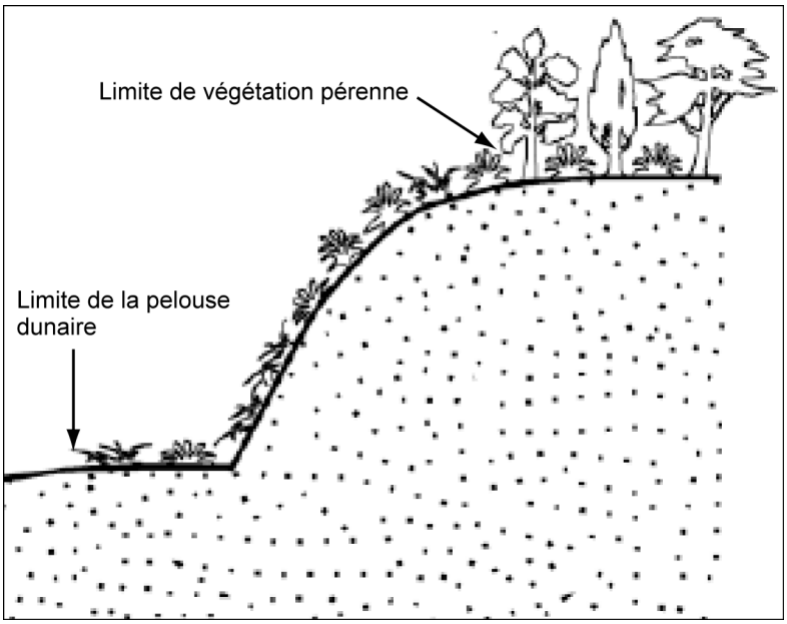


2 – Les lignes de référence botaniques

Ce sont des limites de végétation *(Vegetation line)* qui se rapportent à des indicateurs biologiques comme marqueurs de la position du trait de côte. Ainsi, sur les littoraux meubles, la limite

inférieure de la pelouse dunaire (MCBETH, 1956 ; BIRD, 1985 ; MORTON et PAINE, 1985 ; MORTON et SPEED, 1998 ; MOORE et GRIGGS, 2002 ; FERREIRA *et al.,* 2006) ou de la couverture végétale pérenne (arbustes, arbres,...) (COYNE *et al.,* 1999 ; GUY, 1999 ; PRIEST, 1999 ; TREPANIER *et al.*, 2002) sur le front de mer peut servir de repère (**Figure 3**).

Figure 3 : Représentation schématique de la limite de végétation dunaire et pérenne (Source : BOAK et TURNER, 2005 ; modifié)



Sur les côtes à falaises, la végétation ne dépasse pas dans la plupart des cas la lisière du haut de falaise (si elle est abrupte) ou le niveau des plus hautes mers (si la pente est douce). Aussi, les versants de certaines falaises de roches dures peuvent parfois abriter une végétation d'algues et de lichens dont la bordure supérieure matérialise la limite des plus hautes mers (THIELER *et al.,* 2001 ; BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR, 2002 ; 2003). Ces ceintures de végétation s'observent également sur les ouvrages de défense (mur de soutènement, enrochements, etc.).

D'autres approches s'appuient sur des critères biogéographiques et font intervenir la zonation des espèces littorales pour identifier le niveau des hautes eaux. Par exemple dans les littoraux dunaires tempérés en progradation ou en stabilité, la limite des hautes eaux correspond au point de passage des espèces continentales comme l'oyat *(Ammophila arenaria)* aux espèces maritimes comme le chiendent des sables *(Agropyrum junceum)* (BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR, 2002 ; 2003).

Cependant les variations de la position de la limite de végétation ne sont pas toujours synonymes d'érosion ou d'accrétion car elles peuvent résulter de l'action de l'homme : stabilisation artificielle (plantations, culture, etc.) ou destruction (piétinement, etc.). A cela s'ajoute la sensibilité de la végétation aux conditions climatiques et écologiques d'une manière générale (MORTON et SPEED,

1998 ; ROBIN, 2002). Ce sont là quelques facteurs dont il faut tenir compte dans l'interprétation des résultats lorsqu'on utilise une limite de végétation comme indicateur du trait de côte.

3 – Les lignes instantanées de rivage et les limites d'humectation

La position de ces lignes est inhérente au niveau atteint par la marée sur l'estran. Elles déterminent la limite du jet de rive à un moment donné en fonction des conditions météo-marines. Parmi ces lignes qui font référence à un niveau d'eau momentané, on distingue du bas de plage vers la haute plage :

- l'extrémité du jet de rive ou ligne instantanée de rivage *(water line, swash line, swash terminus)* (**Photo 1**). Elle forme l'interface entre le plan d'eau et la pente de la plage à tout instant et correspond parfois à la limite de l'écume du jet de rive (SHOSHANI et DEGANI, 1992 ; KRAUS et ROSATI, 1997). C'est une ligne très mobile, dont la position sur l'estran fluctue au rythme du jet de rive et de la nappe de retrait. Les fluctuations de l'emplacement de cette ligne sont dictées essentiellement par la pente, la puissance des vagues, les conditions atmosphériques (vent et pression) et surtout le niveau de la marée. En conséquence, sur les littoraux mésotidaux et macrotidaux, l'amplitude de ses déplacements est considérable et peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Par contre sur les littoraux microtidaux méditerranéens par exemple, ses variations sont de moindre importance, voire mêmes négligeables en général si les lignes sont acquises dans des conditions de mer, de marée, de vent et de pression semblables (FRIHY *et al.,* 1994 ; JIMENEZ *et al.,* 1997 ; DURAND, 1998 ; 2000 ; WHITE et EL ASMAR, 1999 ; GAILLOT et CHAVEROT, 2001 ; ANFUSO et MARTINEZ DEL POZO, 2005 ;…). Dans le cas contraire, des corrections doivent être appliquées pour éliminer les effets de la marée (STAFFORD et LANGFELDER, 1971) car même sur des côtes microtidales, des différences de conditions d'acquisition (pente et météo-marine) sont susceptibles d'induire des oscillations importantes de la ligne instantanée de rivage. A titre d'illustration, en Méditerranée, dans le golfe du Lion, DURAND (2000) a constaté un décalage maximal de 13,9 m pour un marnage d'une trentaine de centimètres entre deux lignes instantanées de rivage. Un écart de 5 m a été enregistré sur les rives de la mer Ionienne par GUARIGLIA *et al.* (2006). Auparavant, JIMENEZ *et al*. (1997) avaient noté un déplacement *«erroné»* du trait de côte sur 1200 m dans le delta de l'Ebre entre deux photos prises à un an et demi d'intervalle sur des zones à très faible pente dans des conditions météorologiques différentes et avec une amplitude de marée de 0,3 m.

- La limite sable mouillé/sable sec *(wet/dry line, wet/dry boundary, wet sand line, wetted bound)* (**Photo 1**). Elle correspond à l'extrémité du jet de rive à marée haute et durant la marée descendante, elle migre vers la mer et marque la limite côté terre des sables assombris par le déferlement (DOLAN *et al.,* 1978a). Son utilisation se heurte aux mêmes problèmes que ceux posés par la ligne instantanée de rivage. Aussi, comme pour la ligne de *swash*, en l'absence de perturbations météo-marines sur une côte microtidale, la position de cette ligne

d'humectation varie très peu durant un cycle de marée selon DOLAN *et al.* (1980). Ils estiment ces variations entre 0,12 et 5,8 m, soit 1 – 2 m en moyenne pour une plage ayant une pente de 3 à 6°, une granulométrie moyenne et un marnage inférieur à 0,5 m comme celui des littoraux de Caroline du Nord et de Virginie où leur étude a été réalisée. Sur la base de cette hypothèse, la limite sable mouillé/sable sec est considérée comme équivalente à une ligne de pleines mers *(High water Line)* par de nombreux auteurs (DOLAN *et al.,* 1978a ; 1978b ; HAYDEN *et al.,* 1979a ; 1979b ; DOLAN *et al.,* 1979 ; DOLAN *et al.*, 1980 ; DOLAN et HAYDEN, 1983 ; THIELER et DANFORTH, 1994b ; ROBERTSON *et al.*, 2004).

- La ligne de hautes eaux ou de pleines mers *(High water line, High tide line)* (**Photo 1**). C'est l'indicateur le plus utilisé par les anglo-saxons pour l'étude des variations de la ligne de rivage (MOORE, 2000 ; BOAK et TURNER, 2005 ; MOORE *et al.,* 2006). Elle a été définie par CROWELL *et al.* (1991) comme le niveau atteint par la dernière marée haute. En d'autres termes, elle correspond à la limite supérieure d'humectation de l'estran par la pleine mer précédente. Ces auteurs, tout comme STAFFORD et LANGFELDER (1971), la considèrent comme un bon indicateur de l'évolution du rivage si les différentes lignes à comparer sont acquises dans des conditions similaires. En effet, la position sur l'estran de la ligne de pleines mers est affectée par les marées astronomiques, les changements saisonniers du profil de la plage, la granulométrie, les conditions climatiques (températures, vents, tempêtes), la variabilité inter-journalière du niveau de hautes eaux et les phénomènes de surcote/décote (PAJAK et LEATHERMAN, 2002). Ces variations induisent une certaine marge d'erreur qu'il faut impérativement évaluer et intégrer dans les calculs des taux d'évolution (MOORE, 2000 ; MOORE *et al.,* 2006).
Il est à noter que ces limites d'humectation (*wet/dry line, high water line*) peuvent être masquées ou s'avérer difficiles à localiser sur des plages de sables noirs ou de sables blancs (FLETCHER *et al.,* 2003). Il en est de même si la plage est humectée par le suintement de l'eau des étangs situés dans l'arrière-côte.

- La ligne des pleines mers habituelles *(Usual or mean High water line, Average High water line, Ordinary high water mark)*. Dans la définition de ces types de lignes, d'autres critères que le niveau instantané des pleines mers sont pris en compte pour identifier la position «habituelle» des marées hautes sur l'estran (MC CURDY, 1950 ; MCBETH, 1956 ; NICHOLS et MCLAUGHLIN, 1984 ; BYRNES et HILAND, 1994 ; 1995 ; MCBRIDE *et al.,* 1995 ; KRAUS et ROSATI, 1997 ; KAMINSKY *et al.*, 1999 ; THIELER *et al.,* 2001 ; RUGGIERO *et al.,* 2003). Ces marqueurs comprennent entre autres la limite de végétation, les laisses de mers (débris, bois flotté, varech, etc.) ainsi que les ruptures de pente (micro-falaise, escarpement d'érosion, berme,...). Même si cette ligne est censée marquer la position moyenne des pleines mers, elle n'est pas pour autant un datum marégraphique.

Plage de Duranbah, Nouvelle Galles du Sud, Australie. (Source : BOAK et TURNER, 2005)

A : Ligne instantanée de rivage *(Instantaneous water line)*
B : Limite de la zone de saturation *(Groundwater exit point)*
C : Limite sable sec / sable mouillé *(Wet / dry line or run up maxima)*
D : Ligne du niveau des pleines mers précédentes *(Previous high tide high water level)*
E : Niveau atteint par une pleine mer antérieure *(An old high tide water level)*

Photo 1 : Limites d'humectation et ligne instantanée de rivage. La présence de plusieurs lignes selon la teneur en eau des sédiments est une source potentielle de confusion surtout entre la limite sable sec/sable mouillé et la limite de la zone de saturation d'eau.

4 – Les datums marégraphiques

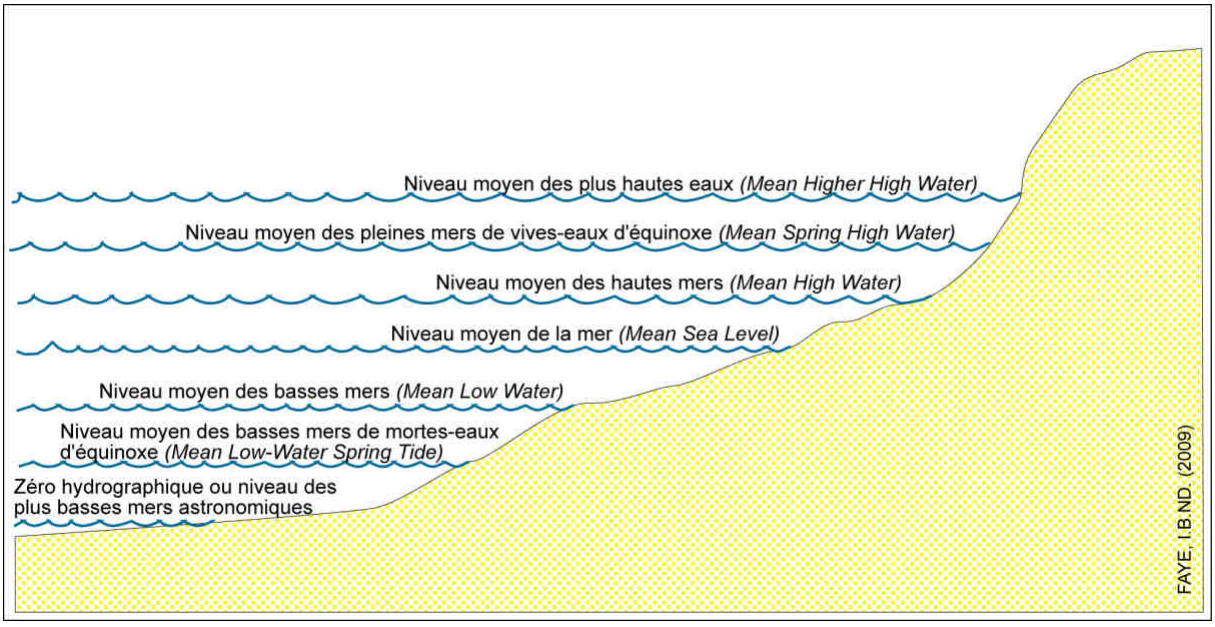
Ce sont des courbes de niveau résultant de l'intersection entre le profil de plage et un niveau de marée conventionnel (**Figure 4**). La ligne de référence est alors une isohypse qui joint tous les points situés sur une même cote d'altitude représentant la limite atteinte par le niveau de la marée de référence. Le plus souvent, c'est un niveau moyen déterminé à partir de statistiques de marée. Nous signalerons entre autres :

- le niveau moyen local de la mer (*Mean sea level*), référence altimétrique des topographes (HORIKAWA, 1988 ; AAGAARD *et al.*, 2004) ;
- la ligne du niveau moyen des hautes mers *(Mean High Water Line)* (COUTTS, 1989 ; BASCO *et al.,* 1997 ; PARKER, 2001 ; STIVE *et al.,* 2002 ; STOCKDON *et al.,* 2002 ;

WOOLARD *et al.,* 2003 ; MORTON *et al.*, 2005 ; MORTON et MILLER, 2005 ; HAPKE *et al.* 2006 ; LIU *et al.,* 2007 ; FARRIS et LIST, 2007 ; MILLER et DEAN, 2007) ;

- la ligne du niveau moyen des pleines mers de vives-eaux d'équinoxe *(Mean Spring high water line)* (STIVE *et al.*, 2002 ; REEVE et SPIVACK, 2004) ;
- la ligne du niveau moyen des plus hautes eaux *(Mean higher high water)* (ALLAN *et al.*, 2003) ;
- la ligne du niveau moyen des basses mers *(Mean Low Water Line)* (REEVE et FLEMING, 1997 ; STIVE *et al.*, 2002) ;
- le niveau moyen des basses mers de mortes-eaux d'équinoxe (*Mean Low-water spring tide mark*) (AURROCOEACHA et PETHICK, 1986) ;
- le zéro hydrographique ou niveau des plus basses mers astronomiques (LAFON *et al.,* 2000 ; 2002).

Figure 4 : Disposition schématique de quelques datums utilisés comme référence sur un profil de plage



La définition de ces lignes est certes plus objective que celle des limites d'humectation mais leur matérialisation suppose la disponibilité de données altimétriques et la connaissance de l'heure exacte où la marée atteint le niveau de référence pour chaque point de la côte.

5 – Les lignes de référence virtuelles

BOAK et TURNER (2005) les ont classées dans la catégorie des lignes de référence invisibles à l'oeil nu. Effectivement, il s'agit de lignes de référence digitales issues de traitements d'images. C'est le cas de la ligne d'intensité lumineuse maximum *(Shore Line Intensity Maximum)* (**Photo 2**)

obtenue par traitement d'images vidéographiques moyennées[3] en niveau de gris (PLANT et HOLMAN, 1997) ou des limites d'humectation et lignes de rivage extraites d'images vidéographiques moyennées en couleur (AARNINKHOF, 2003). Ces entités représentent donc une position moyenne de la ligne instantanée de rivage durant une dizaine de minutes.

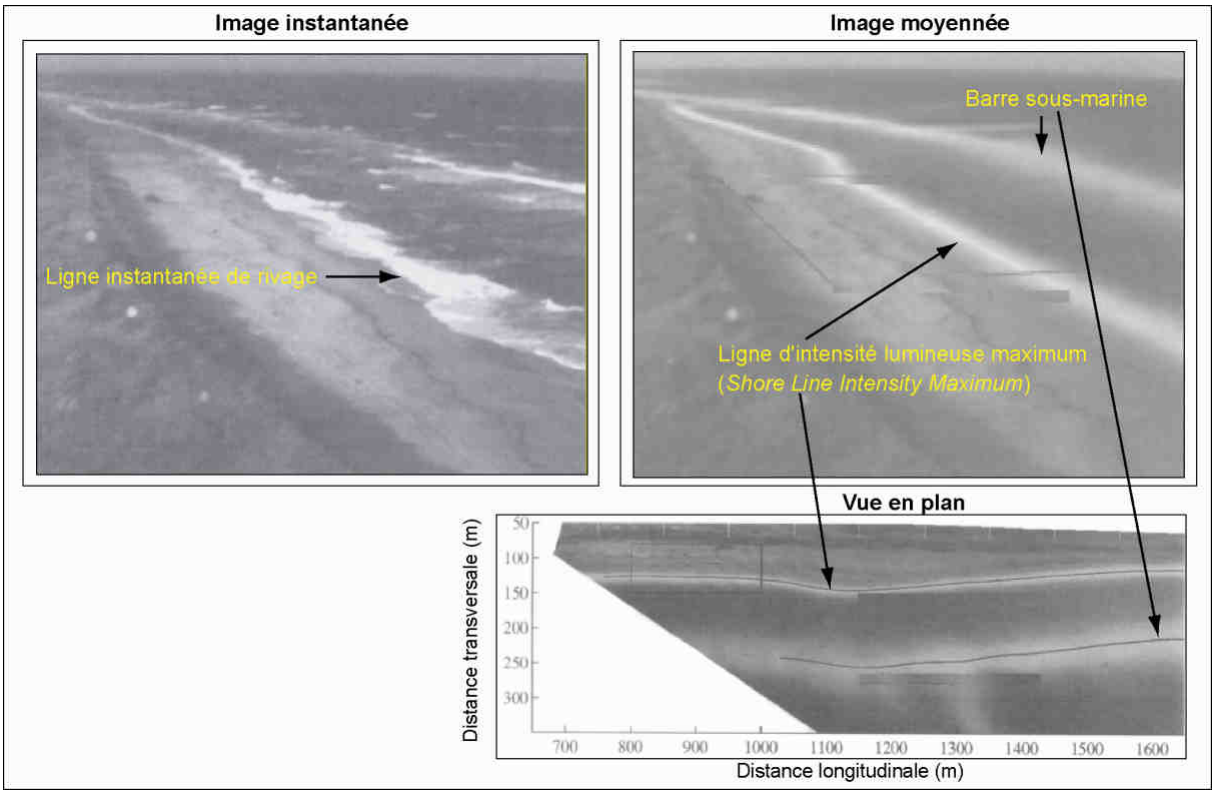


Photo 2 : Aspect de la ligne d'intensité lumineuse maximum sur une image vidéographique moyennée d'après PLANT et HOLMAN (1997). L'écume générée par le déferlement se manifeste sur les images moyennées par une bande lumineuse dont le centre correspond à la ligne de rivage recherchée.

Le squelette de plage entre également dans la catégorie des lignes de référence invisibles. Il correspond à la ligne médiane de la forme décrite par les contours de la plage circonscrite par la limite de végétation ou le pied de dune et la ligne d'humectation d'estran ou *«laisse apparente des hautes mers»* (ROBIN, 1990). Le squelette de plage est concerné par les mêmes problèmes évoqués précédemment à propos de la limite de végétation, du pied de dune ou des lignes faisant référence à un niveau instantané de hautes mers.

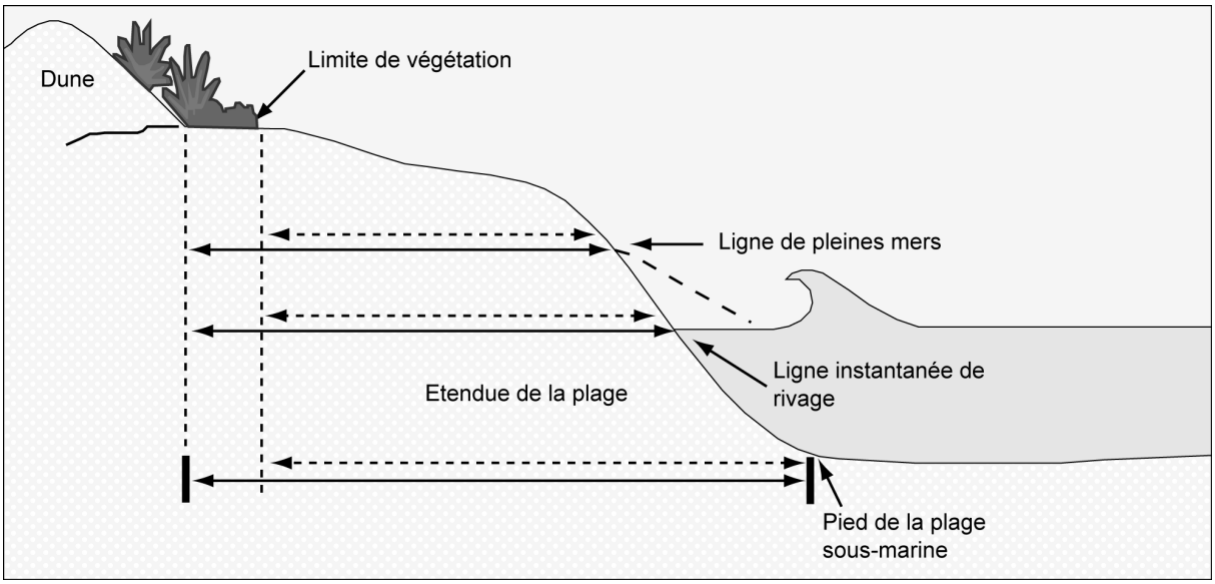
6 – L'étendue de la plage *(Beach width)*

Les variations de la largeur de la plage comprise entre une limite amont et une limite avale clairement définies constituent aussi un indicateur de l'évolution du rivage. La limite amont est fixée au

[3] Images vidéographiques obtenues en moyennant une séquence d'instantanés acquis durant dix minutes (PLANT et HOLMAN, 1997)

pied de la dune ou à la limite inférieure de végétation alors que la position de la limite avale varie selon les auteurs (**Figure 5**) : pied de la plage sous marine (COYNE *et al.,* 1999 ; NORCROSS *et al.,* 2002 ; FLETCHER *et al.*, 2003), ligne de pleines mers *(High water line)* (SMITH et ZARILLO, 1990), limite sable sec/sable mouillé *(Wet/dry line)* (HOEKE *et al.,* 2001) ou ligne instantanée de rivage (*Waterline*) (TURNER *et al.*, 2004 ; ANFUSO et MARTINEZ DEL POZO, 2005). Si le pied de plage ne répond qu'aux variations morpho-sédimentaires de la plage, en revanche les limites d'humectation et la ligne instantanée de rivage peuvent connaître de très fortes oscillations sur le court terme sous l'influence des facteurs marégraphiques et météo-marins.

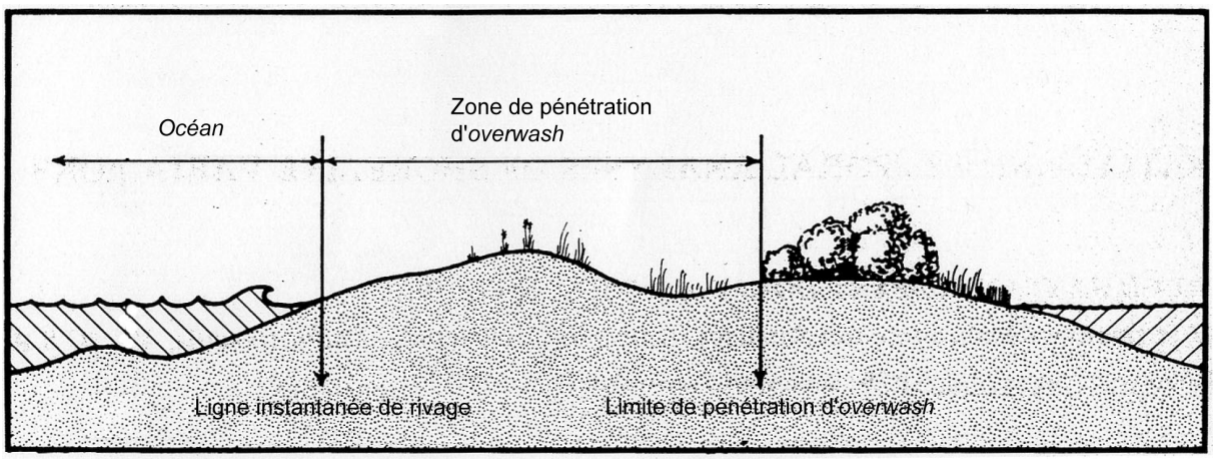
Figure 5 : Etendue de la plage entre le pied de dune ou la limite de végétation et la ligne instantanée de rivage, la ligne de pleines mers ou le pied de la plage sous-marine (Source : COYNE *et al.,* 1999 ; modifié)



7 – Les lignes de tempête *(Storm-surge penetration line, overwash penetration boundary,…)*

Ce sont des lignes liées aux événements météo-marins tempétueux. Elles marquent la limite de pénétration des eaux marines sur le continent à la suite d'une tempête. Cette limite est située en arrière de la végétation herbacée et elle est matérialisée par la ligne de végétation pérenne représentée par les arbustes, les buissons, les arbrisseaux *(Shrub vegetation line,* **Figure 6***)* (DOLAN *et al.,* 1978a ; 1978b ; HAYDEN *et al.,* 1979b ; DOLAN *et al.*, 1979 ; DOLAN *et al.*, 1980 ; DOLAN et HAYDEN, 1983). Elle est utilisée par ces auteurs dans les îles barrières de la côte orientale des Etats Unis pour étudier les zones exposées à des risques d'inondations et de dommages en cas d'ouragan ou de tempête. Dans cette partie du littoral américain, ces phénomènes tempétueux édifient quelquefois des terrasses de *washover* dont la crête est utilisable comme marqueur du trait de côte (MORTON et PAINE, 1985 ; PAINE et MORTON, 1989 ; MORTON et SPEED, 1998 ; MORTON et MCKENNA, 1999 ; PARKER, 2003).

Figure 6 : Représentation schématique de la limite de pénétration d'*overwash* dans une île barrière (Source : HAYDEN *et al.,* 1979b ; modifié)



Lorsque la tempête coïncide avec les plus hautes mers de vives-eaux, la limite de pénétration d'*overwash* sera presque équivalente à ce que PINOT (2001) appelle le trait de côte *«réel et permanent»* c'est-à-dire *«l'extrémité du jet de rive lors des fortes tempêtes survenant aux plus hautes mers de vives-eaux».* Toujours d'après PINOT (2001), ce trait de côte *«n'est pas constamment visible sur le terrain par une discontinuité dans la topographie ou la couverture végétale».*

Dès lors, le suivi de la cinématique du littoral passe le plus souvent par le choix de traits de côte de substitution, des repères ne reflétant qu'un équilibre passager et temporaire du littoral. En définitive, la ligne de référence choisie doit être susceptible de traduire les variations morpho-sédimentaires du littoral, identifiable sur l'ensemble de la zone d'étude et clairement définie pour faciliter son accession directement sur le terrain ou indirectement sur des images (PAJAK et LEATHERMAN, 2002). Le tableau 1 récapitule les différentes lignes de référence utilisées dans des études de cinématique littorale.

Tableau 1 : Exemples de lignes de référence relevées dans la littérature (Bibliographie non exhaustive)

CATEGORIES	LIGNES DE REFERENCE		AUTEURS
Lignes de référence morphologiques définies par une rupture de pente	Littoraux dunaires	Pied de dune (*Dune foot, dune toe*) ou ligne de dune (*Dune line*)	STAFFORD et LANGFELDER (1971) ; HEALY (1991) ; MORTON *et al.* (1993) ; BYRNES et HILAND (1994) ; MCBRIDE *et al.* (1995) ; KRAUS et ROSATI (1997) ; DOUGLAS *et al.* (1998) ; MORTON et SPEED (1998) ; GUILLÉN *et al.* (1999) ; GAILLOT et CHAVEROT (2001) ; HOEKE *et al.* (2001) ; OJEDA ZUJAR *et al.* (2002) ; PAJAK et LEATHERMAN (2002) ; STIVE *et al.* (2002) ; BATTIAU-QUENEY *et al.* (2003) ; BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR (2002 ; 2003) ; ZUZEK *et al.* (2003) ; DOMINGUEZ *et al.* (2005)
		Lisière du haut de falaise dunaire (*Dune top edge*)	THORNTON *et al.* (2006)

Lignes de référence morphologiques définies par une rupture de pente	Littoraux dunaires	Ligne de crête dunaire (*Dune crest line, crest of the dune*)	PAJAK et LEATHERMAN (2002) ; ZUZEK *et al*. (2003)
	Littoraux à falaises et plages adossées	Lisière du sommet de falaise (*Bluff top, cliff top, top of the cliff*)	BIRD (1985) ; CROWELL *et al*. (1991 ; KRAUS et ROSATI (1997) ; DOUGLAS *et al.* (1998) ; DONG et CHEN (1999) ; MOORE *et al*. (1999) ; GUY (1999) ; MOORE et GRIGGS (2002) ; BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR (2002 ; 2003) ; PAJAK et LEATHERMAN (2002) ; ZUZEK *et al.* (2003) ; DOMINGUEZ *et al.* (2005) ; EL ABDELLAOUI et OZER (2007) ; HAPKE et REID (2007)
		Pied de falaise (*Base of the bluff, cliff toe, bluff toe)*	MC CURDY (1950) ; BIRD (1985) ; MACKEY et GUY (1994) *In* LI *et al.* (2001b) ; KRAUS et ROSATI (1997) ; MOORE *et al.* (1999) ; GUY (1999) ; BIRD (2000 ; 2007) ; ZUZEK *et al.* (2003) ; PAJAK et LEATHERMAN (2002) ; BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR (2002 ; 2003) ; MORTON et MCKENNA (1999) ; LE BERRE *et al*. (2005)
	En présence d'éboulis au pied de la falaise	Sommet de l'éboulis (*Top of the landslide headwall*)	PRIEST (1999)
		Base de l'éboulis	BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR (2002 ; 2003)
		«Contour de la cicatrice d'arrachement»	ROBIN (2002)
	En cas de présence d'un front de mer protégé	Limite côté mer des ouvrages de défense *(Seaward most edge of hardening structures)*	MORTON et SPEED (1998) ; COYNE *et al*. (1999)
		Limite côté terre des ouvrages de défense *(Landward edge of shoreline protection structures)*	MOORE *et al.* (1999)
		Ligne de crête des structures de protection *(Crest of the shore-protection structure)*	GUY (1999)
	Crête de berme (*Berm crest*)		NATESAN et SUBRAMANIAN (1994) ; KRAUS et ROSATI (1997) ; MORTON et SPEED (1998) ; GUY (1999) ; MORTON et MCKENNA (1999) ; PAJAK et LEATHERMAN (2002) ; PANDIAN *et al*. (2004)
	Pied de la plage sous-marine (*Beach toe, base of the foreshore*)		COYNE *et al*. (1999) ; NORCROSS *et al*. (2002) ; FLETCHER *et al*. (2003) ; GENZ *et al*. (2007)
Limites de végétation	Limite côté mer de la végétation dunaire (*Vegetation line, seaward edge of dune vegetation*)		MC BETH (1956) ; BIRD (1985) ; MORTON et SPEED (1998) ; MORTON et MCKENNA (1999) ; MOORE *et al*. (1999) ; COYNE *et al.* (1999) ; BIRD (2000 ; 2007) ; MOORE et GRIGGS (2002) ; PAJAK et LEATHERMAN (2002) ; LEATHERMAN (2003) ; O'CONNELL (2003) ; LE BERRE *et al*. (2005) ; DEHOUCK (2006) ; FERREIRA *et al.* (2006)
	Limite côté mer de la végétation pérenne (arbres, arbustes) (*Line of permanent, stable, long-term vegetation*)		MORTON et PAINE (1985) ; PAINE et MORTON (1989) ; GUY (1999) ; PRIEST (1999) ; COYNE *et al*. (1999) ; TREPANIER *et al*. (2002)

Limites de végétation	Limite entre l'oyat (*Ammophila arenaria*) et le chiendent des sables (*Agropyrum junceum*) dans les littoraux dunaires tempérés	BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR (2002 ; 2003)
	Limite supérieure des algues ou des lichens marins (*Verrucaria maura*) sur les parois des falaises rocheuses	THIELER *et al*. (2001) ; BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR (2002 ; 2003) ; LE BERRE *et al*. (2005)
Niveaux instantanés de marée et limites d'humectation	Ligne instantanée de rivage (*Water line, swash line, swash terminus*)	BAULIG, H. (1956) ; ROUBERTOU et BONNEVAL (1965) ; STAFFORD et LANGFELDER (1971) ; BLODGET *et al*. (1991) ; RYAN *et al*. (1991) ; FRIHY *et al*. (1994 ; 1998) ; ZHANG *et al*. (1994) ; MASON et DAVENPORT (1996) ; JIMENEZ *et al.* (1997) ; SCHWABISCH *et al*. (2000) ; DURAN (1998 ; 2000) ; WHITE et EL ASMAR (1999) ; BO *et al*. (2000 ; 2001) ; NIEDERMEIER *et al*. (2000) ; GAILLOT et CHAVEROT (2001) ; ONANA *et al*. (2001) ; ZHU (2001) ; EL ASMAR et WHITE (2002) ; LOOS et NIEMAN (2002) ; RYU *et al*. (2002) ; BAGLI et SOILE (2003 ; 2004) ; DI *et al*. (2003a, 2003b) ; FOODY *et al*. (2003) ; GIORDANO *et al*. (2003) ; SABATIER et SUANEZ (2003) ; DILLENBURG *et al*. (2004) ; LIU et JEZEK (2004a, 2004b) ; SHAGUDE (2004) ; TURNER *et al*. (2004) ; AKONO *et al*. (2005) ; ANFUSO et MARTINEZ DEL POZO (2005) ; FOODY *et al*. (2005) ; GOPINATH et SERALATHAN (2005) ; GUARIGLIA *et al*. (2006) ; MUSLIM *et al*. (2006 ; 2007) ; RUIZ *et al*. (2007) ; EKERCIN (2007)
	Ligne de pleines mers assimilée à la limite sable sec/sable mouillé (*Wet/dry line, wet/dry boundary, wetted bound, wet/sand line*)	DOLAN *et al*. (1978a ; 1978b) ; HAYDEN *et al*. (1979) ; HAYDEN *et al*. (1979a, 1979b) ; DOLAN *et al*. (1979) ; DOLAN *et al*. (1980) ; DOLAN et HAYDEN (1983) ; MORTON et PAINE (1985) ; THIELER et DANFORTH (1994b) ; YOUNG *et al*. (1995) ; DOUGLASS *et al*. (1999) ; HOEKE *et al*. (2001) ; THIELER *et al*. (2001) ; O'CONNELL (2003) ; ROBERTSON *et al*. (2004)
	Ligne de pleines mers ou limite supérieure d'humectation de l'estran (*High water line*)	STAFFORD et LANGFELDER (1971) ; LEATHERMAN (1983) ; PENLAND et BOYD (1981) ; PHILLIPS (1986) ; SMITH et ZARILLO (1990) ; ANDERS et BYRNES (1991) ; CROWELL *et al*. (1991 ; 1993) ; SHOSHANI et DEGANI (1992) ; GORMAN *et al*. (1998) ; MORTON et SPEED (1998) ; FARELL *et al*. (1999) ; FENSTER et DOLAN (1999) ; LEATHERMAN et ANDERS (1999) ; LEATHERMAN et ESKANDARY (1999) ; O'CONNELL et LEATHERMAN (1999) ; GALGANO et DOUGLAS (2000) ; DOUGLAS et CROWELL (2000) ; HONEYCUTT *et al*. (2001) ; PAJAK et LEATHERMAN (2002) ; ZHANG *et al*. (2002) ; LEATHERMAN (2003) ; MAKOTA *et al*. (2004) ; ZHANG *et al*. (2004) ; MOORE *et al.* (2006) ; ROMAGNOLI *et al*. (2006)
	Ligne de pleines mers assimilée aux laisses de hautes mers (algues) (*High tide wrack line*)	THIELER *et al*. (2001) ; O'CONNELL (2003)
	Ligne des pleines mers moyennes, habituelles (*Usual or mean high water*	MC CURDY (1950) ; MCBETH (1956) ; NICHOLS et MCLAUGHLIN, 1984 ; BYRNES

	line, average high water line) déterminée par la limite supérieure d'humectation de l'estran, les laisses de mers et les ruptures de pente entre autres	et HILLAND (1994 ; 1995) ; MCBRIDE *et al*. (1995) ; KAMINSKY *et al*. (1999) ; RUGGIERO *et al*. (2003) ; LANGLEY *et al*. (2003) ; CHANG *et al*. (2005) ; CHU *et al*. (2006)
Datums marégraphiques	Ligne du niveau moyen local de la mer *(Mean sea level)*	HORIKAWA (1988) ; AAGAARD *et al*., 2004
	Ligne du niveau moyen des hautes mers (*Mean high water line*)	COUTTS (1989) ; BASCO *et al.* (1997) ; DEAN et MALAKAR (1999) ; PARKER (2001) ; STIVE *et al*. (2002) ; STOCKDON *et al*. (2002) ; WOOLARD *et al*. (2003) ; MORTON *et al*. (2004 ; 2005) ; MORTON et MILLER (2005) ; HAPKE *et al.* (2006) ; LIU *et al*. (2007) ; FARRIS et LIST (2007) ; MILLER et DEAN (2007)
	Ligne du niveau moyen des pleines mers de vives-eaux d'équinoxe *(Mean spring high water line, mean high water spring tide)*	STIVE *et al*. (2002) ; REEVE et SPIVACK (2004)
	Ligne du niveau moyen des plus hautes mers *(Mean higher high water line*)	ALLAN *et al*. (2003)
	Ligne du niveau moyen des basses mers (*Mean low water line*)	REEVE et FLEMING (1997) ; STIVE *et al*. (2002)
	Ligne du niveau moyen des basses mers de mortes-eaux d'équinoxe *(Mean low water spring tide mark)*	AURROCOEACHA et PETHICK (1986)
	Ligne du zéro hydrographique ou niveau des plus basses mers astronomiques	LAFON *et al*. (2000 ; 2002)
Lignes de référence virtuelle	Ligne d'intensité lumineuse maximum sur des images vidéographiques moyennées en niveau de gris (*Shore line intensity maximum*)	PLANT et HOLMAN (1997) ; PLANT *et al.* (2007)
	Ligne de rivage extraite à partir de la distinction de couleur et de la luminance sur des images vidéographiques moyennées en couleur	AARNINKHOF (2003) ; PLANT *et al.* (2007)
	Squelette de plage (Axe médian de la forme du contour de la plage)	ROBIN (1990)
Contours de la plage	Largeur de la plage (*Beach width*)	SMITH et ZARILLO (1990) ; MORTON *et al.* (1993) ; COYNE *et al.* (1999) ; DOUGLASS *et al.* (1999) ; HOEKE *et al.* (2001) ; NORCROSS *et al.* (2002) ; ANFUSO et MARTINEZ DEL POZO (2005)
Lignes de tempête	Limite de pénétration des ondes de tempête ou d'*overwash* (*Storm-surge penetration line, overwash penetration boundary*)	DOLAN et al. (1978a ; 1978b) ; HAYDEN *et al.* (1979) ; HAYDEN *et al.* (1979a, 1979b) ; DOLAN *et al.* (1979) ; DOLAN *et al.* (1980) ; DOLAN et HAYDEN (1983) ; PINOT (2001)
	Crête des terrasses de *washover* (*Crest of washover terrace*)	MORTON et PAINE (1985) ; PAINE et MORTON (1989) ; MORTON et SPEED (1998) ; MORTON et MCKENNA (1999) ; PARKER (2003)

II – LES METHODES D'EXTRACTION DU TRAIT DE CÔTE

Les principales sources d'information sur la position historique du trait de côte sont les levés de terrain et le plus souvent des documents iconographiques en particulier des cartes, des

photographies aériennes, des images satellitaires optiques et radar ainsi que des enregistrements vidéographiques. Notons au passage que les cartes historiques (topographiques, cadastrales, marines ou bathymétriques) sont des sources de seconde main car le trait de côte qui y figure est déjà levé par les topographes ou hydrographes et dessiné par le cartographe. Elles comportent des sources d'incertitude liées à la précision des levés, à la conception et au support de la carte (CARR, 1962 ; 1980 ; ANDERS et BYRNES, 1991 ; CROWELL *et al.,* 1991). Quant aux images aériennes et satellitaires, elles sont affectées, elles aussi, par quelques problèmes de qualité ayant trait à la radiométrie et aux déformations géométriques dues aux conditions de prises de vue, aux matériels, aux films et au relief (STAFFORD et LANGFELDER, 1971 ; DOLAN *et al.*, 1978a ; ANDERS et BYRNES, 1991 ; CROWELL *et al.*, 1991 ; THIELER et DANFORTH, 1994a ; MOORE, 2000). A ces limites, s'ajoute pour les images satellitaires, une résolution spectrale et spatiale pas toujours adaptée (GRENIER et DUBOIS, 1990 ; CRACKNEL, 1999 ; WHITE et EL ASMAR, 1999 ; ROBIN, 2002).
Dans le cadre d'une étude diachronique, il convient de minimiser ou de corriger toutes ces imperfections autant que possible avant l'extraction de la ligne de référence (CROWELL *et al.*, 1991).

1 – Les méthodes manuelles d'extraction du trait de côte

La technique de détection la plus courante appliquée aux lignes de référence visibles est l'interprétation visuelle réalisée soit directement sur le terrain, soit indirectement sur un document iconographique (photographies aériennes, images, cartes, etc.) (BOAK et TURNER, 2005). Sur une photographie aérienne ou une image, on procède par photo-interprétation manuelle ou assistée par ordinateur. Les lignes instantanées de rivage, les limites d'humectation et les limites de végétation sont repérées par les variations de tons en niveaux de gris ou des variations de couleur (**Photos 3** et **4**). Ce qui nécessite des clichés présentant un bon contraste surtout pour les limites d'humectation.

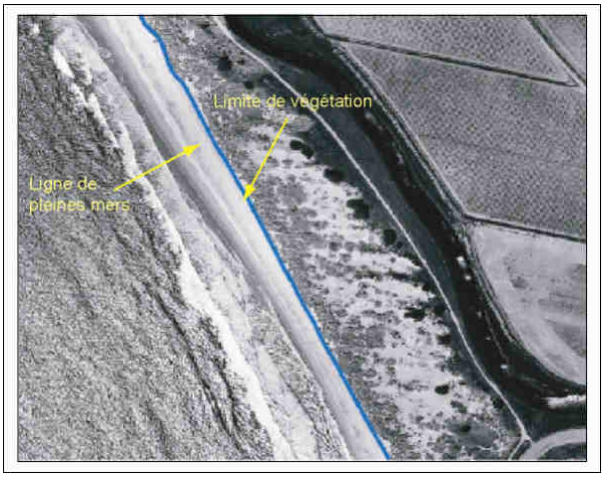


Photo 3 : Variations de contraste indiquant la ligne de pleines mers ou la limite de végétation sur une photographie aérienne panchromatique (Source : MOORE et GRIGGS, 2002 ; modifié)

Photo 4 : Variations de couleur marquant la limite d'humectation ou la limite de végétation sur une photographie aériennes en couleur (Source : HOEKE *et al.,* 2003 ; modifié)

Quant aux traits de côte morphologiques comme la crête de berme, la crête de dune, le pied de dune ou de falaise, … une vision stéréoscopique est nécessaire pour identifier la ligne de référence à moins qu'elle ne corresponde à une limite de végétation ou à des variations de contraste. Néanmoins, certaines lignes comme le pied de falaise ne sont pas toujours détectables dans les côtes à falaises vives verticales du fait des ombres générées quelquefois par le haut de l'escarpement (VERGER, 1996). Sur une carte, la ligne de référence est repérée selon les indications de la légende mais il faut s'assurer auparavant que la définition donnée au trait de côte lors des différents levés est la même d'une carte à une autre.

En ce qui concerne l'extraction proprement dite, l'opérateur dessine directement le trait de côte sélectionné sur un support transparent superposé au document de référence (photographie aérienne, cartes, etc.) ou avec un digitaliseur sur une table à digitaliser. La restitution du trait de côte est possible aussi avec un *Stereo Zoom Transfer Scope* (LEVOY et FLAGEOLLET, 1986 ; SMITH et ZARILLO, 1990 ; MCBRIDE *et al.,* 1995 ; SUANEZ et SIMON, 1997). Les cartes ou les photographies aériennes peuvent être également numérisées et exploitées par photo-interprétation assistée par ordinateur. Ainsi, en fonction des indicateurs de l'entité de référence, la ligne est repérée et digitalisée à l'écran avec une souris sur fond d'images grâce à des logiciels spécialisés (DAO[4], CAO[5], SIG).

La précision des lignes extraites par ces méthodes dépend en grande partie de la qualité des documents de base, du matériel utilisé, des conditions de travail, de l'appréciation et de l'expérience du photo-interprète (MOORE, 2000). Elle est extrêmement variable aussi bien pour un même opérateur (THIELER ET DANFORTH, 1994a ; COYNE *et al.* 1999 ; DURAND, 2000 ; FLETCHER *et al.,* 2003) que pour plusieurs opérateurs (PAJAK et LEATHERMAN, 2002 ; RUGGIERO *et al.,* 2003 ; MOORE *et al.,* 2006). Par exemple, RUGGIERO *et al.* (2003) ont mesuré un écart moyen de 2 m entre deux numérisations d'une ligne de pleines mers moyennes (*Average high water line*) par un même opérateur. Lorsqu'ils ont comparé les résultats de ce premier opérateur avec la même ligne numérisée par un autre opérateur sur la même image, ils ont constaté un décalage moyen de 19 m entre les deux interprétations. MOORE *et al.* (2006) ont mené aussi une expérience similaire entre trois photo-interprètes expérimentés en matière d'interprétation de la limite supérieure d'humectation de l'estran (*High water line*). Les écarts qu'ils ont mesurés varient de 4,1 m (entre le premier photo-interprète et le deuxième) à 0,6 m (entre le deuxième et troisième) soit 4,7 m (entre le premier et le troisième photo-interprète). Ce caractère subjectif et non reproductible constituent de grosses faiblesses pour cette approche traditionnelle de détection et d'extraction du trait de côte et justifient le développement ainsi que la recherche de méthodes automatiques ou semi-automatiques reproductibles et plus performantes (RYAN *et al.*, 1991 ; SHOSHANY et DEGANI, 1992 ; DELLEPIANE *et al.*, 2004 ; LIU et JEZEK, 2004a ; 2004b ; BOAK et TURNER, 2005).

[4] Dessin assisté par ordinateur
[5] Conception assistée par ordinateur

2 – Techniques semi-automatiques d'extraction de lignes de référence

Les techniques sont très diverses et procèdent essentiellement par traitement d'images. Elles concernent surtout la détection et l'extraction de l'interface terre – eau (ligne instantanée de rivage) et dans une moindre mesure les datums marégraphiques, la limite de végétation et les contours de la plage.

2.1 – La ligne instantanée de rivage

Les procédés mobilisés varient suivant la nature des données utilisées (images satellitaires optiques, radar et enregistrements vidéographiques).

2 .1.1 – … Sur les images optiques

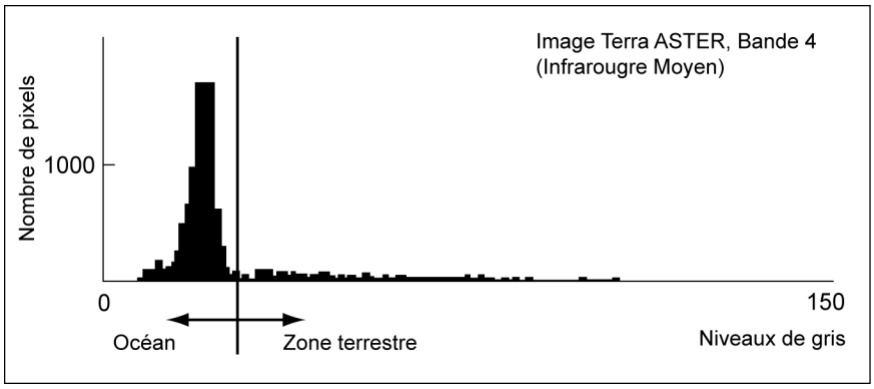
Sur les images de télédétection passive, les principaux canaux utilisés pour la détection de l'interface terre – mer sont le proche infrarouge (BLODGET *et al.*, 1991 ; ROBIN, 1995 ; 2002 ; VERGER, 1996 ; WILSON, 1997 ; THOMAS et DIAW, 1997 ; CODJIA et DOMINGO, 1998 ; THOMAS *et al.,* 1998 ; EL-RAEY *et al.*, 1999 ; ZHU, 2001 ; KARANTZALOS, 2002 ; EKERCIN, 2007 ; …) et le moyen infrarouge ou infrarouge à ondes courtes (WHITE et EL ASMAR, 1999; FRAZIER et PAGE, 2000 ; RYU *et al.*, 2002 ; BAGLI et SOILE, 2004 ; LIU et JEZEK, 2004 ; YAMANO *et al.,* 2006 ; EKERCIN, 2007 ; …). Toutefois, la netteté de la ligne instantanée de rivage dans le proche infrarouge est affectée par les eaux turbides (VERGER, 1996 ; FRAZIER et PAGE, 2000) et l'écume générée par le déferlement alors que le moyen infrarouge et l'infrarouge à ondes courtes sont sensibles à l'eau piégée dans les sédiments intertidaux (RYU *et al.*, 2002 ; FRAZIER et PAGE, 2000).
L'extraction de la ligne instantanée de rivage est réalisée soit par des techniques classiques de traitement d'images (seuillage, classifications) disponibles dans tous les logiciels commerciaux de traitement d'images, soit des méthodes fondées sur de nouveaux algorithmes d'agrégation des pixels notamment la segmentation par croissance de région (*Region Growing*), ligne de partage des eaux (*Watershed segmentation*) ou la connectivité floue (*Fuzzy connectivity*) par exemple.

2.1.1.1 – Le seuillage

Le seuillage de l'histogramme est une technique ancienne et très répandue de reconnaissance de la ligne de rivage instantanée (VERGER, 1996 ; WILSON, 1997). Pour ce faire, une valeur de partition est choisie en examinant la morphologie de l'histogramme (**Figure 7**) de l'image afin d'identifier un point de rupture ou de transition entre les populations de pixels correspondant aux zones terrestres et marines. Il en résulte une image binaire. Une autre méthode consiste à choisir plusieurs valeurs de partition et générer une image en équidensitométrie *(Density slicing)* où chaque gamme de gris sera représentée par une couleur (FRAZIER et PAGE, 2000 ; RYU *et al.*, 2002 ; YAMANO *et al.,* 2006). Selon FRAZIER et PAGE (2000), pour les données Landsat TM

par exemple, le canal TM 5 (moyen infrarouge) donne les meilleurs résultats avec la méthode de l'équidensitométrie.

Figure 7 : Histogramme d'une image infrarouge du satellite Terra Aster concernant une plage de l'Atoll de Majuro dans les îles Marshall (Source : YAMANO *et al.,* 2006 ; modifié)



2.1.1.2 – Les classifications

Les techniques de détection de l'interface terre/mer par classification utilisent des algorithmes de classification non dirigée ou des algorithmes de classification dirigée. Ainsi, la classification non supervisée par la méthode ISODATA *(Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques)* a été utilisée avec succès par EKERCIN (2007) sur des images Landsat MSS (proche infrarouge), TM et ETM+ (moyen infrarouge) et par GUARIGLIA *et al.* (2006) sur des ortho-images aériennes panchromatiques, des données SPOT, Landsat TM (proche et moyen infrarouge) ainsi que des images aériennes infrarouges.

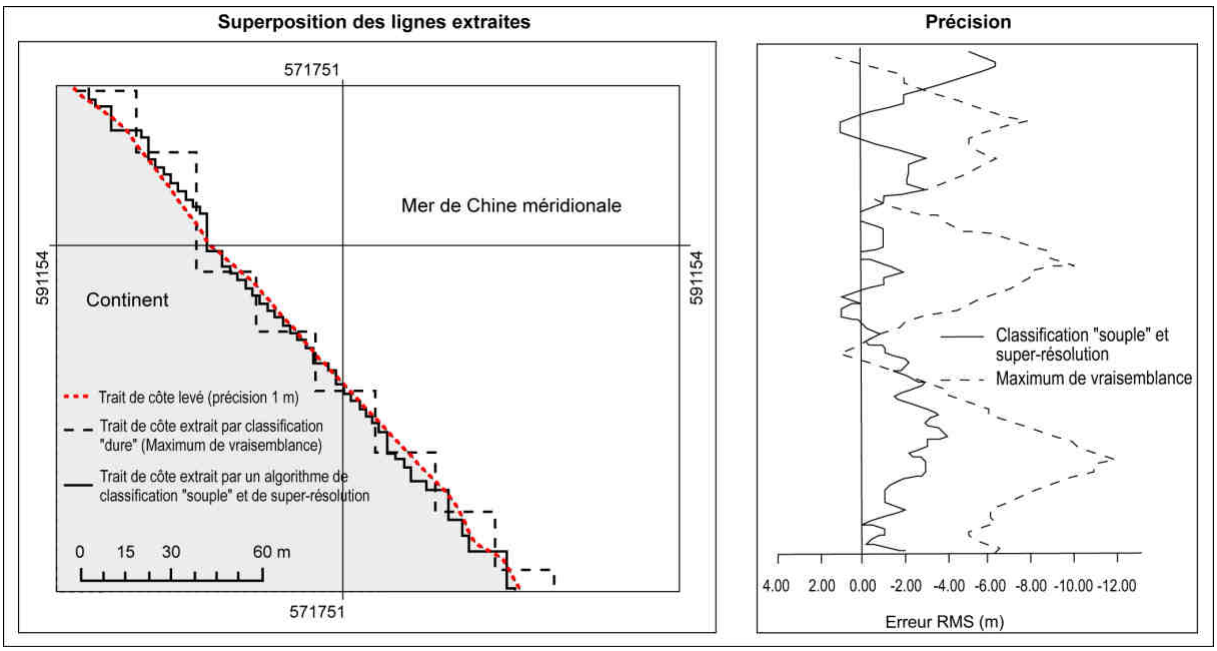
D'autres approches sont fondées sur la classification dirigée par le maximum de vraisemblance (FRAZIER et PAGE, 2000 ; CHANG *et al.,* 2005 ; NIEDERMEIER *et al.,* 2005) ou les réseaux de neurones appliquée par ZHU (2001) sur des images Landsat MSS et TM (proche infrarouge).

2.1.1.3 – Autres exemples d'algorithmes d'extraction de la ligne instantanée de rivage sur des images de télédétection passive

D'après FOODY *et al.* (2003), les méthodes de classifications traditionnelles représentent la ligne instantanée de rivage de façon inappropriée car elles forcent les pixels mixtes (mixel) souvent abondants à l'interface terre – eau à appartenir à une seule classe ; ce qui peut décaler de façon non négligeable la position de la ligne instantanée de rivage par rapport à sa position réelle sur le terrain particulièrement dans le cas d'images à résolution spatiale moyenne ou faible. Pour pallier ce problème, ils proposent une approche alternative. Cette approche combine des algorithmes de classification souple *(soft classification)* supervisée permettant à un pixel d'avoir une classe d'appartenance partielle ou multiple et des algorithmes de super résolution pour positionner la ligne de rivage à travers un pixel et non entre deux pixels comme c'est le cas avec les algorithmes de

classification traditionnelle. Les tests menés sur des images IKONOS d'un mètre de résolution concernant les côtes malaisiennes indiquent une certaine amélioration de la précision du référencement de la ligne de rivage avec cette nouvelle approche (**Figure 8**).

Figure 8 : Comparaison des traits de côte extraits par classification «dure» (Maximum de vraisemblance) et par classification «souple». (Source : FOODY *et al.,* 2003 ; modifié)



WILSON (1997) a formalisé un ensemble de règles pour l'extraction automatique de la ligne instantanée de rivage sur des données Landsat MSS (bande 6, proche infrarouge). Il a développé à cet effet un algorithme utilisant la segmentation par croissance de région *(Region Growing*). Une approche similaire a été adoptée par WHITE et EL ASMAR (1999) pour étudier l'évolution littorale dans le delta du Nil à partir de données Landsat TM (bande 7, infrarouge à ondes courtes). Aussi, pour alimenter une base de données regroupant des traits de côte pan-européens, BAGLI et SOILE (2003 ; 2004) se sont inspirés de la démarche de WILSON (1997). Par ailleurs dans le cadre du même projet, ils ont développé un autre algorithme fondé sur la segmentation par ligne de partage des eaux *(Watershed segmentation)* à partir de marqueurs. L'indice de performance de ces algorithmes sur des images Landsat ETM+ a été estimé entre 96 et 97 % après comparaison avec un trait de côte de référence.

L'approche semi-automatique proposée par BO *et al.* (2000) s'appuie, quant à elle, sur le concept de connectivité floue *(Fuzzy connectivity)* pour générer à partir, d'une «graine[6]», une image de connectivité et détecter la ligne instantanée de rivage par seuillage de l'image de connectivité. L'efficacité de cet algorithme sur des données Landsat n'a pas été quantifiée par les auteurs qui se sont contentés d'une validation visuelle et ont relevé une bonne correspondance entre la ligne extraite par le programme et l'image originale.

[6] Pixel représentatif de l'objet à extraire

2 .1.2 – … Sur les images radars

Concernant les images radars, le faible contraste entre l'océan et les zones terrestres ainsi que la présence d'un ensemble de petites taches appelé chatoiement limitent l'utilisation des algorithmes classiques de traitement d'image et nécessite la mise au point d'algorithmes spécifiques et très complexes (LEE et JURKEVICH, 1990 ; ZHANG *et al.,* 1994 ; MASON et DAVENPORT, 1996 ; DESCOMBES *et al.,* 1996 ; SCHWABISCH *et al.,* 1996 ; BO *et al.,* 2001 ; DELLEPIANE *et al.,* 2004 ; LIU et JEZEK, 2004a ; NIEDERMEIER *et al.*, 2005). Ils utilisent une approche hiérarchique (multirésolution) et génèrent des résultats variables. Ainsi, par exemple, l'algorithme de LEE et JURKEVICH (1990) utilisant le filtrage, le seuillage, des opérateurs de morphologie mathématique et de détection de contours, permet de détecter, dans 75% des cas, une ligne de rivage avec une précision de 1 à 2 pixels[7] sur une image Seasat SAR. Pour élaborer un modèle numérique d'estran à partir des lignes instantanées de rivage et des hauteurs d'eau, MASON et DAVENPORT (1996) ont développé un algorithme qui exploite la texture des images pour détecter les contours grâce à un filtre de ratio de contraste et utilise des modèles de contours actifs (*snake*) pour extraire la ligne de rivage. Les tests sur une image SAR ERS-1 indiquent que 90 % de la ligne extraite était visuellement corrects. Après comparaison avec des mesures de terrain, les auteurs évaluent la précision de l'algorithme à 1 pixel[8] dans les zones où l'image était nette. L'algorithme de NIEDERMEIER *et al.* (2000) basé sur la méthode de détection des contours par les ondelettes de Mallat et les contours actifs pour joindre les segments détectés atteint une précision de 2,5 pixels pour la ligne de rivage terrestre et de 1,1 pixels[9] pour les lignes de rivage insulaires sur des images SAR ERS-2. Sur le même type d'image (SAR ERS1 et 2) celui de DELLEPIANE *et al.* (2004) utilisant la théorie de la connectivité floue et exploitant les mesures de cohérence extraites d'un couple InSAR atteint une précision moyenne de 3,5 pixels[10]. D'autres algorithmes utilisant la segmentation par la distribution de GIBBS (ZHANG *et al.,* 1994), les champs markoviens (DESCOMBES *et al.,* 1996), le seuillage localement adaptatif et le filtre de CANNY (LIU et JEZEK, 2004a) ont été développés aussi pour la détection de la ligne instantanée de rivage sur des images SAR (**Tableau 2**).

2 .1.3 – … Sur les images vidéographiques

En ce qui concerne les images vidéographiques moyennées, quatre modèles ont été mis au point pour la reconnaissance et l'extraction automatiques de la position de la ligne de rivage suivant deux approches (AARNINKHOF, 2003 ; PLANT *et al.*, 2007). La première approche s'apparente à celle des algorithmes de classification avec un regroupement des pixels selon l'intensité de leur couleur *(Pixel Intensity Clustering model)* ou par des réseaux de neurones *(Artificial Neural Network model).* La seconde approche est basée sur l'extraction d'une valeur d'intensité maximale à partir de transects radiométriques de la zone intertidale *(Shore Line Intensity Maximum model)* (**Figure 9**) ou

[7] Taille du pixel : 25 m
[8] Taille du pixel : 12,5 m
[9] Taille du pixel : 12,5 m
[10] Taille du pixel : 20 m

l'identification d'un point de divergence entre le rouge, le vert et le bleu *(Color Channel Divergence model)* dans la zone de déferlement (**Figure 10**).

Chacun de ces modèles a été développé pour un type de plage aux conditions hydrodynamiques bien particulières. Ils permettent de suivre les variations de la position de la ligne de rivage en fonction du niveau d'eau durant un cycle tidal pour en déduire un modèle numérique de terrain d'une précision centimétrique après correction des biais liés au *setup* et au déferlement (PLANT *et al.*, 2007).

Figure 9 : Extraction de la ligne d'intensité lumineuse maximum par le modèle SLIM d'après PLANT *et al.* (2007). La ligne de rivage est extraite en ajustant un modèle d'intensité aux valeurs d'intensité extraites de l'image.

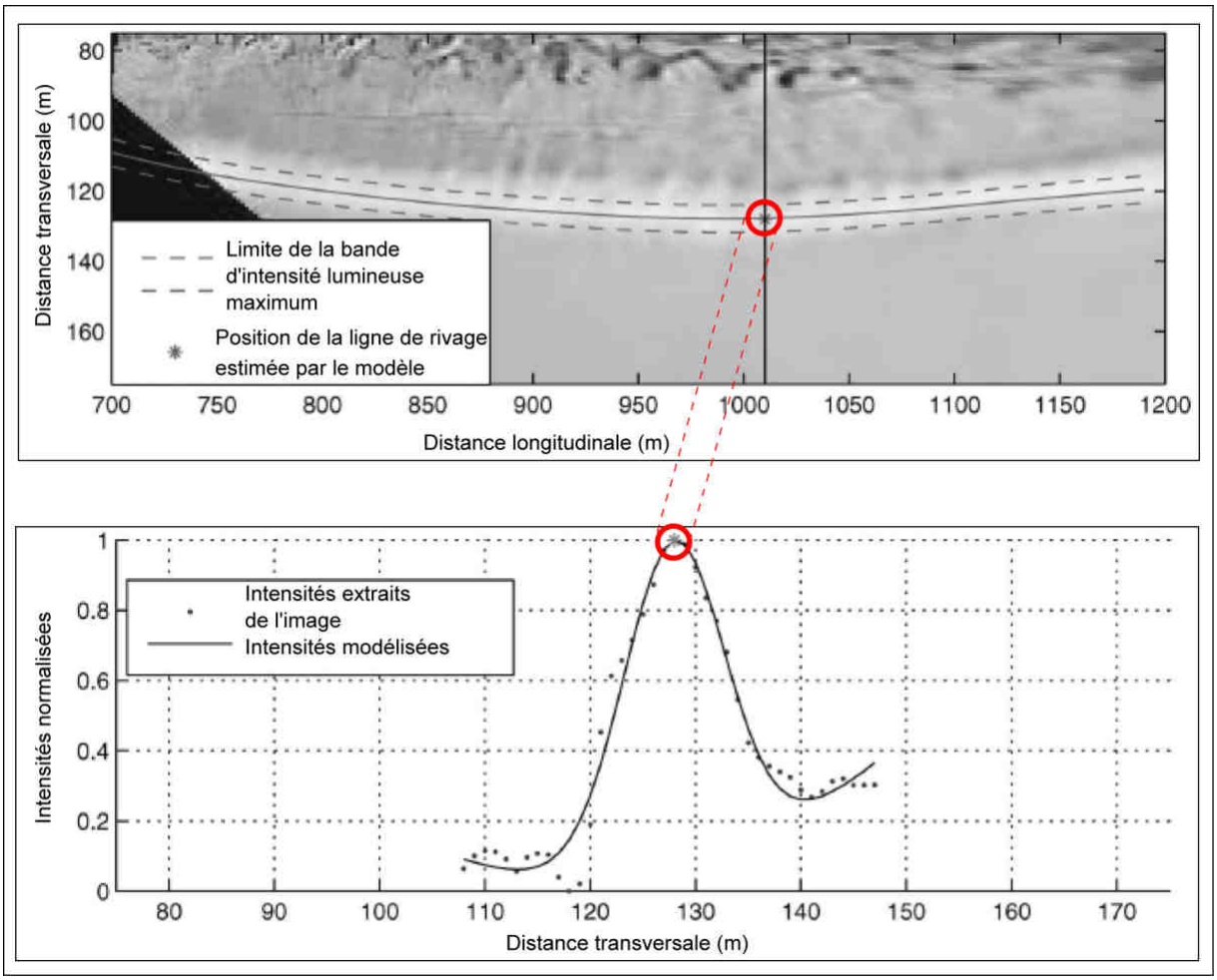
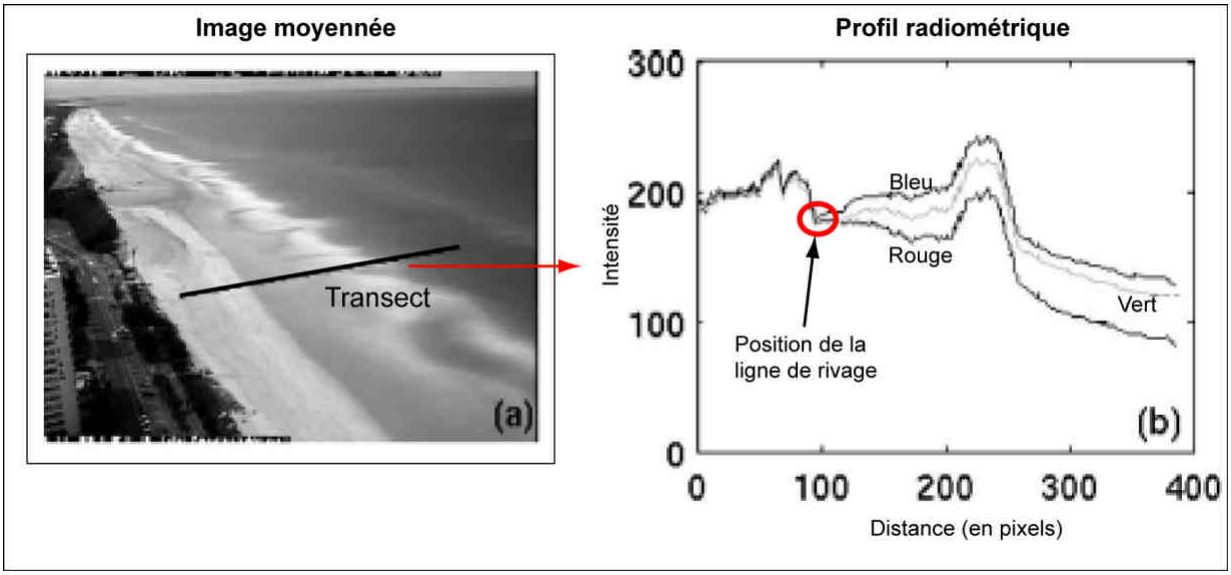


Figure 10 : Détection de la ligne de rivage par le modèle CCD *(Color Channel Divergence)* d'après PLANT *et al.* (2007). La ligne de rivage correspond au point de divergence entre le rouge, le vert et le bleu sur une image vidéographique en couleur.



2.2 – La ligne du niveau moyen des pleines ou basses mers

A défaut d'une coïncidence entre la marée de référence et les missions aériennes, l'extraction indirecte des datums marégraphiques nécessite des sources de données altimétriques comme le Lidar ou un modèle numérique de terrain. L'extraction de la courbe de niveau des pleines ou basses mers moyennes se fait alors soit par des profils transversaux à la plage, soit par l'intersection d'un niveau de marée avec un modèle numérique d'élévation soit encore par le traitement d'image.

La technique des profils en travers a été développée par STOCKDON *et al.* (2002) et utilisée ensuite dans plusieurs publications (MORTON *et al.,* 2004 ; 2005 ; HAPKE et REID, 2006 ; HAPKE *et al.,* 2007). Dans cette approche, des profils Lidar sont extraits à intervalles réguliers suivant des transects perpendiculaires au rivage (**Figure 11a**). Le long de chaque profil, les données altimétriques sont réduites à une altitude proche du datum (±0,5 m) et ajustées par une droite de régression linéaire par les moindres carrés. L'intersection entre la pente de la droite de régression et l'altitude des pleines mers moyennes représente la position horizontale de la ligne recherchée à ce niveau (**Figure11b**). En répétant cette procédure pour tous les profils, on génère un ensemble de points correspondant au trait de côte. La précision de cette technique a été estimée à ±1,1 ; ±1,4 m par STOCKDON *et al.* (2002).

Figura 11 : Extraction de la ligne des pleines mers moyennes à partir d'un profil Lidar concernant le secteur de Kitty Hawk en Caroline du Nord (Etats Unis), d'après MORTON *et al.* (2005 ; modifié).

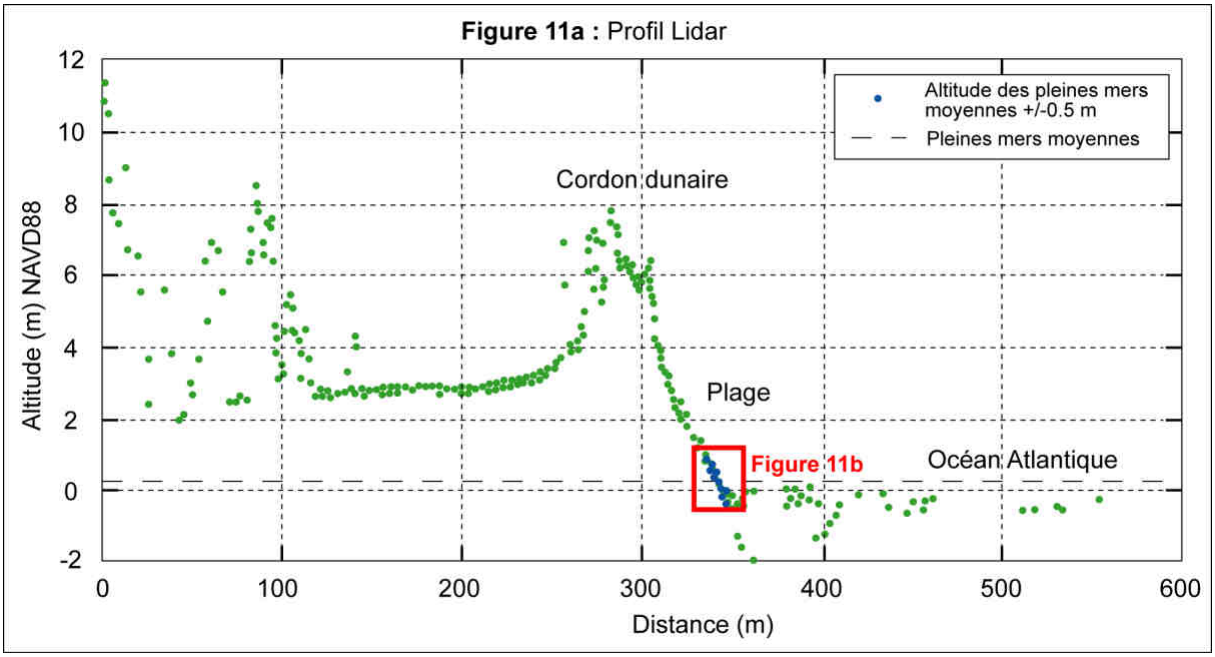
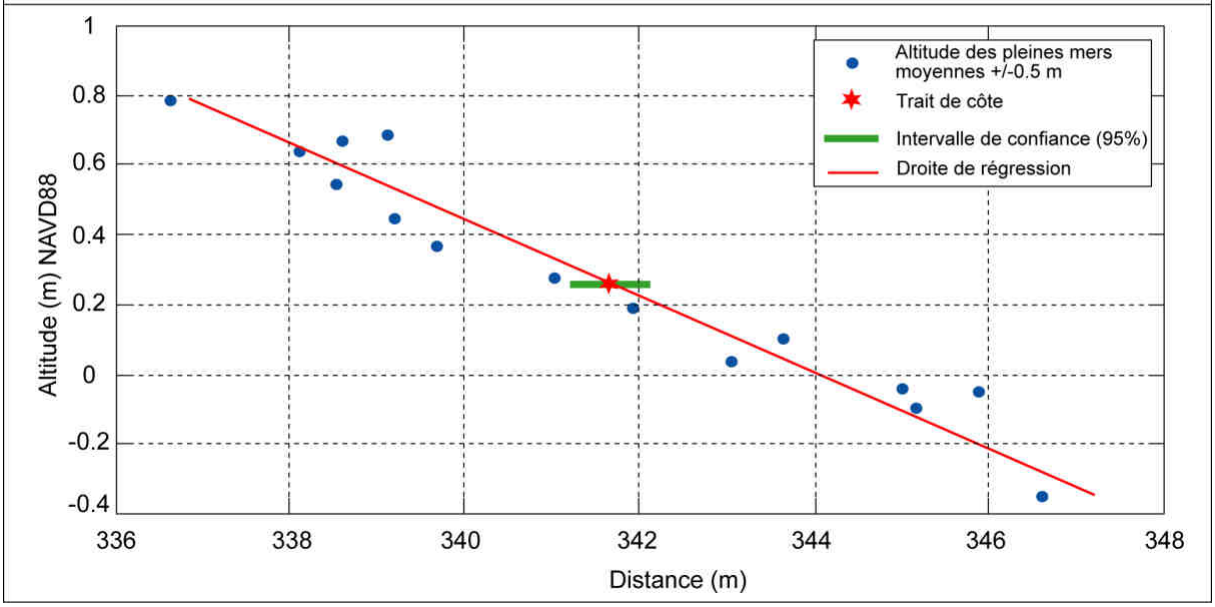


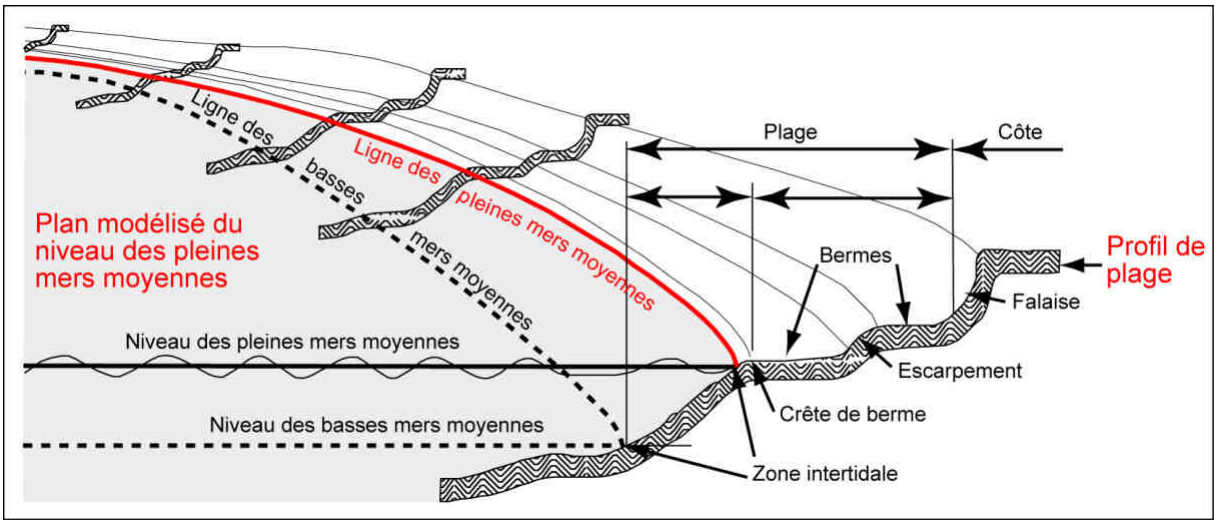
Figure 11b : Extraction de la position de la ligne des pleines moyennes par une régression linéaire. La position de la ligne correspond au point d'intersection entre la plage, la droite de régression et la barre d'intervalle de confiance 95%



Une autre approche consiste à «intersecter» le niveau des pleines mers moyennes avec les données Lidar pour obtenir une courbe de niveau. Dans cette optique, des hauteurs d'eau collectées à partir de marégraphes situés dans la zone d'étude ou à proximité sont projetées sur un modèle numérique d'élévation dérivé de mesures Lidar (ROBERTSON *et al.*, 2004). On peut utiliser aussi un modèle hydrodynamique pour générer un niveau d'eau et l'élever jusqu'aux hautes mers moyennes puis le croiser avec des profils Lidar (PARKER, 2001 ; 2003) (**Figure 12**). Les incertitudes sur le positionnement de la ligne émanant de ces méthodes sont déterminées par la qualité du modèle

hydrodynamique et l'extrapolation des mesures marégraphiques pour les zones dépourvues de marégraphe.

Figure 12 : Intersection entre une surface représentant le datum des pleines mers moyennes et des profils de plage provenant d'un modèle numérique de terrain (Source : PARKER, 2003 ; modifié).



L'extraction de la ligne du niveau des pleines mers moyennes peut se faire également par le traitement d'une image hypsométrique résultant de la fusion d'un modèle numérique de terrain issu de mesures Lidar et d'un modèle représentant le niveau des pleines mers moyennes. La méthode de LIU *et al.* (2007) basée sur la segmentation et des opérateurs de morphologie mathématique donne une précision variant entre – 3,41 m et +3,71 m ou entre – 4,21 m et 4, 51 m en considérant l'imprécision du Lidar.

LI *et al.* (2001a ; 2001b ; 2002) ont aussi proposé une méthode pour dériver la ligne du niveau des pleines mers moyennes ou des basses mers moyennes par soustraction de deux grilles. L'une de ces grilles représente le datum marégraphique et l'autre un modèle numérique de terrain côtier dérivé de couples de photographies aériennes ou d'images satellitaires haute résolution (IKONOS par exemple) et qui intègre en plus des données bathymétriques. Le trait de côte recherché correspond aux zones où la différence entre les cellules des deux grilles est nulle. Les résultats expérimentaux pour une ligne du niveau moyen des plus basses mers indiquent une précision de l'ordre de 2 à 13 m en fonction de la précision des modèles utilisés (LI *et al.,* 2001a).

Sur le même registre, LAFON *et al.* (2000 ; 2002) ont eu recours à un modèle qui calcule la profondeur en fonction de la réflectance de l'eau sur des images SPOT XS pour extraire le zéro des cartes marines ou zéro hydrographique dans l'embouchure du bassin d'Arcachon. Ils évaluent la marge d'erreur entre 20 et 45% du linéaire extrait selon la précision du géoréférencement des images et la turbidité de l'eau.

2.3 – La limite de végétation

Pour retracer l'évolution littorale dans le delta du fleuve Rouge au Vietnam avec la limite inférieure de végétation comme indicateur, TREPANIER *et al.* (2002) ont utilisé l'indice de végétation SAVI *(Soil Adjusted Vegetation Index)* pour détecter les contours de la couverture végétale pour chaque date sur des images SPOT HRV. Ils ont simultanément appliqué un masque binaire uniquement sur la végétation. Par la suite, une soustraction des masques binaires correspondant aux différentes dates leur a permis de mettre en évidence les zones en progradation, en érosion et en stabilité.

Si la ligne de référence est déterminée par la zonation des espèces végétales, sa reconnaissance est possible à partir des signatures spectrales des espèces (NICHOLS et MCLAUGHLIN, 1984).

2.4 – Les contours de la plage et les lignes dérivées

La boite à outils *«BeachTools»* mise au point par HOEKE *et al.* (2001) et fonctionnant comme extension pour le logiciel ArcView 3.X, comporte des modules permettant, par une classification supervisée, l'extraction et la vectorisation des contours de la plage entre la limite d'humectation de l'estran *(Wet/dry line)* et la ligne de végétation sur des photographies aériennes en couleur.

Le squelette de plage constitue aussi une autre ligne de référence que l'on peut déduire des contours de la plage en procédant d'abord à un seuillage des images pour extraire la surface de la plage (**Figure 13a**). Ensuite, un algorithme réduit cette forme en un ensemble de courbes matérialisant la ligne médiane de la plage (ROBIN, 1990) (**Figure 13b**).

Figure 13 : Comparaison de deux squelettes de plage obtenus par squelettisation de formes. (Source : ROBIN, 1990)

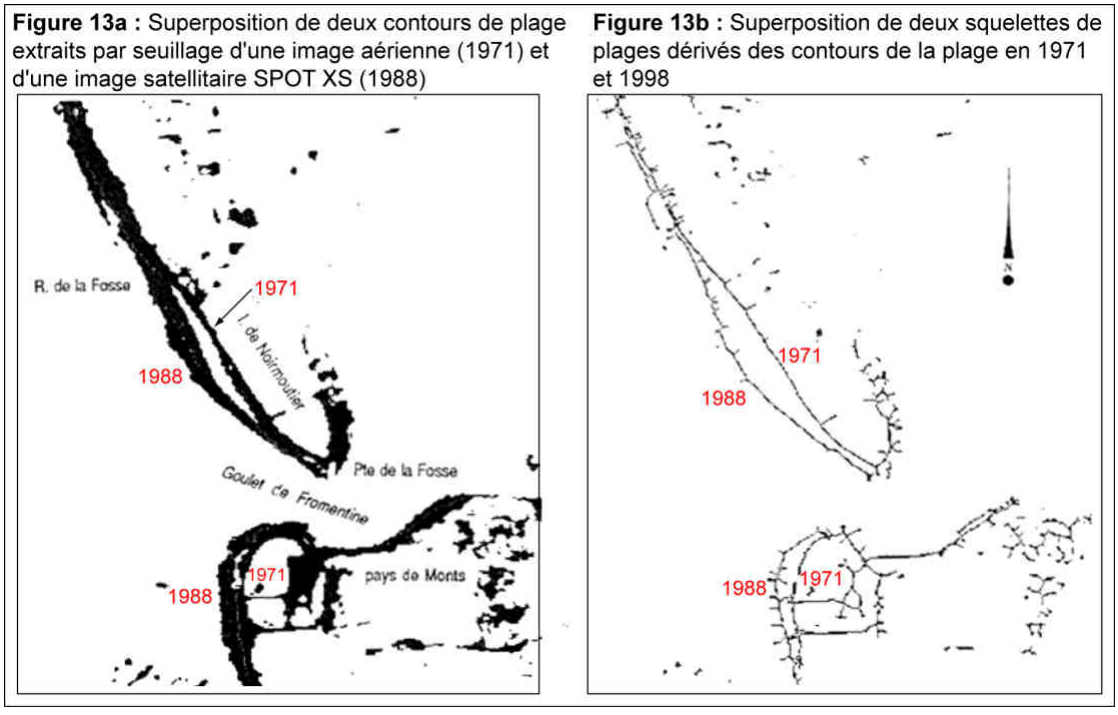


Tableau 2 : Synthèse bibliographique non exhaustive des méthodes d'extraction semi-automatiques de lignes de référence. La précision n'est pas toujours indiquée par les auteurs mais elle est conditionnée en grande partie par la taille du pixel. Une marge d'erreur au moins équivalente à la taille du pixel est admise par la plupart des auteurs

LIGNE DE REFERENCE	DONNEES UTILISEES		METHODE D'EXTRACTION	PRECISION	AUTEURS
Ligne instantanée de rivage	Images optiques (télédétection passive)	Images optiques en général	Seuillage de l'histogramme	?	VERGER (1996)
		Landsat MSS		?	WILSON (1997)
		Landsat TM	Equidensitométrie	96,9 % de pixels bien classés	FRAZIER et PAGE (2000)
		Landsat TM ; ETM+ ; EOS-Terra ASTER		?	RYU *et al.* (2002)
		EOS-Terra ASTER ; Landsat ETM+ ; IKONOS		18,5 m (Aster), 36 m (Landsat), 5,9 m (IKONOS)	YAMANO *et al.* (2006)
		Landsat MSS	Classification non dirigée	?	BLODGET *et al.* (1991) ; FRIHY *et al.* (1994)
		Landsat MSS, TM		?	FRIHY *et al.* (1998) ; EL RAEY *et al.* (1995)
		Landsat TM et ETM+		?	GUARIGLIA *et al.* (2006)
		Landsat MSS, TM et ETM+		?	EKERCIN (2007)
		Landsat TM	Classification dirigée par le maximum de vraisemblance	97,4 % de pixels bien classés	FRAZIER et PAGE (2000)
		Landsat MSS, TM, ETM+		?	CHANG *et al.* (2005)
		IKONOS Multispectrale		6,48 m	FOODY *et al.* (2003 ; 2005)
				3,16 à 8,67 m	MUSLIM *et al.* (2007)
		Landsat MSS, TM	Classification dirigée par les réseaux de neurones	?	ZHU (2001)
		Landsat MSS		87,02 à 99,88 % de pixels bien classés	WILSON (1997)

Ligne instantanée de rivage	Images optiques (télédétection passive)	Landsat TM	Segmentation par croissance de régions	?	WHITE et EL ASMAR (1999) ; EL ASMAR et WHITE (2002)
		Landsat ETM+		Indice de performance 96 ,67 à 97,43 %	BAGLI et SOILE (2003 ; 2004)
		Landsat ETM+	Segmentation par ligne de partage des eaux	Indice de performance 97,33 %	BAGLI et SOILE (2003 ; 2004)
		IKONOS Multispectrale	Classification souple et de super-résolution	2,25 à 3,20 m	FOODY *et al.* (2003 ; 2005)
				0,97 à 2,13 m	MUSLIM *et al.* (2006)
		IKONOS Multispectrale	Segmentation par le *mean shift*	?	DI *et al.* (2003b)
		QuickBird fusionnée (multispectrale + panchromatique)	Classification dirigée et algorithme de super-résolution	?	RUIZ *et al.* (2007)
	Photographies aériennes		Segmentation par la théorie de la connectivité floue *(Fuzzy connectivity)*	?	BO *et al.* (2000)
			Réseaux de neurones	?	RYAN *et al.* (1991)
	Photographies aériennes infrarouges		Classification non dirigée	?	GUARIGLIA *et al.* (2006
	Images radars (télédétection active)	Seasat SAR	Filtrage (filtre sigma et de Sobel), seuillage et opérations de morphologie mathématique	1 à 2 pixels (taille du pixel 25 m) soit 50 m	LEE et JURKEVICH (1990)
		ERS-1 SAR	Analyse de la texture des images, filtrage par le ratio de contraste, seuillage et modèles de contours actifs (*snake*)	1 pixel (taille du pixel 12,5 m)	MASON et DAVENPORT (1996)
		SAR	Filtre de LEE et segmentation par la distribution de GIBBS	?	ZHANG *et al.* (1994)

Ligne instantanée de rivage	Images radars (télédétection active)	ERS-1 SAR	Segmentation par les champs markoviens	?	DESCOMBES *et al.* (1996)
		ERS-2 SAR	Décomposition en ondelettes de MALLAT, seuillage et contours actifs	1,1 à 2,5 pixels (taille du pixel 12,5 m) soit 13,75 à 31,25 m	NIEDERMEIER *et al.* (2000 ; 2005)
		ERS SAR	Analyse de la texture des images et segmentation par la théorie de la connectivité floue	?	BO *et al.* (2001)
		ERS SAR	Analyse de la texture et classification dirigée par le maximum de vraisemblance	?	ONANA *et al.* (2001)
			Décomposition en ondelettes et classification dirigée par les *K-Means*	?	
		ERS-1 et 2 SAR	Analyse de la cohérence et segmentation par la théorie de la connectivité floue *(Fuzzy connectivity)*	3,6 pixels (Taille du pixel 25 m) soit 90 m	GIORDANO *et al.* (2003)
				3,5 pixels (Taille du pixel 20 m) soit 70 m	DELLEPIANE *et al.* (2004)
		Radarsat-1 SAR	Seuillage localement adaptatif et filtre de CANNY	1 pixel (Taille du pixel 100 m)	LIU et JEZEK (2004a)
	Images vidéographiques moyennées		Modèle regroupant les pixels selon l'intensité de leur couleur *(Pixel Intensity Clustering model)*	Précision centimétrique après correction des erreurs liées au *set up* et au déferlement	AARNINKHOF (2003) ; PLANT *et al.* (2007)
			Réseaux de neurones *(Artificial Neural Network model)*		
			Modèle d'extraction de la valeur d'intensité maximale *(Shore Line Intensity Maximum model)*		
			Modèle		

		d'identification du point de divergence entre le rouge, le vert et le bleu *(Color Channel Divergence model)*		
Ligne des pleines mers moyennes	Lidar	Profils en travers	±1,1 à ±1,4 m	STOCKDON *et al.* (2002) ; MORTON *et al.* (2004 ; 2005) ; MORTON et MILLER (2005) ; HAPKE et REID (2006) ; FARRIS et LIST (2007) ; HAPKE *et al.* (2007)
		Intersection du niveau des pleines mers moyennes avec des données Lidar	?	ROBERTSON *et al.* (2004) ; PARKER (2001 ; 2003)
		Segmentation et opérateurs de morphologie mathématique	- 4,21 m à 4,51 m	LIU *et al.* (2007)
Ligne du niveau moyen des plus basses mers	Deux grilles, l'une représentant le datum marégraphique recherché et l'autre un modèle numérique de terrain du littoral concerné	Soustraction de deux grilles	2 à 13 m	LI *et al.* (2001a ; 2001b ; 2002)
Zéro des cartes marines ou zéro hydrographique	Images SPOT XS	Modèle qui calcule la profondeur en fonction de la réflectance de l'eau	20 et 45% du linéaire extrait	LAFON *et al.* (2000 ; 2002)
Limite de végétation	Images SPOT HRV	Indice de végétation SAVI *(Soil Adjusted Vegetation Index)*	?	TREPANIER *et al.* (2002)
Contours de la plage	Photographies aériennes en couleur	Classification supervisée par la boite à outils *«BeachTools»*	?	HOEKE *et al.* (2001)
Squelette de plage	Photographies aériennes et images SPOT XS	Seuillage et squelettisation	?	ROBIN (1990)

3 – Extraction de lignes de référence sur le terrain

Les approches méthodologiques adoptées sur le terrain pour la reconnaissance du niveau atteint par les plus hautes eaux sont diverses. Par exemple, pour les lignes de référence visibles qui

font appel à la géomorphologie et à la végétation côtières ou toutes autres marques laissées par la marée sur le littoral, il s'agit de repérer la ligne de référence selon ses critères de définition et de procéder à des levés topographiques (BOAK et TURNER, 2005). Quant aux lignes se référant à un niveau d'eau, elles sont obtenues par l'analyse statistique de longues séries de données marégraphiques collectées sur des sites portuaires de référence. Pour les datums marégraphiques, dans certains pays comme les Etats Unis, une durée minimale de 19 ans d'observation est requise (GILL et SCHULTZ, 2001). Pour identifier cette ligne afin de la matérialiser, il faut se rendre sur le terrain le jour où la marée atteint le niveau de référence. Cela ne va pas sans poser de problème car PARKER (2001) note que pour les pleines mers moyennes par exemple, trois difficultés sont à surmonter. Le premier problème relève des inégalités du niveau des hautes eaux d'un cycle tidal à un autre qui fait qu'il y a très peu de jours dans l'année où la hauteur moyenne est exactement atteinte. Le deuxième problème est que les hautes eaux ne se produisent pas au même moment partout. Le troisième problème est l'effet du vent, de la pression atmosphérique et les apports d'eaux fluviales. Finalement à défaut de mesurer systématiquement les niveaux d'eau à chaque point du littoral, l'extraction de la position exacte du niveau des pleines mers moyennes s'avère extrêmement délicate. La même remarque a été signalée par le SHOM (1979) à propos du zéro des marées ou zéro hydrographique, car dans l'impossibilité d'installer des marégraphes sur toute la côte, des interpolations des données marégraphiques d'un lieu à un autre sont nécessaires.

III – LES METHODES DE DETECTION DES VARIATIONS DE LA POSITION DU TRAIT DE CÔTE

Parmi les techniques mises en œuvre pour étudier la mobilité d'une ligne de référence donnée, on distingue les méthodes de terrain privilégiant l'observation directe et les méthodes fondées sur l'observation indirecte.

1 – Les approches directes

Elles sont basées sur des mesures topographiques périodiques (hebdomadaires, bihebdomadaires, mensuelles, semestrielles, annuelles) à l'aide de matériels de levés allant des appareils à principe optique (niveau de chantier, théodolites, …) aux appareils électroniques utilisant le laser (tachéomètre électronique, Lidar) ou le positionnement par satellites en mode différentiel (récepteur DGPS). Les mesures peuvent concerner uniquement la ligne de référence ou le profil de plage et doivent être raccordées à un même système de référence relatif ou absolu pour faciliter la comparaison entre différents levés.

Les données fournies par les levés de terrain sont extrêmement précises[11] pour la quantification de la mobilité du trait de côte mais leur acquisition réclame beaucoup de temps. Pour cette raison, elles sont limitées dans la plupart des cas à quelques sites spécifiques pour des études sur le court terme (DOLAN *et al.,* 1978a ; DOLAN *et al.*, 1979 ; SMITH et ZARILLO, 1990 ; MORTON *et al.,* 1993).

[11] La marge d'erreur en planimétrie et en altitude est centimétrique, elle est de ±2 à ±22 cm pour le tachéomètre et inférieure à 5 cm pour le DGPS d'après SUANEZ *et al.* (2008)

Toutefois dans certains pays, la mise en place de programmes de suivi du littoral par des mesures régulières de profils de plage permet de suivre l'évolution du rivage sur une dizaine d'années (FRIHY *et al.*, 1994 ; EL RAEY *et al.*, 1995 ; NATESAN et SUBRAMANIAN, 1994 ; EL RAEY *et al.*, 1999 ; AAGAARD *et al.*, 2004) et parfois même plus. Par exemple aux Pays Bas, l'exploitation de la base de données topo-bathymétriques JARKUS, opérationnelle depuis 1964, a permis à GUILLÉN *et al.* (1999) de suivre l'évolution de la position du pied de dune durant 28 ans (1964 – 1992) sur 120 km de côte. Mais il s'agit là d'une exception, les études s'appuyant uniquement sur des mesures de terrain pour suivre l'évolution du littoral sur le long terme étant plutôt rares. Dans la plupart des cas, les levés de terrain sont complétés par des mesures indirectes sur des documents graphiques multi-dates.

2 – Les méthodes indirectes

Les méthodes d'observation indirecte s'appuient sur l'analyse graphique de documents essentiellement cartographiques et photographiques pour mesurer et cartographier les positions successives des indicateurs du trait de côte. Elles ont bénéficié des progrès technologiques réalisés au cours des deux dernières décennies dans le domaine du traitement numérique de l'information géographique. En effet, si dans les années 1960 – 1970, les techniques reposaient exclusivement sur des méthodes manuelles (mesures directes sur des photographies aériennes ou des cartes, photo-interprétation analytique), les années 1980 ont vu l'introduction de techniques de photogrammétrie analytique dans les études de cinématique littorale. De nos jours, les méthodes de photogrammétrie numérique et surtout de photo-interprétation assistée par ordinateur couplée aux SIG s'imposent.

2.1. – Mesures à partir de points d'appui sur des photographies aériennes analogiques ou des cartes anciennes

C'est une technique ancienne largement confirmée qui a été bien décrite par STAFFORD et LANGFELDER (1971). Sur des photographies aériennes multi-dates, elle procède par comparaison de distances perpendiculaires au rivage entre des amers aux contours bien définis et la ligne de référence. Les variations de distances enregistrées au niveau de ces amers sont converties en distances réelles grâce aux échelles des documents et correspondent à l'évolution du rivage entre les dates comparées. Les mesures de surfaces sont possibles aussi par planimétrie ou papier millimétré (FROIDEFOND, 1989). Pour plus de profondeur historique, les photographies aériennes peuvent être combinées à des cartes anciennes à grande échelle (cartes marines, topographiques et cadastrales) dont la précision a été testée et vérifiée préalablement (BIRD, 1985 ; 2007 ; US ARMY ENGINEER, 1986 ; ANDERS et BYRNES, 1991 ; CROWELL *et al.,* 1991). Quant aux erreurs dues aux déformations des clichés aériens verticaux, STAFFORD et LANGFELDER (1971) estiment qu'elles sont tolérables si l'on travaille sur des côtes basses à des dates très éloignées et en utilisant uniquement la partie centrale du cliché qui est la zone la moins déformée. La méthode a l'avantage d'être simple, peu coûteuse et peut avoir une précision acceptable si elle est appliquée avec soin (LEATHERMAN, 1983 ; ANDERS et BYRNES, 1991 ; MOORE, 2000). Par ailleurs, la fiabilité des taux

d'évolution obtenus par cette technique dépend du nombre et de la répartition spatiale des points de référence. Cela peut être problématique sur les côtes disposant de peu de points d'appui (DOLAN *et al.*, 1979).

2.2 – Le système de grilles orthogonales *(Orthogonal Grid Address System, OGAS ; Orthogonal Grid Mapping System, OGMS)*

Pour cartographier les zones exposées aux risques de submersion lors des tempêtes ainsi que l'évolution de la ligne de rivage à une échelle régionale, DOLAN *et al.* (1978a) ont développé un système de cartographie utilisant des photographies aériennes et des grilles orthogonales. Cette procédure se déroule en trois étapes. Une première étape au cours de laquelle des cartes de référence d'une dimension de 3500 m X 2100 m sont élaborées en agrandissant des minutes topographiques au 1/5000e. Dans une deuxième étape, à l'aide d'un projecteur agrandisseur, chaque photographie aérienne est agrandie à la même échelle et calée sur la carte de référence. Un transparent de même dimension que la carte de référence est superposé aux agrandissements et les lignes de référence y sont reportées. Dans une troisième étape, un autre transparent de même dimension que le précédent mais doté de grilles orthogonales numérotées et espacées de 2 cm (100 m au 1/5000) est superposé au transparent contenant les tracés. Les variations de distances entre les positions des lignes de référence sont mesurées suivant les grilles. Compte tenu des erreurs dues à la perte de netteté et de contraste des clichés agrandis, à la précision des mesures et au calage des photographies aériennes sur la carte de base, l'erreur totale engendrée par les différentes étapes est évaluée à 12,5 m par date (DOLAN *et al.*, 1980 ; DOLAN et HAYDEN, 1983). LEATHERMAN (1983) estime cependant que cette erreur est sous-évaluée et n'intègre pas l'imprécision des minutes topographiques ainsi que les erreurs liées aux conditions de prises de vues. Tous ces facteurs conduiraient l'erreur totale à dépasser 240 pieds (environ 73,15 m). Il en conclut que les photographies aériennes doivent être redressées géométriquement pour permettre de mesurer des taux d'évolution significatifs.

2.3 – Les méthodes photogrammétriques

Des systèmes de cartographie numérique et de mesure des variations de la position historique des marqueurs du trait de côte s'inspirant des techniques de photogrammétrie analytique ont été développés par LEATHERMAN (1983) (*Metric mapping*) et THIELER et DANFORTH (1994a ; 1994b) (*Digital Shoreline Mapping System, DSMS*). Ils requièrent une table à digitaliser connectée à un ordinateur. Les programmes informatiques auxquels ils sont associés permettent de rectifier des cartes ou de corriger les déformations des photographies aériennes suivant des méthodes photogrammétriques et de digitaliser la position de la ligne de référence à partir de ces deux types de documents. Les lignes ainsi cartographiées sont géoréférencées, projetées dans un système de coordonnés géographiques et superposées. Les déplacements de la ligne de référence sont mesurés soit manuellement soit automatiquement dans le cas du DSMS grâce au *Digital Shoreline Analysis*

System (DSAS). Certes ces méthodes de photogrammétrie analytique améliorent la précision et la fiabilité des résultats mais le procédé de relèvement spatial utilisé par la *Metric mapping*, nécessite beaucoup de points de contrôle et peut entraîner un décalage des traits de côte à la jonction des clichés (THIELER et DANFORTH, 1994a). Ces auteurs évaluent l'erreur engendrée par le DSMS à 9,25 m. Elle est tributaire essentiellement de la précision du repérage des points de calage.

Les techniques de photogrammétrie numérique ou digitale (*Softcopy photogrammetry*) sont beaucoup plus précises, en ce sens qu'elles intègrent, dans le processus de rectification en plus de l'aérotriangulation, un modèle numérique de terrain. Elles réduisent considérablement les erreurs surtout dans les secteurs au relief accidenté (MOORE, 2000). Les orthophotographies qu'elles produisent permettent des mesures directes de la mobilité du trait de côte (THORNTON *et al.*, 2006) ou servent d'images de fond pour la numérisation et la comparaison des traits de côte dans un environnement de type SIG (JIMENEZ *et al*., 1997 ; COYNE *et al.,* 1999 ; MOORE et *al.*, 1999 ; MOORE et GRIGGS, 2002 ; NORCROSS *et al*., 2002 ; FLETCHER *et al*., 2003 ; RUGGIERO *et al*., 2003).

2.4 – Les systèmes d'information géographique (SIG)

Apparus dans les années 1970, les SIG se sont imposés dans les années 2000 dans les études de cinématique littorale (LEATHERMAN, 2003). Ils permettent d'intégrer diverses sources de données sur la position du trait de côte (photographies aériennes, cartes, images satellitaires, levés DGPS, Lidar, etc.), de produire des informations, de les analyser et de les cartographier (BYRNES et HILAND, 1994 ; 1995 ; MCBRIDE *et al.,* 1995 ; GORMAN *et al.*, 1998 ; MOORE, 2000 ; ZUZEK *et al.,* 2003 ; MORTON *et al.,* 2005 ; HAPKE et REID, 2006). A partir des données géoréférencées, les lignes de référence sont numérisées puis superposées et les changements sont évalués suivant des transects établis à intervalles réguliers. Les mesures peuvent être effectuées avec les outils de mesure proposés par le logiciel ou automatiquement par des programmes spéciaux comme le DSAS (THIELER et DANFORTH, 1994b) ou l'ASAP *(Automated Shoreline Analysis Program)* (BYRNES et HILAND, 1994) capables, par ailleurs, de fonctionner comme des modules d'ArcView ou d'ArcGIS. Certains auteurs (MOORE *et al.,* 1999 ; MOORE et GRIGGS, 2002) utilisent une macro AML *(ArcInfo Macro Language)* qui convertit les lignes de référence en grilles avec des cellules d'un mètre de résolution et calcule la distance la plus courte entre deux cellules appartenant aux deux traits de côte à comparer pour mesurer les déplacements.

Les mesures de distances linéaires ne traduisant qu'un mouvement unidimensionnel du rivage, elles peuvent être complétées par des bilans surfaciques qui offrent une vision de la cinématique littorale en deux dimensions. A cet effet, certains outils logiciels permettent de créer des polygones à partir des lignes de référence. Pour ce faire les traits de côte sont intersectés à un même niveau (ROBIN, 2002 ; MAKOTA *et al.,* 2004 ; CHANG *et al.,* 2005). Les bilans surfaciques peuvent également être réalisés en numérisant la surface séparant deux lignes de référence (DEHOUCK, 2006) ou en

comptant les pixels compris entre deux linéaires côtiers multi-dates après avoir découpé le littoral en cellules (SUANEZ et SIMON, 1997 ; DURAND, 2000).

De nos jours, avec des sources de données altimétriques comme le DGPS, le Lidar, la photogrammétrie numérique, etc., une approche volumétrique est possible permettant ainsi d'avoir une vision complète et globale des phénomènes d'érosion et d'accrétion (HAPKE et RICHMOND, 2000 ; COLLIER *et al.,* 2001 ; OJEDA ZUJAR *et al.,* 2002 ; THORNTON *et al.*, 2006 ; FARRIS et LIST, 2007).

Pour appréhender l'évolution temporelle du littoral, les valeurs d'évolution mesurées par ces différentes techniques sont traduites en taux par plusieurs méthodes statistiques.

IV – METHODES STATISTIQUES DE CALCUL DE LA MOBILITE DU TRAIT DE CÔTE

Les méthodes statistiques d'analyse quantitative de la mobilité du linéaire côtier utilisent les moyennes ou les régressions pour modéliser au mieux les tendances évolutives du littoral. Elles ont été abordées par DOLAN *et al.* (1991) et réactualisées récemment par GENZ *et al.* (2007) auxquels nous avons emprunté l'essentiel des informations de cette section. Deux méthodes en particulier sont employées : la méthode des points extrêmes *(End point rates)* et la régression linéaire simple.

La méthode des points extrêmes n'utilise que deux positions connues de la ligne de référence (la position la plus ancienne et la plus récente). La distance mesurée entre ces deux emplacements extrêmes du trait de côte durant la période d'étude est divisée par le nombre d'années écoulées pour obtenir la vitesse d'évolution annuelle du littoral. L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité. Toutefois, lorsque l'on dispose de positions intermédiaires entre les deux dates extrêmes de la période d'étude, les taux estimés par cette technique n'intégreront pas les éventuelles variations temporelles dans l'évolution du littoral (accélération, ralentissement ou inversion de tendance). Ainsi, ils peuvent être moins significatifs que ceux obtenus par les méthodes régressives qui utilisent toutes les positions disponibles et nécessitent donc plusieurs traits de côte.

Dans le cas de la régression linéaire simple, au niveau de chaque point, les mesures de distances entre toutes les positions successives de la ligne de référence sont utilisées pour calculer par les moindres carrés une droite de régression ajustée aux différents emplacements de la ligne de référence. La pente de la droite de régression correspond au taux d'évolution. La régression linéaire est la méthode la plus robuste pour estimer les tendances historiques de l'évolution du trait de côte d'après FENSTER *et al.* (1993). Néanmoins, dans la mesure où toutes les positions sont utilisées pour résoudre l'équation de la droite d'ajustement, les taux d'évolution obtenus peuvent être biaisés par les points excentrés liés aux traits de côte extraits de données acquises immédiatement après une tempête. Il en est de même si les linéaires côtiers analysés sont groupés et ne sont pas répartis de façon homogène dans le temps. Pour minimiser l'influence de ces facteurs, des méthodes de

régression linéaire plus sophistiquées ont été développées en utilisant d'autres techniques telles le *Jackknife*, la longueur de description minimum, la moindre déviation absolue, les moindres carrés médians ou les moindres carrés pondérés par la marge d'erreur associée aux lignes de référence. Toutes ces techniques de calcul sont disponibles dans la version 3.2 du logiciel DSAS à l'exception de la méthode de régression par la longueur de description minimum et de la moindre déviation absolue (THIELER *et al.*, 2003).

Le choix d'une méthode statistique pour évaluer la mobilité du littoral dépend des objectifs de la recherche ainsi que des variations temporelles de l'évolution du trait de côte car elles ne donnent pas toujours des résultats identiques d'après DOLAN *et al.* (1991). Ils notent par exemple que si la tendance évolutive est linéaire, les taux d'évolution calculés par la méthode des points extrêmes, la régression linéaire simple ou le *jackniffing* sont cohérents. Dans le cas où l'évolution est chaotique avec une alternance de phases de progradation et d'érosion, les taux d'évolution obtenus peuvent varier du simple au quintuple suivant les méthodes de calcul. Dans tous les cas, quelle que soit la méthode de calcul utilisée, la fiabilité des taux d'évolution reste conditionnée par la précision du positionnement des lignes de référence que l'on compare (GENZ *et al.*, 2007).

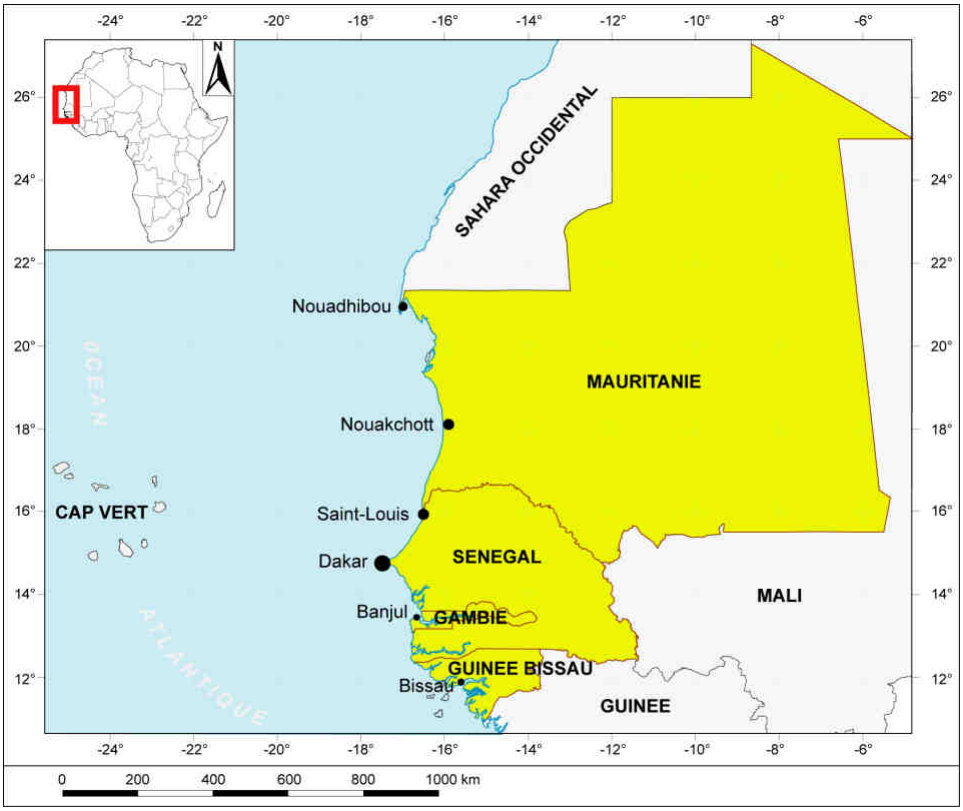
Conclusion du chapitre I

En dépit des nombreux travaux sur la cinématique des littoraux à l'échelle mondiale, on est encore loin d'un consensus sur une définition universelle du trait de côte au vu du foisonnement des lignes de référence en usage dans la littérature. Ces entités linéaires renvoient le plus souvent à des indicateurs soumis à l'appréciation visuelle. Il s'agit de ruptures dans la pente du profil du littoral, de la végétation côtière, du degré d'humectation de l'estran,… d'un niveau de marée conventionnel ou extrême. De plus, malgré les progrès technologiques réalisés dans l'acquisition et le traitement de l'information (télédétection, photogrammétrie, SIG), les instruments de levés (tachéomètre, DGPS), la matérialisation de ces lignes de référence sur le terrain et sur des documents iconographiques reste délicate, peu aisée et incertaine. Les incertitudes sont liées à la nature de la ligne elle-même, quelquefois à son instabilité, aux sources de données, à l'opérateur chargé de son positionnement ainsi qu'à l'instrumentation utilisée, etc.. En définitive, compte tenu de la multiplicité des traits de côte en usage, des méthodes de détection et de mesure de sa mobilité, chaque étude doit s'adapter aux conditions matérielles et au cadre morphologique du littoral concerné. Suivant le type de côte étudié, les données disponibles, les contraintes techniques, il est nécessaire de trouver un ou des indicateurs plus ou moins objectifs du niveau atteint par les hautes eaux, de sélectionner une ou des méthodes d'extraction en considérant les insuffisances de chaque ligne de référence, de chaque démarche méthodologique adoptée pour appréhender la cinématique littorale. A cet égard, de nombreux auteurs ont mis en œuvre des approches plus ou moins similaires à celles décrites précédemment dans l'optique d'analyser la mobilité du rivage ouest-africain.

Chapitre II : EVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE EN AFRIQUE DE L'OUEST : ETAT DE LA QUESTION DE LA MAURITANIE A LA GUINEE-BISSAU

Dans la littérature consultée, l'analyse de l'évolution de la ligne de rivage en Afrique de l'Ouest, en particulier sur le littoral sénégalo-mauritanien, s'opère à deux échelles temporelles et par deux approches. La première procède par des datations et se focalise sur une échelle géologique millénaire en recherchant des indices et des traces de paléorivages témoignant des oscillations du niveau marin. Ces études sur les variations de la ligne de rivage au rythme des transgressions et régressions du Quaternaire sont très documentées dans la littérature des années 1970 et 1980, notamment par les bulletins de liaison de l'ASEQUA[12] et les travaux des géologues du Quaternaire (BARUSSEAU *et al.,* 1989 ; 1995 ; 1996 ; 2005 ; BOUAKAZ, 1980 ; CARITE, 1983 ; EINSELE *et al.,* 1974 ; 1977 ; ELOUARD, 1966 ; 1968 ; 1975 ; ELOUARD et FAURE, 1967 ; ELOUARD *et al.,* 1977 ; GIRESSE, 1983 ; GIRESSE et BARUSSEAU, 1986 ; GIRESSE *et al.*, 2000 ; HEBRARD, 1973 ; MICHEL, 1973 ; MONTEILLET, 1986 ; PINSON-MOUILLOT, 1980 ; ...). La seconde approche, qui nous concerne ici, traite des fluctuations contemporaines et récentes de la ligne de rivage à travers l'analyse de documents graphiques et des mesures de terrain. Ces études restent majoritairement sectorielles puisqu'elles sont limitées, pour la plupart, à quelques segments de côte répartis sur le littoral sénégalo-mauritanien. Depuis les projets WACAF[13] dans les années 1980, aucune synthèse régionale de l'érosion côtière n'a été réalisée.

Figure 14 : Localisation de la zone d'étude



[12] Association Sénégalaise pour l'Etude du Quaternaire Africain
[13] *West and Central Africa*

I – LES ETUDES REGIONALES

Les approches régionales pour l'étude de l'évolution de la ligne de rivage en Afrique de l'Ouest ont été impulsées au début des années 1980 par le lancement du projet WACAF/3 «Lutte contre l'érosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre» (PNUE/UNESCO/ONU-DAESI, 1985). Ce projet, piloté par le PNUE[14] en collaboration avec le DAESI[15] et l'UNESCO[16], s'inscrivait dans le cadre du plan d'action de la convention d'Abidjan du 23 mars 1981 relative à la coopération en matière de protection et de mise en valeur du milieu marin et des zones côtières de la région de l'Afrique de l'Ouest et du Centre. Les principaux objectifs de ce projet, lancé en 1983, étaient de documenter le recul des côtes et d'analyser les causes de ce phénomène à des fins de protection et de gestion du littoral des pays côtiers de la Mauritanie à l'Angola. A cet effet, le Département de Géologie Marine du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM, France) a été chargé de la coordination des activités du projet (collecte des données disponibles, reconnaissance sur le terrain de sites représentatifs, formation de personnels locaux) et de la rédaction d'un rapport de synthèse présentant un état des lieux des facteurs de la morphogenèse et de la dynamique littorale à l'échelle régionale. C'est ainsi que l'exploitation de la bibliographie existante (études sectorielles), les visites de terrain et les témoignages recueillis auprès des populations locales par les différents impliqués dans le programme avaient permis de procéder à l'inventaire des variations historiques de la ligne de rivage et des zones en érosion ou en accrétion au sein de grands ensembles régionaux identifiés suivant l'orientation principale de la côte, la largeur du plateau continental, la présence ou l'absence de deltas et l'existence ou non de canyons sous-marins. La **figure 15** (volume 2) présente la synthèse cartographique des résultats concernant le littoral s'étendant de la Mauritanie à la Guinée-Bissau. Elle montre une érosion ponctuelle des secteurs sableux de part et d'autre de la Presqu'île du Cap Vert alors que le fond des baies en Mauritanie et les estuaires du Saloum à la Guinée-Bissau sont en accumulation.

Les travaux de BARUSSEAU (1985a ; 1985b) sur l'évolution côtière en Mauritanie et au Sénégal s'inscrivent également dans le cadre des activités du projet WACAF/3. Cet auteur s'est appuyé sur l'analyse de cartes anciennes, de photographies aériennes, de témoignages écrits et sur des observations de terrain pour mettre en évidence des indices d'engraissement dans la Baie de Cansado, la Baie de l'Etoile, sur toute la rive du Souhel El Abiod ainsi que du Cap Iwik au Cap Timiris (**Figure 16**). Des indices d'érosion ont été relevés aussi par l'auteur sur les falaises du Cap Blanc, Cap El Sass et sur la «grande plage mauritanienne». BARUSSEAU (1985b) a par ailleurs analysé les facteurs de la dynamique littorale et les mécanismes régissant le transit sédimentaire et divisé le littoral sénégalo-mauritanien en 5 unités morphosédimentaires (**Figure 16**) :

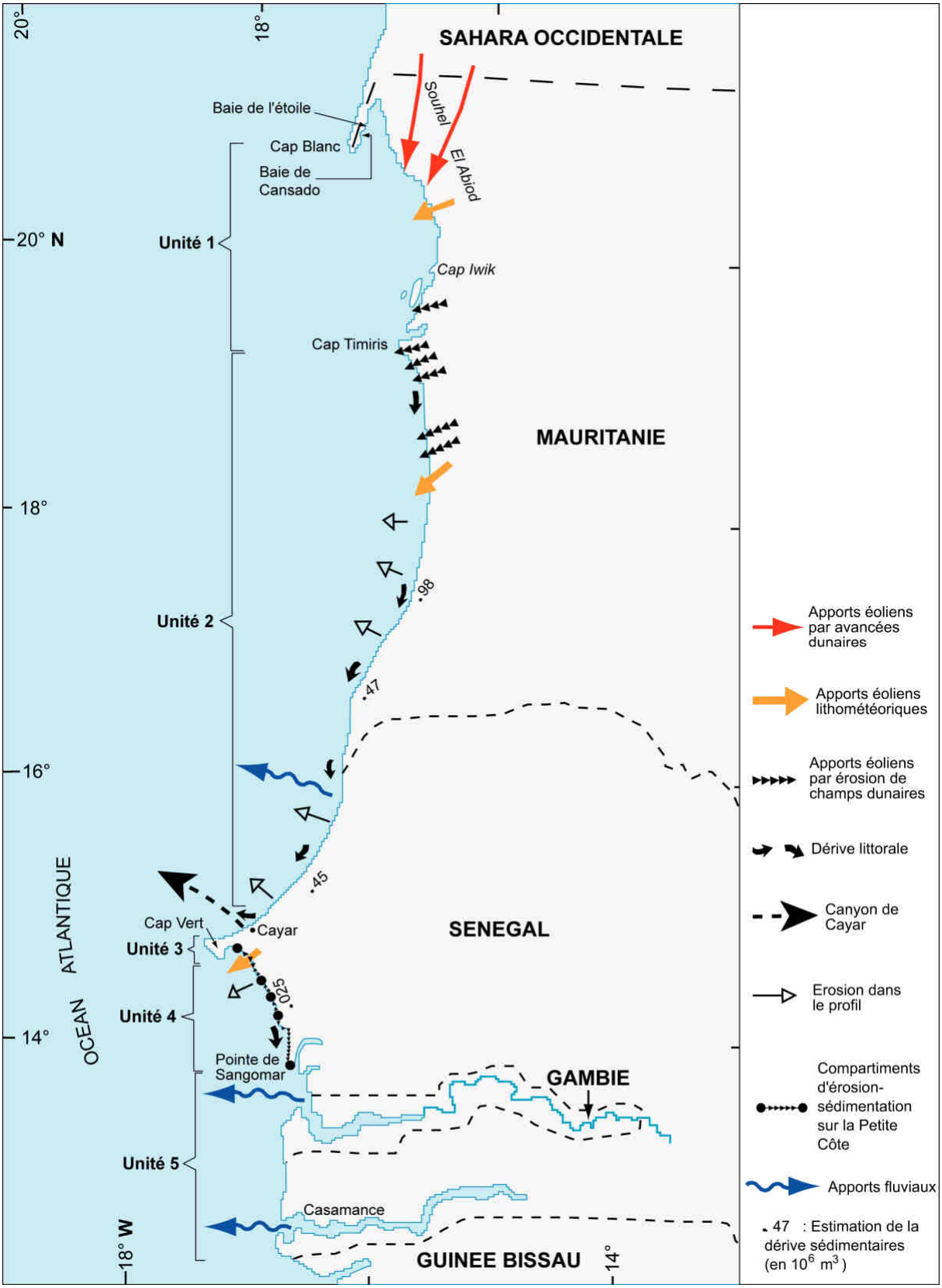
- la côte au nord du Banc d'Arguin en voie d'accumulation du fait des apports éoliens provenant du désert sur laquelle existent aussi des érosions sectorielles touchant la Presqu'île du Cap Blanc ;

[14] Programme des Nations Unies pour l'Environnement
[15] Département des Affaires Economiques et Sociales Internationales des Nations Unies
[16] Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture

- la zone du Cap Timiris à Kayar, soumise à un fort transit sédimentaire décroissant du nord vers le sud (980000 à 450000 m^3/an) serait en équilibre dynamique avec des érosions localisées généralement de l'ordre du mètre par an ;
- la Presqu'île du Cap Vert, très exposée, et dont le transit sédimentaire est dirigé vers le large à cause de la faible largeur du plateau continental et de la puissance des courants marins ;
- la côte de Rufisque à Joal, privée d'apports éoliens importants et caractérisée par un faible transit sédimentaire (25000 m^3/an), elle présente une série de cellules (3 à 4) qui renferment une zone de départ des sédiments (nord de la cellule) et une zone d'accumulation (sud de la cellule) ;
- le secteur du Saloum à la Casamance correspondant à une côte à estuaires susceptible de recevoir des apports sédimentaires fluviaux et qui inclut cependant des secteurs en érosion.

La principale conclusion tirée par l'auteur est, d'une manière peu surprenante, que les unités morphosédimentaires transcendent les frontières nationales d'où la nécessité d'une analyse régionale de la dynamique littorale avant toute opération importante d'aménagement côtier.

Figure 16 : Dynamique et segmentation du littoral sénégalo-mauritanien (Source : BARUSSEAU, 1985b ; modifié).



Dans la continuité du projet WACAF/3, un manuel didactique portant sur la recherche et le contrôle de l'érosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre a été élaboré par IBE et QUELENNEC (1989) dans le cadre du projet WACAF/6 inspiré en partie du programme européen CORINE/Erosion côtière. Le but de cet ouvrage était de proposer des méthodes d'analyse standardisées pour permettre aux acteurs de terrain de la région WACAF, de comprendre la formation et la dynamique des structures sédimentaires littorales afin d'identifier, d'inventorier et de lutter contre l'évolution régressive du rivage. WACAF/6 était en fait un prélude au projet WACAF/7 qui devait aboutir à l'établissement d'un centre régional de documentation sur l'érosion côtière en Afrique de l'Ouest et du Centre. Malheureusement cette structure n'a jamais vu le jour à cause de divergences politiques.

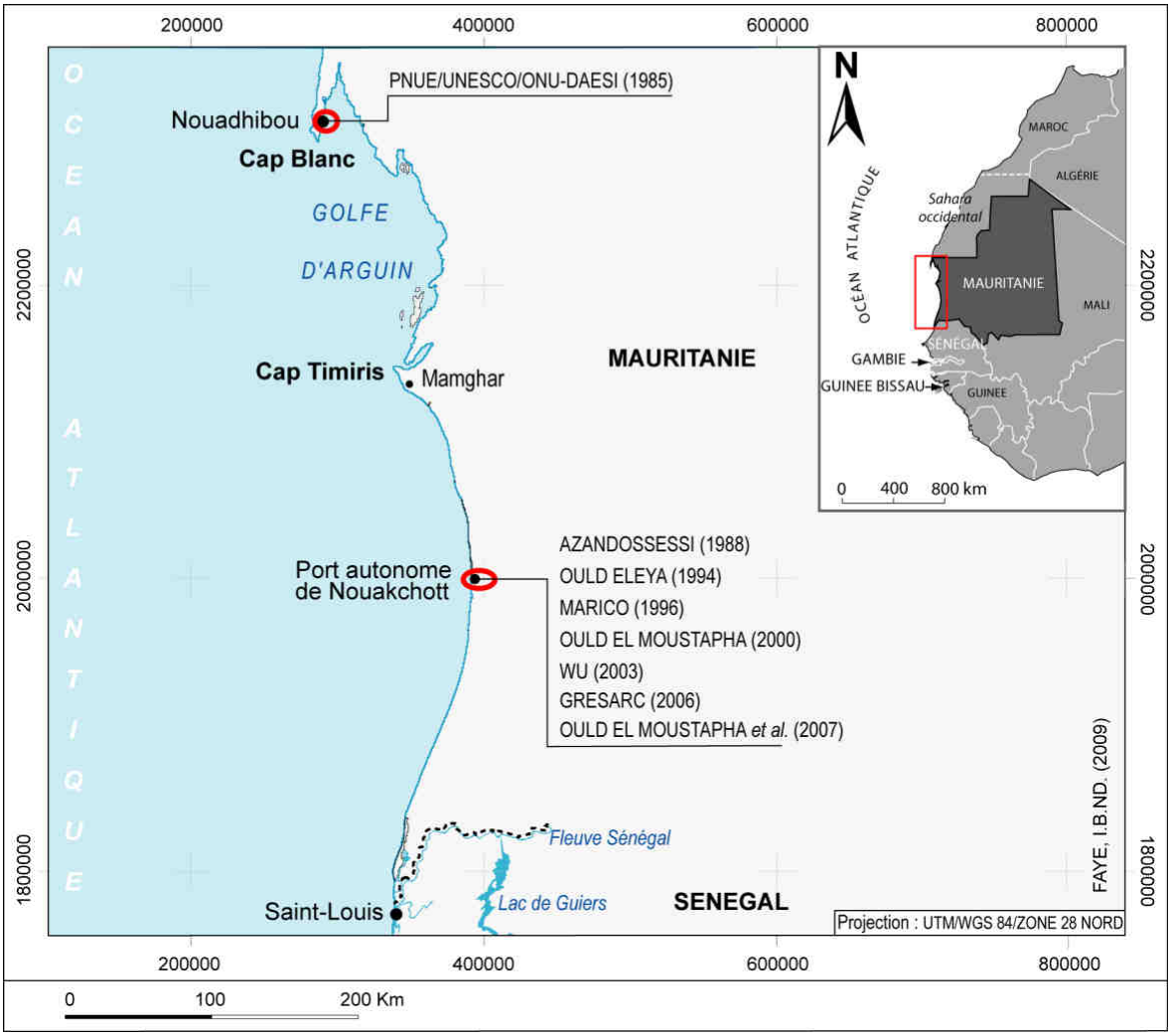
Généralement, les études régionales sur la cinématique littorale (PNUE/UNESCO/ONU-DAESI, 1985 ; BARUSSEAU, 1985a ; 1985b) restent qualitatives et reposent en grande partie sur la compilation des études sectorielles pré-existantes.

II – LES ETUDES LOCALES

Mis à part les travaux menés sur les flèches littorales, la quasi-totalité des études sectorielles sur l'évolution de la ligne de rivage indique une régression de la côte ouest-africaine. Les **tableaux 3**, **4** et **5** synthétisent les résultats disponibles sur la cinématique côtière du Cap Blanc au Rio Cacine, les figures **17 et 18** localisent les sites qui ont fait l'objet de mesures quantitatives et la **figure 21** (volume 2) présente quelques taux d'érosion estimés durant les cinq dernières décennies au Sénégal et en Gambie. De prime abord, cette littérature sur la cinématique littorale laisse apparaître quelques faits marquants selon les pays.

En Mauritanie, pratiquement toutes les études consacrées à l'évolution du rivage s'intéressent au cas spectaculaire du Port de l'Amitié à la suite des perturbations du transit sédimentaire induites par les installations portuaires (**Figure 17**).

Figure 17 : Zones ayant fait l'objet de mesures quantitatives de l'évolution côtière en Mauritanie



Démarrés en avril 1979, les travaux de construction du port de Nouakchott se sont achevés en juillet 1986. Selon le rapport de BAI *et al.* (1997) du *Tianjin Engineering Port Institute*, les changements dans la position du trait de côte et la bathymétrie des petits fonds ont commencé après la construction en 1983 du premier tronçon de brise-lames. Cet ouvrage, accolé au quai et destiné à atténuer l'énergie des vagues, a provoqué rapidement un engraissement au droit du brise-lames et un ensablement du bassin. Pour bloquer le transit sédimentaire et éviter la sédimentation dans le bassin, un mur de 496 m de long a été construit en 1986 sous la passerelle. Le blocage de la dérive littorale s'est traduit au nord par une avancée et au sud par un recul très rapides de la ligne de rivage. Ces processus ont été étudiés par de nombreux auteurs qui ont estimé les changements intervenus au voisinage immédiat du port depuis les années 1980 jusqu'en 2002 (OULD EL GHASSEM, 1987 ; AZANDOSSESSI, 1988 ; OULD ELEYA, 1994 ; MARICO, 1996 ; OULD EL MOUSTAPHA, 2000 ; WU, 2003 ; GRESARC, 2006 ; OULD EL MOUSTAPHA *et al.,* 2007). Les documents, supports de ces études, sont de nature et d'échelle spatiale diverses : cartes topographiques, images satellitaires, photographies aériennes, levés GPS et DGPS. Peu d'entre elles indiquent la ligne de référence utilisée pour le suivi du «trait de côte» à l'exception de deux études récentes. WU (2003) utilise la

ligne de rivage instantanée alors que le GRESARC (2006) utilise la ligne des basses mers. Les méthodes mises en œuvre pour suivre l'évolution de la position du trait de côte sont les suivantes :
– mesures linéaires sur des photographies aériennes non rectifiées (AZANDOSSESSI, 1988 ; MARICO, 1996) ;
– estimation de surfaces en accrétion ou en érosion à partir d'images satellitaires SPOT redressées (OULD ELEYA, 1994 ; WU, 2003) ;
– levés DGPS et modélisation de l'évolution future de la ligne de rivage (OULD EL MOUSTAPHA, 2000 ; GRESARC, 2006 ; OULD EL MOUSTAPHA *et al.*, 2007).

La diversité des pas de temps considérés, des échelles spatiales et des méthodes utilisées dans ces travaux aboutissent à une forte hétérogénéité des valeurs d'évolution du trait de côte. En règle générale, les taux d'évolution proposés varient entre -20 et -35 m/an au sud du port et entre +22 et +42 m/an au nord (**Tableau 3a**). La seule étude qui s'est intéressée à la mobilité du trait de côte avant l'implantation du port de Nouakchott est celle de BARUSSEAU (1985a). Elle était basée sur des mesures de distances entre la ligne de *swash* et des points repérés sur des clichés aériens non rectifiés datant de 1954 et de 1980. Une analyse qualitative en a été déduite permettant à l'auteur de conclure à un littoral en érosion dont la vitesse moyenne annuelle de recul était certainement inférieure à 1 m.

Tableau 3 : Synthèse des sources de données et résultats des travaux sur les mesures de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale en Mauritanie

Tableau 3a : Quelques sources de données et taux d'évolution estimés aux abords du port de Nouakchott et dans la Baie de Cansado en Mauritanie

Source de données	Ligne de référence	Taux d'évolution moyen		Auteurs
		Au nord du port	Au sud du port	
Mobilité du trait de côte				
Photographies aériennes obliques (1986)	?	?	-35 m/an	AZANDOSSESSI (1988)
Photographies aériennes IGN (1980, 1/20000, 1991, 1/15000) et des mesures de terrain (1993)	?	+42,5 m/an	-20,45 m/an	MARICO (1996)
Carte topographique IGN (1980) ; images satellitaires (1987, 1989, 1992) et levés DGPS (1998)	?	+35 m/an	-25 m/an	OULD EL MOUSTAPHA (2000)
Levés GPS (1995) et DGPS (2006)	Ligne des basses mers	+22 m/an	-28 m/an	GRESARC (2006)

Carte topographique IGN (1980) ; images SPOT (1987, 1992) et levés DGPS (1998, 2002)	?	+32,7 m/an	-25 m/an	OULD EL MOUSTAPHA *et al.* (2007)
Surfaces accumulées ou érodées				
Images satellitaires rectifiées (1987, 1988, 1989, 1991, 1992)	?	+0,0862 km²/an	-0,0974 km²/an	OULD ELEYA (1994)
Images SPOT rectifiées XS2 (1989) et Pan (1995, 1999, 2001)	Ligne instantanée de rivage	+0,08 Km²/an	-0,12 Km²/an	WU (2003)

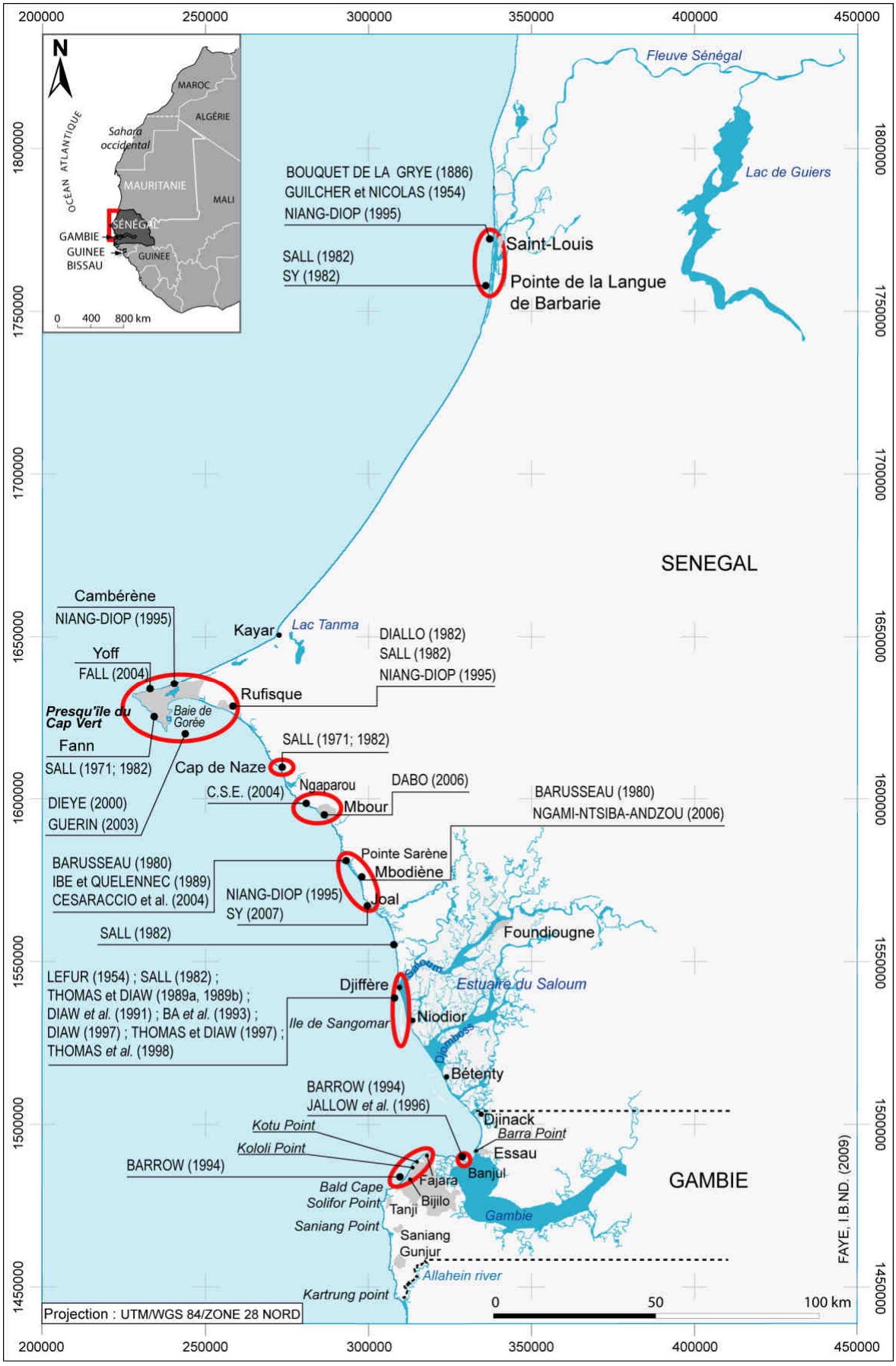
Tableau 3b : Données et taux d'évolution estimés dans la Baie de Cansado en Mauritanie

Site étudié	Source de données	Ligne de référence	Taux d'évolution moyen	Auteurs
Baie de Cansado (accès de Nouadhibou)	Cartes marines américaines (1944, 1976, 1/39400) ; SHOM (n° 5915, 1942 et 1976, 1/37500)	?	+37,5 m/an[17]	PNUE/UNESCO/ONU–DAESI (1985)

Au Sénégal, les zones privilégiées par les auteurs dans l'analyse de la mobilité du littoral sont les alentours de la Presqu'île du Cap Vert, la zone touristique de Somone à Mbour et les flèches sableuses de la Langue de Barbarie à la pointe de Sangomar (**Figure 18**).

[17] Ce taux très élevé s'explique par le fait que des zones cartographiées sur les cartes des années 1940 comme secteurs marécageux ont été remblayées lors de travaux d'aménagements portuaires (PNUE/UNESCO/ONU–DAESI, 1985).

Figure 18 : Zones ayant fait l'objet de mesures quantitatives de l'évolution côtière sur le littoral sénégambien



Ces travaux sont fondés pour l'essentiel sur l'analyse de documents iconographiques (photographies aériennes, cartes topographiques, plans cadastraux, cartes marines, images satellitaires très haute résolution). Si GUILCHER et NICOLAS (1954) ont utilisé comme référence la largeur du cordon pour la Langue de Barbarie, l'indicateur le plus utilisé pour estimer la cinématique littorale est la limite d'humectation de l'estran (NIANG-DIOP, 1995 ; DIEYE, 2000 ; C.S.E., 2004 ; GUERIN, 2003 ; FALL, 2004 ; DABO, 2006 ; NGAMI-NTSIBA-ANDZOU, 2006 ; SY, 2007) en dépit du fait que, cette ligne est affectée par les variations du niveau de marée et d'autres facteurs météo-marins qui peuvent parfois biaiser les résultats.

La méthode d'estimation la plus répandue est celle des points d'appui. Les mesures de distances perpendiculaires entre les points repères ou les points de contrôle (coins de bâtiments, croisement de route, arbres, etc.) et la ligne de référence se font alors à la règle sur des photographies aériennes analogiques et des cartes anciennes (marines, topographiques, cadastrales) (DIALLO, 1982 ; NIANG-DIOP, 1995) ou sous environnement SIG sur des images aériennes et satellitaires redressées (DIEYE, 2000 ; C.S.E., 2004 ; FALL, 2004 ; DABO, 2006 ; NGAMI-NTSIBA-ANDZOU, 2006 ; SY, 2007). Le principal problème de cette méthode est le nombre de repères choisis et le caractère aléatoire de la répartition spatiale des points de contrôle. Par exemple à Rufisque, NIANG-DIOP (1995) a utilisé des repères distants de 138 à 508 m. Pour DIEYE (2000), l'écartement des points de mesure varie de 242 à 1880 m.

Dans quelques sites, l'approche indirecte par analyse de documents iconographiques est complétée par des mesures de terrain pour appréhender la cinématique du rivage sur le court terme soit en mesurant la distance entre des points fixes (piquets, arbres, etc.) et des lignes de référence (SALL, 1971 ; 1982), soit en procédant à des levés topographiques mensuels au niveau de chantier (NIANG-DIOP, 1995 ; FALL, 2004 ; DABO, 2006 ; NGAMI-NTSIBA-ANDZOU, 2006 ; SY, 2007). Ces suivis topographiques sont systématiquement combinés à des analyses sédimentologiques pour étudier la dynamique morpho-sédimentaire annuelle du site d'étude.

En complément des analyses quantitatives, des approches qualitatives sont mobilisées pour mettre en évidence la cinématique des flèches sableuses (BOUQUET DE LA GRYE, 1886 ; TROMEUR, 1946 ; JOIRE, 1947 ; DIOP, 1975 ; NDIAYE, 1975 ; GAC *et al.,* 1982 ; SY, 1982 ; BARUSSEAU *et al*., 1995), des cordons littoraux (FAYE, 2003 ; SALL, 1971) ou des falaises meubles et autres cordons sableux (PENNOBER, 1999). Elles reposent sur plusieurs sources telles que des observations de terrain recoupées, si possible, avec des données bibliographiques ou des entretiens avec les populations locales ou encore des comparaisons de cartes anciennes, de photographies aériennes et d'images satellitaires.

Comme le montre le **tableau 4**, les taux d'érosion les plus fiables mis en évidence par ces études sont inférieurs ou égaux à -2,5 m/an. Les plus fortes vitesses de recul sont localisées aux environs de la Presqu'île du Cap Vert. Ainsi dans les secteurs de Yoff – Cambérène, elles varient de -

1 à -1,8 m/an. L'autre secteur en forte érosion est la zone de Mbao – Rufisque où les taux de régression oscillent entre -0,9 et -1,6 m/an. Par ailleurs, en dépit de la construction d'épis et de l'aménagement d'un cordon d'enrochement pour protéger Rufisque de l'avancée de la mer, certains quartiers riverains sont submergés lors de fortes houles et des grandes marées. Les facteurs évoqués par NIANG-DIOP (1995) pour expliquer cette régression du littoral de l'isthme de la Presqu'île du Cap Vert sont divers : élévation du niveau marin, augmentation possible de l'énergie des houles, déficit sédimentaire lié à des facteurs naturels tels que la sécheresse qui a eu comme conséquence la réduction des apports de sédiments des cours d'eau côtiers. Ce phénomène a été accentué par des activités anthropiques, notamment l'assèchement des marigots dans le cadre des politiques d'assainissement, le prélèvement de sables sur les plages, l'exploitation de l'ilménite sur les plages (1920 – 1950) et la construction de canaux d'évacuation des eaux usées des usines (centrale électrique du cap des biches, zone industrielle entre Thiaroye et Mbao) qui créent des structures perpendiculaires au rivage entravant le transit sédimentaire. Les secteurs dotés de tels aménagements semblent être stables ou évoluent faiblement. Ainsi le rivage à Thiaroye reculerait de -0,2 m/an (GUERIN, 2003) à -0,3 m/an (DIEYE, 2000). C'est aussi en amont de ces secteurs, au fond de la Baie de Hann abritée par la pointe de Bel Air, que sont localisés les rares cas d'accumulation signalés par PNUE/UNESCO/DAESI (1985) (**Figure 15, volume 2**) et DIEYE (2000) avec un taux de +1,3 m/an de 1968 à 1997.

Tableau 4 : Synthèse des sources de données et résultats des travaux sur les mesures de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale au Sénégal

Site étudié	Source de données	Ligne de référence	Taux d'évolution moyen	Auteurs
Cambérène[18]	Photographies aériennes non rectifiées IGN (1968, 1/15000 ; 1980, 1/5000) et Airmaps (1973, 1/6000)	Limite d'humectation de l'estran	-1,8 m/an	NIANG-DIOP (1995)
Yoff	Photographies aériennes rectifiées IGN (1968, 1/15000 ; 1997, 1/20000)	Limite d'humectation de l'estran	-1 m/an	FALL (2004)
Rufisque	Cartes topographiques IGN (1933 ; 1948) Plan cadastral (1968) Photographie aérienne non rectifiée IGN (1980)	?	-1,29 m/an	DIALLO (1982)
	Plans cadastraux (1933, 1945) Photographies aériennes non rectifiées IGN (1980)	?	-1,30 m/an	SALL (1982)
	Photographies aériennes non rectifiées IGN (1959, 1/5000 ; 1968, 1/15000 ; 1972, 1/10000 ; 1976, 1/20000 ; 1980, 1/5000) et B.C.G. (1989, 1/6000)		-1,20 m/an	NIANG-DIOP (1995)

[18] L'auteur note à la page 89 que c'est une étude sommaire basée sur 4 points repères et destinée uniquement à avoir des données comparatives par rapport à Rufisque pour montrer que l'érosion côtière affecte d'autres secteurs du littoral sénégalais.

Rufisque (partie centrale de la ville)	Carte topographique du SGAOF[19] (1917, 1/10 000 ; 1941, 1/20000) Cartes marines du SHOM[20] (N° 3592, 1929, 1/20000 ; N° 5842, 1937, 1/20000) Photographies aériennes non rectifiées IGN (1959, 1/5000 ; 1980, 1/5000)	Limite d'humectation de l'estran	-0,9 m/an	NIANG-DIOP (1995)
De Bel Air à Rufisque	Photographies aériennes rectifiées (1968, 1/15000 ; 1997, 1/20000)	Limite d'humectation de l'estran	-0,6 m/an	DIEYE (2000)
De Hann à Bargny	Photographies aériennes rectifiées IGN (1954, 1/50000 ; 1978, 1/60000 ; 1997, 1/20000)	Limite d'humectation de l'estran	-0,77 m/an	GUERIN (2003)
Ngaparou	Photographies aériennes rectifiées IGN (1978, 1/60000 ; 1989, 1/60000) et image satellitaire rectifiée QuickBird (2001)	Limite d'humectation de l'estran	-0,96 m/an	C.S.E. (2004)
Saly			-0,9 m/an	
Mbour			-0,25 m/an	
Mbour	Photographies aériennes rectifiées (1946, 1/25000) ; IGN (1978, 1/60000) ; JICA (1989, 1/60000) et image satellitaire rectifiée QuickBird (2001)	Limite d'humectation de l'estran	-0,45 m/an	DABO (2006)
De Joal à la pointe de Sangomar	?	?	-1,2 m/an	SALL (1982)
Saint–Louis	Observations de terrain (Plage au profil concave)	?	-1 à -2 m/an	BOUQUET DE LA GRYE (1886)
Saint–Louis	Cartes anciennes (1856 et 1926)	Largeur de la Langue de Barbarie	-1,78 m/an	GUILCHER et NICOLAS (1954)
Sud de la Langue de Barbarie (Hydrobase à la Tassinière)	Suivi de piquets repères (de 1972 à 1978)	?	-1,03 m/an	SALL (1982)
Saint -Louis[21]	Photographies aériennes non rectifiées IGN (1954, 1/50000 ; 1975, 1/15000) et JICA (1989, 1/30000)	Limite d'humectation de l'estran	-0,61 m/an	NIANG-DIOP (1995)
Devant le village de Pointe Sarène	?	?	-2 m/an	IBE et QUELENNEC (1989)
	Témoignage oral	?	-2 m/an	BARUSSEAU (1980)
Plage de Pointe Sarène	Mesures *in situ* effectuées par des propriétaires de campements touristiques de 1990 à 2003	?	-15 m/an	CESARACCIO *et al.* (2004)
	Photographies aériennes rectifiées IGN (1954, 1/50000 ; 1978, 1989,			

[19] Service Géographique de l'Afrique Occidentale Française.
[20] Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
[21] Même remarque que 7, 6 points repères ont été utilisés.

Flèche de Mbodiène	1/60000) ; JICA (1989, 1/60000) et image satellitaire rectifiée QuickBird multi spectrale (2002, résolution 1,2 m)	Limite d'humectation de l'estran	-0,33 m/an	NGAMI-NTSIBA-ANDZOU (2006)
Joal [22]	Photographies aériennes non rectifiées IGN (1960, 1/6000 ; 1972, 1/10000 ; 1978, 1/6000) et JICA (1989, 1/30000)	Limite d'humectation de l'estran	+1 m/an	NIANG-DIOP (1995)
Joal	Photographies aériennes rectifiées IGN (1954, 1/50000 ; 1997, 1/20000) ; JICA (1989, 1/60000) et image satellitaire rectifiée QuickBird (2001) Carte bathymétrique redressée du SHOM (1928, 1/26740)	Limite d'humectation de l'estran	+0,5 m/an	SY (2007)
	Photographies aériennes rectifiées IGN (1954, 1/50000 ; 1997, 1/20000) ; JICA (1989, 1/60000) et image satellitaire rectifiée QuickBird (2001)		-0,09 m/an	
Fann	Suivi périodique de mires positionnées sur le haut et le pied de falaise de 1969 à 1971	Sommet de falaise	-0,38 m/an	SALL (1971)
Cap de Naze			-0,19 m/an	
Fann		Pied de falaise	-0,28 m/an	
Cap de Naze			-0,03 m/an	
Fann	Suivi de repères fixes (de 1969 à 1979)	Sommet de la falaise	-0,29 m/an	SALL (1982)
Cap de Naze			-0,22 m/an	
Fann		Base de la falaise	-0,29 m/an	
Cap de Naze			-0,05 m/an	

L'érosion côtière touche aussi sévèrement les plages très touristiques de la Somone à Saly qui perdent presque 1 m/an (C.S.E., 2004). Ces sites sont localisés à l'extrémité d'une petite baie dans laquelle se trouve Mbour où la ligne de rivage recule moins rapidement (-0,45 m/an). Le recul est également très faible pour les falaises et les plages adossées de Fann et du Cap de Naze. L'évolution du pied et du haut de falaise dans les secteurs de plages adossées résulte principalement des actions alternées ou simultanées de la mer qui attaque la base de la falaise et déblaie les éboulis ainsi que des pluies qui ravinent les horizons meubles des falaises et provoquent des mouvements de masses boueuses principalement sur les versants des falaises marneuses et argileuses (ELOUARD, 1980 ; SALL, 1971 ; 1982).

Concernant les flèches sableuses, l'évolution de la ligne de rivage du front maritime a été très modérée ou faible des années 1950 à aujourd'hui. Elle est à peine supérieure à -0,3 m/an pour celle de Mbodiène, -0,5 m/an à Saint-Louis sur la Langue de Barbarie alors que la flèche de Joal serait en

[22] Même remarque que 7 et 8, 5 points repères ont été utilisés.

accrétion ou stable. En réalité dans les détails, les flèches présentent une forte disparité spatiale avec une succession de zones en érosion et en accumulation qui fait que, sur l'ensemble de la flèche, l'évolution est faible voire nulle. Pour les flèches accrochées à une pointe (Joal et Mbodiène), les parties proximales abritées par le point d'ancrage sont stables ou progressent alors que les parties médianes plus exposées s'érodent régulièrement : -1,6 m/an à Mbodiène de 1954 à 2002 (NGAMI-TSIBA-ANDZOU, 2006), -1,46 m/an à Joal durant la même période (SY, 2007). Quant à la partie distale et l'extrémité des flèches, elles sont caractérisées par une très grande mobilité. Les cas de la Langue de Barbarie et de la pointe de Sangomar sont bien connus et très étudiés car ils concernent des embouchures donnant accès à des sites portuaires (Saint-Louis et Kaolack). Diverses techniques et sources de données ont été mobilisées dans cette optique :

- mesures linéaires sur des documents non rectifiés, à savoir des cartes marines (LE FUR, 1954) ; des photographies aériennes (BARUSSEAU, 1980) ; cartes anciennes, photographies aériennes, images satellitaires (SALL, 1982) ; images satellitaires (SY, 1982) ;
- mesures linéaires sur des photographies aériennes et des images satellitaires redressées (DIAW *et al.,* 1987 ; THOMAS et DIAW, 1989a ; 1989b ; DIAW et *al.,* 1991 ; DIAW, 1997 ; THOMAS *et al.,* 1998 ; NGAMI-NTSIBA-ZANSOU, 2006 ; SY, 2007) ;
- estimation de surfaces gagnées ou perdues à partir de cartes anciennes, photographies aériennes et images satellitaires corrigées géométriquement (THOMAS et DIAW, 1989a ; 1989b ; DIAW *et al.*, 1991 ; DIAW, 1997 ; THOMAS et DIAW, 1997).

Trois lignes servent de référence à ces études : la limite d'humectation de l'estran (NGAMI-TSIBA-ANDZOU, 2006 ; SY, 2007), le pied de dune matérialisé par la limite de végétation (THOMAS et DIAW, 1989a ; 1989b ; DIAW *et al.,* 1991 ; DIAW, 1997) et le zéro des cartes marines déduit de la ligne instantanée de rivage selon la hauteur d'eau et la pente de la plage (THOMAS et DIAW, 1997 ; THOMAS *et al.*, 1998).

La vitesse de progression des flèches est variable avec des taux allant de 150 à 700 m/an pour la Langue de Barbarie, 22 m/an pour celle de Joal, 12 à 130 m/an pour la pointe de Sangomar (**Tableau 5**). La progression se fait par adjonction de crochets successifs pour la Langue de Barbarie (SALL, 1982) ou la pointe de Sangomar (DIAW, 1997) alors que celle de Mbodiène se ferait par formation de coudes à l'extrémité (NGAMI-TSIBA-ANDZOU, 2006). Du point de vue temporel, la pointe des flèches peut progresser régulièrement ou alterner des périodes de progression et de régression. Ainsi, la cinématique de l'extrémité distale de la flèche de Sangomar peut-être circonscrite en deux phases selon DIAW (1997) : une phase d'alternance de reculs et d'avancées qui a été soulignée aussi par les travaux de TROMEUR (1946), LE FUR (1954), DIOP (1975) et SALL (1982) jusqu'en 1927 ; une phase suivante de progression régulière d'une centaine de mètres par an jusqu'en 1969 puis d'un ralentissement entre 1969 et 1984 avant un nouvel accroissement de la vitesse de progression à partir de cette date jusqu'en 1991.

L'évolution de la flèche de Mbodiène a, quant à elle, été précisée récemment par NGAMI-TSIBA-ANDZOU (2006). Même si globalement les taux d'évolution calculés par cet auteur indiquent une

évolution régressive, celle-ci s'articule sur 4 phases. Deux phases d'accumulation exprimées par une progression de la pointe de 25 m/an entre 1954 et 1978, puis de 77 m/an entre 1989 et 2002 et deux phases de recul, -36 m/an entre 1978 et 1989 et -400 m/an de 2002 à 2005. Entre temps, la flèche a subi deux ruptures, l'une d'origine naturelle (tempête ou courant de marée) en 1974 et l'autre artificielle en 2003 effectuée par les riverains pour permettre l'évacuation des eaux de la lagune. La brèche s'est agrandie au moment où l'extrémité insularisée du cordon avançait de 350 m/an de 2003 à 2005. Ces ruptures ponctuelles sous l'influence de conditions naturelles et/ou anthropiques constituent une caractéristique commune aux trois flèches. Celle qui a affecté la pointe de Sangomar en 1987 à hauteur du Lagoba, serait, selon DIAW (1997), le résultat de la conjonction de plusieurs facteurs dont :

- la morphologie particulière du site qui en fait une zone de faiblesse très étroite et topographiquement basse,
- l'effet de chasse accru du jusant du Saloum consécutif à l'amélioration de la pluviométrie depuis le milieu des années 1980,
- les activités anthropiques (prélèvements de sable et constructions sur le littoral) contribuant au déficit sédimentaire et des facteurs hydro-climatologiques (fortes houles concomitantes avec une marée de vives–eaux et une dépression atmosphérique) dans un contexte marqué par la disparition des bancs prélittoraux qui amortissaient les houles par le passé.

La rupture du Lagoba a engendré une érosion rapide de la racine de la flèche à une vitesse comprise entre 280 et 700 m/an de 1987 à 1994 (**Tableau 5**) et a transformé la partie distale de Sangomar en une île–barrière dont l'extrémité sud continue de progresser grâce à l'apport de sédiments par la dérive littorale (DIAW *et al.,* 1991 ; BA *et al.*, 1993 ; DIAW, 1997 ; THOMAS et DIAW, 1997 ; THOMAS *et al.,* 1998). La pointe de Sangomar aurait connu seulement 4 ruptures antérieures à celle de 1987 (1860, 1928, 1952 et 1954) (DIAW, 1997) contrairement à la Langue de Barbarie qui en a enregistré plus d'une cinquantaine (**Figure 20**). La mobilité de l'embouchure de cette flèche caractérisée par la présence d'une barre sableuse au fond du chenal a été suivie, durant le 19e siècle, par BOUQUET DE LA GRYE (1886) et sa position a été retracée depuis le 17e siècle par JOIRE (1947). Ces ruptures interviendraient environ tous les 14 ans selon la synthèse de GAC *et al.,* (1982) qui ont reconstitué, à la suite de JOIRE (1947), les positions de l'embouchure du fleuve de 1658 jusqu'à 1981 grâce à des documents cartographiques anciens et des données écrites (**Figure 20**). Les coupures de la Langue de Barbarie résulteraient de la conjugaison des dynamiques fluviale (érosion du revers par les crues) et marine (sapement du front maritime par les fortes houles) créant des zones de rétrécissement de faible altitude qui deviennent par la suite des points de submersion lors des grandes marées et des amorces de brèche (JOIRE, 1947 ; GUILCHER, 1954a ; GUILCHER et NICOLAS, 1954 ; TRICART, 1961 ; SALL, 1982). Le fleuve ne pouvant entretenir deux embouchures à cause du décalage de la vitesse des courants entre les deux, celle où les courants sont plus forts se maintient tandis que l'ancienne embouchure tend à se refermer (BOUQUET DE LA GRYE, 1886). Son colmatage génère ainsi une lagune et une progradation du rivage. Ce phénomène se serait produit à l'extrémité de la flèche de Mbodiène après la rupture de 1974 au nord de Ngazobil

et s'est reproduit aussi après celle de 2003 (NGAMI-TSIBA-ANDZOU, 2006) alors que dans le cas de la pointe de Sangomar qui borde une embouchure plus large (1,5 à 4,5 km), la partie distale s'est insularisée.

Tableau 5 : Sources de données et mesures de l'évolution de la pointe des flèches sableuses sénégalaises

Secteurs étudiés	Source de données	Ligne de référence	Taux d'évolution moyen	Auteurs
Déplacements de la ligne de rivage				
Langue de Barbarie	Levés hydrographiques, récits de voyage, cartes anciennes, tradition orale et bibliographie (1890 à 1950)	?	+350 à +400 m/an	SALL (1982)
	Photographies aériennes non rectifiées (1958, 1960)	?	+700 m/an	
	Suivi de piquets repères (1972 à 1978)	?	+152 m/an	
	Images Landsat MSS non rectifiées (1973, 1977)	?	+625 m/an	SY (1982)
Flèche de Mbodiène	Photographies aériennes non rectifiées (1954 et 1972)	?	+94,44 m/an	BARUSSEAU (1980)
	Photographies aériennes rectifiées IGN (1954, 1/50000 ; 1978, 1/60000) ; JICA (1989, 1/60000) ; images satellitaires rectifiées Quickbird multispectrale (2002) et SPOT 5 (2005)	Limite d'humectation de l'estran	–83,62 m/an	NGAMI-NTSIBA-ANDZOU (2006)
Flèche de Joal	Photographies aériennes rectifiées IGN (1954, 1/50000 ; 1997, 1/20000) ; JICA (1989, 1/60000) et image satellitaire rectifiée QuickBird (2001)	?	+22 m/an	SY (2007)
Pointe de Sangomar	Travaux de TROMEUR (1946), levés hydrographiques antérieurs (1828, 1858, 1906, 1912, 1914, 1925, 1930, 1950)	?	+12,25 m/an	LE FUR (1954)
	Cartes marines SHOM (1895, 1906, 1907, 1912, 1914, 1925, 1930)	?	+77,81 m/an	SALL (1982)
	Photographies aériennes non redressées IGN (1954, 1/50000) et image satellitaire non rectifiée (simulation SPOT HRV, 1981)	?	+44 m/an	
	Photographies aériennes IGN agrandies à la même échelle (1972, 1981) Image SPOT XS redressée (1986)	Pied de dune	+52 m/an	DIAW *et al.* (1987)
	Carte topographique du SGAOF (1907) ; calque d'interprétation photographies aériennes de 1927 ; photographies aériennes IGN			

Pointe de Sangomar	agrandies à la même échelle (1946, 1954, 1958, 1969, 1972) et images satellitaires rectifiées (simulation SPOT HRV 1981) ; Landsat 4 TM (1984) ; SPOT HRV (1986, 1987)	Pied de dune (limite de végétation)	+85,33 m/an	THOMAS et DIAW (1989a ; 1989b), DIAW *et al.* (1991)
	Carte marine du SHOM (N° 6147, 1958), images satellitaires[23] (Landsat TM 1976 ; simulation SPOT HRV 1981)	?	+65 m/an	BA *et al.* (1993)
	Images satellitaires (simulation SPOT HRV 1981 et SPOT HRV (1991)	?	+130 m/an	
	Carte topographique du SGAOF (1907) ; calque d'interprétation photographies aériennes de 1927 ; photographies aériennes IGN rectifiées (1954, 1958, 1969, 1972) ; JICA (1989) et images satellitaires rectifiées (simulation SPOT HRV 1981) ; Landsat 4 TM (1984) ; SPOT HRV (1986, 1987, 1988, 1991)	Pied de dune (limite de végétation)	+102,28 m/an	DIAW (1997)
	Images satellitaires rectifiées (simulations SPOT HRV 1981) ; Landsat 5 TM (1984) ; SPOT HRV XS (1986, 1987, 1990, 1988, 1991, 1992, 1993)	Zéro des cartes marines déduit de la ligne instantanée de rivage	+41,16 m/an	THOMAS *et al.* (1998)
Lagoba	?	?	-600 m à -700 m/an vers le nord	BA et *al.* (1993)
	Images satellitaires rectifiées SPOT HRV XS (1987, 1988, 1990, 1991, 1991, 1992, 1993, 1997, 1997) ; Landsat TM (1994)	Zéro des cartes marines déduit de la ligne instantanée de rivage	Vers le nord : -281,05 m/an Vers le sud : -80,3 m/an	THOMAS *et al.* (1998)
	Images satellitaires rectifiées SPOT HRV XS (1986, 1987, 1988, 1990, 1991, 1992, 1992, 1993)	Zéro des cartes marines déduit de la ligne instantanée de rivage	-470,85 m/an	THOMAS et DIAW (1997)
Surface accumulées ou érodées				
Lagoba	Images satellitaires rectifiées SPOT HRV XS (1986, 1987, 1988, 1990, 1991, 1992, 1992, 1993)	Zéro des cartes marines déduit de la ligne instantanée de rivage	-85045 m²/an	THOMAS et DIAW (1997)
Extrémité distale Pointe de Sangomar	Carte topographique du SGAOF (1907) ; calque d'interprétation photographies aériennes de 1927 ; photographies aériennes IGN agrandies à la même échelle (1946, 1954, 1958, 1969, 1972) et images satellitaires rectifiées (simulation SPOT HRV 1981) ; Landsat 4 TM (1984) et SPOT HRV (1986, 1987)	Pied de dune (limite de végétation)	+34440 m²/an	THOMAS et DIAW (1989a ; 1989b), DIAW *et al.* (1991)

[23] Les auteurs ne précisent pas si les données sont rectifiées ou pas

	Carte topographique du SGAOF (1907) ; calque d'interprétation photographies aériennes de 1927 ; photographies aériennes IGN rectifiées (1954, 1958, 1969, 1972) ; JICA (1989) et images satellitaires rectifiées (simulation SPOT HRV 1981) ; Landsat TM (1984) ; SPOT HRV (1986, 1987, 1988, 1991)	Pied de dune (limite de végétation)	+47100 m²/an	DIAW (1997)

Figure 19 : Migration et évolution de la pointe de Sangomar entre 1927 et 1995

Figure 19a : Recul de la ligne de rivage à Djiffère de juillet 1991 à février 1995 (Source : SOUMARE, 1996, modifié)

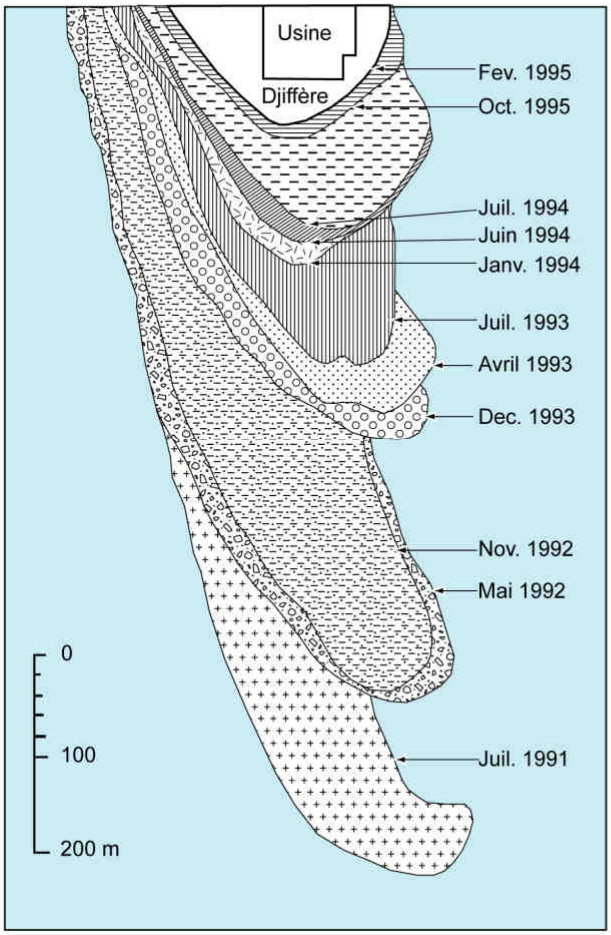


Figure 19b : Positions de l'extrémité de la pointe de Sangomar de 1927 à 1991 (Source : DIAW, 1997, modifié)

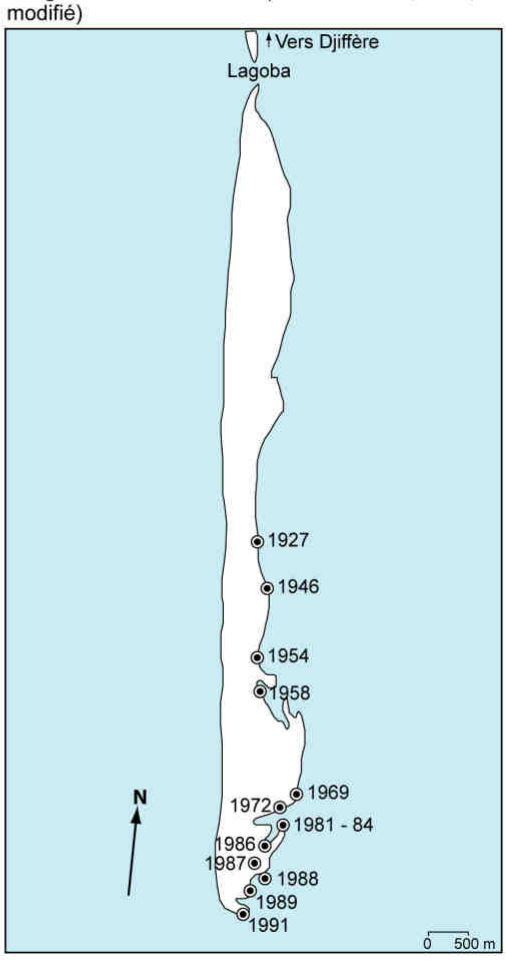
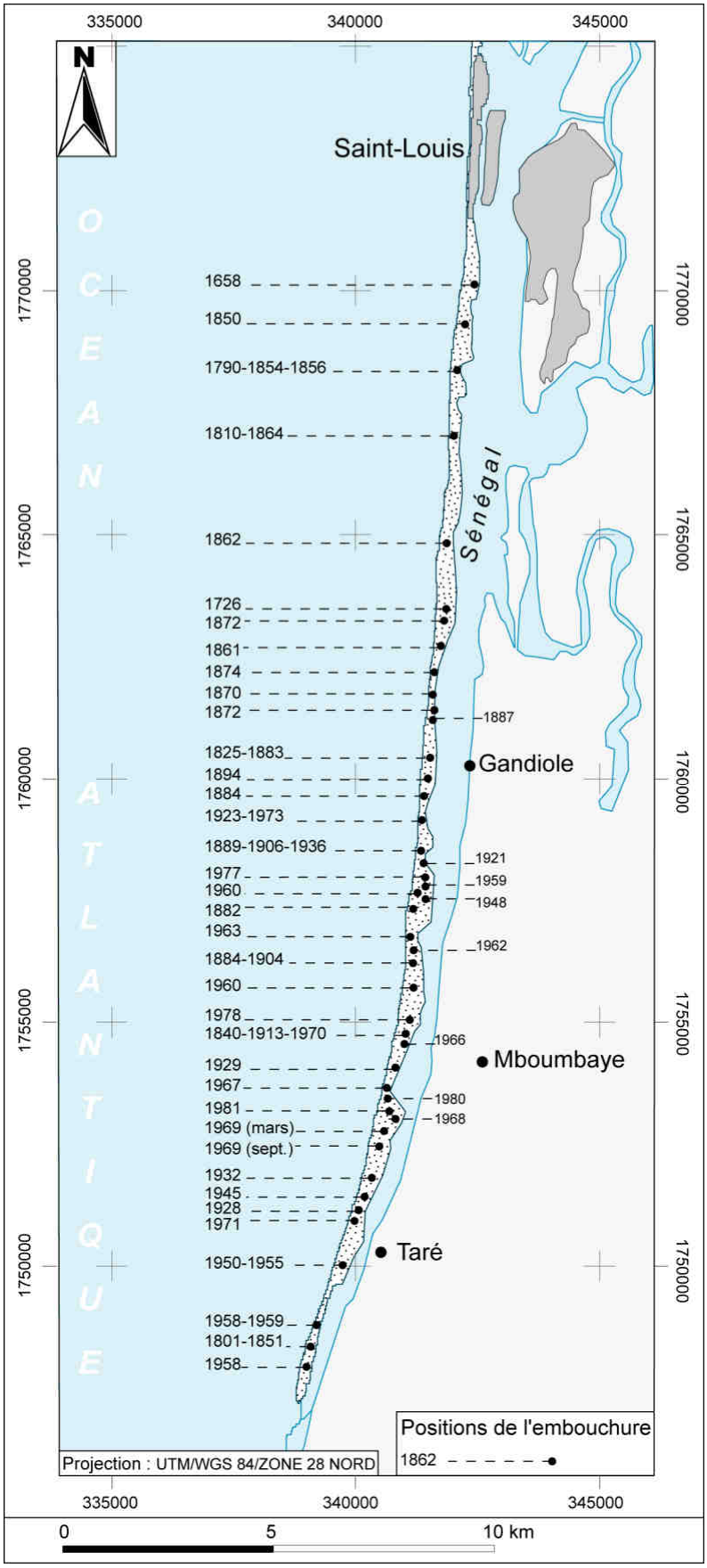


Figure 20 : Positions successives de l'embouchure du fleuve Sénégal de 1658 à 1981 d'après les données de GAC *et al.* (1982)



En Gambie très peu de mesures ont été réalisées sur l'érosion côtière. IBE et QUELENNEC (1989) reprenant les travaux de QUELENNEC (1988) avaient identifié à l'époque les zones suivantes comme sujettes à des phénomènes d'érosion importants :

- Barra point au nord de l'estuaire,
- la zone des cimetières à l'ouest de Banjul,
- les falaises du cap Saint–Mary à Fajara et de Solifor Point,
- les plages entre Bijilo et Fajara à cause de l'extraction massives de sables.

La question de l'érosion côtière a été abordée par la suite sous un angle qualitatif par BARROW (1994). JALLOW *et al.* (1996) quant à eux se sont limités à des mesures ponctuelles sur des photographies aériennes non rectifiées dans le cadre d'une étude sur la vulnérabilité de la ville de Banjul à l'élévation du niveau marin. Les vitesses de régression qu'ils ont estimées varient entre -0,5 et -2,5 m/an (**Tableau 6** et **figure 21, volume 2**).

Tableau 6 : Synthèse des sources de données et résultats des travaux sur les mesures de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale en Gambie

Site étudié	Source de données	Ligne de référence	Taux d'évolution moyen	Auteurs
Banjul	Photographies aériennes non rectifiées (1972, 1993)	?	Environ -2,5 m/an	JALLOW *et al.* (1996)
De Banjul au cap Saint Mary	Photographies aériennes non rectifiées (1964, 1972, 1983) ; observations de terrain et bibliographie	?	-1 à -1,5 m/an	BARROW (1994)
Kololi Point – Kotu Point	Photographies aériennes non rectifiées (1964, 1982) et des observations de terrain	?	-2 m/an	BARROW (1994)
Kololi Point – Bald Cape	?	?	-1,5 à -2,3 m/an	
Gambie (falaises taillées dans le Continental Terminal)	?	?	-0,5 m/an	BARROW (1994)

En Guinée-Bissau, à partir d'observations de terrain, confirmées par la comparaison d'images Landsat de 1973, 1990 et 1995, PENNOBER (1999) a mis en évidence un recul des falaises de l'île Meio, du nord de Caravela et l'allongement de la flèche d'Acapa dans l'Archipel des Bijagos.

Conclusion du chapitre II

Le trait de côte ouest-africain s'inscrit dans des unités morphologiques et lithologiques très variées (cordons dunaires, falaises, flèches, etc.) évoluant sous la pression d'agents naturels et anthropiques. A l'exception des pointes des flèches sableuses, cette évolution se traduit le plus souvent par une régression du trait de côte que de nombreux auteurs ont essayé d'évaluer. L'étude de la bibliographie existante à ce sujet révèle :

1 – une littérature relativement fournie, qui montre l'importance accordée par les géomorphologues et les géologues à la connaissance des tendances évolutives de la côte ouest-africaine ;

2 – une certaine disparité géographique des mesures quantitatives des processus d'érosion. En effet, les taux de recul du rivage sont assez bien documentés sur quelques secteurs sableux du littoral sénégalo-mauritanien. En revanche, sur les littoraux gambiens et bissauguinéens, l'analyse de la cinématique littorale reste encore très qualitative.

3 – Les principales sources d'informations de ces études sont des documents iconographiques (cartes topographiques, cartes marines, plans cadastraux, photographies aériennes et images satellitaires). Ces données sont utilisées directement ou subissent des corrections géométriques avant leur exploitation.

4 – La diversité morphologique du littoral concerné offre une variété de choix d'indicateurs pour suivre l'évolution de la ligne de rivage. Cependant, dans l'ensemble, les mesures de la cinématique côtière sont fondées sur l'utilisation de niveaux instantanés de marée (ligne instantanée de rivage, limite d'humectation) comme indicateurs, mis à part quelques travaux qui utilisent des lignes de référence morphologiques à l'instar du sommet ou du pied de falaise pour les plages adossées ou encore le pied de dune sur la flèche de Sangomar.

D'après cette littérature, d'une manière générale, le processus de recul de la ligne de rivage intéresse l'ensemble du littoral entre la Mauritanie et la Guinée-Bissau à des vitesses variables mais inférieures ou égales à 2,5 m/an au cours de ces cinquante dernières années. L'érosion côtière présente un caractère alarmant en certains endroits comme le sud immédiat du port de Nouakchott, l'isthme de la Presqu'île du Cap Vert, les secteurs de Somone – Ngaparou – Saly, tout comme la côte entre Banjul et Bald Cape. Toutefois de nombreux secteurs de la côte n'ont pas encore fait l'objet d'études approfondies même si des signes d'érosion y sont manifestes.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Derrière la simplicité apparente du concept, une large ambiguïté existe en matière de définition du trait de côte, ambiguïté qui est plus ou moins clairement exprimée dans la littérature que nous avons examinée, y compris pour les littoraux sableux qui nous préoccupent dans cette étude. En l'absence de toute possibilité de recoupement d'une topographie continentale, précisément connue à chaque instant, par un plan d'eau dont l'altitude est fixée conventionnellement pour tous les rivages, le positionnement du trait de côte et le suivi de son évolution demeurent, incertains quelle que soit la méthode d'identification choisie, notamment lorsque celle-ci repose sur l'utilisation d'un marqueur naturel. Il faut néanmoins s'en accommoder et les auteurs qui ont étudié les littoraux de l'Afrique de l'Ouest ont adopté leur propre définition du trait de côte. La ligne de référence a alors été positionnée en fonction des caractéristiques du littoral étudié localement et en fonction des supports cartographiques et/ou photographiques dont disposait l'auteur pour une étude diachronique de son évolution. Ce sont cependant des choix qui ne permettent pas toujours de comparer les résultats obtenus par des auteurs différents. Cet état de fait n'est pas propre aux rivages de cette région, c'est une caractéristique commune aux études portant sur le trait de côte étant donné la diversité des critères d'identification et la multiplicité des traits de côte qui en résulte. Pour aborder notre problématique de recherche, nous devrons donc choisir une ligne de référence adaptée aux données disponibles et aux types de côte de notre zone d'étude.

Concernant les démarches méthodologiques mises au point pour l'extraction de la ligne de rivage, quelques techniques semi-automatiques que l'on retrouve dans la revue bibliographique comme le seuillage, l'équidensitométrie, les classifications non dirigées et dirigées, peuvent être testées en complément de la photo-interprétation assistée par ordinateur. Une fois les lignes de référence extraites, l'analyse de la mobilité du trait de côte est envisageable avec des mesures automatisées sous environnement SIG ; les techniques plus précises comme la photogrammétrie ne sont pas applicables ici faute de données altimétriques et les levés de terrain ne sont pas adaptés à l'échelle d'étude. Aussi, les autres méthodes comme les mesures à partir de points d'appui sur des documents redressés ou non souffrent de quelques problèmes de représentativité du fait de la répartition aléatoire des éléments ponctuels servant de repères. Cela étant, elles ont largement été utilisées pour quantifier la mobilité de segments littoraux concernant notre zone d'étude. A ce propos, la bibliographie montre que l'érosion côtière intéresse l'ensemble des plages sableuses entre la Mauritanie et la Guinée-Bissau à des vitesses variables, globalement inférieures ou égales à 2,5 m/an. Il faut souligner par ailleurs les cas «exceptionnels» de la zone au sud du port de Nouakchott mais surtout des flèches sableuses qui sont caractérisées par une très grande mobilité exprimée par des taux d'évolution d'une dizaine à plusieurs centaines de mètres par an. Ces chiffres sont hors de proportion par rapport aux évolutions métriques des autres littoraux sableux, les plus touchés étant localisés dans la Presqu'île du Cap Vert et dans le segment côtier allant de la Somone à Saly ainsi que de Banjul à Bald Cape.

En somme, le bilan des connaissances relatives aux évolutions du trait de côte en Afrique de l'Ouest met en évidence l'existence d'un nombre relativement important de résultats. Ces résultats sont cependant hétérogènes, d'une part, dans leur distribution spatiale, certains secteurs étant encore inexploités alors que d'autres ont fait l'objet d'études successives, d'autre part, dans l'absence d'actualisation de leurs évolutions pour certains, et enfin, dans les méthodologies mises en œuvre pour leur acquisition qui rend difficile la comparaison des résultats acquis à l'échelle régionale.
Nous tenterons de pallier ces limites et d'apporter de nouvelles connaissances concernant l'évolution du trait de côte ouest-africain à l'échelle régionale et locale de la Mauritanie à la Guinée-Bissau.

Deuxième partie : CINEMATIQUE DES LITTORAUX SABLEUX D'AFRIQUE DE L'OUEST : ANALYSE REGIONALE DE LA MAURITANIE A LA GUINEE-BISSAU

La première partie de cette étude a montré que, dans l'étude de la cinématique d'un rivage, le choix d'une ligne de référence dépend, entre autres facteurs, du type de côte pris en considération. Afin de disposer des critères permettant de faire un choix pour les segments côtiers concernés par notre étude, cette deuxième partie s'intéresse d'abord à la géomorphologie du littoral ouest-africain. Elle permettra en particulier de localiser et de décrire les côtes sableuses avant de traiter de la dynamique de ces littoraux. Trois chapitres la composent. Le premier présente les données disponibles ainsi que, la méthodologie mise en œuvre pour extraire et cartographier les indicateurs des traits de côte retenus. Les couches cartographiques utilisées pour décrire les aspects morphologiques et cinématiques des plages de la zone d'étude y sont également exposées. Le deuxième chapitre traite de la diversité géomorphologique des littoraux sableux de la zone d'étude qui constitue le fondement du choix de sites représentatifs de la diversité morphologique des littoraux rencontrées pour aborder l'analyse locale de la cinématique littorale. Enfin, le troisième chapitre est consacré à la cinématique des zones où nous avons enregistré une évolution significative du linéaire côtier notamment les flèches, les petites îles et les cordons sableux situés à l'embouchure des estuaires du Sénégal au Rio Cacine en Guinée-Bissau.

CHAPITRE I : LES DONNEES DISPONIBLES, METHODES DE TRAITEMENT ET LIMITES METHODOLOGIQUES

Le recensement et la collecte des données disponibles à l'échelle régionale ont été effectués auprès des archives de l'EPSHOM[24] de Brest et du site internet du *Global Landcover Facility*[25]. Les données cartographiques et images collectées ont été examinées afin de sélectionner les documents utilisables. Ceux-ci ont subi des traitements numériques qui nous ont permis d'extraire des traits de côte multi-dates pour entreprendre une analyse régionale de la cinématique des littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau.

I – LES DONNEES DISPONIBLES

Les documents iconographiques accessibles à l'échelle régionale sont de deux types : les cartes marines à petite échelle et les images satellitaires Landsat qui donnent une vue synoptique de plusieurs centaines de kilomètres de côte concernant la zone d'étude.

1 – Les cartes marines du SHOM

Une vingtaine de cartes marines régionales datant du milieu du 19e siècle à la fin des années 1990 et couvrant en partie ou entièrement les côtes sableuses de la Mauritanie à la Guinée-Bissau a été inventoriée aux Archives de l'EPSHOM (**Annexe 1-A**). Nous nous sommes particulièrement intéressés à deux éléments relatifs à ces cartes : les échelles et l'origine des données cartographiées.

Les échelles des cartes recensées varient du 1/291 000 au 1/1 000 000. Toutefois, ces échelles ne sont valables qu'à la latitude moyenne de la carte car le système de projection utilisé est la projection conforme de MERCATOR[26]. L'échelle de chaque carte est essentielle dans la mesure où elle détermine le niveau de représentation des détails topographiques cartographiés et, par conséquent, l'allure ou le degré de simplification du tracé du trait de côte. Ainsi, il nous semble plus convenable de comparer des cartes ayant la même échelle ou des échelles proches pour être certain que les variations observées entre les contours de deux traits de côte successifs ne résultent pas d'une différence d'échelle mais d'une réelle cinématique côtière. Or, parmi la vingtaine de cartes disponibles, seules les différentes éditions d'une même carte répondent à cette condition (exemple des cartes N° 3385, 5847, 5957, 5979, 6115, cf. **Annexe 1-A**). La plupart des autres cartes sont éditées à des échelles différentes les unes des autres, ce qui rend leur comparaison hasardeuse pour en déduire une évolution littorale.

[24] Etablissement Principal du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
[25] Des recherches ont été menées aussi auprès de l'IGN mais cet institut ne dispose que d'une seule série de cartes topographiques régionales éditées au 1/200 000 et couvrant les littoraux sénégalo-mauritaniens.
[26] Le méridien origine des cartes est le méridien de Paris pour les cartes éditées avant 1914 et le méridien de Greenwich pour les cartes publiées après cette date.

Le deuxième élément ayant attiré notre attention est l'origine des données utilisées. Dans le cadre d'une analyse comparative, cette démarche est indispensable pour définir l'intervalle chronologique entre deux cartes car la date d'édition d'une carte ne coïncide pas toujours avec celle des levés de base. La provenance des données cartographiées est mentionnée parfois en dessous du titre de la carte ou dans un diagramme intitulé *«Origine des renseignements hydrographiques»* accompagné d'un graphique localisant les zones en question. S'il y a lieu, les corrections[27] majeures apportées à la carte sont indiquées aussi dans ce diagramme. Dans les cas qui nous intéressent, ces informations ont été recoupées autant que possible avec celles collectées dans les Annales hydrographiques pour préciser davantage les sources des données. La lecture de tous ces éléments appelle un constat majeur, à savoir la nature très disparate des renseignements ayant servi à la conception des cartes. En effet, pratiquement tous les documents cartographiques à petite échelle recensés sont établis à partir de la compilation de données acquises à des dates différentes et issues d'horizons très divers (quelques exemples sont présentés dans le **tableau 7**). On y retrouve également des mentions imprécises comme par exemple *«d'après les documents français les plus récents»* ou *«d'après les documents français, anglais et portugais les plus récents»*. Certaines cartes du SHOM intéressant les côtes gambiennes ou bissauguinéennes sont, de ce fait, localement décalquées de cartes britanniques ou portugaises, comme la carte N° 5847 (Côte ouest d'Afrique du fleuve Sénégal au Cap Roxo au 1/539 800) publiée en 1941 ou encore, plus récemment, la carte N° 7389 (Côtes du Sénégal, de Gambie et de Guinée-Bissau du fleuve Saloum à Ilhéu de Caió au 1/342 000) datant de 1997. D'autres documents à petite échelle à l'instar des cartes les plus anciennes (carte N°1313, 1712) éditées dans les an nées 1850, sont des reproductions intégrales de cartes anglaises de l'époque.

D'une manière générale, les levés français utilisés dans l'élaboration des cartes à petite échelle sont ponctuels et concernent surtout de petits secteurs littoraux, réduits aux environs des anciens comptoirs commerciaux ou des zones portuaires comme nous le verrons dans la partie consacrée aux cartes locales. Le seul levé portant sur de longs segments du littoral sénégalo-mauritanien a été réalisé par la mission hydrographique Agadir-Dakar de 1934 à 1937 (BONNIN, 1938). Les travaux ont été exécutés en deux étapes. La première phase (1er mars 1934 – 21 mars 1936) intéressait les secteurs littoraux du Cap Sainte-Anne dans le Banc d'Arguin (levé au 1/50 000), la portion de côte allant de Mehejrat (près du Cap Timiris) à Cambérène (Dakar) (levé au 1/100 000) et de Thiaroye à Toubab Dialao (levé au 1/10 000). Ces levés ont été prolongés par la deuxième phase de la mission (21 mars 1936 – 20 septembre 1937) jusqu'au Cap de Naze à l'échelle du 1/10 000 puis au 1/15 000 jusqu'à la Somone (DE GEFFRIER et MILLIAU, 1946). A l'occasion de cette mission, une reconnaissance détaillée de la côte du Banc d'Arguin au Cap Vert a été menée avec comme résultats deux minutes topographiques représentant le linéaire côtier au 1/255 064 et au 1/252 165. Les travaux hydrographiques ont donné lieu en 1957 à l'édition de deux cartes : la carte N°

[27] La liste et la date de toutes les corrections apportées à une carte sont inscrites aussi au bas de celle-ci. Ces corrections sont le plus souvent mineures et limitées quelquefois à une simple mise à jour de la position des amers. Lorsque la carte a fait l'objet de nombreuses corrections mineures ou des corrections majeures à l'issu d'un levé partiel du secteur concerné, elle est rééditée ou remplacée par une nouvelle carte.

6115 (du Cap Timiris au Chott Boul au 1/294 190) et la carte N°6116 (du *Chott Boul* à Dakar au 1/297 700). Cette dernière carte comporte aussi un cartouche de Cayar au 1/100 000 tandis que les travaux de la deuxième phase ont été intégrés à la carte N° 5852 (Baie de Gorée au 1/50 000) éditée en 1939 et à la carte N° 5996 (Côte ouest d'Afrique de Daka r à Mbour au 1/99 785) parue en 1956.

Tableau 7 : Origine des renseignements hydrographiques de quelques cartes régionales

Numéro de la carte	Titre de la carte	Année d'édition	Origines des renseignements hydrographiques (zone côtière uniquement)	Extension spatiale	Echelle à la latitude moyenne
5847	Côte ouest d'Afrique, du fleuve Sénégal au Rio Cacheu	1941	Levés exécutés entre : - 1908 et 1910 pour Dakar et l'entrée de la Casamance ; - 1934 et 1936 pour la côte du fleuve Sénégal jusqu'à Toubab Dialao ; - 1936 et 1937 pour les côtes du Sénégal de Toubab Dialao à la Somone ; - 1930 et 1931 pour l'embouchure du Saloum ; - et les *«documents français, anglais et portugais les plus récents»*	11°50' – 16°30' N 18°55' – 15°40' W	1/539800 (14°10' N)
6125	Côte ouest d'Afrique de Dakar au Cap Roxo	1962	*«Levés hydrographiques exécutés de 1934 à 1960»*	12°20' – 14°58' N 16°15' – 18°05' W	1/300500 (13°40' N)
7388	Côte du Sénégal de Saint-Louis au fleuve Saloum	1997	*«Levés français effectués jusqu'en 1960»* *«Les tracés des embouchures du fleuve Sénégal et du Saloum sont issus de l'interprétation d'images du satellite SPOT de 1995 et 1996 sont approximatifs»*	13°47' – 16°05' N 16°23' – 16°51' W	1/340000 (14°56'N)
7389	Côte du Sénégal, de Gambie et de Guinée Bissau du fleuve Saloum à Ilhéu de Caio	1997	Pour le Sénégal : levés français effectués jusqu'en 1963 Pour la Gambie : cartes britanniques éditées jusqu'en 1993 Pour la Guinée Bissau : carte portugaise éditée en 1986	11°47' – 14°06' N 15°13' – 18°41' W	1/342000 (12°57')

En définitive, l'hétérogénéité des échelles et des renseignements de base rend fort difficile l'exploitation des cartes régionales pour appréhender l'évolution des rivages sableux en Afrique de l'ouest. Cela étant, nous ferons quelques tentatives avec des cartes que nous avons sélectionnées en procédant à un tri basé sur plusieurs critères :

- l'emprise spatiale des cartes,
- leur date d'édition ainsi que l'origine des données de base, en privilégiant celles ayant des données sources assez éloignées dans le temps et plus ou moins homogènes sur de larges secteurs ;
- les échelles des cartes, en évitant celles dont l'échelle est trop petite ;

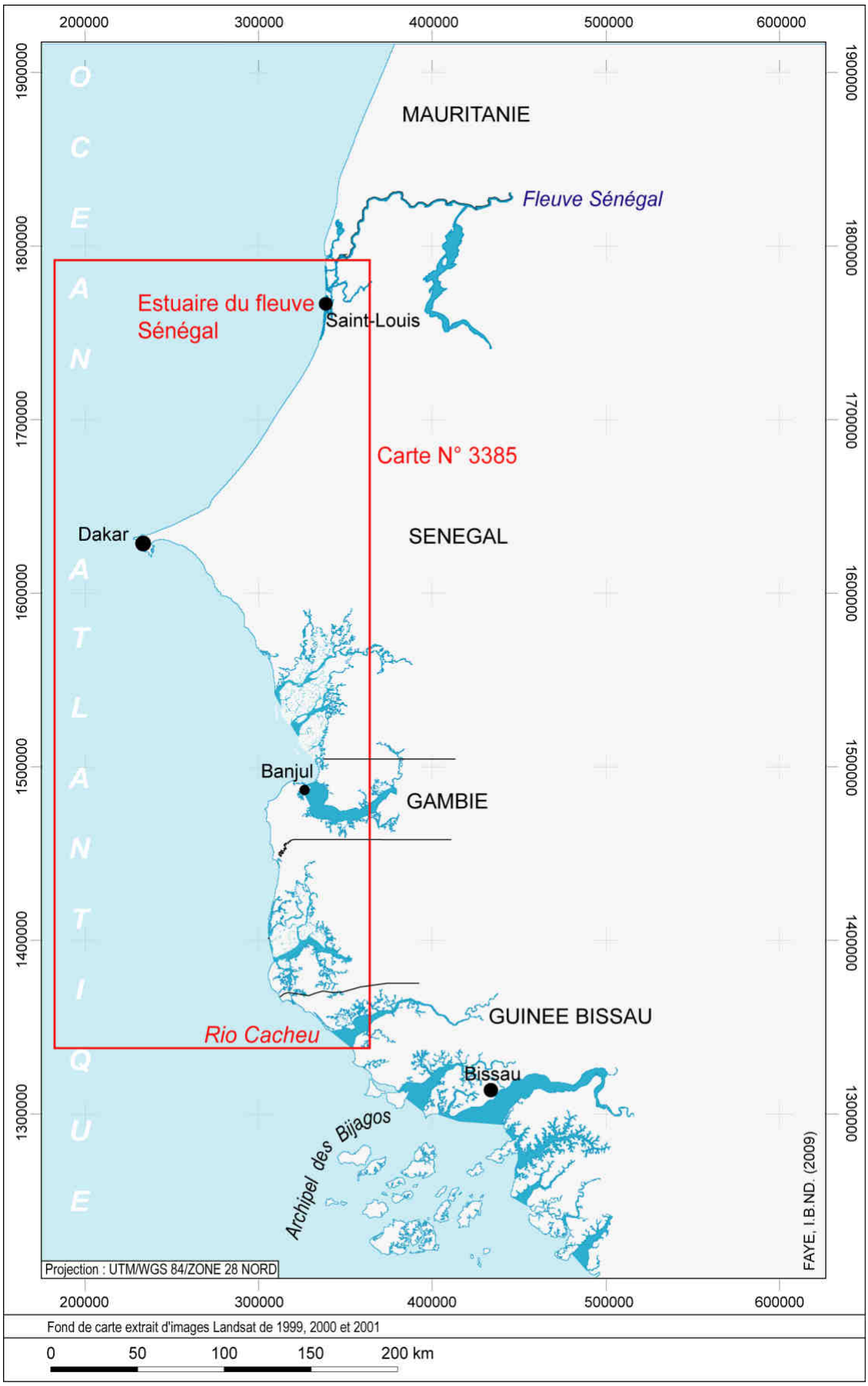
- les modifications observées entre deux traits de côte successifs, après une superposition des cartes de même échelle sur une table lumineuse en vue de ne sélectionner que les documents qui présentent des changements majeurs.

Le **tableau 8** indique les caractéristiques générales des données cartographiques retenues pour apprécier les modifications historiques du rivage à l'échelle régionale du sud de la Mauritanie jusqu'au nord de la Guinée-Bissau (**Figure 22**). Ces cartes ont été éditées en 1874 et 1929 au 1/492 250. Cette échelle exclut toute possibilité d'utiliser ces documents pour mesurer une quelconque évolution côtière au regard des vitesses d'évolution de la plupart des littoraux de notre zone d'étude. Elles pourront au mieux fournir une information qualitative relative aux changements littoraux majeurs et, même dans ce cas, la prudence s'impose dans l'interprétation des résultats. Des recoupements avec d'autres sources de données cartographiques ou bibliographiques sont nécessaires pour la validation des observations.

Tableau 8 : Documents nautiques du SHOM utilisés pour l'analyse qualitative de l'évolution du littoral à l'échelle régionale

Numéro de la carte	Titre de la carte	Année d'édition	Origines des données cartographiées (zone côtière uniquement)	Extension spatiale	Echelle
3385	Côte occidentale d'Afrique du Sénégal au Cap Roxo	1874	Travaux du Capitaine anglais BOTELER en 1829 et les «documents français les plus récents»	12°10' – 16°10' N 15°40' – 18°25' W	Echelle moyenne 1/492 250
		1929	La topographie entre Saint-Louis et l'entrée de la rivière de la Gambie a été corrigée en 1928 d'après les photographies aériennes prises en 1927		

Figure 22 : Emprise spatiale de la carte N°3385



2 – Les images satellitaires Landsat

Elles proviennent des catalogues d'images d'archives issues des capteurs MSS *(Multispectral Scanner)* de Landsat 1, de l'instrument TM *(Thematic Mapper)* de Landsat 4 et 5 et du radiomètre ETM+ *(Enhanced Thematic Mapper Plus)* de Landsat 7 (**Annexe 2**). Trente cinq scènes datant de 1972 à 2001, couvrant la zone du Cap Blanc (Mauritanie) au Rio Cacine (Guinée-Bissau) sont disponibles et téléchargeables gratuitement *via* les sites ftp://ftp.glf.umiacs.umd.edu/Landsat/, www.landsat.org/ortho/index.php ou www.landcover.org/data/landsat/. Les images sont référencées dans la grille d'indexation WRS *(Worldwide Reference System),* WRS 1 pour les données MSS et WRS 2 pour les données TM et ETM+. Dans la fenêtre de téléchargement, les scènes sont cataloguées dans des dossiers correspondant aux traces *(Path)* à l'intérieur desquels se trouvent des répertoires équivalents aux lignes *(Row)*. Il est donc nécessaire de repérer au préalable dans la grille WRS, le *Path* et le *Row* relatifs à la zone recherchée. Le littoral ouest-africain de la Mauritanie à la Guinée-Bissau est couvert par les traces 219 à 221 dans le WRS 1 ou 204 à 206 dans le WRS 2 et les lignes 47 à 52 de ces deux systèmes globaux de catalogage des données Landsat (**Annexe 2-A**). Toutes les scènes accessibles sont orthorectifiées, projetées dans le système de projection UTM/WGS84 et chacune d'entre elles est accompagnée de métadonnées précisant les paramètres d'acquisition, le type de capteur, le type de satellite, la date, etc.. L'extension spatiale des scènes est de 170 X 185 km pour les données MSS, 180 X 182 km pour celles des radiomètres TM et 185 X 183 pour celles de l'ETM+. Ces champs permettent de couvrir l'ensemble de notre zone d'étude avec 6 à 7 images. La résolution spatiale varie avec les capteurs et les longueurs d'ondes (**Annexe 2-B**). Les radiomètres TM et ETM+ opèrent dans sept bandes spectrales : trois dans le spectre visible, une dans le proche infrarouge, deux dans l'infrarouge moyen ou à ondes courtes avec une résolution spatiale de 30 m alors que le canal infrarouge thermique a un pixel de 60 à 120 m respectivement pour les capteurs ETM+ et TM. En plus de ces sept canaux, l'instrument ETM+ comporte une 8e bande panchromatique qui fusionne les données des fenêtres visibles et infrarouges afin d'affiner la résolution spatiale des images et la ramener à 15 m. Quant au capteur MSS, il dispose de quatre bandes spectrales : deux dans le visible et deux autres dans le proche infrarouge avec une résolution spatiale plus faible (79 m). Les images dérivées des données brutes sont livrées cependant sous un format standard avec une résolution spatiale de 57 m pour Landsat MSS ; de 28,5 m pour toutes les bandes spectrales de l'instrument TM ainsi que les canaux visibles, proche et moyen infrarouges de ETM+. Pour la bande panchromatique de ce capteur, la taille du pixel est de 14,25 m et de 57 m pour l'infrarouge thermique.

Par rapport aux taux d'évolution de la plupart des littoraux de notre zone d'étude (cf. **Tableau 4** et **6**), ces résolutions spatiales décamétriques sont un peu trop grossières pour mesurer précisément l'ampleur des changements littoraux. L'utilisation de telles images pour les mesures de cinématique côtière n'est envisageable que pour les littoraux très mobiles comme les flèches ou les abords du port de Nouakchott (cf. **Tableau 3a** et **tableau 5**). Il faut noter par ailleurs que ces images sont de qualité variable avec par exemple la présence de nuages sur l'image TM du 18 juin 1984 (*path* 206/*row* 50) concernant la Presqu'île du Cap Vert. Il en est de même pour l'image ETM+ du 4

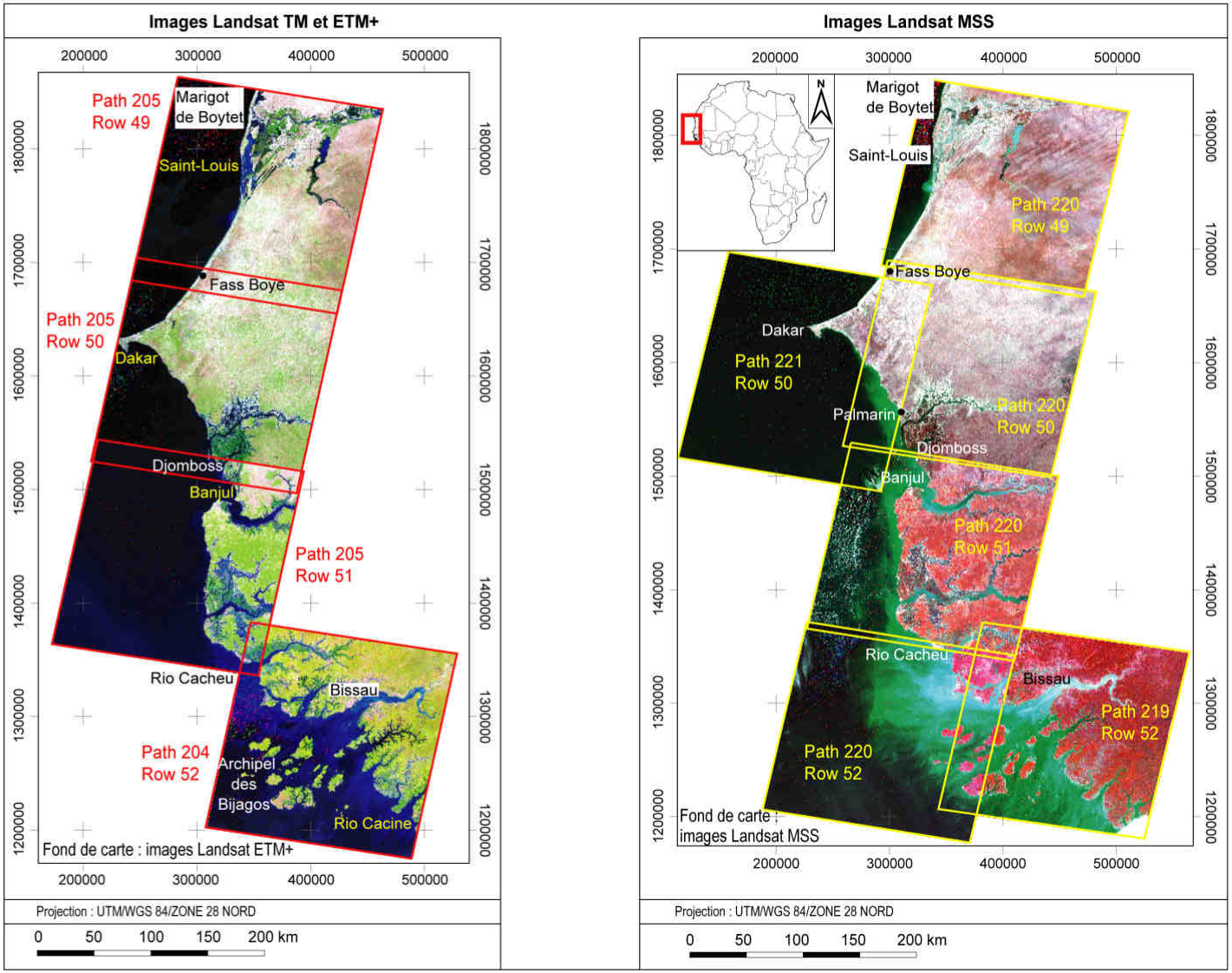
novembre 1999 (*path* 205/*row* 50) qui laisse également apparaître un voile nuageux au-dessus de l'île de Sangomar dans l'estuaire du Saloum. On observe aussi, des rayures parallèles *(stripping)* sur les images Landsat MSS, singulièrement sur les dunes vives du Cap Vert à l'embouchure du fleuve Sénégal couvertes par les scènes du 17 décembre 1978 (*path* 221/*row* 50) et du 30 septembre 1979 (*path* 220/*row* 49).

Après comparaison visuelle des scènes téléchargées, quatorze images montrant d'importantes variations du linéaire côtier particulièrement aux embouchures des cours d'eau ont été retenues pour l'analyse régionale. L'intervalle chronologique de cette série d'images Landsat s'étale entre la fin des années 1970 et le début des années 2000 (**Tableau 9**).

Tableau 9 : Imagerie Landsat utilisée pour l'analyse de l'évolution de la position du trait de côte à l'échelle régionale. La **figure 23** indique l'emprise spatiale des images utilisées

Satellite / Capteur	Segments de côte concerné	Coordonnées de l'extrémité des segments	Date d'acquisition	Référence de la scène dans le système de grilles WRS	
				Path	Row
				WRS1	
Landsat 3 / MSS	Des environs du marigot de Boytet à Fass Boye	16°41' N – 16°24' W 15°13' N – 16°52' W	30/09/1979	220	49
Landsat 3 / MSS	De Fass Boye à Palmarin	15°08' N – 16°56' W 14°01' N – 16°46' W	17/12/1978	221	50
Landsat 3 / MSS	De Ngaparou au Djomboss (Estuaire du Saloum)	14°28' N – 17°04' W 13°42' N – 16°38' W	23/11/1979	220	50
Landsat 3 / MSS	Du Djomboss au Rio Cacheu	13°44' N – 16°37' W 12°11' N – 16°25' W	05/11/1979	220	51
Landsat 3 / MSS	Du Rio Cacheu à l'archipel des Bijagos	12°14' N – 16°31' W 11°01' N – 16°05' W	26/02/1979	220	52
Landsat 3 / MSS	De l'île de Pexice au Rio Cacine	11°54' N – 16°11' W 10°46' N – 14°57' W	08/12/1979	219	52
				WRS 2	
Landsat 5 / TM	Du Chott Boul à Mboro-sur-mer	16°44' N – 16°23' W 15°09' N – 16°55' W	11/01/1987	205	49
Landsat 4 / TM	De Fass Boye au Djomboss (Estuaire du Saloum)	15°17' N – 16°50' W 13°36' N – 16°33' W	10/03/1988	205	50
Landsat 5 / TM	Du Djomboss (Estuaire du Saloum) au Rio Cacheu	13°46' N – 16°36' W 12°05' N – 16°20' W	09/02/1986	205	51
Landsat 4 / TM	Du Rio Cacheu au Rio Cacine	12°12' N – 16°29' W 10°55' N – 15°03' W	30/11/1988	204	52
Landsat 7 / ETM +	Du Chott Boul à Mboro-sur-mer	16°44' N – 16°23' W 15°08' N – 16°56' W	04/11/1999	205	49
Landsat 7 / ETM +	De Fass Boye au Djombos (Estuaire du Saloum)	15°19' N – 16°48' W 13°36' N – 16°33' W	04/11/1999	205	50
Landsat 7 / ETM +	Du Djomboss (Estuaire du Saloum) au Rio Cacheu	13°49' N – 16°45' W 12°05' N – 16°20' W	06/11/2000	205	51
Landsat 7 / ETM +	De l'embouchure du Rio Cacheu au Rio Cacine	12°11' N – 16°28' W 10°49' N – 15°03' W	04/12/2001	204	52

Figure 23 : Emprise spatiale des images satellitaires Landsat utilisées pour l'analyse de l'évolution de la position du trait de côte à l'échelle régionale



II – LE TRAITEMENT DES DONNEES

Les cartes à petites échelles ayant été utilisées dans un but uniquement descriptif, elles n'ont pas fait l'objet d'un traitement particulier. Nous nous focaliseront donc sur le traitement des images satellitaires Landsat suffisamment précises pour autoriser une mesure de la cinématique des flèches et cordons sableux à l'embouchure des systèmes estuariens du Sénégal à la Guinée-Bissau. L'approche méthodologique adoptée s'articule autour des étapes suivantes :

- la sélection d'une ligne de référence adaptée au terrain d'étude ;
- le traitement des images (recalage des images MSS, choix des canaux et étalonnage radiométrique des images et extraction des lignes de référence).

1 – Les indicateurs sélectionnés pour le référencement du trait de côte sur les images satellitaires

Le choix des lignes de référence a été effectué après un examen minutieux de toutes les images fournies par les différents canaux des scènes utilisées pour choisir le marqueur le plus adéquat dans chaque section de côte étudiée.

Au nord de la Presqu'île du Cap Vert, la ligne instantanée de rivage est la seule entité visible dans la mesure où la végétation dunaire naturelle est quasi inexistante et que la résolution spatiale des images ne permet pas de faire une distinction entre cette ligne et celle des pleines mers précédant le passage du satellite. Au sud de la Presqu'île du Cap Vert, en plus de la ligne instantanée de rivage, la limite supérieure de la plage peut-être plus ou moins distinguée sur tout le littoral jusqu'au Rio Cacheu et ponctuellement sur les segments de côte sableux au sud de ce secteur.

Ainsi, la ligne instantanée de rivage (**Photo 5**) a été retenue pour mettre à jour les données d'évolution relatives à la Langue de Barbarie de 1979 à 1999. Notons au passage que les mesures effectuées sont des valeurs approchées. En effet, pour quantifier rigoureusement l'évolution de la flèche, il aurait fallu disposer de l'heure exacte d'acquisition des images, de la marée correspondante, de la pente de la plage et même du rivage fluvial si l'on veut établir des bilans surfaciques[28]. Or l'heure d'enregistrement n'est pas disponible pour l'image ETM+ du 4 novembre 1999 et nous ne disposons d'informations que sur la pente du rivage maritime et les hauteurs de marée prédites par le SHOM pour le port de Saint-Louis aux dates d'acquisition des images. A partir de ces éléments, seule une marge d'erreur sur laquelle nous reviendrons ultérieurement a pu être définie.

Pour le suivi des modifications intervenues aux débouchés des cours d'eau ou des systèmes estuariens (Joal, Saloum, Gambie, Saniang Point, Allahein river, Casamance, Cap Roxo, Bijagos, Rio Tombali, Rio Cumbija), la limite supérieure de la plage matérialisée sur le front de mer par les contours du tapis végétal (**Photo 6**) a été choisie comme repère.

[28] La connaissance de la pente du rivage fluvial est d'autant plus nécessaire pour les bilans surfaciques que l'image du 4 novembre 1999 a été acquise lors de périodes de crues qui ont inondé toute la zone estuarienne alors que les images de 1987 et de 1979 coïncident avec la décrue.

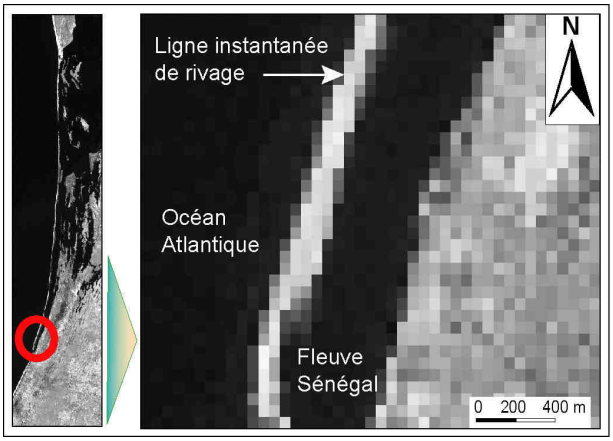


Photo 5 : Ligne instantanée de rivage sur la Langue de Barbarie à l'embouchure du fleuve Sénégal (Extrait d'une image Landsat 7 ETM+ du 04-11-1999, canal 7)

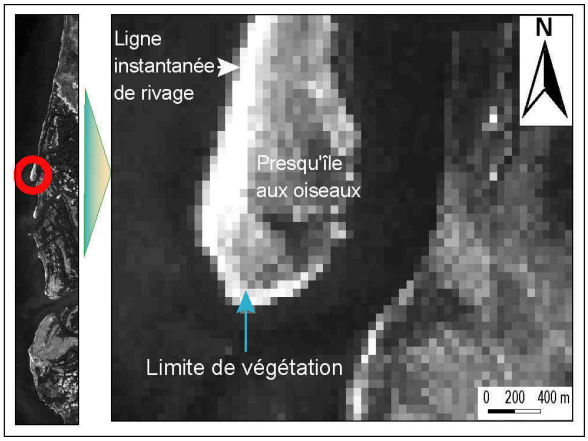


Photo 6 : Limite de végétation sur la Presqu'île aux Oiseaux dans l'estuaire de la Casamance (Extrait d'une image Landsat 5 TM du 09-02-1986, canal 3)

2 – Le traitement des images satellitaires Landsat

Les traitements numériques réalisés sur les images satellitaires pour extraire les lignes de référence et les autres couches thématiques relatives à l'occupation des sols ont été effectués avec le logiciel *ENVI 4.2*® qui dispose de plusieurs modules dédiés à la correction géométrique des images satellitaires, à la calibration des données Landsat et à l'extraction semi-automatique des objets.
L'extraction semi-automatique de la ligne instantanée de rivage et de la limite de végétation sur les images Landsat s'est déroulée en trois phases :

- prétraitement : vérification de la qualité du géoréférencement et recalage des données si nécessaire, étalonnage radiométrique, rehaussement de contraste ;
- traitement des images : application d'un algorithme pour extraire les indicateurs de la ligne instantanée de rivage et de la limite de végétation ;
- post-traitement : suppression des lignes «parasites», vérification et correction si nécessaire des lignes extraites.

2.1 – Le recalage des images MSS

Avant d'entreprendre l'extraction des lignes de référence, nous avons évalué la qualité géométrique des images acquises à différentes dates sur un site en superposant des éléments linéaires comme les routes ou les méandres des cours d'eau par exemple. Une bonne conformité a été notée entre les données TM et ETM+. En revanche, localement, des décalages de plus de 200 m ont été enregistrés entre ces images et celles du capteur MSS (**Photo 7**). Deux images sont concernées parmi la série utilisée. Il s'agit de l'image du 5 novembre 1979 couvrant le littoral du Djomboss au Rio Cacheu (p220/r51) et de l'image concernant la zone du sud du Rio Cacheu au Rio Cacine enregistrée le 28 décembre 1979 (p219/r52). Elles ont donc été recalées sur les images TM et

ETM+ avec une quarantaine de points de calage chacune et une transformation polynomiale de premier degré qui nous a permis d'obtenir finalement une bonne superposition des données.
Par ailleurs, nous avons profité de cette opération pour harmoniser la taille des pixels en les ramenant à celle des images Landsat MSS, c'est-à-dire 57 m.

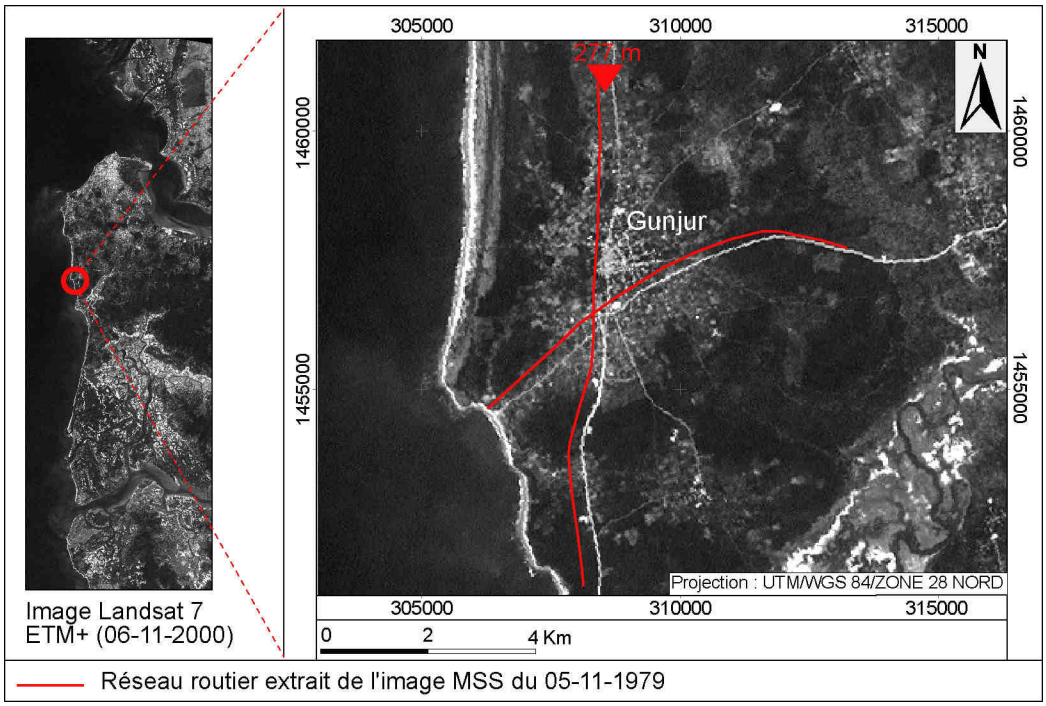


Photo 7 : Illustration du décalage entre les images Landsat MSS et ETM+ sur le littoral gambien

2.2 – Le choix des canaux et l'étalonnage radiométrique des données Landsat

Les capteurs Landsat TM et ETM+ fournissent plusieurs types d'images allant du visible à l'infrarouge, d'intérêt variable selon les objets et les informations à extraire d'où l'importance du choix du canal le plus adéquat pour extraire l'indicateur utilisé comme marqueur du trait de côte (ROBIN, 2002). De manière classique, la détection de la ligne instantanée de rivage s'effectue soit dans le proche infrarouge (BLODGET *et al.*, 1991 ; ROBIN, 1995 ; VERGER, 1996 ; THOMAS et DIAW, 1997 ; CODJIA et DOMINGO, 1998 ; THOMAS *et al.,* 1998 ; EL-RAEY *et al.*, 1999 ; ZHU, 2001 ; ROBIN, 2002 ; …), soit dans l'infrarouge moyen (WHITE et EL ASMAR, 1999 ; RYU *et al.*, 2002 ; FRAZIER et PAGE, 2000 ; BAGLI et SOILE, 2004 ; LIU et JEZEK, 2004a ; YAMANO *et al.,* 2006) du fait de la faible réflectance de l'eau dans le domaine infrarouge du spectre électromagnétique. La bande 7 (proche infrarouge) de Landsat MSS a donc été utilisée sur la Langue de Barbarie. Cependant pour le radiomètre TM, WHITE et EL ASMAR (1999) ont noté que les brisants caractérisés par une forte réflectance gênent considérablement l'exploitation de la bande proche infrarouge (canal 4) contrairement aux canaux 5 et 7 (moyen infrarouge) qui estompent la visibilité des brisants. Ce phénomène est également bien visible sur les images de l'ETM+ (**Photo 8**). En conséquence dans

cette configuration, ces auteurs ont estimé que le canal 7 était le plus adéquat pour extraire le niveau instantané de marée. Sur cette base, l'extraction de la ligne instantanée de rivage a été effectuée sur les bandes 7 des images TM et ETM+ de la Langue de Barbarie.

Pour la limite de végétation, c'est le canal rouge qui fait ressortir le mieux le contact entre les sédiments secs de la haute plage et la couverture végétale (ROBIN, 2002). Les bandes 3 du capteur TM et de l'ETM+ et 5 du MSS ont donc été utilisées pour discriminer l'interface haute plage/végétation.

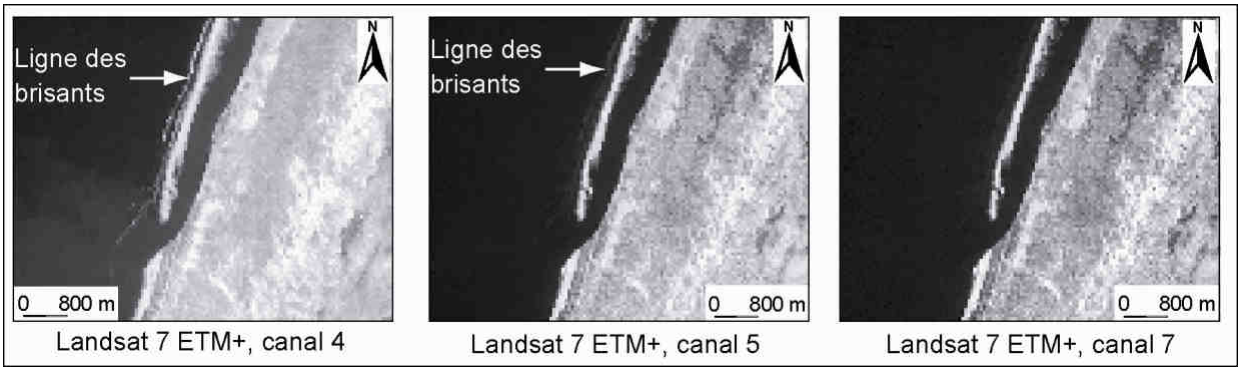


Photo 8 : Visibilité de la ligne des brisants dans les canaux proche et moyen infrarouges de Landsat 7 ETM+ (Extrait d'une image prise le 04-11-1999 à l'embouchure du fleuve Sénégal). La ligne des brisants est très nette dans le canal 4, très estompée dans le canal 5 et invisible dans le canal 7.

Les images étant prises avec des capteurs et selon des angles d'élévation solaires différents, il est nécessaire de compenser ces différences (FRIHY *et al.*, 1994 ; EL RAEY *et al.,* 1995 ; FRIHY *et al.*, 1998 ; ROBINOVE, 1982 et TEILLET, 1986 *in* EL RAEY *et al.,* 1999 ; WHITE et EL ASMAR, 1999). Pour ce faire, toutes les images sélectionnées ont été transformées en images de réflectance exo-atmosphérique (calibration ou étalonnage radiométrique) grâce aux données fournies par les métadonnées ou les fichiers d'entête des images. Le type de capteur, la date et l'angle d'élévation solaire au moment de la prise de vue sont requis en entrée par l'utilitaire du logiciel ENVI dédié à la calibration des données Landsat. En plus de ces paramètres, les radiances maximale et minimale (*Lmax* et *Lmin*) pour chaque canal du TM et de l'ETM+ sont indispensables. L'étalonnage radiométrique des images constitue la première étape de la correction des effets atmosphériques (absorption par les molécules d'eau, diffusion par les aérosols du rayonnement des objets) qui perturbent le signal émis par les objets et enregistré par le capteur. Ces effets sont largement abordés dans les manuels de télédétection (BONN et ROCHON, 1992 ; ROBIN, 1995 ; CALLOZ et COLLET, 2001 ; GIRARD et GIRARD, 2003) ou dans des articles de synthèse (KERGOMARD, 2000 ; SONG *et al.*, 2001). Le logiciel ENVI dispose d'un module appelé FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) permettant de corriger en partie ces effets pour isoler la réflectance des objets de celle de l'atmosphère. Il réclame les coordonnées géographiques (latitude, longitude) du centre de la scène, le type de capteur, son altitude, la taille du pixel de l'image, la date, l'heure d'enregistrement, le choix d'un modèle atmosphérique et d'aérosols, les angles azimutal et zénithal entre autres. Les tests menés avec les images MSS, TM et ETM+ ne montrent aucune amélioration

entre les résultats provenant des données étalonnées sans corrections atmosphériques et celles ayant subi des corrections atmosphériques. Les effets de l'atmosphère semblent donc négligeables sur les images utilisées.

2.3 – L'extraction des lignes de référence sur l'imagerie satellitaire Landsat

Les lignes de référence ont été extraites des données Landsat par deux méthodes interactives éprouvées dans les études de cinématique littorale par télédétection satellitaire. Il s'agit de :

- l'équidensitométrie pour la ligne de rivage instantanée ;
- la classification non supervisée pour extraire la limite inférieure de végétation.

- Extraction de la ligne instantanée de rivage par équidensitométrie (**Figure 24 et Figure 25, volume 2**)

L'algorithme d'équidensitométrie permet de segmenter une image en plusieurs classes à partir de valeurs seuils délimitant les contours des objets. Dans le cas étudié, il s'agit de distinguer le sable vif de la flèche de la Langue de Barbarie caractérisé par une réflectance très élevée des eaux océaniques, fluviales et autres zones humides présentant une réflectance plus faible (**Figure 24**). Pour identifier les valeurs des bornes radiométriques déterminant ces deux entités, nous avons procédé de la manière suivante :

1 - toutes les valeurs radiométriques des pixels situés dans la zone de contact entre l'océan, le sable vif de la flèche et le fleuve ont été examinées environ tous les 100 m pour identifier la gamme de réflectance correspondant à la ligne instantanée de rivage (**Figure 24, Tableau 10**) ;

2 - la valeur maximale de cette série a été utilisée comme valeur de partition pour individualiser la flèche ou les zones terrestres d'une manière générale (sable sec) et les plans d'eau (océan, fleuve) (**Tableau 10**) ;

3 - une couleur est affectée automatiquement à chaque objet sur l'image en niveau de gris (**Figure 24**).

Figure 24 : Profils radiométriques extraits des images Landsat de la Langue de Barbarie

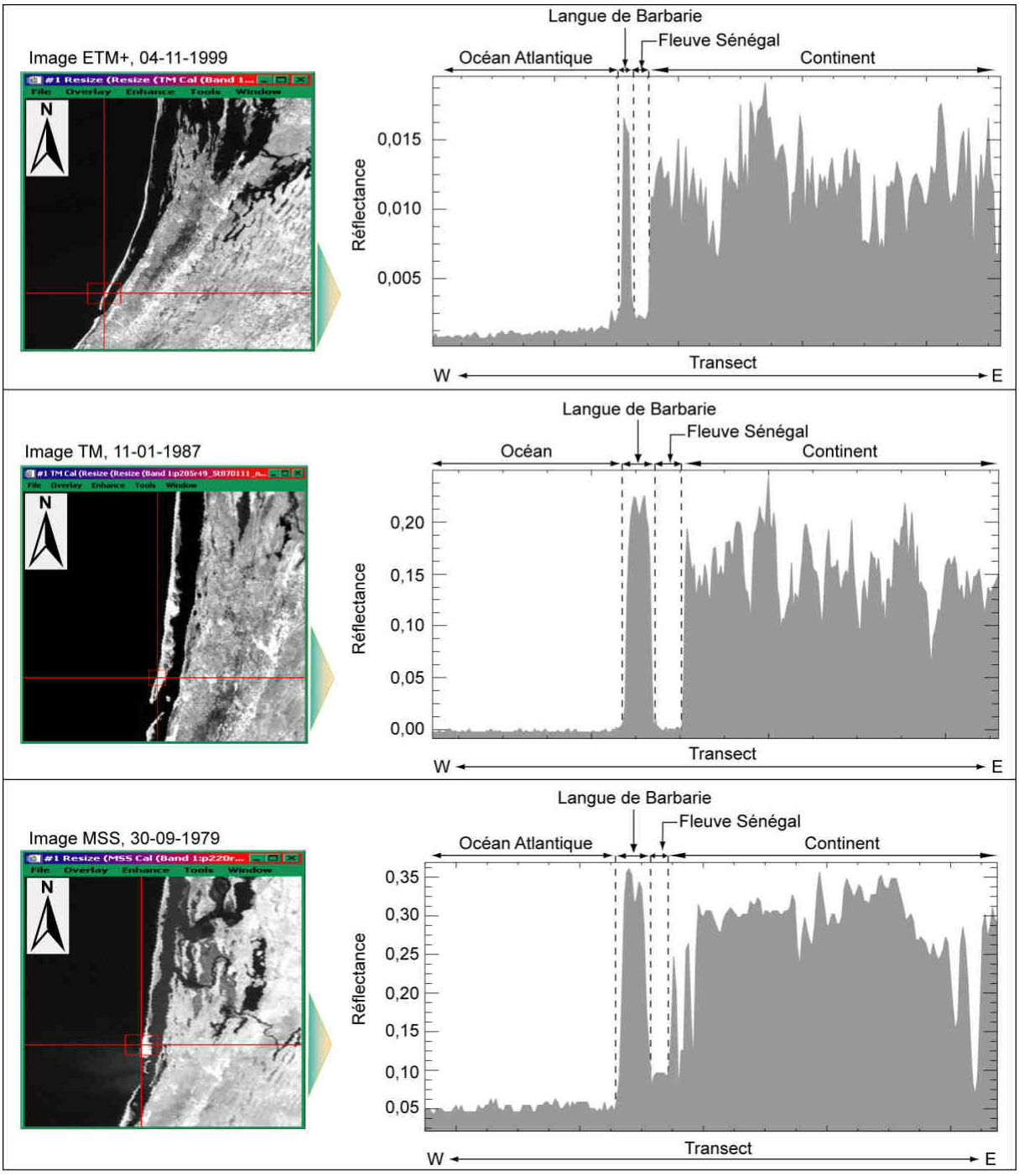


Tableau 10 : Gammes de réflectance et seuils utilisés pour isoler la ligne instantanée de rivage sur les images Landsat de la Langue de Barbarie

Tableau 10a – Image MSS du 30 septembre 1979, canal 7, proche infrarouge

Objets	Réflectance	
	Minimum	Maximum
Image	0,012557	0,411248
Ligne instantanée de rivage	0,079705	0,159443
Seuil utilisé	0,159443	
Eau	0,012557	0,159443
Terre	0,159444	0,411248

Tableau 10b – Image TM du 11 janvier 1987, canal 7, moyen infrarouge

Objets	Réflectance	
	Minimum	Maximum
Image	-0,002233	0,376886
Ligne instantanée de rivage	0,026238	0,168595
Seuil utilisé	0,168595	
Eau	-0,002233	0,168595
Terre	0,168597	0,376886

Tableau 10c – Image ETM+ du 4 novembre 1999

Objets	Réflectance	
	Minimum	Maximum
Image	-0,000611	0,021558
Ligne instantanée de rivage	0,004451	0,011782
Seuil utilisé	0,011782	
Eau	-0,000611	0,011782
Terre	0,011783	0,021558

- Extraction des contours de la plage et de la limite de végétation par classification automatique (**Figure 26, volume 2**)

Pour mettre en relief les discontinuités radiométriques de l'image et faciliter l'extraction des contours des objets, les images ont été filtrées avec un filtre de convolution passe-haut[29] avant de procéder à la classification. L'algorithme ISODATA utilisé requiert en entrée le nombre maximal et minimal de classes ainsi que le nombre d'itérations souhaitées. Nous avons défini un nombre de classes compris entre 10 et 20 et fixé le nombre d'itérations à 20. Ce nombre élevé de classes a été choisi pour nous permettre, après l'extraction des lignes de référence, d'utiliser les autres couches pour cartographier les paysages littoraux des secteurs étudiés.
Après la classification, les résultats sont interprétés en fonction de la connaissance du terrain. Les classes sont fusionnées et recodées en deux classes : plage et autre.

Les résultats issus de ces traitements ont été vectorisés et intégrés sous forme de couche thématique dans une base d'information géographique. Les polygones et les lignes «parasites» ont été supprimés pour ne conserver uniquement que l'information utile, c'est-à-dire les contours du sable

[29] L'aide du logiciel conseille l'utilisation des filtres de convolution passe-haut pour rehausser les zones de contact, les frontières entre les objets. Le noyau (*kernel*) ou la taille de la matrice du filtre utilisé est de 3X3 pixels.

vif de la flèche (Langue de Barbarie) ou la limite supérieure de la plage (la limite de végétation). Pour valider les résultats, les lignes extraites et les images de référence ont été superposées (**Figure 25** et **26, volume 2**).

L'algorithme ISODATA a été utilisé aussi pour la cartographie de la morphologie du trait de côte à l'échelle régionale du Cap Blanc (Mauritanie) au Rio Cacine (Mauritanie). A cet effet, les images Landsat ETM+ à 28,5 m de résolution spatiale ont été utilisées. L'extraction du trait de côte et des couches thématiques a été effectué suivant le même principe que celui décrit précédemment (filtrage des images, classification, interprétation des classes, vectorisation, mise au net et validation des résultats). Les couches linéaires (nature du trait de côte) et polygonales (typologie des paysages littoraux) ont été caractérisés en utilisant les informations extraites de la documentation et des observations de terrain. Un attribut est ainsi affecté à chaque objet : sebkha, vasière à mangrove, dune continentale, cordon littoral, flèche, cours d'eau, … pour les paysages littoraux et pour le trait de côte (l'indicateur utilisé et la longueur du segment côtier).

III – LES LIMITES METHODOLOGIQUES : SOURCES D'INCERTITUDE AFFECTANT LES LIGNES DE REFERENCE ISSUES DES IMAGES SATELLITAIRES ET DES CARTES A PETITE ECHELLE

L'extraction semi-automatique de la ligne instantanée de rivage et de la limite de végétation fournit des résultats satisfaisants mais les limites de végétation détectées par l'ISODATA sont discontinues en raison de l'absence localement de contraste entre la couverture végétale et la haute plage. Il a donc fallu joindre manuellement les lignes extraites dans certaines zones. Aussi, la qualité des résultats dépend de la connaissance du terrain par l'opérateur pour interpréter et regrouper les classes d'objets extraites par l'algorithme. Il en est de même s'agissant de la détermination des plages de valeurs radiométriques correspondant à la ligne instantanée de rivage. Les principaux facteurs d'imprécision estimables sont ceux induits par la taille du pixel et le recalage de certaines images MSS. En plus de ces incertitudes, les inégalités des niveaux de marée lors de l'acquisition génèrent une erreur supplémentaire sur la position de la ligne instantanée de rivage utilisée comme référence sur la Langue de Barbarie.
Concernant les cartes à petite échelle, quelques incohérences ont été relevées sur l'édition de 1877 de la carte N°3385 au sud de Dakar.

1 – L'imprécision due à la résolution spatiale des capteurs et au recalage des images MSS

La résolution spatiale des images Landsat est de 30 m pour le capteur TM et ETM+ et de 79 m pour le MSS. Néanmoins, la taille du pixel de toutes les images utilisées a été ramenée à 57 m (taille standard du pixel des images MSS téléchargées du site du *Global Landcover Facility*). Nous ainsi avons fixé l'incertitude à 57 m sur les images TM et ETM+ et à 79 m (résolution initiale des images) sur les images MSS non recalées. Sur les images MSS recalées (p220/r51 et p219/r52), bien

que l'erreur RMS[30] varie entre 0,3 et 0,4 pixel pour les deux scènes concernées, l'incertitude résultant du recalage a été fixée à la taille du pixel comme le conseillent WHITE et EL ASMAR (1999). L'erreur est donc de 136 m pour l'image du 5 novembre 1979 relative à la zone allant du Djomboss au Rio Cacheu (p220/r51) et celle du 8 décembre 1979 (p219/r52) couvrant le segment côtier de l'île de Pexice au Rio Cacheu.

2 – Les erreurs liées aux variations des niveaux instantanés de marée sur les images Landsat concernant la Langue de Barbarie

Comme nous l'avons souligné dans le premier chapitre de la première partie, le niveau instantané de marée ne peut-être utilisé avec fiabilité que s'il est corrigé des effets de la marée et d'autres paramètres comme les effets météo-marins. RUGGIERO *et al.* (2003) et MOORE *et al.* (2006), ont proposé une méthode permettant de calculer les écarts horizontaux entre des lignes instantanées de rivage à partir de la pente de la plage et des niveaux d'eau en intégrant le *set-up*, la hauteur significative des vagues, leur période, les surcotes et décotes. Comme nous ne disposons pas de mesures portant sur l'ensemble de ces paramètres, nous avons choisi une formule plus simple utilisée par THOMAS et DIAW (1997) ainsi que THOMAS *et al. (*1998) sur la pointe de Sangomar au Saloum (Sénégal). Elle permet d'estimer l'écart horizontal entre deux lignes instantanées de rivage (Δd) acquises par des hauteurs d'eau différentes uniquement en fonction de la pente (θ) et du niveau de la marée prédite (h) : $\Delta d = h/\tan(\theta)$. Cette formule moins précise que celle de RUGGIERO *et al.* (2003) ou de MOORE *et al.* (2006), rend néanmoins possible une estimation des écarts potentiels entre des lignes instantanées de rivage pour approcher l'évolution de la flèche depuis 1979.

Les niveaux de marée utilisés sont les niveaux prédits par le SHOM pour le port de Saint-Louis. Ainsi, l'image Landsat MSS du 30 septembre 1979 a été enregistrée à 10 h 40 min coïncidant avec un niveau de marée de 0,80 m et celle de Landsat TM du 11 janvier 1987 à 10 h 46 min avec une hauteur d'eau de 0,95 m.

Pour estimer la valeur des pentes, en l'absence d'informations sur le profil de plage à l'heure exacte de passage des satellites, nous nous sommes référés aux valeurs de pente indiquées par la littérature. Dans le segment qui nous intéresse, BARUSSEAU *et al.* (1993 ; 1998) estiment les pentes moyennes de l'estran à 0,95 % (0,54°) au minimum et à 1,94 % (1,11°) au maximum sur la base d'un suivi de 13 profils de plage réalisés d'octobre 1989 à novembre 1991.

Si on applique la formule mentionnée précédemment, pour une différence de niveau de marée de 0,15 m entre l'acquisition des données MSS et TM, l'écart entre les lignes instantanées de rivage est de 15,91 m pour une pente de 0,54° et 7,74 m pour u ne pente de 1,11°, soit en moyenne 11,82 m. Si on suppose que Landsat ETM+, satellite héliosynchrone, passe à peu près au-dessus de la zone, le matin comme ses prédécesseurs, la hauteur de marée le 04 novembre 1999 entre 10 h 40 min et 10 h 50 min est de 0,99 m soit un écart de 4 cm par rapport à la situation de 1987. Il en résulterait un décalage de 4,24 m sur un estran présentant une pente de 0,54° et de 2,06 m sur une pente de 1,11°, donc une distance moyenne de 3,15 m.

[30] *Root Mean Square*

Tableau 11 : Estimation de la marge d'erreur pour l'analyse de l'évolution de la pointe de la Langue de Barbarie à partir des images Landsat

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude	Estimation de l'erreur(m)
1979 – 1987	Ligne instantanée de rivage	Taille du pixel MSS, TM	±136
		Variations de la position de la ligne instantanée de rivage générées par les différences de hauteur d'eau	±11,82
		Total (Marge d'erreur)	**±147,82**
1987 – 1999	Ligne instantanée de rivage	Taille des pixels TM et ETM+	±114
		Variations de la position de la ligne instantanée de rivage générées par les différences de hauteur d'eau	±3,15
		Total (Marge d'erreur)	**±117,15**
1979 – 1999	Ligne instantanée de rivage	Taille du pixel MSS, TM et MSS	±193
		Variations de la position de la ligne instantanée de rivage générées par les différences de hauteur d'eau	±14,97
		Total général (Marge d'erreur globale)	**±207,97**

Tableau 12 : Estimation de la marge d'erreur pour l'étude de l'évolution des flèches et des modifications à l'embouchure des systèmes estuariens de Joal (Sénégal) au Rio Cacine (Guinée-Bissau) à partir des images Landsat

Tableau 12a : Pointe de la flèche et îles sableuses au large de Joal

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude	Estimation de l'erreur(m)
1978 – 1988	Limite de végétation	Taille du pixel MSS, TM	±136
1988 – 1999		Taille des pixels TM et ETM+	±114
1978 – 1999		Taille du pixel MSS, TM et MSS	**±193**

Tableau 12b : Flèches et systèmes estuariens du Saloum au Rio Cacheu

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude	Estimation de l'erreur (m)
1979 – 1986	Limite de végétation	Taille du pixel MSS et recalage de l'image p220/r51	±136
		Taille du pixel TM	±57
		Total (Marge d'erreur)	**±193**
1986 – 2000		Taille des pixels TM et ETM+	±114
1979 – 2000		Taille des pixels TM et ETM+	±114
		Taille du pixel MSS et recalage de l'image p220/r51	±136
		Total général (Marge d'erreur globale)	**±250**

Tableau 12c : Flèches et systèmes estuariens du sud du Rio Cacheu au Rio Cacine

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude	Estimation de l'erreur (m)
1979 – 1988	Limite de végétation	Taille du pixel MSS et recalage de l'image p219/r52	±136
		Taille du pixel TM	±57
		Total (Marge d'erreur)	**±193**
1988 – 2001		Taille des pixels TM et ETM+	±114
1979 – 2001		Taille du pixel MSS et recalage de l'image	±136
		Taille des pixels TM et ETM+	±114
		Total général (Marge d'erreur globale)	**±250**

Au vu de l'importance de la marge d'erreur, nous nous sommes intéressés essentiellement aux secteurs qui présentaient des évolutions largement supérieures à la marge d'incertitude. Les mesures linéaires effectuées tous les 10 m perpendiculairement aux lignes de référence ont été complétées par des bilans de surface. A cet effet, les lignes de référence multi-dates comparées sont intersectées à un même niveau, fusionnées et les surfaces résultantes calculées automatiquement. Lorsque les évolutions mesurées étaient inférieures de la marge d'erreur, on indique uniquement la tendance évolutive éventuelle (progradation ou érosion) par une flèche.

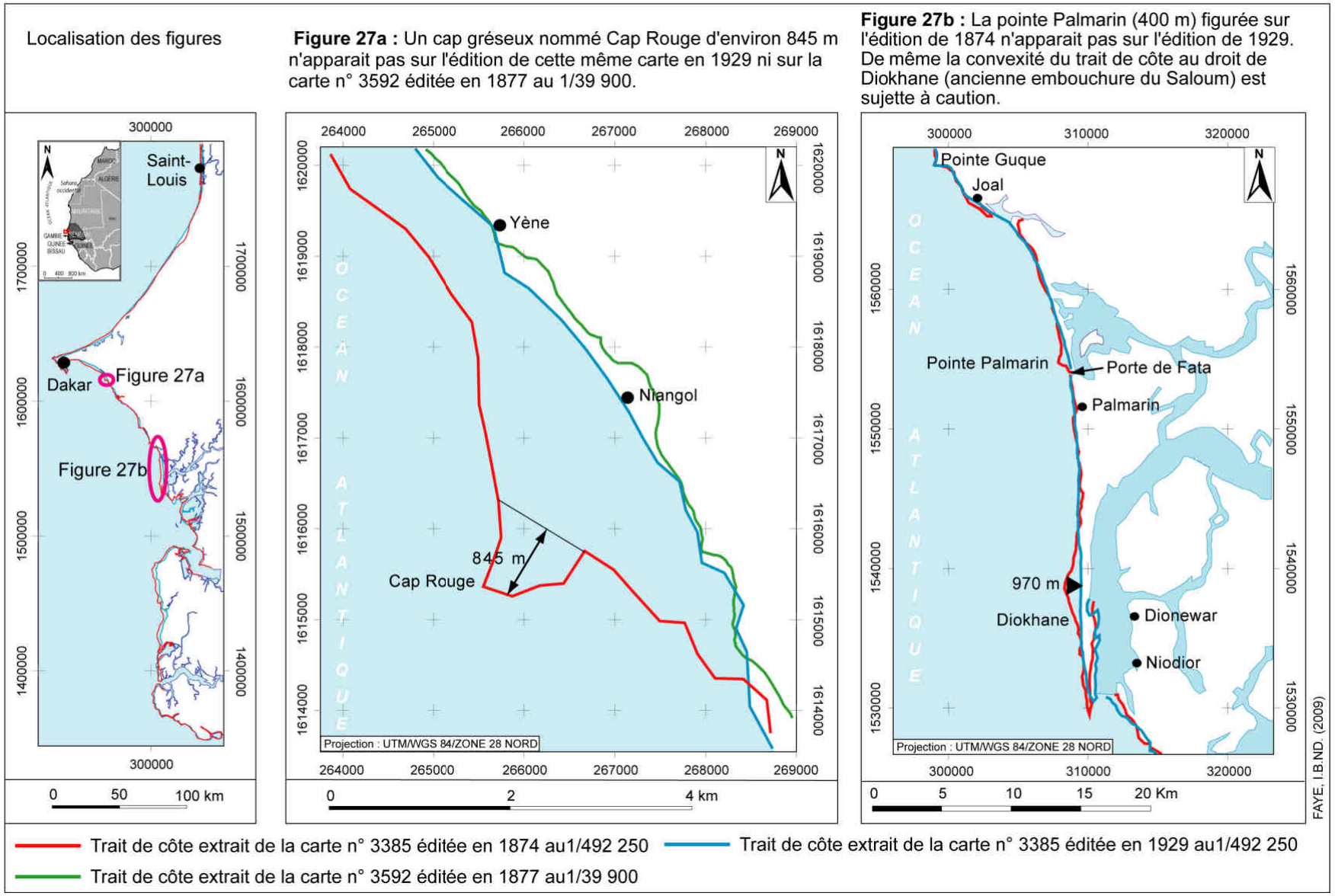
3 – Les incertitudes liées à la précision des documents cartographiques utilisés

Des erreurs de représentation et de positionnement des objets cartographiés ont été mises en évidence grâce aux indications portées en marge des cartes, aux informations bibliographiques et à la comparaison des documents cartographiques. Ainsi, sur la carte N° 3385 éditée en 1874 avec des données de terrain provenant essentiellement de levés anglais de 1829, le Cap Rouge figuré de façon très prononcée entre Yène et Toubab Dialao, a complètement disparu sur l'édition de 1929[31] (**Figure 27a**).

Il nous paraît peu vraisemblable que ce cap de plus de 800 m de long constitué de falaises de grès maestrichtiens, ait pu s'éroder entre ces deux dates. De plus, ce promontoire devrait apparaître sur les cartes à grande échelle de la Baie de Gorée éditées au 19e siècle. Or la configuration du rivage dans le secteur en question ne montre aucun promontoire, ni sur la carte N° 3579, ni sur la carte N° 3592, toutes deux levées par le lieutenant de vaisseau BESSON en 1875-1876 et publiées en 1877 (**Figure 27a**). Au contraire, on y observe plutôt une grande échancrure du littoral. L'existence même de cette anfractuosité dans une zone rocheuse sur une longueur de plus d'un kilomètre et une profondeur de 200 à plus de 300 m nous laisse tout aussi perplexe car on constate qu'elle a été entièrement comblée sur l'édition de 1929 et le village de Niangol figure à son emplacement (**Figure 27a**). On peut aussi se poser des questions sur la réalité de la proéminence, le renflement de la pointe de Sangomar tout comme l'existence réelle de la pointe de Palmarin figurée sur l'édition de 1874 de la carte N° 3385 à l'emplacement de la porte de Fata (embouchure d'un cours d'eau) sur l'édition de 1929 de la même carte (**Figure 27b**).

[31] L'édition de 1929 de la carte N°3385 a été mise à jour à partir de photographies aériennes de 1927 mais elle renferme, par ailleurs, des erreurs de positionnement signalées par un avertissement. D'après cet avertissement, l'erreur concerne les longitudes de la carte. Elle est de 10'' par rapport au méridien de Paris et de 29'' par rapport au méridien de Greenwich.

Figure 27 : Modification du tracé du trait de côte probablement du fait d'une erreur de cartographie sur la carte N° 3385 publiée en 1874 au 1/492 250



Conclusion du Chapitre I

Le recensement des données concernant les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau a révélé une vingtaine de documents cartographiques disponibles aux archives de l'EPSHOM de Brest. Ces documents sont parfois très anciens mais de qualité inégale pour retracer l'évolution du littoral à l'échelle régionale. Ainsi pour les cartes marines, en dépit de l'ancienneté des données cartographiques (1852), l'hétérogénéité des échelles ne facilite pas l'analyse comparative entre deux documents. Toutefois, les deux éditions de la carte N°3385 (Côte ouest d'Afrique du Sénégal au Cap Roxo, éditions de 1874 et 1929) montrent des variations dans la configuration du tracé du trait de côte qu'il nous semble intéressant d'examiner. Les informations fournies par ces documents seront complétées par celles issues de l'analyse des images Landsat acquises à la fin des années 1970 (1978-1979), au milieu des années 1980 (1986-1987) et dans les années 2000 (1999-2001). Toutes ces données ont été traitées pour cartographier la morphologie du trait de côte à l'échelle régionale et analyser les modifications ayant affecté les systèmes estuariens de l'embouchure du fleuve Sénégal au Rio Cacine en Guinée-Bissau.

A cet effet, deux indicateurs ont été retenus selon leur pertinence par rapport aux secteurs d'étude. Ainsi, le niveau instantané de marée, seule ligne visible sur la Langue de Barbarie, a servi de référence pour approcher approximativement son évolution de 1979 à 1999. L'évolution des flèches et les modifications ayant affecté les embouchures des cours d'eau et autres systèmes estuariens allant de Joal (Sénégal) jusqu'au Rio Cacine (Guinée-Bissau) ont été suivies en utilisant la limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation comme entité de référence.

L'extraction de ces deux lignes de référence a été effectuée selon une méthode semi-automatique : l'équidensitométrie pour extraire le niveau instantané des marées, alors que la limite de végétation a été isolée par classification automatique avec l'algorithme ISODATA.

Cependant, avant d'entreprendre l'analyse de l'évolution côtière, les sources d'incertitude affectant la précision des lignes de référence extraites des images satellitaires et des cartes marines ont été analysées.

Sur les cartes marines, des erreurs de cartographie s'expriment par une représentation erronée du tracé du linéaire côtier entre Dakar et Mbour et entre Joal et l'estuaire du Saloum.

Pour les images satellitaires, deux sources d'incertitude ont été relevées :

- la résolution spatiale, 57 m pour chaque image TM et ETM+ et 79 m (résolution spatiale du capteur) pour les données MSS et 136 m en tenant compte du recalage des deux images MSS concernant le littoral du Saloum au Rio Cacheu ;
- les incertitudes induites par les différences de niveaux de marée au moment de l'acquisition des images sur la Langue de Barbarie. Pour estimer rigoureusement ces erreurs, il aurait fallu connaître la hauteur de la marée et la pente de la plage au moment de l'enregistrement des données satellitaires. Ces informations n'étant pas disponibles, nous avons utilisé les hauteurs de marée prédites par le SHOM au port de Saint-Louis et les résultats des travaux antérieurs pour connaître la valeur de la pente de la plage. Ainsi, l'ordre de grandeur des erreurs liées aux inégalités des niveaux de marée entre les lignes

instantanées de rivage a été estimé à 11,82 m en moyenne pour la période 1979 – 1987 et à 3,15 m pour la période 1987 – 1999. Compte tenu de la taille des pixels, il en résulte une incertitude globale de 207 m sur la Langue de Barbarie dans l'intervalle chronologique 1979 – 1999.

Pour les autres flèches et îles sableuses où la limite de végétation a été utilisée comme référence, la somme de toutes les erreurs liées à la résolution spatiale génère une erreur totale de 193 m pour le secteur de Joal de 1979 à 1999. En intégrant le recalage des images MSS, la marge d'erreur globale atteint 250 m pour les flèches et îles sableuses situées aux débouchés des systèmes estuariens du Saloum au Rio Cacheu de 1979 à 2000 ainsi que ceux du Rio Cacheu au Rio Cacine dans la période 1979 à 2001.

Ces marges d'erreurs très importantes sont néanmoins compatibles avec la cinématique des flèches sableuses qui enregistrent des taux d'évolution de plusieurs dizaines de mètres par an (**Tableau 5**).

CHAPITRE II : LES ASPECTS MORPHOLOGIQUES DU TRAIT DE CÔTE EN AFRIQUE DE L'OUEST : DU CAP BLANC (MAURITANIE) AU RIO CACINE (GUINEE-BISSAU)

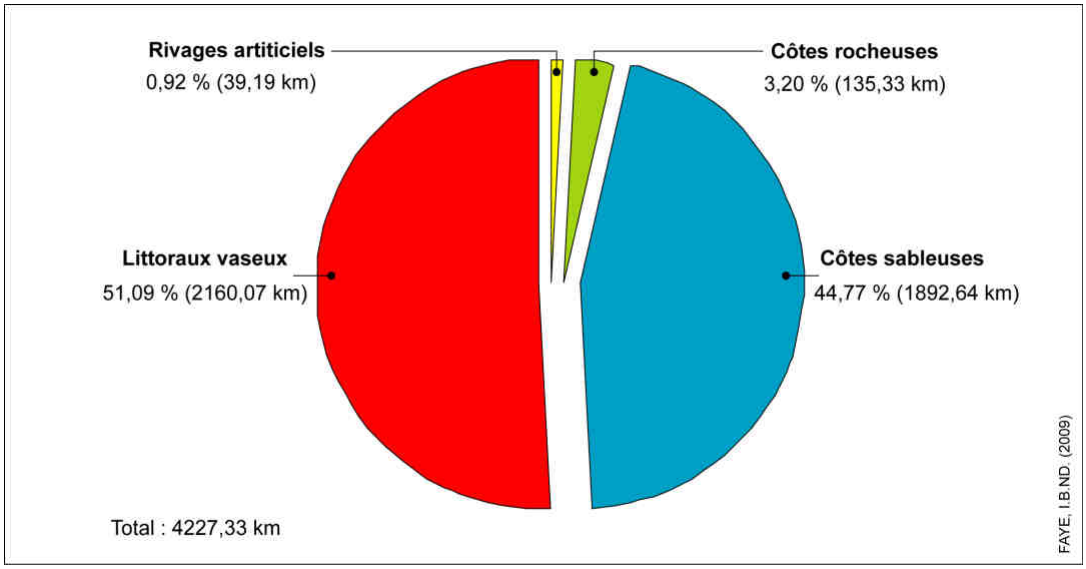
Le linéaire côtier ouest-africain, cadre de cette étude, s'étale sur 4227 km de côte (**Figure 28**) allant des zones désertiques du Cap Blanc (Mauritanie) aux régions très humides du Rio Cacine (frontière Guinée-Bissau – Guinée Conakry). Le choix d'une ligne de référence dépendant, entre autres du type de côte concerné, ce deuxième chapitre abordant la morphologie du littoral ouest-africain nous permettra aussi de localiser et de décrire les côtes sableuses avant de traiter ensuite de l'évolution de ces littoraux dans le troisième chapitre. L'analyse morphologique est un élément essentiel, nécessaire à la présélection ultérieure de sites représentatifs des différents types de plage rencontrés.

Les caractères morphologiques et les matériaux constitutifs des littoraux individualisent à l'échelle régionale trois grands types de littoraux (**Figure 28**) :

- les côtes rocheuses caractérisées par la présence de falaises ;
- les littoraux vaseux à sédiments fins et cohésifs présentant des paysages plats, dénudés (sebkhas) ou couverts de palétuviers (vasières à mangrove) ;
- les côtes sableuses généralement associées à des massifs dunaires continentaux ou des cordons littoraux.

Ces trois types de côte à l'état «naturel» sont localement artificialisés, notamment dans les villes dotées de grands ports (Cansado, Nouadhibou, Nouakchott, Dakar) où le rivage est figé par des aménagements portuaires (quais, digues, jetées, etc.) ou des ouvrages de défense. Tous ces ensembles morphologiques reposent sur le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien d'âge méso-cénozoïque (BELLION, 1987 *in* NIANG-DIOP, 1995) dont la sédimentation aurait débuté au Jurassique supérieur (DE SPENGLER *et al.,* 1966).

Figure 28 : Répartition du linéaire côtier selon le type de côte du Cap Blanc (frontière mauritano-sahraouie) au sud sud du Rio Cacine (frontière Guinée-Bissau – République de Guinée)



I – LES CÔTES ROCHEUSES A FALAISES

Avec seulement 3 % du linéaire côtier de notre zone d'étude, les côtes à falaises sont concentrées pour l'essentiel dans les régions du Cap Blanc, du Cap Vert, du massif de Ndiass et sur quelques segments côtiers en Gambie. Elles sont modelées soit dans des formations sédimentaires (69,55 %) soit dans des roches volcaniques (30,45 %).

1 – Les falaises taillées dans les formations sédimentaires

Ces falaises couvrant au total 94,12 km sur le terrain étudié sont constituées principalement de roches gréseuses ou calcaires. Ainsi, de part et d'autre de la Baie de Cansado, entre l'extrémité du Cap Blanc et la Baie de l'Etoile, le littoral mauritanien présente sur 30 km de long une côte rocheuse à falaises (**Figure 32, volume 2**). Celles-ci surplombent de 15 à 25 mètres de haut une plate-forme recouverte localement de quelques plages sableuses découvertes à marée basse au sud de Cansado alors qu'au nord de la baie du même nom, elles sont entrecoupées de zones marécageuses. Ces falaises, au profil chaotique (**Photo 9**), sont façonnées dans les formations gréseuses de l'Aguerguer datant du Quaternaire et dominées par les grès calcaires blancs à stratifications entrecroisées (HEBRARD, 1973).

Photo 9 : Aspect des falaises du Cap Blanc. L'érosion différentielle met en surplomb le haut de falaise alors que la base est colmatée par divers matériaux (sables éoliens, blocs, etc.) qui masquent le pied de falaise. Photo prise au Cap Cap Blanc, novembre 1987.

Ces grès blancs sont friables. Leur vulnérabilité à l'attaque des vagues se manifeste par des encorbellements et un recul des falaises par éboulements (HEBRARD, 1973 ; BARUSSEAU, 1985a). Au-delà de cette zone, les côtes rocheuses en Mauritanie se limitent à quelques îlots (Kiaone, Chikchitt) ou promontoires gréseux[32] localisés dans le Golfe d'Arguin (cap Sainte Anne, cap El Sass, cap Tagarit, cap Tafarit) et s'élevant à une dizaine de mètres au-dessus d'un platier immergé à marée haute.

Sur le littoral sénégambien, les falaises taillées dans les formations sédimentaires sont constituées de grès rubéfiés argilo-sableux du Maestrichtien entre Yène-sur-mer et le Cap de Naze (ELOUARD, 1965), de calcaires zoogènes paléocènes dans la région de Popenguine (MASSE, 1968 ; BOUAKAZ, 1980), de calcaires lutétiens interstratifiés à lits marneux au Cap des Biches et d'horizons de calcaires argileux fossilifères et marnes yprésiens à Ngazobil (NIANG-DIOP, 1995) (**Figure 35, volume 2**). Ce sont des falaises vives à profil vertical (**Photo 10**) ou des falaises-versants avec un profil végétalisé d'aspect rectiligne à convexe (SALL, 1971 ; 1982). Seules les falaises calcaires du Cap des Biches et de Popenguine présentent des platiers rocheux, les falaises gréseuses du Maestrichtien étant bordées plutôt de plages (**Photo 10**). L'altitude de ces escarpements varie entre 10 et 30 m dans le secteur de Yène-sur-mer – Toubab Dialao et peut atteindre 74 m au cap de Naze d'après la carte topographique de l'Institut Géographique National (IGN) éditée en 1983 (Feuille de Bargny).

Photo 10 : Falaise vive d'une dizaine de mètres d'altitude taillée dans les grès maestrichtiens. On distingue nettement le pied de falaise et le sommet de falaise habituellement utilisés comme lignes de référence dans ces types de littoraux. Vue prise au sud de Yène-sur-mer en direction du sud, le 05-08-2007.

[32] Ces falaises sont constituées de plusieurs types de grès friables comme ceux de l'Aguerguer mais très différents : grès à marmites ferruginisés, grès verdâtres glauconieux, grès verdâtres à diatomites, etc. (HEBRARD, 1973).

Des abrupts de 10 à 20 mètres (BARROW, 1994), modelés dans les grès hétérométriques argileux du Continental Terminal (oligo-miocène) et couronnés d'une cuirasse ferrugineuse et de niveaux latéritiques rongés par la mer, apparaissent aussi au sud de l'embouchure de la Gambie (MICHEL, 1960 ; 1973). Ils jalonnent la côte sur 4,8 km du cap Saint-Mary à l'embouchure de la Kotu stream et le long des promontoires situés de part et d'autre de ce secteur (Toll Point, Bald Cape, Solifor Point, Saniang Point) (**Figure 36, volume 2**).

Signalons, par ailleurs, la présence marginale en Guinée-Bissau, de falaises ayant une structure lithologique semblable à celle des côtes gambiennes. D'une altitude de 5 à 15 m, elles sont constituées d'horizons rubéfiés sablo-argileux reposant sur des cuirasses ferrugineuses au sud de Varéla (MICHEL, 1960) et dans les Bijagos (PENNOBER, 1999) (**Figure 36, volume 2**). Dans ces zones, l'érosion des formations tendres laisse, en avant de la falaise le plus souvent de gros blocs de roches ferralitiques et très rarement un platier en cuirasse latéritique (DE WEISSE, 1954 *in* MICHEL, 1960).

Il faut ajouter à cet inventaire, les argiles à attapulgites et les argiles éocènes silicifiées qui affleurent en falaises dans l'anse Bernard et dans l'anse des Madeleines où elles alternent avec des marno-calcaires paléocènes (ELOUARD, 1980). Ces falaises se raccordant quelquefois à la mer par des plages sableuses interrompent localement la côte rocheuse à matériaux volcaniques de la Presqu'île du Cap Vert.

2 – Les falaises à matériaux volcaniques de la Presqu'île du Cap Vert

Les falaises rocheuses de la tête de la Presqu'île du Cap Vert forment une côte très festonnée, sculptée dans des roches volcaniques tertiaires et quaternaires sur un linéaire de 41 km (**Figure 34, volume 2**). Ainsi du nord au sud, sont exposées d'abord des dolérites de Yoff à la pointe des Almadies, puis une alternance de basanites, de roches pyroclastiques et de dolérites jusqu'à Fann et enfin des orgues d'ankaratrite au Cap Manuel. Ce cap est précédé par des falaises de tufs qui servent d'appui à la plage Pasteur et un peu plus au nord à la plage de la «Voile d'Or» à Bel Air (ETONGUE MAYER et NIANG-DIOP, 2001).

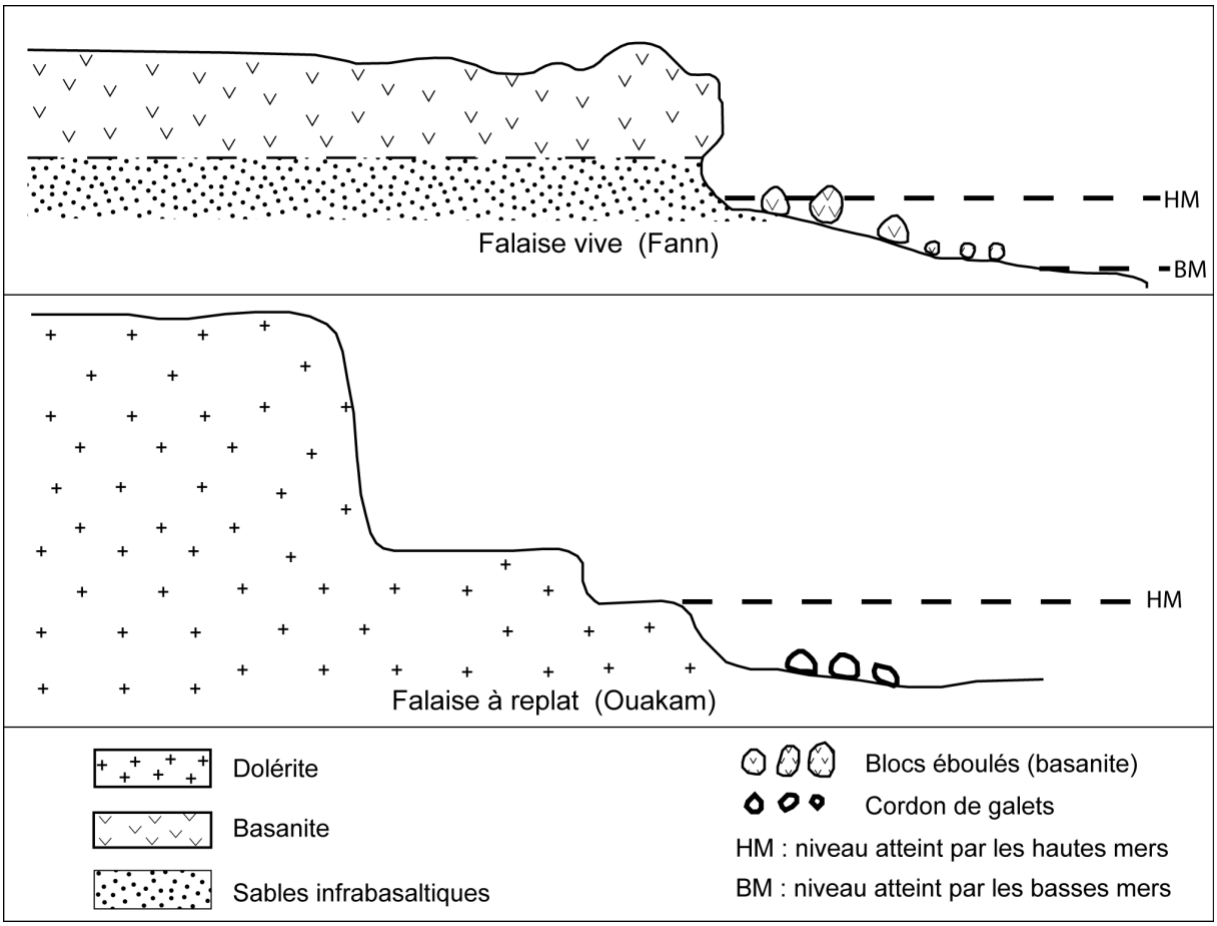
La forme du profil du versant permet de distinguer deux types de falaises (SALL, 1982) (**Figure 29**) :

- les falaises à replats façonnées par l'haloclastie sont observées dans les dolérites de la zone de Ouakam. Elles présentent un profil en gradins avec des plates-formes étagées adossées à une falaise à pic ;
- les falaises vives, sub-verticales à verticales, taillées dans les basanites et l'ankaratrite. Dans des secteurs comme Fann, la base de ces falaises est constituée de sables infrabasaltiques dont l'affouillement favorise la formation d'encoches et le recul de la falaise.

Concernant l'altimétrie, la carte topographique de l'IGN de 1983, mise à jour partiellement en 1993, montre que c'est aux Mamelles et au Cap Manuel que l'on enregistre les altitudes les plus élevées avec des points cotés respectivement à 105 m dans le premier cas et à 87 m pour le second cas, 18 m à la pointe des Almadies, 7 à 17 m à Fann et seulement 12 m à Yoff. D'après ELOUARD *et*

al. (1977), il existerait une plate-forme littorale tout autour de la Presqu'île du Cap Vert, mais MASSE (1968) souligne que les rares plates-formes d'abrasion au pied des falaises souvent ourlé d'accumulations de galets sont situées en bordure des pointes rocheuses.

Figure 29 : Profils et coupes schématiques des falaises à matériaux volcaniques de la Presqu'île du Cap Vert (Source : SALL, 1982 ; modifié)



II – LES CÔTES VASEUSES

Les côtes d'accumulation de sédiments fins représentent un peu plus de la moitié (2160 km) du linéaire côtier du secteur étudié. Elles se développent le plus souvent dans les espaces littoraux abrités des houles du large par des îles, des hauts-fonds ou des promontoires rocheux (PNUE/UNESCO/ONU-DAESI, 1985 ; IBE et QUELENNEC, 1989) ; un contexte propice à la sédimentation de particules fines et à la formation de sebkhas ou de vasières à mangrove.

1 – Les côtes à sebkhas

Les littoraux à sebkhas concernent exclusivement la Mauritanie entre la Pointe Rey et le promontoire sédimentaire du Cap Timiris (824 km) (**Figure 32, volume 2**). Dans ces secteurs, protégés de la houle par le Cap Blanc et le Banc d'Arguin, l'estran sablo-argileux qualifié de *tidal flats*

par VERMEER (1985) est souvent prolongé vers l'arrière-pays par des paysages marécageux presque plats envahis épisodiquement par la mer (**Photo 11**) parfois sur plusieurs kilomètres notamment au fond des baies (Baie du Lévrier, Baie d'Arguin et Baie de Saint-Jean). Au Banc d'Arguin, les sebkhas qui occupent le haut estran sont précédées par des vasières tapissées d'herbiers marins infralittoraux (cymodocées), intertidaux (zostères), de spartines et même d'une mangrove relique à *Avicennia* sur l'île Tidra, le tout formant un couvert végétal pouvant couvrir jusqu'à 72% de l'estran (CUQ, 1989). Selon HEBRARD (1973) et THIAM (1976), le matériel des sebkhas est constitué essentiellement d'un mélange de sables fins à limoneux, de gypse, de matières organiques et d'argiles. Dans ces milieux paraliques soumis à des intrusions marines périodiques commandées par le niveau de la marée, la forte imbrication entre la mer et la terre donne au rivage des contours flous.

Photo 11 : Vue d'une sebkha dans le Banc d'Arguin. Les zones les plus élevées présentent des tons plus clairs que les zones plus basses fréquemment inondées.

2 – Les littoraux à mangrove

Ils constituent la façade maritime des vasières à mangrove, zones marécageuses vaseuses à vaso-sableuses sillonnées par un lacis de chenaux de marée et peuplées de forêts de palétuviers. Toutefois, les mangroves peuvent se développer sur un substrat sableux, caillouteux et même rocheux (DIOP, 1986 ; 1990 ; PENNOBER, 1999). Leurs formations végétales sont dominées par deux familles de végétaux aux racines échasses (**Photo 12**) : en front de mer les rhizophoracées, avec *Rhizophora racemosa, Rhizophora harisonii* et *Rhizophora mangle* et en arrière les

avicenniacées représentées par *Avicennia nitida* ou *africana* (DIOP, 1990). Les littoraux à mangrove sont particulièrement bien représentés en Guinée-Bissau au sud du Rio Cacheu ou sur la façade orientale des îles de Jeta, Pexice et des Bijagos (**Figure 36, volume 2**). Ils présentent un aspect très sinueux qui explique leur relative importance par rapport aux autres types de littoraux puisqu'ils forment à eux seuls 31 % du linéaire de la zone d'étude. Par rapport aux limites tidales, SALL (1982) note que les vasières à mangrove se développent généralement entre le niveau des pleines mers de vives-eaux et de mortes-eaux. La ligne de rivage instantanée peut donc être masquée par le feuillage des palétuviers alors que la ligne des hautes eaux est à chercher au-delà de la limite supérieure du rideau de mangrove du côté des tannes. Ces unités morphologiques succèdent aux vasières à mangrove vers l'intérieur des terres et ne sont inondées que lors des grandes marées de vives-eaux. Comme pour les côtes à sebkhas, il est difficile de repérer dans les mangroves la limite exacte des plus hautes mers.

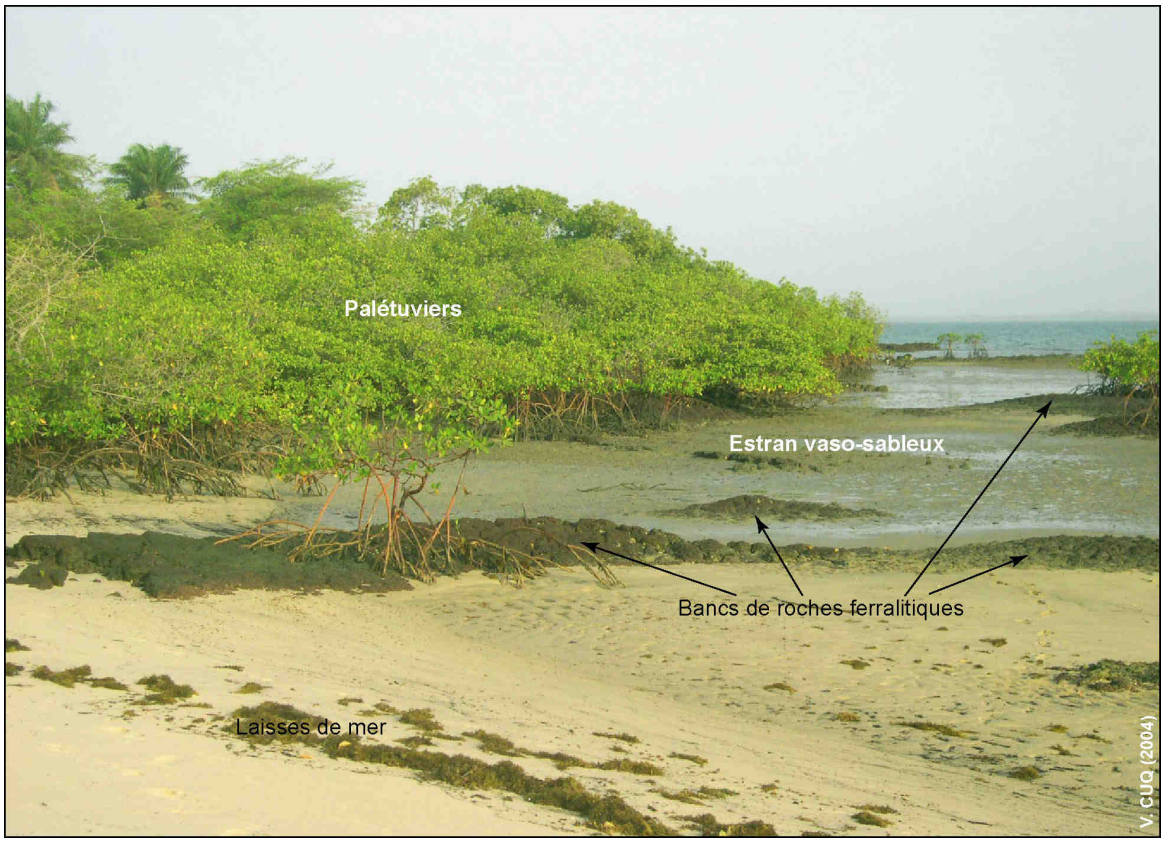


Photo 12 : Mangrove se développant sur un estran vaso-sableux avec quelques individus isolés sur des bancs rocheux. Vue prise à marée basse au nord-est d'Eticoga dans la partie septentrionale de l'île d'Orango (Archipel des Bijagos), le 13-04-2004.

III – LES CÔTES SABLEUSES

Les côtes sableuses représentent 45 % du linéaire côtier de la Mauritanie à la Guinée-Bissau et constituent le deuxième type de rivage dominant derrière les littoraux vaseux. Il est possible de les

répartir en deux grandes catégories en fonction de la nature de l'arrière-côte : les plages associées à des cordons dunaires et les plages adossées à des falaises.

1 – Les plages bordées de cordons dunaires

La chronologie de leur mise en place et la morphologie de l'arrière-pays permettent de distinguer deux ensembles morphologiques : les plages bordées de dunes continentales ogoliennes et les plages ourlées de cordons dunaires littoraux post-ogoliens abritant des dépressions (sebkhas, niayes, lagunes, vasières à mangrove).

1.1 – Les plages associées à des dunes continentales ogoliennes

Ce type de plage est présent au Sénégal de Somone à Mbour (**Figure 35, volume 2**), en Mauritanie dans la Baie de Tanoudert, de Saint-Jean et aux abords du Cap Timiris jusqu'au nord de Mehejrat (**Figure 33, volume 2**) où, sur une quarantaine de kilomètres environ, le littoral des ergs dunaires de l'Achkar et de l'Agneïtir déroule un segment de plage «rougeâtre» ourlé de cordons de dunes au sable rubéfié. Ces derniers forment un chapelet de crêtes dunaires orientées généralement nord-est – sud-ouest matérialisant la provenance des alizés continentaux qui les ont mis en place durant l'aride ogolien entre 20000 et 13000 ans B.P. (ELOUARD, 1966 ; SALL, 1982). Dans ces secteurs, sur le front de mer, un pied de dune très net marque le contact entre le haut de plage et le front dunaire (**Photo 13**). Ces grands massifs dunaires de 25 à 40 mètres de haut (selon la carte IGN de 1969, feuille de Nouamghar) côtoient deux autres générations de dunes mineures beaucoup plus récentes, de direction nord nord-est – sud-sud-ouest et nord – sud (LANCASTER *et al.,* 2002).

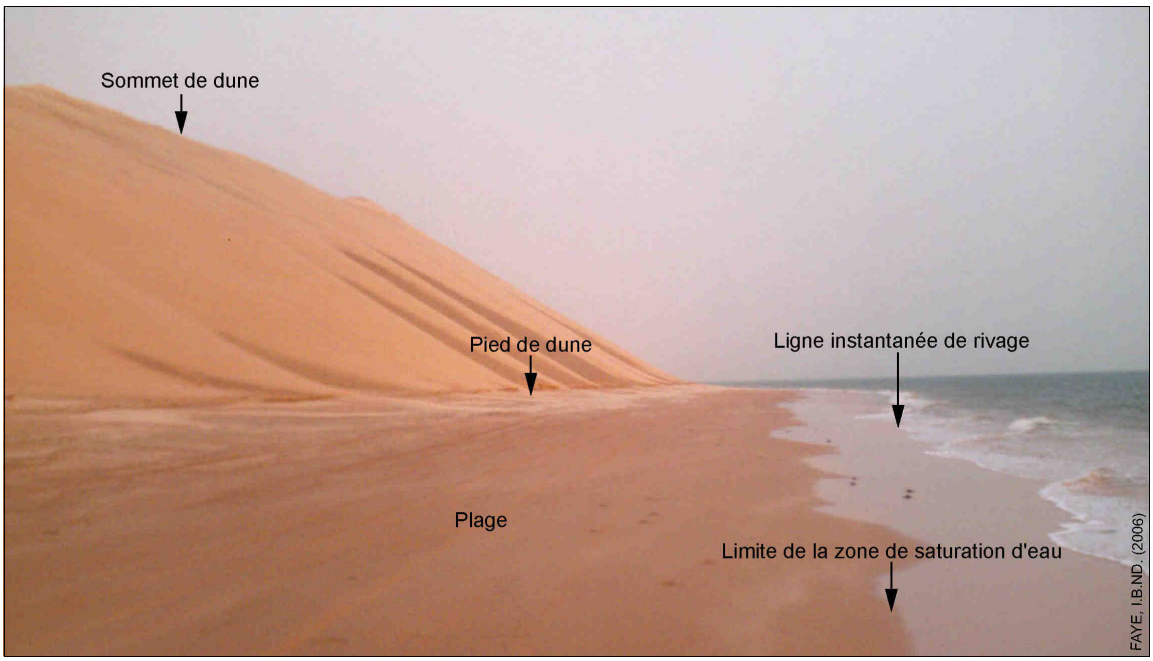


Photo 13 : Dune ogolienne d'une vingtaine de mètres se raccordant à la mer par une plage de sable «rougeâtre» et un front dunaire en pente duce. Ici le trait de côte peut-être assimilé au pied de dune battu par les vagues à marée haute. Photo prise entre Jreiffe et Mehejrat, en direction du sud-ouest, le 16-06-2006.

1.2 – Les plages bordées de cordons dunaires post-nouakchottiens

A partir de 4000 ans B.P. (Tafolien), d'importantes quantités de sédiments charriées par une dérive littorale nord – sud vont fermer progressivement les golfes résultant de la transgression nouakchottienne et édifier une série de plages et de cordons sableux sur tout le littoral ouest-africain au sud du Cap Timiris (HEBRARD, 1973 ; ELOUARD *et al.*, 1977). L'isolement des anciens golfes nouakchottiens va les transformer en zones lagunaires puis, suivant les régions morphoclimatiques, en dépressions humides de type sebkhas dans le sud mauritanien, de type niayes entre le fleuve Sénégal et la Presqu'île du Cap vert, des marigots plus ou moins temporaires au nord du massif de Ndiass, ou encore des lagunes et des vasières à mangrove dans les systèmes estuariens de la Somone jusqu'à la Guinée Bissau.

1.2.1 – Les plages associées à des cordons dunaires isolant des dépressions de type sebkhas

Partie intégrante de la «grande plage mauritanienne» (De LANJAMET, 1988), elles s'étirent sous la forme d'un arc sur à peu près 417 km des environs de Mehejrat jusqu'au fleuve Sénégal (**Figure 33, volume 2**). Cette section de côte peut-être scindée en trois parties du nord au sud selon la structure, la vigueur du cordon dunaire et l'ampleur des dépressions côtières à sebkhas :

- au nord de Tiouilit, le littoral des petites sebkhas incrustées dans les dunes ogoliennes de l'Achkar et de l'Agneïtir est dépourvu de cordon dunaire. En effet, dans ce secteur de 45 km de long, l'estran et les étendues sursalées de l'arrière-pays sont séparés par une terrasse argilo-coquillière recouverte d'un placage sableux (**Photo 14**) auquel se substituent des dunes embryonnaires apparaissant sous forme d'un amoncellement de monticules au fur et à mesure que l'on se rapproche de Tiouilit ;

Photo 14 : Aspect de la plage et haut de plage entre Mehejrat et Tioulit. Le passage du placage sableux à l'estran est marqué par une rupture de pente mais il n'existe aucun indice clair du trait de côte. vue prise en direction du sud-est, le 16-06-2006.

- de Tiouilit jusqu'à Nouakchott (122 km), la plage est séparée de la grande sebkha de Ndrhamcha, large d'une soixantaine de kilomètres, par un cordon dunaire discontinu fait de dunes vives parsemées de *Zygophyllum waterlotii,* en particulier sur une largeur de 70 à 500 m. Ce cordon de dunes vives se juxtapose à des lambeaux de dunes semi-fixées par des buissons de *Tamarix sp., e*ntre autres, de Tiouilit à Lemcid ainsi qu'aux environs de Jreida. Au nord de cette dernière localité, le contour du littoral montre une certaine irrégularité avec une suite de petites pointes et de baies (Baie de Tanit, Baie d'Achéma). Aussi comme le signalait HEBRARD (1973), la plage est tapissée localement de *beach-rock,* notamment entre Lemcid et Ablawakh (**Photo 15**) ;

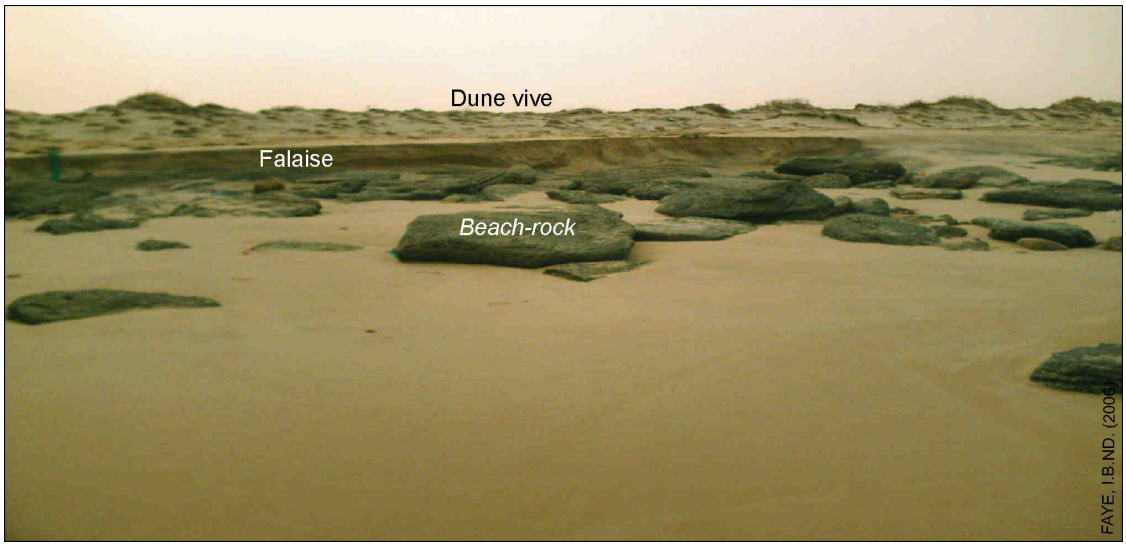


Photo 15 : Affleurement de *beach-rock* au bord d'une plage en érosion entre Lemcid et Ablawakh. La limite supérieure de la plage est délimitée par une falaise d'environ 0,5 m. photo prise en direction de l'est, le 17-06-2006.

- du sud de Nouakchott aux alentours du *Chott Boul,* sur un peu plus de 250 km, un cordon dunaire isole la plage de l'*Aftout es Saheli*, une dépression longitudinale large de 5 à 12 km renfermant des terrasses coquillières et logée entre le cordon littoral post-ogolien et les dunes ogoliennes du Trarza. Très étroit de Nouakchott au PK[33] 64 où il est composé uniquement d'une ceinture de dunes vives (100 à 450 m de large), le cordon dunaire s'élargit progressivement vers le sud et atteint une largeur de 3 km au nord immédiat du *Chott Boul*. A partir du PK 93, il aligne deux systèmes dunaires juxtaposés : une ceinture continue de dunes vives sur la façade maritime (**Photo 16**) et une bande de dunes semi-fixées par des arbustes (*Tamarix sp, Nitraria retusa, Calotropis procera, etc*.) du côté de l'*Aftout*. L'altitude de ces dunes semi-fixées qui présentent de nombreuses caoudeyres varie entre 5 et 13 m en général et atteint ponctuellement une vingtaine de mètres, 23 m par exemple au sud du PK 140 d'après la carte topographique de l'IGN de 1969 (feuille de Saint-Louis). La zone de transition

[33] Point Kilométrique, il exprime la distance du site par rapport à Nouakchott

entre les dunes vives et le haut estran présente par endroits des formes périodiques comme des gradins de plage, des croissants de plage, des baches, des crêtes et sillons obliques, des petites falaises, etc. (DE LANJAMET, 1988).

Le long de ce littoral caractérisé par la rareté du couvert végétal et la faible extension spatiale des dunes semi-fixées, le choix d'une ligne de référence paraît très délicat.

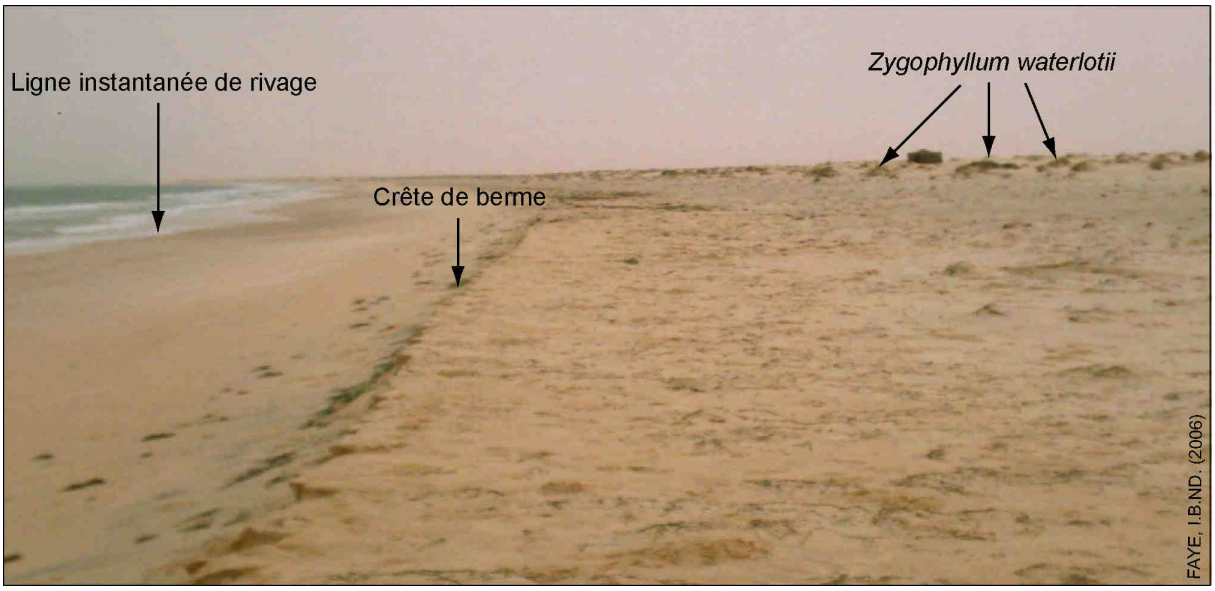


Photo 16 : Monticules de sables colonisées par *Zygophyllum waterlotii* en bord de mer aux environs de Tioulit. Une berme indique localement une position approximative des pleines mers récentes. Vue prise en direction du nord, le 16-06-2006.

1.2.2 – Les plages associées à des cordons dunaires isolant des dépressions de type niayes

De l'embouchure du Sénégal jusqu'à Yoff, s'étire une longue plage de 200 km garnie d'un puissant cordon dunaire (**Figure 33, volume 2**). Ce secteur plus connu sous le vocable de «Grande Côte» (KANE, 1993), présente quelques similitudes avec la partie méridionale de la «grande plage mauritanienne». En effet, les formes développées sur le haut estran et qui ont été décrites par DIAW (1981) et par SALL (1982) sont semblables, à bien des égards, à celles rencontrées sur le littoral sud mauritanien (crêtes et sillons obliques, croissants de plage, falaises, ...). Les systèmes dunaires qui bordent la plage sont également similaires avec, en front de mer, une ceinture de dunes vives au modelé chaotique relayée vers l'intérieur des terres par des dunes semi-fixées, couvertes d'une végétation arborée et herbacée sur une largeur moyenne de 3,7 km au nord de Kayar. Ces dunes semi-fixées dominent d'une altitude d'une dizaine à une trentaine de mètres (selon les cartes topographiques de la JICA[34] de 1989, feuilles de Louga) les niayes qui, contrairement aux sebkhas, comportent une nappe phréatique d'eau douce sub-affleurante. Dans cette région, les terrains salés

[34] *Japanese International Cooperation Agency.*

ne se retrouvent qu'en bordure des lacs (Retba, Mbaouane, Tanma, Mbeubeussé, Youi), reliques des anciennes lagunes nouakchottiennes entre Kayar et Yoff (SALL, 1979a). La remobilisation, par les alizés maritimes, des matériaux des ensembles dunaires semi-fixés surtout en saison sèche entraîne un remblaiement progressif des niayes qui sont, par ailleurs, le siège d'importantes activités maraîchères (SALL, 1971 ; 1973 ; 1982 ; CISSE, 1976 ; DIAW, 1980 ; 1997). L'importance socio-économique de ces zones humides a justifié la mise en place, depuis 1925, de périmètres de reboisement pour fixer les dunes de la Presqu'île du Cap Vert à l'embouchure du fleuve Sénégal avec des filaos *(Casuarina equisetifolia)* (DIA, 1993 ; MAILLY *et al.,* 1994). Ce tapis végétal clairement visible sur le terrain et sur les images aériennes et satellitaires pourrait constituer une référence idéale pour un trait de côte mais elle n'est pas naturelle. De plus, la position de sa limite inférieure est trop en retrait de celle des hautes mers et est précédée quelquefois par une dune vive portant une végétation saisonnière (**Photo 17**).

Photo 17 : Aspect du front de mer au nord de Fass Boye. Ici la limite inférieure des *Ipomea* marquée par une rupture de pente peut-être considérée comme trait de côte mais c'est une végétation saisonnière. Vue prise en direction du nord, le 07-08-2007.

1.2.3 – Les plages associées à des cordons littoraux isolant des marigots côtiers

Dans le segment de côte compris entre les falaises de la Presqu'île du Cap Vert et du littoral du massif de Ndiass (**Figure 35, volume 2**), il n'existe plus de véritable cordon dunaire du fait de l'urbanisation. La plage a même totalement disparu dans certains secteurs comme Rufisque protégé entièrement par un mur d'enrochement de 5 km de long (**Photo 18**). A la différence de la «grande plage mauritanienne» et de la «Grande Côte» situées au nord de la Presqu'île du Cap Vert, ici il n'existe pas de vaste champ dunaire dans l'arrière-pays. Sur les rares zones non encore occupées par des habitations, seul subsiste un mince cordon sableux de 10 à 80 m de large colonisé essentiellement par des figuiers de Barbarie (*Opuntia tuna*). Le long de toute cette zone, des marigots s'écoulant transversalement ou parallèlement à la côte occupent les fonds des dépressions côtières (MASSE, 1968 ; MORIN, 1973 ; BOUAKAZ, 1980). En raison de l'alternance entre saison sèche et saison des pluies, ils sont parfois à sec durant une bonne partie de l'année. Ils se remplissent en hivernage et peuvent entretenir une communication permanente avec la mer par le biais d'un canal de vidange à travers le cordon littoral (**Photo 19**).

Photo 18 : Vue du cordon d'enrochement protégeant le littoral rufisquois. Photo prise au quartier de Thiawlène, en direction du nord, le 22-10-2006.

Photo 19 : Brèche à travers le cordon à *Opuntia tuna*. Photo prise au sud de Rufisque, en direction du sud, le 22-10-2006.

1.2.4 – Les plages associées à des dunes littorales semi-fixées

Au sud de Mbour, le mince cordon littoral à *Opuntia tuna* est remplacé par des tronçons de cordons dunaires partiellement fixés, entre autres, par des filaos, *Calotropis procera*, *Nitraria retusa* et des herbacés. Ces dunes bien visibles au nord de la pointe Sarène (**Photo 20**) apparaissent aussi sur le littoral sénégambien entre l'exutoire de la Kotu Stream et Kafountine (**Figure 36, volume 2**) où le couvert végétal plus dense et plus diversifié les a pratiquement fixées et facilite la délimitation du contact plage – dune. Les cordons dunaires, larges en moyenne de 400 m, dominent au sud de Solifor Point un arrière-pays de rizières où coulent quelquefois des rivières qui se jettent dans l'Atlantique (JALLOW et *al.*, 1996). Alimentés par les eaux de pluie durant l'hivernage, ces cours d'eau se transforment en lagunes en saison sèche et certains d'entre eux abritent même de la mangrove (*Kotu stream, Tanji river, Allahein river* par exemple).

Photo 20 : Dune semi-fixée au sud de Nianing. Photo prise en direction du sud, le 03-08-2007.

1.2.5 – Les plages associées à des cordons sableux isolant des vasières à mangrove

Elles caractérisent les marges maritimes des systèmes estuariens de Joal au Saloum, les secteurs nord de la côte gambienne entre Djinack et Bara ainsi que le littoral casamançais et bissauguinéen, soit au total 885 km (**Figure 36, volume 2**). Il s'agit le plus souvent d'un ensemble constitué de plusieurs générations successives de cordons sableux modelés en dunes plus ou moins consolidées et fixées par une végétation de savane arborée au Sénégal, en Gambie (SALL et DIOP, 1977 ; SALL, 1982) et en Guinée-Bissau (**Photo 21**) où ils portent aussi par endroits une palmeraie (DIOP, 1986 ; 1990 ; PENNOBER, 1999). Ils sont indissociables des vasières à mangrove car c'est leur mise en place progressive qui a créé les conditions favorables à l'envasement des estuaires et au développement de mangroves pendant le Tafolien, vers 3000 ans B.P. (MICHEL, 1973). Aux débouchés des cours d'eau comme au Saloum ou en Casamance, ces cordons sableux sont relayés par des flèches sableuses orientées dans le sens du transit sédimentaire responsable de leur formation.

Photo 21 : Vue d'une plage en avant d'un cordon sableux fixé par une végétation de savane. En l'absence de dunes vives, la mer atteint presque la limite inférieure de végétation à marée haute. Photo prise sur l'île d'Orango dans les Bijagos près d'Eticoga, le 13-04-2004.

1.2.6 – Les flèches sableuses

Nous avons dénombré quatorze flèches sur la façade maritime de l'estuaire du Sénégal à la Guinée-Bissau. La **figure 30** montre leur localisation et le **tableau 13** fournit quelques indications sur les caractéristiques de ces accumulations sableuses. Elles comportent le plus souvent un estran sableux sur leur front maritime et vaseux sur leur revers. On peut les ranger en deux catégories en se référant à la typologie établie par PINOT (2001) : les flèches d'estuaires et les flèches de redan.

Les flèches d'estuaires s'observent au droit des embouchures des fleuves (Sénégal, Saloum et Casamance). BARUSSEAU (1980) les a baptisé «flèches sénégaliennes». Elles s'allongent vers le sud et présentent des unités géomorphologiques ainsi que des caractéristiques granulométriques communes (SY, 1982). Il s'agit de :

- la Langue de Barbarie. Cette longue barrière littorale commence à la hauteur du marigot de Boytet et dévie l'embouchure du fleuve Sénégal vers le sud. Elle atteint sa largeur maximale au sud de Saint-Louis mais montre localement des rétrécissements la réduisant à une quarantaine de mètres de large. C'est une flèche presque droite, d'orientation méridienne avec, cependant, une légère déviation de son extrémité distale vers le sud-sud-ouest ;

- la pointe de Sangomar dans l'estuaire du Saloum. Elle a presque la même orientation que la Langue de Barbarie mais est interrompue à Djiffère où elle se termine par un crochet dirigé vers le sud sud est ;
- la Presqu'île aux Oiseaux au nord de l'embouchure de la Casamance. C'est la plus large de toutes les flèches sénégalaises. Elle atteint son extension maximale à son extrémité avec une largeur d'un kilomètre environ.

Le deuxième groupe de flèches dites de redan se développe à l'abri d'une pointe rocheuse, d'un cap ou d'un angle saillant de la côte. Entrent dans cette catégorie :

- la flèche de Mbodiène. Elle s'appuie sur la pointe Sarène et s'achève par une partie distale très étroite avec un coude orienté soit vers la lagune soit vers l'océan (NGAMI-NTSIBA-ANDZOU, 2006) ;
- la flèche de Joal. Prenant appui sur la pointe Gaskel ou pointe Senti, elle sert de cadre à la ville de Joal ;
- les flèches qui barrent l'embouchure de la Gambie entre le Cap Saint-Mary et Banjul. Ce secteur d'une douzaine de kilomètres environ recèle trois flèches. L'une ancrée sur le Cap Saint-Mary s'arrête à l'exutoire d'un chenal de marée un peu avant Toll Point. Les deux autres flèches dont celle de Banjul se sont développées en direction de l'embouchure du fleuve avec comme point d'ancrage le promontoire de Toll Point. Elles offrent une morphologie identique, à savoir des parties proximale et médiane étroites et une large extrémité ;
- la flèche située à Balde Cape. Elle s'enracine sur une pointe située au droit de l'embouchure de la Tanji river et se développe vers le nord en direction de Bald Cape ;
- la flèche de Saniang Point. Accrochée au promontoire du même nom, elle présente un crochet vers le sud est ;
- la flèche de Kartrung Point. Localisée à l'exutoire de l'Allahein river, elle se termine aussi par un crochet vers l'est ;
- la flèche du Cap Roxo. D'une forme très concave surtout dans sa partie proximale et médiane, elle est dotée d'une pointe en crochet vers le sud est ;
- la flèche de Varéla. Elle a une physionomie très proche de celle du Cap Roxo ;
- la flèche d'Acapa qui correspond en fait à l'extrémité libre d'un cordon sableux au sud de l'île d'Orango dans l'archipel des Bijagos (PENNOBER, 1999).

La langue de Barbarie, la flèche de Mbodiène, la pointe de Sangomar, la flèche de Joal et de Banjul sont anthropisées à des degrés variables contrairement aux autres qui sont vierges de toute occupation humaine. Elles sont toutes végétalisées, en particulier celles situées au sud de Kartrung Point. La limite inférieure de cette couverture végétale pourrait constituer un indicateur pour retracer leur évolution.

Figure 30 : Localisation des flèches sableuses sur le littoral sénégalo – bissauguinéen

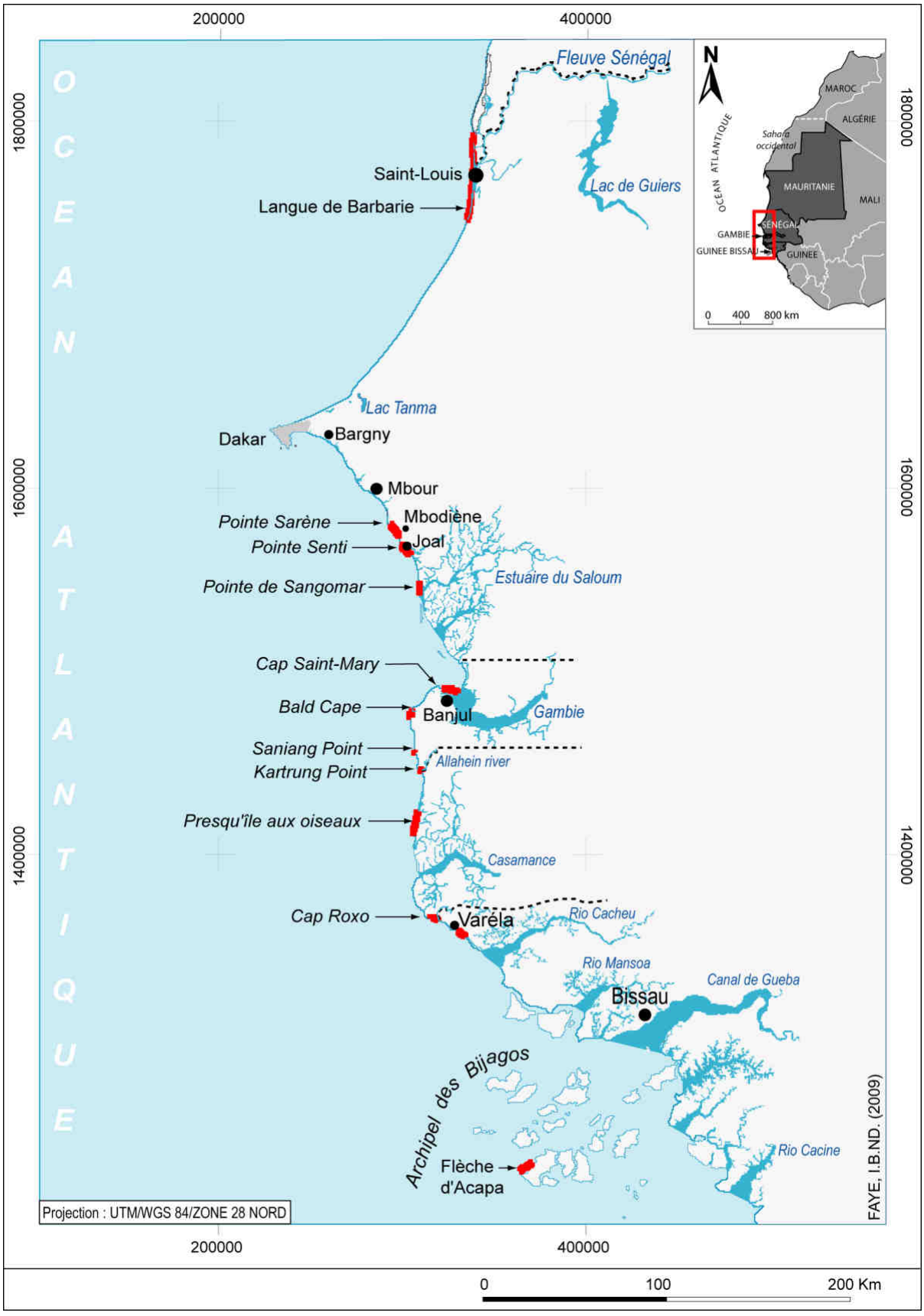


Tableau 13 : Dimensions et orientations des flèches sableuses du Sénégal à la Guinée-Bissau. Mesures effectuées dans un SIG à partir des couches thématiques extraites par l'algorithme ISODATA. La résolution spatiale des images Landsat ETM+ utilisées datant de 1999, 2000 et 2001 est de 28,5 m.

Nom / Localisation	Longueur du linéaire côtier (Km)	Largeur (m)			Orientation générale
		Minimale	Maximale	Moyenne	
Flèches d'estuaire					
Langue de Barbarie	56,36[35]	47,99	413,47	165,15	Nord – Sud
Pointe de Sangomar	15,28	42,71	326,14	133,30	Nord – Sud
Presqu'île aux Oiseaux	20,14	106,64	1047,74	383,70	Nord-nord-est – Sud-sud-ouest
Flèche de redan					
Flèche de Mbodiène	13,49	14,03	382,55	159,30	Nord-ouest – sud-est à Nord-nord-ouest – sud-sud-est
Flèche de Joal	8,63	52,36	700,81	357,68	Nord-nord-ouest – sud-sud-est à nord-ouest – sud-est
Flèche de Banjul	6,3	90,79	1672,63	536,82	Ouest – est à ouest-nord-ouest – est-sud-est
Flèche de Toll Point	2,42	137,21	398,02	263,11	Ouest – est à ouest-nord-ouest – est-sud-est
Flèche du Cap Saint-Mary	3,62	22,13	232,13	93,28	Ouest – est
Flèche de Bald Cape	2,63	26,21	167,49	67,48	Sud – nord
Flèche de Saniang Point	5,53	30,37	150,14	78,17	Nord-nord-ouest – sud-sud-est
Flèche de Kartrung Point	6,62	50,78	415,51	207,29	Nord-nord-ouest – sud-sud-est
Flèche du Cap Roxo	5,92	38,03	265,68	144,25	Ouest-nord-ouest – est-sud-est à nord-ouest – sud-est
Flèche de Varéla	4,20	38,11	389,30	206,83	Nord-ouest – sud-est
Flèche d'Acapa	10,12	107,48	557,16	332,69	Ouest sud ouest – est nord est

2 – Les plages de poche et les plages adossées à des falaises

On les rencontre le long des côtes rocheuses ou au fond des baies entre deux pointes rocheuses. C'est le cas des plages de la Baie de Cansado (**Figure 32, volume 2**) et pour les petites plages logées dans les anses, les petites baies et les criques de la tête de la Presqu'île du Cap Vert. Dans ce dernier cas, elles s'adossent à des falaises vives taillées par l'érosion différentielle dans les zones fracturées de moindre résistance ou dans les formations sédimentaires moins résistantes que les roches volcaniques comme les marnes et les argiles de l'anse des Madeleines et de l'anse

[35] La langue de Barbarie a subi en 2003 une coupure artificielle à une vingtaine de km au nord de l'embouchure aux environs de Saint–Louis.

Bernard (MASSE, 1968 ; ELOUARD, 1980 ; SALL, 1982) (**Figure 34, volume 2**). Les plages adossées se retrouvent également au pied des falaises gréseuses du Maestrichtien (**Figure 35, volume 2**), du Continental Terminal et, dans une moindre mesure, à la base des falaises sablo-argileuses en Guinée-Bissau (**Figure 36, volume 2**). Elles sont parfois encombrées d'écueils ou de gros blocs arrachés à la falaise (exemple des plages adossées aux falaises de grès maestrichtiens de Yène au cap de Naze et du littoral gambien). Elles peuvent masquer aussi le platier rocheux comme à Ngazobil ou au droit des promontoires gréseux au sud de la Gambie (Bald Cape, Solifor Point, Saniang Point).

IV - SYNTHESE

Il ressort de cette brève présentation du cadre morphologique de la Mauritanie à la Guinée-Bissau, une très grande variété de formes littorales en raison de la diversité de la géologie, de la topographie littorale et de la grande longueur de côte considérée. Dans sa classification morphologique de la zone côtière sénégalaise, SALL (1982) s'appuyant sur la classification d'INMAN et NORDSTROM (1971) distinguait des côtes de plateau caractérisées par la présence d'un plateau continental étroit et des falaises rocheuses vives ou mortes ; des côtes de plaines et de plaines deltaïques qui bordent en revanche un plateau continental large et présentent des cordons littoraux ou des vasières. La géologie et la morphologie interviennent aussi dans l'allure du tracé de la ligne de rivage ou du trait de côte. Ainsi un travail de morphométrie plane avait permis à DIAW (1997) de définir un indice de découpure associé aux formes littorales pour individualiser :

- des côtes à découpure insignifiante (côtes à dunes, côtes de formations sédimentaires du Secondaire et du Tertiaire) ;
- des côtes à forte découpure (côtes rocheuses à produits volcaniques et côtes à cordons littoraux) ;
- et des côtes à très forte découpure (estuaires, rias et flèches littorales).

C'est en s'inspirant de ces classifications et compte tenu de notre problématique de recherche axée sur les littoraux sableux que nous avons établi une typologie qui a d'abord distingué les différents types de côte à l'échelle régionale selon la lithologie. Une fois les côtes sableuses localisées, nous les avons classées dans un premier temps en fonction de la nature de l'arrière-côte. Dans un deuxième temps, d'autres critères dont la chronologie de leur mise en place et la morphologie de l'arrière-pays littoral ont été utilisés afin de distinguer des sous-groupes. Cela dans l'optique de pouvoir procéder ultérieurement à un choix de sites représentatifs de la diversité des types de côtes sableuses rencontrées pour mener une analyse de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale. Tous les types de côte présentés succinctement dans les paragraphes précédents ont été identifiés à l'échelle régionale, mis en forme dans un SIG grâce aux renseignements tirés de la bibliographie, des cartes topographiques et de l'imagerie Landsat ETM+ datant de 1999, 2000 et 2001. Aussi pour montrer la répartition géographique des types de côte de manière à orienter notre choix d'études de cas à

grande échelle, nous avons découpé la zone d'étude en cinq grands ensembles contigus du nord au sud compte tenu du type de côte dominant et des discontinuités naturelles.

La première zone va du Cap Blanc au Cap Timiris (901,31 km) (**Figure 31a et Figure 32, volume 2**). Les littoraux à sebkhas y dominent largement à côté des littoraux rocheux à falaises et des côtes sableuses isolées au fond des baies. Ce littoral au tracé très sinueux est peu anthropisé, sauf les abords de la Baie de Cansado, qui abritent les villes de Cansado et Nouadhibou dotées d'importantes zones industrialo-portuaires.

La deuxième zone s'étire du Cap Timiris au Cap Vert sur 721,73 km (**Figure 31b et Figure 33, volume 2**). C'est le domaine des plages bordées de cordons dunaires isolant des dépressions (sebkhas en Mauritanie et niayes au Sénégal) qui séparent les dunes littorales des dunes continentales. Entre les sebkhas et les niayes s'interpose l'estuaire du fleuve Sénégal fermé par une flèche sableuse d'une cinquantaine de kilomètres, la Langue de Barbarie. En dehors de Nouakchott et de Saint-Louis, les installations humaines se limitent à quelques campements saisonniers ou de gros villages de pêcheurs artisanaux.

La troisième zone correspond à la tête de la Presqu'île du Cap Vert, de Yoff à Bel Air (71,87 km) (**Figure 31c et Figure 34, volume 2**). Elle est constituée majoritairement de littoraux à falaises de roches volcaniques, surtout dans sa partie septentrionale, et de roches sédimentaires affleurant dans sa partie méridionale. Ces falaises surplombent, par endroits, des plages représentant au total 11,92 km soit 23,54 % de la côte à falaises. La région du Cap Vert renferme aussi la plus grande proportion de rivages artificiels avec le port autonome de Dakar développé sur 20,4 km et le port de plaisance de Hann Marina derrière la pointe de Bel Air.

La quatrième zone s'étend au sud du Cap Vert, de Bel Air à Joal (133,12 km) (**Figure 31d et Figure 35, volume 2**). Elle combine divers types de rivages sableux formés pour l'essentiel de plages associées à des cordons littoraux isolant des marigots au nord des falaises gréseuses du massif de Ndiass, des plages associées à des dunes continentales ogoliennes dans la région de Mbour, des dunes littorales semi-fixées au sud et des flèches sableuses qui isolent des lagunes. Elle est densément urbanisée et fait partie des principaux foyers de développement du tourisme balnéaire au Sénégal.

La dernière zone couvre le littoral du sud de Joal au Rio Cacine (2399,06 km) (**Figure 31e et Figure 36, volume 2**). Elle est caractérisée par de nombreux estuaires et naturellement les types de rivage qui leur sont associés dominent avec tout d'abord les littoraux à mangrove au sud du Rio Cacheu, puis les plages associées à des cordons dunaires isolant des vasières du Saloum au Rio Cacine en passant par les Bijagos et enfin les flèches sableuses aux embouchures des cours d'eau ou chenaux de marée. S'y ajoutent des plages associées à des dunes littorales semi-fixées et quelques falaises à cuirasse ferrugineuse et à horizons sablo-argileux.

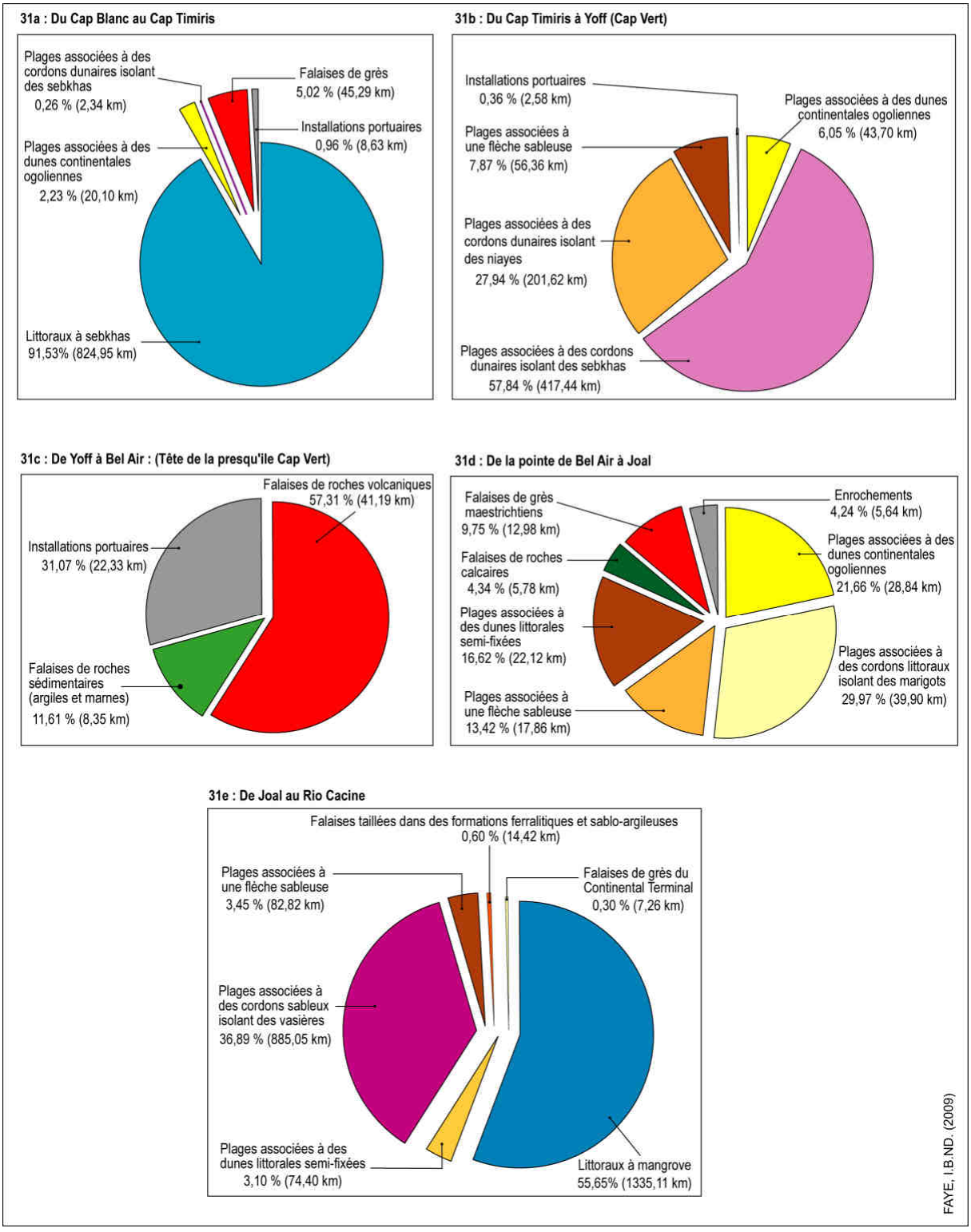
Tableau 14 : Répartition du linéaire côtier selon le type de côte du Cap Blanc à la Guinée-Bissau

Types de côte		Linéaire côtier (km)	Proportion (%)
Littoraux vaseux (2160,06 km ; 51,1%)	Littoraux à sebkhas	824,95	19,52
	Littoraux à mangrove	1335,11	31,58
Côtes sableuses (1892,61 km ; 44,77%)	Plages associées à des dunes continentales ogoliennes	92,65	2,19
	Plages associées à des cordons dunaires isolant des sebkhas	419,81	9,93
	Plages associées à des cordons dunaires isolant des niayes	201,62	4,77
	Plages associées à des cordons littoraux isolant des marigots côtiers	39,90	0,94
	Plages associées à des dunes littorales semi-fixées	92,27	2,18
	Plages associées à des cordons sableux isolant des vasières à mangrove	885,05	20,94
	Plages associées à des flèches sableuses	161,31	3,82
Côtes rocheuses[36] (135,25 km ; 3,19%)	Falaises de calcaires lutétiens interstratifiés à lits marneux	0,46	0,01
	Falaises de calcaires argileux fossilifères et marnes yprésiens	0,59	0,01
	Falaises de calcaires zoogènes paléocènes	4,72	0,11
	Falaises d'argiles éocènes et de marnes calcaires paléocènes[37]	8,35	0,20
	Falaises sablo-argileuses reposant sur une cuirasse ferrugineuse	14,42	0,34
	Falaises de grès calcaires blancs de l'Aguerguer	30,79	0,73
	Falaises de grès divers des caps et îlots gréseux du Golfe d'Arguin	14,49	0,34
	Falaises de grès argilo-sableux du Maestrichtien	12,98	0,31
	Falaises de grès argileux du Continental Terminal	7,26	0,17
	Falaises de roches volcaniques	41,19	0,97
Rivages artificiels (39,18 km ; 0,92%)	Enrochements	5,64	0,13
	Installations portuaires	33,54	0,79
TOTAL		**4227,10**	**100**

N.B. Le linéaire côtier reporté sur ce tableau correspond à la ligne instantanée de rivage pour les littoraux à falaises, les rivages artificiels, littoraux à sebkhas, les plages bordées de cordons dunaires isolant des sebkhas, des niayes et certaines flèches sableuses à savoir la Langue de Barbarie. Pour les autres flèches, les plages associées à des cordons littoraux isolant des marigots, des dunes littorales semi-fixées ou encore des cordons sableux isolant des vasières à mangrove, la limite de végétation a été utilisée comme repère. Dans les mangroves, c'est la limite inférieure du rideau de mangrove qui a été utilisée. Les mesures ont été effectuées dans un SIG à partir des couches thématiques extraites par l'algorithme ISODATA. La résolution spatiale des images Landsat ETM+ de référence datant de 1999, 2000 et 2001 est de 28,5 m.

[36] La longueur des plages de poche et des plages adossées a été confondue avec celle des falaises qui les bordent.
[37] Nous n'avons pas réussi à délimiter les zones de contact entre les différents faciès, c'est la raison pour laquelle les linéaires côtiers concernés ont été regroupés.

Figure 31 : Répartition proportionnelle du linéaire côtier selon les types de côte recensés au sein de chacune des cinq zones identifiées du Cap Blanc au Rio Cacine.



V – CHOIX ET PRESENTATION DES SITES PRESELECTIONNES POUR LE SUIVI DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE A L'ECHELLE LOCALE

En toute logique, tous les ensembles et sous-ensembles identifiés dans l'analyse du cadre morphologique que nous avons défini devraient être étudiés à grande échelle. Cet aspect de l'étude pourra constituer une suite logique au travail entrepris dans le cadre de cette thèse, mais avant tout, il nous paraît plus judicieux de porter notre attention sur les zones où s'étendent majoritairement les côtes sableuses **(Figure 37, volume 2)**, c'est-à-dire :

- la zone 2, du Cap Timiris à la Presqu'île du Cap Vert ;
- la zone 4, de Bel Air à Joal ;
- la zone 5, du sud de Joal au Rio Cacine.

Les sites d'étude ont donc été choisis au sein de ces espaces, en fonction de leurs caractéristiques naturelles, anthropiques, de leur accessibilité, des données iconographiques existantes ou potentielles ainsi que des études antérieures les concernant. Notre première sélection, fondée sur ces critères, en particulier la typologie et les informations bibliographiques, a abouti à cibler les secteurs décrits ci-dessus.

1 – Sites présélectionnés du Cap Timiris à la Presqu'île du Cap Vert

La zone 2, du Cap Timiris à la Presqu'île du Cap Vert, présente 720 km de plages ininterrompues, connectées par une dérive littorale globalement orientée nord – sud et dont le volume de sédiments charriés décroît au fur et mesure que l'on va vers le sud. De 980 000 m^3/an au large de Nouakchott, il passe à 450 000 m^3/an aux environs de la Langue de Barbarie (BARUSSEAU, 1980 ; 1985b). Trois sites appartenant à trois catégories de plage ont été *a priori* retenus.

1.1 – Les abords de Nouakchott (Mauritanie)

Dans la catégorie des plages associées à des cordons dunaires isolant des dépressions de type sebkha, Nouakchott et ses abords ont été choisis. Ce choix s'explique entre autres son statut de site pilote au sein de l'Observatoire du littoral mauritanien. Cette structure partenaire du PRCM y dispose, sur une vingtaine de kilomètres, d'un suivi topographique régulier réalisé depuis 2004 (MARICO *et al.,* 2006). De plus, l'absence de mesures quantitatives de l'évolution du trait de côte durant la période antérieure à la construction du port et sur l'ensemble de la ville est un argument supplémentaire en faveur du choix de ce site qui constitue un cas exemplaire de perturbation d'une dynamique naturelle par des aménagements.

1.2 – La Grande Côte de Mboro-sur-mer à Fass Boye (Sénégal)

Concernant la catégorie des plages associées à des cordons dunaires isolant des niayes, nous avons sélectionné le segment côtier de Mboro-sur-mer à Fass Boye. A ce jour, il n'existe aucune mesure sur la cinématique du trait de côte au nord de Cayar. En effet, les travaux dans cette zone

sont surtout consacrés à la mesure de la progression des dunes littorales semi-fixées sur les niayes (SALL, 1973 ; 1982 ; NDIAYE, 1975 ; CISSE, 1976 ; DIAW, 1980 ; 1997), mais les informations sur la ligne de rivage sont très vagues. SALL (1982) et BARUSSEAU (1985b) supposaient que la Grande Côte était globalement en stabilité dynamique. Le rapport du PNUE/UNESCO/ONU-DAESI (1985) ainsi que BARUSSEAU *et al*. (1993 ; 1995) citant une étude de la SOGREAH dans le secteur de Mboro-sur-mer considérait que la côte était en recul. Y a-t-il une érosion, une stabilité ou une évolution trop faible pour être détectée ? C'est pour tenter de répondre à cette question que nous avons choisi cette zone où les seules implantations humaines sur le littoral se limitent aux villages de Mboro-sur-mer, Ngolgaïndé et Fass Boye.

1.3 – La Langue de Barbarie de Ndiago à Saint-Louis (frontière sénégalo-mauritanienne)

Pour les plages associées à une flèche d'estuaire, trois possibilités s'offraient à nous : la pointe de Sangomar largement étudiée, la Presqu'île aux Oiseaux, peu traitée mais écartée pour des raisons de sécurité[38] et la Langue de Barbarie. Le choix s'est finalement porté sur cette dernière, plus précisément sur le secteur allant de Ndiago à Saint-Louis. Les migrations de l'embouchure du côté sénégalais sont assez documentées du 17e siècle jusqu'aux années 1980, mais peu d'informations existent sur la partie mauritanienne et transfrontalière de la flèche, à part les travaux de GUILCHER et NICOLAS (1954) sur la dynamique morphologique de la flèche. Ce choix nous permettra également d'approfondir l'étude de NIANG-DIOP (1995) sur l'érosion côtière à Saint-Louis.

2 – Les sites présélectionnés sur la Petite côte

La zone 4 fait partie de la Petite Côte, au tracé nettement plus irrégulier que celui de la Grande Côte. D'une longueur approximative de 170 km, elle présente 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 en fait une *«côte segmentée»* avec un transit sédimentaire de seulement 25 000 m^3/an (BARUSSEAU, 1980 ; 1985b). Deux sites d'étude ont été retenus.

2.1 – La côte de Bargny à Yène-sur-mer (Sénégal)

Pour la catégorie des plages associées à des cordons littoraux isolant des marigots, le secteur de Bargny – Yène-sur-mer jouxtant une zone de forte érosion (Rufisque) a été retenu. Si l'érosion de la Baie de Gorée a fait l'objet de nombreuses études, de Rufisque à Bel Air, peu de données existent sur la zone urbanisée qui s'étend au sud de Bargny. DEMOULIN (1967) et NIANG-DIOP (1995) ont signalé une régression du littoral sans la quantifier. Nos travaux compléteront ceux effectués un peu plus au nord de Rufisque à Bel Air.

[38] La région de Casamance connaît des troubles politiques depuis le début des années 1980 (guérilla du MFDC, Mouvement des Forces Démocratiques de Casamance).

2.2 – Le littoral de Mbour à la Pointe Sarène (Sénégal)

Dans la catégorie des plages associées à des dunes littorales semi-fixées, nous avons choisi le segment de Mbour à la Pointe Sarène dans le prolongement du rivage de la ville de Mbour, affecté aussi par l'érosion côtière mais à une vitesse deux fois moindre que celle de la zone de Rufisque. C'est une unité d'aménagement touristique (SENE-DIOUF, 1993) qui, jusque là à notre connaissance, n'a pas été étudiée contrairement au secteur de Mbour à Somone (plages associées à des dunes continentales) (C.S.E., 2004).

3 – Sites présélectionnés du Saloum au Rio Cacine

Du Saloum au Rio Cacine, en zone 5, secteur susceptible de recevoir des apports sédimentaires en provenance des cours d'eau (BARUSSEAU, 1985b ; PNUE/UNESCO/ONU-DAESI, 1985) et des falaises de grès du Continental Terminal (SALL, 1982), les sites suivants ont été présélectionnés.

3.1 – La flèche de Banjul (Gambie)

Banjul a été présélectionné pour représenter les plages associées à des flèches de redan. C'est un cas intéressant car, contrairement aux «flèches sénégaliennes» (BARUSSEAU, 1980), toutes déjetées vers le sud, elle est orientée globalement ouest – est à ouest nord ouest – est sud est. Flèche presque entièrement occupée par la ville de Banjul, elle subit une forte érosion (1 à 2,5 m/an) alors qu'elle est située à l'embouchure d'un fleuve qui déverse d'importants apports sédimentaires sur la côte, comme en témoigne l'édification récente d'une deuxième flèche sur le front de celle de Banjul (BARROW, 1994).

3.2 – La «*Tourism Development Area*» (Gambie)

Le deuxième site qui a retenu notre attention est une portion de la *Tourism Development Area*[39] (CONTEH, 1994) allant de la Kotu stream au sud de Fajara à Balde Cape. De forts taux d'érosion dus à une exploitation intensive de sablières (BARROW, 1994) sont notés dans ce secteur. Contrairement à Mbour – Pointe Sarène, il jouxte des falaises qui sont aussi en érosion et, par conséquent, susceptibles de fournir du matériel aux plages environnantes.

3.3 – Le secteur au nord de Varéla (Guinée-Bissau)

Le troisième site ciblé est la zone en aval de la flèche du Cap Roxo jusqu'à Varéla. Il représente les plages associées à des cordons sableux isolant des vasières. C'est une zone en érosion faisant l'objet de projets touristiques qui, à notre connaissance, n'a pas fait l'objet de travaux concernant la cinématique littorale.

[39] Zone touristique s'étendant actuellement de Barra Point à Kartrung point, créée en 1972 pour développer le tourisme en Gambie (CONTEH, 1994)

Conclusion du chapitre II

La cartographie de la morphologie littorale de la Mauritanie à la Guinée-Bissau à partir des images satellitaires montre des littoraux sableux présentant des paysages morphologiques variés : plages adossées à des falaises de roches dures ou meubles, plages associées à des dunes continentales, des cordons littoraux ou des dunes littorales semi-fixées. Compte tenu de ce contexte morphologique et parmi les nombreuses lignes de référence proposées dans la littérature (lignes matérialisant des ruptures de pente, lignes instantanées de rivage, limites d'humectation, datums marégraphiques, limites de végétation, surface de la plage, lignes de référence virtuelles, lignes de tempête), plusieurs pistes peuvent être explorées pour le choix d'un marqueur du trait de côte dans notre secteur d'étude au vu des observations de terrain. Ainsi dans les abords du Cap Timiris, les plages bordées de grands cordons dunaires continentaux de l'Achkar et de l'Agnëtir offrent un pied et un haut que l'on peut distinguer aisément. Du sud de cette zone jusqu'à la Langue de Barbarie, le long des plages associées à des dunes littorales isolant des sebkhas ou sur la flèche sableuse de Barbarie, la végétation est très éparse et trop discontinue pour guider le positionnement d'un trait de côte. En revanche, au sud de la Langue de Barbarie, de l'embouchure du fleuve Sénégal à la Presqu'île du Cap Vert, il existe un couvert végétal assez dense constitué par une bande de filaos sur le cordon dunaire isolant les niayes de la mer. La limite de cette végétation côté mer est très nette, mais elle est trop loin du rivage pour être utilisée comme indicateur des plus hautes mers. Il s'agit de plus d'une végétation artificielle. De surcroît, la présence et le développement sur la frange côtière d'étendues de dunes vives très basses n'autorisent pas le recours aux lignes de ruptures de pente comme le pied ou le haut de dune ou encore moins d'une crête dunaire. Aussi, les crêtes de berme qui apparaissent ponctuellement sur le haut estran sont très éphémères. Finalement, le long de toute cette zone au nord de la Presqu'île du Cap Vert, les niveaux instantanés de marée et les autres limites d'humectation semblent être les seules limites utilisables comme repères pour approcher l'évolution du rivage. A cet effet, la limite d'humectation a déjà été utilisée à Saint-Louis (NIANG-DIOP, 1995) ainsi que dans la région de Dakar de Yoff à Cambérène (NIANG-DIOP, 1995 ; FALL, 2004).

Pour les plages adossées de la Presqu'île du Cap Vert, du littoral du massif de Ndiass ou de la côte gambienne, le haut de falaise et le pied de falaise sont nettement observables et ont servi d'indicateurs à SALL (1982) dans les falaises du Cap de Naze (massif de Ndiass) et de Fann (Presqu'île du Cap Vert).

Pour les autres rivages sableux artificialisés en particulier par des enrochements, la limite côté mer ou côté terre de ces structures de défense est discernable.

Sur tous les littoraux au sud de la Presqu'île du Cap Vert, les conditions climatiques sont propices au développement d'une végétation importante qui permet d'envisager l'utilisation des limites de végétation. De la même manière, le développement des dunes semi-fixées sur le front de mer rend possible l'utilisation du pied de dune ou du haut de dune comme référence en lieu et place de la limite d'humectation qui reste encore privilégiée dans de nombreuses études de cinématique côtière sur ce secteur (DIEYE, 2000 ; C.S.E., 2004 ; GUERIN, 2003 ; DABO, 2006 ; NGAMI-NTSIBA-ANDZOU, 2006 ; SY, 2007).

En fonction de la classification morphologique et de la segmentation du littoral, huit sites représentatifs des principaux types de littoraux sableux rencontrés ont été présélectionnés. Il s'agit de **Nouakchott** (plages associées à des cordons dunaires isolant des dépressions de type sebkhas), Ndiago – Saint-Louis (plages associées à une flèche d'estuaire), **Mboro–sur–mer – Fass Boye** (plages associées à des cordons dunaires isolant des dépressions de type niayes), **Bargny – Yène-sur-mer** (plages associées à des cordons littoraux isolant des marigots côtiers), **Mbour – Pointe Sarène**, la ***Tourism Development Area*** **de Fajara au Cap Bald** (plages associées à des dunes littorales semi-fixées), **Banjul** (plages associées à une flèche de redan) et **Varéla** (plages associées à des cordons sableux isolant des vasières à mangrove). Les différents marqueurs potentiels du trait de côte identifiés précédemment seront examinés plus en détail pour choisir la ligne de référence la plus adéquate dans ces sites pour l'analyse de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale en complément de l'analyse régionale.

CHAPITRE III : CINEMATIQUE DES LITTORAUX SABLEUX DE LA MAURITANIE A LA GUINEE-BISSAU : ANALYSE REGIONALE

L'analyse de l'évolution côtière à l'échelle régionale, est fondée sur l'utilisation de deux types de documents à savoir les cartes marines et des images satellitaires Landsat. Elle a été conduite suivant deux approches : une approche qualitative et une approche quantitative. L'approche qualitative consiste à repérer des indices probables d'évolution côtière à partir des éditions de 1874 et de 1929 de la carte N° 3385 concernant le littoral de l'estuaire du fleuve Sénégal à l'embouchure du Rio Cacheu. L'approche quantitative est fondée l'imagerie Landsat. La superposition des lignes de référence extraites des images MSS (1978-1979), des images TM (1986-1988) et des images ETM+ (1999-2001) a montré d'importantes variations du littoral aux embouchures des cours d'eau de l'estuaire du Sénégal au Rio Cacine. Faute de données historiques portant sur les agents de la dynamique marine régionale, nous nous focaliserons uniquement sur les aspects cinématiques.

I – LES MODIFICATIONS DU TRACE DE LA LIGNE DE RIVAGE SUR LES EDITIONS DE 1874 ET DE 1929 DE LA CARTE MARINE N° 3385 DU SHOM

Il ressort de la confrontation des traits de côte de 1829 et de 1927 extraits des deux éditions de la carte N° 3385, une certaine régularisation du tracé de la côte qui suggère une progradation au nord de la Presqu'île du Cap Vert entre Cayar et l'embouchure du fleuve Sénégal (**Figure 38, volume 2**). Ce constat est conforme aux conclusions de BARBEY (1967) qui à partir de l'analyse de récits de voyage et de cartes historiques, a relevé le comblement des irrégularités du littoral entre le 16e et le 19e siècle au nord de Cayar après l'isolement des lacs côtiers, vestiges des anciennes lagunes nouakchottiennes.

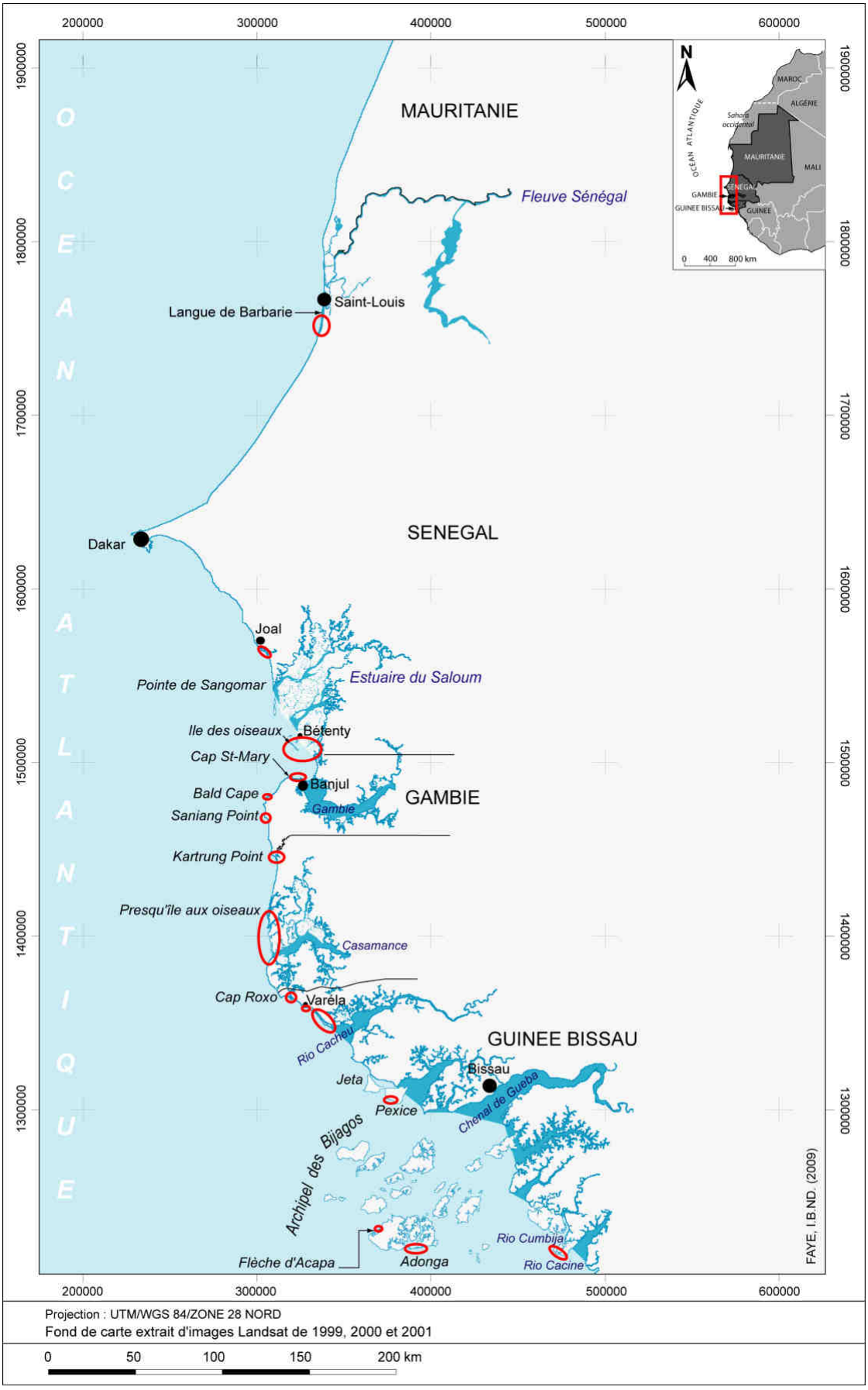
Outre cette régularisation, nous avons constaté aussi une tendance érosive dans les baies de part et d'autre de la Presqu'île du Cap Vert, à savoir les baies d'Yof et de Gorée (**Figure 38, volume 2**). Cette tendance se maintient aujourd'hui d'après les résultats des études menées dans ces deux secteurs et qui ont mis en évidence une évolution régressive de la côte (NIANG-DIOP, 1995 ; DIEYE, 2000 ; GUERIN, 2003 ; FALL, 2004 ; etc.).

Au sud de ce secteur (**Figure 39, volume 2**), du Cap Bald en Gambie jusqu'au nord de Barella en Guinée-Bissau, le trait de côte semble avoir reculé entre 1829 et 1927 exceptés dans deux secteurs où le littoral aurait tendance à progader : l'un situé au sud de la Kalissaye et l'autre au sud de la Casamance. Ces observations doivent néanmoins être considérées avec prudence car nous ne disposons pas d'études concernant l'évolution historique du littoral de ce secteur.

II – LE SUIVI DE LA CINEMATIQUE DES FLECHES SABLEUSES PAR COMPARAISON DES IMAGES LANDSAT

L'analyse de la série multi-temporelle d'images Landsat nous a permis d'apprécier les modifications ayant affecté les flèches, les cordons et les îles sableuses à l'embouchure des fleuves et autres rias du Sénégal à la Guinée-Bissau durant deux décennies, (fin des années 1970 aux années 2000) (**Figure 40**). Les segments concernés représentent au total 142 km de côte.

Figure 40 : Localisation des secteurs où une évolution significative du trait de côte a été enregistrée après superposition des lignes de référence extraites des images Landsat



1 – La Langue de Barbarie

Le suivi de la position de la ligne instantanée de rivage sur les images MSS (1979), TM (1987) et ETM+ (1999) montre une progression très importante de la pointe de la flèche caractérisée par une certaine variabilité temporelle dans les taux de progression.

Phase 1 : 1979 – 1987 (**Figure 41, volume 2**)

Sur les images MSS de 1979, la pointe de la flèche se trouvait à hauteur de la localité de Mouit (**Figure 41, volume 2**). A l'époque, un îlot sableux obstruait partiellement l'embouchure du fleuve, large de 2350 m. En 1987, cette embouchure a été entièrement colmatée et l'embouchure qui ne mesurait plus que 660 m a migré vers le sud en amont de Mboumbaye. Entre ces deux dates, la pointe de la flèche a progressé de +3846,41 m soit un rythme de +480,80 m/an. Parallèlement, le front maritime du cordon sableux situé au sud de l'embouchure a reculé de -339,5 m en moyenne soit -42,43 m/an.

Phase 2 :1987 – 1999 (**Figure 42, volume 2**)

A l'instar de la période précédente, durant ces 12 années, la progression de la pointe de la flèche s'est poursuivie vers le sud-ouest. L'embouchure de 1987 a été ainsi fermée et la pointe de la flèche s'est allongée de 7189,44 m, soit une vitesse de progression de 599,12 m/an. En 1999, une embouchure de 400 à 500 m d'envergure séparait désormais la Langue de Barbarie des dunes littorales au sud de Taré.

Synthèse des deux phases : 1979 – 1987 – 1999 (**Figure 43, volume 2**)

Pour les deux périodes d'étude, la superposition des lignes instantanées de rivage datant de 1979 – 1987 – 1999 montre une progression ininterrompue de la pointe de la Langue de Barbarie depuis 1979. Le taux moyen est passé de 480,80 m/an de 1979 à 1987 à presque 600 m/an pour la période 1987-1999 traduisant ainsi une accentuation des phénomènes de progradation. Au total, la flèche s'est allongée de 11035,86 m en 20 ans à une vitesse de 551,79 m/an.

Par rapport aux travaux antérieurs, menés sur une durée à peu près similaire, les taux obtenus pour la période 1979 – 1987 sont supérieurs aux 152 m/an rapportés par SALL (1982) établis sur la base d'un suivi de piquets-repères de 1972 à 1978. Les valeurs calculées sur des périodes plus courtes sont cependant largement supérieures aux taux que nous avons calculés. Par exemple, SY (1982) estimait la vitesse de progression de la flèche à 625 m/an à partir de l'analyse d'images Landsat MSS non rectifiées (1973 – 1977).

Il est intéressant de noter qu'en dépit du barrage de Diama construit en 1985, la Langue de Barbarie a continué de progresser alors qu'on aurait pu craindre une baisse des apports sédimentaires et par conséquent un ralentissement de la vitesse de progression. Or on observe plutôt une tendance inverse qui suppose une prépondérance des apports marins par rapport aux apports fluviaux. Les sédiments qui participent à l'allongement de la flèche proviendraient donc essentiellement de la dérive littorale.

2 – La flèche de Joal

A l'inverse de la Langue de Barbarie, la pointe de la flèche de Joal a connu une évolution contrastée, marquée par une phase d'avancée et une phase de recul.

Phase 1 : 1978 – 1988 (**Figure 44, volume 2**)

Cette décennie est caractérisée par une régression de la pointe de la flèche. Elle a perdu en moyenne 209,16 m en distance linéaire et une surface de 2,93 ha. En revanche, l'île sableuse située à 300 m au sud de la pointe a enregistré une progradation à ses deux extrémités. L'avancée de 714,66 m mesurée à la pointe sud de l'île s'est traduite par la formation d'un crochet sur une surface de 8,62 ha. Pour l'extrémité nord, la distance gagnée vers le nord-est (32,77 m) est inférieure à la marge d'erreur de 136 m et ne peut donc être considérée comme significative. On note aussi l'apparition d'un banc sableux au sud immédiat de la pointe de la flèche mais ce banc de 4,22 ha est dépourvu de végétation.

Phase 2 : 1988 – 1999 (**Figure 45, volume 2**)

Au cours de cette deuxième période, la pointe de la flèche a progressé vers le sud-est. Elle s'est étendue de 3,08 ha et sur une distance moyenne de 252,47 m (+22,95 m/an) tandis que le banc sableux au sud immédiat de la pointe a été démantelé.
Plus au sud, les deux extrémités de l'île sableuse ont continué leur progression avec un rythme de 38,64 m/an pour la pointe sud et 13,79 m/an pour la pointe nord. Le bilan surfacique total est de +4,09 ha pour ces deux zones.

Synthèse des deux phases : 1979 – 1988 – 1999 (**Figure 46, volume 2**)

Depuis 1978, l'évolution de la pointe de la flèche de Joal a alterné deux phases : une phase régressive entre 1978 et 1988 avec un taux d'érosion de -20,91 m/an et une phase de progradation entre 1988 et 1999 à un rythme de 22,95 m/an. La **figure 46** (**volume 2**) qui synthétise les résultats montre que la pointe de la flèche a repris sa position de 1978. Ainsi, sur l'ensemble de la période étudiée, la pointe semble stable en dépit d'une légère progradation de la limite de végétation sur sa partie occidentale. Toutefois, cette progression de 110 à 120 m n'est pas significative par rapport à la marge d'erreur.
Sur les deux extrémités de l'île sableuse située au sud de la pointe, la progression a été continue depuis 1978. La pointe sud a avancé à un rythme moyen de +71,46 m/an jusqu'en 1988, puis +38,64 m/an jusqu'en 1999 vers l'est, soit en moyenne +54,27 m/an. Pour l'extrémité nord, la progression n'est pas significative entre 1978 et 1988 contrairement à la période 1988 – 1999 au cours de laquelle elle a progradé de 13,79 m/an. Dans ce secteur, la progression moyenne est de 15,89 m/an depuis 1978. L'extension surfacique de l'île à ses deux pointes a été estimée à 15,74 ha.

3 – L'estuaire du Saloum

Dans cette zone, les seuls secteurs où nous avons mesuré une évolution notable de la limite de végétation entre 1979, 1986 et 2000 sont le segment côtier allant de l'embouchure du Bandiala à la pointe Buniadou et l'Ile aux Oiseaux.

Phase 1 : 1979 – 1986 (**Figure 47, volume 2**)

Concernant l'Ile aux Oiseaux, la progradation est nette à ses deux extrémités. Ainsi au nord, la pointe de l'île a progressé de 1152,83 m et au sud de 422,05 m. Dans ces deux secteurs, l'Ile a gagné 34,77 ha vers le nord-ouest et 39,65 ha vers le sud-est. Au même moment, deux petites îles sableuses se sont développées, d'une part au sud de l'Ile aux Bœufs sur 15,55 ha et, d'autre part, au nord-ouest de l'Ile aux Oiseaux sur 2,26 ha et 513,6 m de long.
De part et d'autre de l'embouchure du Bandiala, le littoral aurait tendance à progresser mais les évolutions constatées ne sont pas significatives par rapport à la marge d'erreur. Les mesures supérieures à la marge d'erreur ne se retrouvent qu'au sud de ce secteur, à la pointe Buniadou qui a enregistré une extension de 310,32 m et une accumulation de 2,04 ha depuis 1979.

Phase 2 : 1986 – 2000 (**Figure 48, volume 2**)

A la différence de la première période d'étude qui a connu une évolution positive sur l'ensemble de la zone, le littoral du secteur étudié présente quelques secteurs en érosion durant ces 14 années.
Les secteurs en érosion concernent essentiellement le sud immédiat de l'embouchure du Bandiala où la limite de végétation a reculé de -335,19 m soit -31,09 ha en surface. En dehors de cette zone, l'érosion affecte également la pointe Buniadou (-183,68 m, bilan surfacique -6,51 ha). Sur la partie septentrionale de l'Ile aux Oiseaux, le remodelage de la surface accumulée entre 1979 et 1986 s'est traduit par une érosion latérale de -247,12 m et une avancée de la pointe sur 785,12 m vers le nord-ouest. Sur la partie méridionale, l'avancée a été beaucoup plus importante +1085,12 m. L'Ile aux Oiseaux aura enregistré, au total, une perte surfacique de -14,62 ha et un gain de 68,96 ha.
Il faut noter aussi la formation d'une nouvelle île sableuse au nord-ouest de l'Ile aux Bœufs sur une longueur de 3624 m de long et 60 m de large. L'autre secteur en progradation se trouve au sud de l'embouchure du Bandiala qui présente une avancée de 165,13 m/an et un gain surfacique de 14,91 ha.

Synthèse des deux phases : 1979 – 1986 – 2000 (**Figure 49, volume 2**)

Sur les deux périodes d'étude, hormis les deux petites îles qui se sont développées au sud et au nord-ouest de l'Ile aux Bœufs, l'évolution de la position de la limite de végétation n'a été significative par rapport à la marge d'erreur qu'aux extrémités nord et sud de l'Ile aux Oiseaux. La

pointe méridionale a progressé de 1507,18 m et la pointe septentrionale de 1937,95 m. En termes de surface, l'île a gagné au total + 143,39 ha en 21 ans.
Si on compare les vitesses de progression des deux pointes de l'île sur les deux périodes d'étude, on constate un accroissement de la vitesse de progression de la pointe sud qui est passée de 60,29 m/an entre 1978 et 1986 à 77,50 m/an de 1986 à 2000. Pour la pointe nord, la situation est inverse. Le taux d'évolution est passé de 164,69 m/an dans l'intervalle 1978 – 1986 à 56,08 m/an de 1986 à 2000. Dans les autres secteurs, la comparaison entre les images MSS, TM et ETM+ donnent des valeurs d'évolution inférieures à la marge d'erreur. La tendance serait progressive au nord de l'embouchure du Bandiala, au sud de Djinack et au nord immédiat du bras de mer en bordure de cette localité. En revanche, la tendance est érosive au sud immédiat du Bandiala et de la Pointe Buniadou.

4 – Les flèches de l'embouchure de la Gambie entre Toll Point et le Cap Saint-Mary

L'évolution de la limite de végétation à l'ouest de Banjul entre 1979, 1986, 2000 est caractérisée par une érosion à la racine de la flèche ancrée sur le Cap Saint-Mary et le développement d'une deuxième flèche à l'est de Toll Point.

Phase 1 : 1979 – 1986 (**Figure 50, volume 2**)

A l'est de Toll Point, la comparaison des images MSS de 1979 et TM de 1986 montre un important développement d'une accumulation sableuse de 9,36 ha exprimée par une progression de la limite de végétation sur 302,14 m. *A contrario*, à Cape Creek, la tendance est à l'érosion de la racine de la flèche mais les valeurs mesurées tombent dans la marge d'erreur.

Phase 2 : 1986 – 2000 (**Figure 51, volume 2**)

Durant cette deuxième période, l'érosion affecte l'accumulation à l'est de Toll Point alors qu'une flèche de 1762,60 m s'est développée en amont vers l'est comme le signalait BARROW (1994). Cette flèche couvre une superficie de 24,66 ha. A l'ouest de Toll Point, à l'embouchure du bras de mer, la pointe de la flèche sableuse a reculé de 283,29 m et perdu 6,39 ha à Oyster Creek. A Cape Creek, aussi l'érosion est assez importante avec la disparition du mince cordon sableux qui s'est traduite par une régression de -384,78 m et une perte surfacique de -20,60 ha.

Synthèse des deux phases : 1979 – 1986 – 2000 (**Figure 52, volume 2**)

Sur ces 21 ans, le littoral à l'est de Toll Point a avancé de 2064, 74 m (98,32 m/an) et gagné 34,03 ha. Si entre 1979 et 1986, on y a enregistré une accumulation, cette dernière a été érodée entre 1986 et 2000 parallèlement à l'édification de la flèche sableuse.
En amont de ce secteur, la limite de végétation aurait tendance à reculer à Oyster Creek, mais sur une distance inférieure à la marge d'erreur.
A Cape Creek, l'érosion n'est pas significative entre 1979 et 1986 contrairement à la période 1986 – 2000 qui fait que sur l'ensemble de la période le littoral a reculé de 533,22 m et de 29,52 ha.

5 – La flèche de Bald Cape

A Bald Cape, sur la période 1979 – 1989 (**Figure 53, volume 2**), l'adjonction d'un nouveau crochet de 2,60 ha a allongé la flèche vers l'est de 260,91 m soit un taux moyen de 37,27 m/an. Pour la période 1989 – 2000 (**Figure 54, volume 2**), l'évolution s'est inversée : toute la surface accumulée durant la période précédente a été érodée et la pointe de la flèche a reculé de -427,03 m, soit -30,50 m/an. Les pertes en surfaces ont été estimées à 5,23 ha.
Le bilan évolutif pour les deux périodes étudiées est négatif sur la pointe de la flèche (**Figure 55, volume 2**). Le taux moyen de recul est de -13,13 m/an correspondant à une distance de -275,89 m et une superficie de 2,9 ha. D'un point de vue temporel, la flèche a alterné deux phases. Une phase de progradation entre 1979 et 1986 et une phase d'érosion sur les 14 années séparant les images TM et ETM+ de 1986 et 2000.

6 – La flèche de Saniang Point

La comparaison de la position de la limite de végétation extraite des images MSS de 1979 et TM de 1986 montre une tendance à l'érosion sur le front de la flèche. Cependant les évolutions enregistrées sont inférieures à la marge d'erreur tout comme celles de la pointe de la flèche qui n'a progressé que d'une vingtaine de mètres (**Figure 56, volume 2**). La progression de la pointe de la flèche a été beaucoup plus nette sur la période 1986 – 2000, avec une progression moyenne de +570,39 m soit une vitesse de +40,74 m/an. Durant ces quatorze années, la flèche a ainsi gagné 5,19 ha (**Figure 57, volume 2**).
Sur l'ensemble de la période étudiée (1979-2000), la pointe de la flèche a progressé à un rythme de +27,16 m/an en deux décennies. Cette progression s'est réalisée essentiellement entre 1986 et 2000 car dans la période antérieure, la progradation enregistrée est inférieure à la marge d'erreur (**Figure 58, volume 2**).

7 – La flèche Kartrung Point

C'est la forme littorale qui a enregistré l'évolution la plus importante sur le littoral gambien. Ainsi, pour la période 1979-1986 (**Figure 59, volume 2**), la pointe de la flèche a migré sur une distance de 994,63 m vers le sud-est et gagné 18,52 ha. Cette progression s'est poursuivie dans la période 1986 – 2000 avec un gain supplémentaire de 20 ha et un allongement de la flèche de 1544,29 m (**Figure 60, volume 2**).
Depuis 1979, la progression de la flèche s'est faite de manière continue mais à un rythme irrégulier. De 142,09 m/an durant la première phase (1979-1986), elle s'est réduite à 110,30 m/an durant la deuxième phase (1986-2000). Le bilan évolutif est donc largement positif et se traduit par un gain de 38,58 ha en surface et une extension de 2538,92 m linéaire (**Figure 61, volume 2**).

8 – La Presqu'île aux Oiseaux et l'embouchure de la Casamance

La mesure des écarts entre les lignes de végétation extraites des images MSS (1979), TM (1986) et EMT+ (2000) montre une tendance progressive durant la phase 1979-1986 et une situation contrastée dans la période 1986-2000.

Phase 1 : 1979 – 1986 (**Figure 62, volume 2**)

L'évolution durant ces sept années n'est significative que dans trois endroits seulement de la Presqu'île aux Oiseaux à l'embouchure de la Casamance.
Le premier secteur est le front de la Presqu'île aux Oiseaux qui a enregistré une avancée de 229,80 m soit un taux de progression de 32,82 m/an et un accroissement surfacique de 13,71 ha, alors que la pointe de la flèche n'a pas connu d'évolution significative.
Le deuxième secteur en progradation se situe au sud immédiat de l'embouchure de la Kalissaye, dont l'extrémité sud de l'embouchure a servi de point d'ancrage au développement vers le nord-est d'un cordon sableux, une petite «flèche» sur une longueur de 1661,46 m. Au sud de ce secteur et au nord immédiat de l'embouchure de la Rivière aux huîtres, le littoral aurait progradé mais les écarts mesurés sont compris dans la marge d'erreur.
Le dernier secteur présentant une évolution significative est la pointe de Nikine sur la rive sud de l'embouchure de la Casamance. La progression moyenne est de 56,29 m/an soit une extension de 394,09 m en distance linéaire et une surface de 1,84 ha.

Phase 2 : 1986 – 2000 (**Figure 63, volume 2**)

Au cours de cette deuxième période, plusieurs secteurs ont enregistré une évolution significative exprimée par une progradation de l'extrémité libre des cordons sableux et une érosion latérale du front maritime de certains d'entre eux.
Les zones en accumulation concernent surtout les petites «flèches» disséminées sur l'ensemble du secteur étudié, notamment au sud immédiat de l'embouchure de la Kalissaye (+121,97 m/an) et de l'Ebédou (+110 m/an), la pointe au nord de la Kalissaye (+48,81 m/an), la pointe Nikine (+26,64 m/an) et la pointe de la Presqu'île aux Oiseaux (+24,42 m/an). Dans les autres zones, les vitesses de progression sont moins importantes : 21,07 m/an à la pointe de Diogué, +19,13 m/an au sud de l'Ebédou, +10,20 m/an sur le front maritime de la Presqu'île aux Oiseaux et +9,77 m/an au sud immédiat de la Rivière aux huîtres. La surface accumulée dans tous ces secteurs entre 1986 et 2000 représentent au total 209,26 ha.
Les cordons sableux affectés par l'érosion intéressent l'embouchure de la Casamance (au sud-ouest de Diogué, -18,10 m/an et au nord de Nikine, -12,22 m/an) ; le sud immédiat de la Kalissaye (-13,57 m/an) et le front maritime du cordon sableux s'étirant entre l'Ebédou et la Kalissaye (-10,85 m/an). Les pertes surfaciques dans ces secteurs ont été estimées à 87,75 ha au total.

Synthèse des deux phases : 1979 – 1986 – 2000 (**Figure 64, volume 2**)

Le bilan global pour la période 1979 – 2000 met en relief quatre secteurs en érosion et sept en progradation. Outre ces sections qui présentent une évolution significative, trois autres sont probablement en accumulation. Toutefois, les évolutions constatées sont en dessous de la marge d'erreur.

Les zones érodées représentent une surface totale de 131,89 ha. Elles se situent de part et d'autre de l'embouchure de la Kalissaye et à l'entrée de la Casamance. Ainsi, le cordon sableux compris entre l'embouchure de l'Ebédou et la Kalissaye est en érosion continue depuis 1979 à un rythme moyen de 13,11 m/an érodé essentiellement entre 1986 et 2000. Toujours dans ce secteur, la racine de la flèche au sud immédiat de la Kalissaye recule de -24,03 m/an. La tendance régressive de ce segment s'est amorcée dans l'intervalle chronologique 1986 – 2000 à la suite du développement d'une petite «flèche» de 1661,46 m de long entre 1979 et 1986.

Les deux derniers secteurs en érosion sont situés de part et d'autre de l'embouchure de la Casamance. Dans ces deux zones en amont de Diogué et au nord du village de Nikine, les taux d'érosion sont respectivement de -17,19 m/an et de -14,07 m/an. L'érosion de ces segments est ininterrompue depuis 1979, mais la marge d'erreur est supérieure aux écarts enregistrés dans la période 1979-1986.

Les zones en progradation constituent une surface totale de 160,68 ha. Cette accumulation est intervenue pour l'essentiel, entre 1986 et 2000 dans la plupart des secteurs comme :

- la pointe de la Presqu'île aux Oiseaux ;
- l'extrémité sud de l'embouchure de l'Ebédou qui a servi de point d'ancrage au développement d'une petite flèche sableuse ;
- la pointe au nord de la Kalissaye ;
- la pointe de Diogué.

Les taux de progression dans ces sections de côte varient entre 15,9 et 73,36 m/an.

Dans les deux autres secteurs (sud de la Kalissaye et pointe de Nikine) qui ont enregistré une progradation ininterrompue depuis 1979, les vitesses de progression ont baissé.

En dehors de ces segments, l'embouchure de la rivière aux huîtres et le front de la pointe de la Presqu'île aux Oiseaux semblent présenter une avancée mais les valeurs d'évolution mesurées sont inférieures à la marge d'erreur.

9 – Les flèches et les extrémités libres des cordons littoraux du Cap Roxo à l'embouchure du Rio Cacheu

L'évolution de la position de la limite de végétation dans ces secteurs entre 1979, 1986 et 2000 montre des zones en érosion et en progradation concentrées essentiellement aux abords de la pointe de la flèche du Cap Roxo et le segment allant de Varéla au Rio Cacheu.

Phase 1 : 1979 – 1986 (**Figure 65, volume 2**)

Durant ces 7 années, la superposition des limites de végétation fait apparaître 5 sections de côte ayant une évolution significative : quatre en progradation et une en érosion. Un secteur supplémentaire situé à la racine de la flèche de Varéla, serait affecté par une tendance régressive, mais les écarts constatés sont inférieurs à la marge d'erreur. Le seul secteur en érosion est localisé à l'est de la pointe de la flèche du Cap Roxo avec un retrait de -226,45 m soit -32,35 m/an en distance linéaire et -9,4 ha en termes de surface.

Les secteurs en progression 55,96 ha au total intéressent les pointes des flèches du Cap Roxo, de Varéla et les extrémités libres des cordons sableux en aval de cette zone. Ce sont les flèches de Varéla et du Cap Roxo qui enregistrent les plus fortes progressions avec des taux respectifs de 173,84 m/an et de 95,50 m/an. Les embouchures des cours d'eau qui les bordent ont été déviées vers le sud-est de 1216,89 m et de 668,56 m entre 1979 et 1986. Les extrémités libres des deux cordons sableux présentent des taux de progression inférieurs à ceux des flèches avec 36,87 m/an au nord immédiat du Rio Cacheu et 87,59 m/an pour la pointe du cordon sableux qui se trouve entre ce cours d'eau et la pointe de la flèche de Varéla.

Phase 2 : 1986 – 2000 (**Figure 66, volume 2**)

Au cours de cette période, la côte du Cap Roxo à l'embouchure du Rio Cacheu présente, comme dans la période précédente, des secteurs en érosion et en progradation. Les zones en érosion concernent uniquement la flèche de Varéla en particulier ; la pointe de la flèche a régressé de 1232,45 m et la racine de 200 m environ. Les pertes de surface pour l'ensemble de la flèche ont été estimées à 71,09 ha.

Quant aux secteurs en progradation, on les retrouve au nord immédiat du Rio Cacheu où de nouveaux crochets se sont développés aux deux extrémités libres des cordons sableux qui ont progressé respectivement de 868,81 m immédiatement au nord de la ria et 688,73 m pour celui situé un peu plus au nord. Au sud de la pointe de cette flèche, le colmatage de l'embouchure du cours d'eau a entraîné une progradation du trait de côte de 259,66 m. Sur la pointe du Cap Roxo, la progression d'une vingtaine de mètres n'est pas significative par rapport à la marge d'erreur. Plus au sud de la pointe, on observe une progradation du littoral avec un taux de 11,19 m/an simultanément au démantèlement des bancs sableux accumulés entre 1979 et 1986.

Synthèse des deux phases : 1979 – 1986 – 2000 (**Figure 67, volume 2**)

Sur l'ensemble de la période étudiée, les valeurs d'évolution mesurées ne sont significatives qu'au niveau de cinq secteurs : quatre en progradation et un en érosion comme dans la période 1979-1986. Pour les secteurs en progradation, les extrémités libres des deux cordons sableux situés entre la pointe de la flèche de Varéla et l'embouchure du Rio Cacheu sont en progression continue depuis

1979. Elles enregistrent les taux les plus forts : +54,01 m/an pour le cordon au nord immédiat du Rio Cacheu et +65,74 m/an pour celui situé un peu plus au nord.
Le taux de 41 m/an calculé sur la flèche du Cap Roxo résulte essentiellement de la migration de la pointe de la flèche entre 1979 et 1986 puisque, dans la période suivante son évolution est très faible.
Le dernier secteur en progradation concerne le sud de la pointe de la flèche de Varéla qui a progressé de 303,63 m soit 14,43 m/an à la suite du recul de la pointe de la flèche entre 1986 et 2000. Cette migration vers le nord a pratiquement ramené la position de la pointe à sa situation de 1979. La surface totale accumulée est de 8,2 ha.
A l'inverse de ces phénomènes d'accumulation à l'emplacement de l'ancienne embouchure du cours d'eau isolé par le cordon sableux, la racine de la flèche a perdu une distance de 356,03 m et une superficie de 2,43 ha.

11 – Les cordons sableux sur la façade occidentale de l'île de Pexice

Dans ce secteur, nous avons mesuré une progression moyenne de 1297,63 m entre 1979 et 1988 soit un taux d'évolution de 144,18 m/an (**Figure 68, volume 2**). Cette vitesse est de à 129,14 m/an pour la période 1988 – 2001. Ce qui traduit une avancée de 1678,91 m (**Figure 69, volume 2**). Pour l'ensemble de la période d'étude, la limite de végétation a progressé de manière continue entraînant presque la jonction des cordons sableux et l'isolement des vasières à mangrove situées en arrière en 2001. L'extrémité du cordon s'est étendue de 2976,54 m et agrandie de 38,47 ha (**Figure 70, volume 2**).

12 – La flèche d'Acapa et l'île d'Adonga dans l'archipel des Bijagos

Sur la flèche d'Acapa, la pointe a avancé de 568,35 m et s'est étendue de 23,62 ha entre 1979 et 1988 (**Figure 71, volume 2**). Dans la période suivante (1988 – 2001), la tendance s'est inversée. La pointe s'est rétrécie du fait du démantèlement de sa partie orientale et seul un petit îlot sableux témoigne de l'avancée de la flèche entre 1979 et 1988 (**Figure 72, volume 2**). Néanmoins, les valeurs d'évolution mesurées ne sont pas significatives par rapport à la marge d'erreur.
La flèche aurait donc alterné deux phases si on considère l'ensemble de la période : une phase de progradation entre 1979 et 1988 suivie d'une phase érosive dans la période 1988 – 2001. En dépit de cette inversion de la tendance évolutive, le bilan est positif avec un gain de surface de 1,74 ha. La flèche s'est allongée de 501,31 m soit un taux de progression de 22,78 m/an (**Figure 73, volume 2**).

Concernant l'île d'Adonga, ses deux extrémités présentent des tendances évolutives opposées entre 1979 et 1988. Ainsi, la pointe occidentale s'est érodée de 653,91 m alors que la pointe orientale s'est étirée de 425,03 m, soit respectivement des taux de -72,63 m/an et +47,22 m/an (**Figure 74, volume 2**). Dans la période 1988 – 2001, le recul de la limite de végétation s'est poursuivi à l'ouest à un rythme de 37,67 m/an sur une distance moyenne de 489,77 m. A l'est, l'extrémité de l'île a progressé aussi, en moyenne, de 444,45 m, soit un taux de 34,18 m/an (**Figure 75, volume 2**).

Sur l'ensemble de la période, sur la façade ouest de l'île, le taux de recul est de -47,73 m/an et, sur la façade est, la progression est de 41,01 m/an. En termes de surface, l'île d'Adonga a perdu 77,52 ha à l'ouest et gagné 73,13 ha vers l'est (**Figure 76, volume 2**).
Du point de vue temporel, on note un net ralentissement de la vitesse d'évolution à l'ouest tout comme sur la façade est.

13 – La façade maritime entre le Rio Cumbija et le Rio Cacine

De 1979 à 1988 (**Figure 77, volume 2**), on observe une progradation de l'extrémité du cordon sableux au sud immédiat du Rio Cumbija mais les valeurs mesurées sont comprises dans la marge d'erreur. Au sud de ce secteur, la partie nord du cordon sableux s'est érodée à une vitesse de 26,07 m/an alors que sa partie sud a progradé de 30,21 m/an. Dans la période suivante, 1988 à 2001, seul le cordon sableux au sud du Rio Cumbija est en érosion à un taux de -11,95 m/an soit -155,41 m (**Figure 78, volume 2**).
Il ressort de l'analyse de l'évolution de la position de la limite de végétation depuis 1979, un secteur en progradation et deux autres en érosion. Cette évolution s'est produite essentiellement entre 1979 et 1988. Au total, le secteur au sud immédiat du Rio Cumbija, s'est érodé à une vitesse de -13,93 m/an et a perdu 5,94 ha alors qu'au sud de ce secteur, le littoral a gagné 40,54 ha et progressé à un rythme de 15,17 m/an (**Figure 79, volume 2**). Sur l'extrémité du cordon sableux au sud immédiat du Rio Cumbija, la tendance serait à la régression mais les évolutions mesurées sont inférieures à la marge d'erreur.

Conclusion du chapitre III

La confrontation des traits de côte des deux éditions de la carte N°3385 datant de 1829 et de 1927, met en évidence une régularisation du littoral de la Grande Côte du Sénégal de Cayar à l'embouchure du fleuve Sénégal. *A contrario,* il y aurait une tendance à l'érosion dans les baies situées de part et d'autre de la Presqu'île du Cap Vert (Baie de Gorée au sud et Baie de Yof au nord) ainsi que sur le littoral gambien du Bald Cape à la Presqu'île aux Oiseaux alors qu'au sud immédiat de l'embouchure de la Kalissaye, il y aurait un petit secteur en progradation. Dans les autres secteurs, nous n'avons pas enregistré d'évolution notable.
Basée sur le traitement d'images satellitaires Landsat de la fin des années 1970, du milieu des années 1980 et des années 2000, l'analyse régionale de la cinématique littorale a mis en relief plusieurs faits marquants relatifs aux flèches, aux cordons et îles sableuses au large des embouchures des cours d'eau de l'estuaire du Sénégal jusqu'au Rio Cacheu.

Pour les flèches sableuses, trois situations se distinguent selon les tendances évolutives observées : les flèches en progression, les flèches en érosion et les flèches relativement stables.

Les flèches en progression

Il s'agit de la Langue de Barbarie, des flèches du littoral gambien (Saniang Point, Kartrung Point), la Presqu'île aux Oiseaux, la flèche du cap Roxo à proximité de la frontière sénégalo-bissauguinéenne et de la flèche d'Acapa dans les Bijagos en Guinée-Bissau. Toutes ces flèches ont enregistré une progradation de leur pointe entre 1979 et 2001 avec une certaine disparité temporelle. La Langue de Barbarie et la flèche de Karturng point sont les seules flèches qui ont enregistré une progression continue sur l'ensemble des périodes étudiées. Toutefois, si la vitesse de progression de la flèche de Barbarie a augmenté entre les intervalles 1979-1987 et 1987-1999 en passant de 480,8 m/an à 600 m/an, celle de la flèche de Kartrung Point a suivi une tendance inverse. Sa vitesse d'évolution a diminué entre 1979-1986 et 1986-2000 en passant de 142 m/an à 110,3 m/an. Au total, la Langue de Barbarie s'est allongée de 11,03 km entre 1979 et 1999, soit une vitesse moyenne de 551,79 m/an, et la flèche de Kartrung Point de 2,5 km de 1979 à 2000, soit un taux de 120,9 m/an. A côté de ces deux flèches en progression continue depuis 1979, s'ajoutent les flèches ayant alterné une phase d'érosion et une phase de progradation comme la flèche d'Acapa en progression entre 1979 et 1988, puis en recul entre 1988 et 2000. Elle a ainsi gagné 501,31 m de 1979 à 2001. Quant à la flèche de Saniang Point et à la Presqu'île aux Oiseaux, elles sont restées relativement stables dans la période 1979-1986 alors qu'entre1986 et 2000, elles ont connu une progression très importante de +40,74 m/an et 24,42 m/an qui font que sur l'ensemble de la période, elles présentent un bilan positif respectivement de +27,16 m/an et de +18,28 m/an. Pour la flèche du Cap Roxo, la pointe a progressé de 861,03 m de 1979 à 2000. Il s'agit d'une progradation intervenue essentiellement entre 1979 et 1986 (+95,5 m/an) puisque la pointe de la flèche est restée relativement stable dans l'intervalle 1986-2000.

Les flèches en érosion

Elle concerne uniquement la flèche de Bald Cape qui a alterné une phase d'accumulation (1979 à 1986 : +37,27 m/an) et une phase d'érosion (1986-2000 : -30,50 m/an). La pointe de la flèche a régressé de -13,13 m/an sur l'ensemble de la période.

Les flèches relativement stables

Ce sont des flèches où les écarts entre le trait de côte le plus ancien et le plus récent ne sont pas significatifs par rapport au pouvoir de résolution des capteurs Landsat. Il s'agit des flèches de Joal et de Varéla. La pointe de la flèche de Joal a connu un épisode érosif (-209,16 m entre 1979 et 1988) compensé par une avancée de 252,47 m entre 1988 et 1999. *A contrario,* pour la flèche de Varéla, la partie gagnée entre 1979 et 1986 (+ 1216,89 m) a été érodée entre 1986 et 2000 (-1232,45 m) tout comme sa racine qui a été affectée par une forte érosion durant la même période (-199,33 m en 14 ans).

Pour ce qui est des pointes des îles au large des embouchures des cours d'eau, la tendance générale est à la progradation quelle que soit la période considérée pour celle au sud de Joal ainsi que pour l'île aux Oiseaux dans l'estuaire du Saloum. L'île d'Adonga dans les Bijagos présente, à l'inverse, une extrémité occidentale en érosion et une extrémité orientale en progression. A Joal, les deux extrémités nord et sud ont progressé entre 1978 et 1999 à une vitesse respective de 15,89 m/an et 54,27 m/an. Ces taux sont largement inférieurs aux taux enregistrés sur l'île aux Oiseaux qui s'est étendue de 46,14 m/an vers le nord et de 71,77 m/an vers le sud entre 1979 et 2000. Pour l'île d'Adonga, la façade orientale a progradé de 902,41 m et la façade occidentale a reculé de 1050 m de 1979 à 2001.

En ce qui concerne les cordons sableux, la tendance est à la progradation pour les extrémités libres et à l'érosion sur le front maritime. Les pointes des cordons sableux en progression sont situées :

- en Casamance (embouchure de l'Ebédou, de la Kalissaye, pointe de Diogué, pointe Nikine) avec des vitesses variant entre 35,57 et 81,31 m/an,
- au nord de l'embouchure du Rio Cacheu (54,01 m/an au nord immédiat et 65,74 m/an au nord) ;
- la façade ouest de l'île de Pexice (+135,29 m/an),
- et le sud du Rio Cumbija (+15,17 m/an).

Les cordons en érosion sont localisés à l'extrémité sud de l'embouchure de la Kalissaye, aux deux extrémités de l'embouchure de la Casamance (-17,19 m/an et -14,67 m/an de 1979 à 2000) et au sud immédiat du Rio Cumbija (-13,93 m/an de 1979 à 2001).

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

A l'échelle régionale, les cartes disponibles éditées de 1852 à 1998, présentent des échelles trop petites (du 1/294 000 au 1/1 000 000) et donc inadaptées pour une analyse quantitative de la cinématique littorale. Dans la plupart des cas, ces échelles sont très hétérogènes, ce qui constitue un obstacle majeur pour une analyse quantitative. Sur la vingtaine de cartes disponibles, seules les différentes éditions de cinq cartes offrent des échelles homogènes permettant une approche purement descriptive des modifications du tracé de la côte. Parmi cette série, deux cartes éditées en 1874 et en 1929 concernant le littoral sénégalo-gambien ainsi que le nord de la Guinée-Bissau et qui laissaient apparaître des modifications importantes du trait de côte ont été retenues à des fins d'analyse qualitative.

En plus de la vingtaine de cartes marines régionales, le littoral ouest-africain de la Mauritanie à la Guinée-Bissau est couvert par une collection de trente cinq images Landsat (MSS, TM, ETM+) enregistrées entre 1972 et 2001 et accessibles gratuitement auprès du site internet du *Global Landcover Facility*. Cependant la résolution spatiale de ces images (30 m pour les TM et ETM+ et 79 m pour MSS) est trop grossière pour mesurer l'évolution de la plupart des littoraux de notre zone d'étude. Les seules formes dont les évolutions sont compatibles avec ces résolutions décamétriques sont les flèches et les îles sableuses situées à l'embouchure des systèmes estuariens du Sénégal à la Guinée-Bissau. Le suivi de la cinématique de ces accumulations sableuses très mobiles a été rendu possible par le traitement de quatorze images Landsat (MSS, TM et ETM+) et datant de 1978 à 2001. A cet effet, deux lignes de référence ont été sélectionnées selon les secteurs d'étude. Ainsi sur la Langue de Barbarie, la ligne instantanée de rivage seule entité visible sur les images a été retenue alors que pour les autres zones, nous avons retenu la limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation. L'extraction de ces deux lignes de référence a été réalisée avec deux méthodes semi-automatiques de traitement d'image : l'équidensitométrie pour la ligne instantanée de rivage et la classification automatique par l'algorithme ISODATA pour la limite de végétation. Cet algorithme a été également utilisé pour cartographier la morphologie du trait de côte à l'échelle régionale de la Mauritanie à la Guinée-Bissau. Les résultats issus de tous ces traitements ont été vectorisés, contrôlés et corrigés au besoin.

La principale source d'incertitude concernant les lignes de référence issues du traitement des images Landsat est liée à la résolution spatiale. A cette première incertitude, les inégalités des niveaux de marées entre les lignes instantanées de rivage acquises sur la Langue de Barbarie. L'estimation de l'erreur induite par ce facteur a été effectuée en faisant le rapport entre les hauteurs de marée prédites par le SHOM au port de Saint-Louis et la tangente de la pente de la plage. L'incertitude résultante est de 14,97 m entre 1979 et 1999. En tenant compte de la taille des pixels des ortho-images (57 m pour TM, ETM+ et 79 m pour MSS), l'incertitude totale est de 207,97 m. La marge d'erreur globale est de 193 m dans le secteur de Joal (de 1979 à 1999) et de 250 m pour les systèmes estuariens au sud du Saloum (de 1979 à 2000 et 2001) du fait du recalage des images MSS.

Quant aux cartes marines, elles comportent quelques erreurs de cartographie à prendre en compte dans l'interprétation des résultats. Ces erreurs se traduisent sur l'édition de 1874 de la carte N°3385 par un tracé inexact du trait de côte entre Yène et Mbour et de Joal à l'estuaire du Saloum.

Concernant l'évolution côtière, la comparaison des traits de côte extraits de la carte N° 3385 éditée en 1874 et en 1929 avec des données datant respectivement de 1829 et 1927 suggère une régularisation du littoral du nord de Cayar jusqu'à l'embouchure du Sénégal. Cette comparaison suggère également une évolution régressive dans les baies de Yoff et de Gorée aux abords de la Presqu'île du Cap Vert ainsi que sur la portion de côte du Bald Cape à la Presqu'île aux Oiseaux alors qu'au sud immédiat de la Kalissaye en Casamance, il existerait un petit secteur en progradation.

Du point de vue de la cinématique des flèches, des cordons et des petites îles sableuses au large des embouchures des cours d'eau entre l'estuaire du Sénégal et le Rio Cacheu, les tendances évolutives varient d'un secteur à un autre.
La Langue de Barbarie à l'embouchure du Sénégal, les flèches de Saniang Point, Kartrung Point en Gambie, la Presqu'île aux Oiseaux en Casamance, celle du Cap Roxo à proximité de la frontière sénégalo-bissauguinéenne et la flèche d'Acapa dans les Bijagos en Guinée-Bissau sont en progradation dans l'intervalle 1979 – 2001. Les plus fortes progressions ont été enregistrées par la Langue de Barbarie (+11 km), la flèche de Kartrung Point (+2,5 km) et celle du Cap Roxo (+861,03 m). Les flèches d'Acapa et de Saniang Point ne se sont allongées, quant à elles, que d'un demi km environ de la fin des années 1970 aux années 2000. D'un point de vue temporel, la Langue de Barbarie et la flèche de Kartrung Point ont connu une progression ininterrompue depuis 1979, tandis que les flèches de Saniang Point et du Cap Roxo ont alterné des phases de progradation et de relative stabilité et celle d'Acapa une phase d'érosion et de progradation.

A côté des ces flèches en progression, existent des flèches en érosion comme celle de Bald Cape (-275,89 m) qui après avoir avancé de 1979 à 1986 a fortement reculé de 1986 à 2000.
D'autres flèches sont relativement stables à l'instar de la flèche de Joal dont l'érosion entre 1978 et 1988 (-209,16 m) a été compensée par une progradation entre 1988 et 1999 (+252,47 m). C'est aussi le cas de la flèche de Varéla qui a alterné une période d'avancée d'un peu plus d'un kilomètre (1979 – 1986) et une période de recul sur une distance presque équivalente (1986 et 2000).
Pour les petites îles au large des embouchures des cours d'eau, les pointes ont dans l'ensemble connu une progression depuis la fin des années 1970 : au large de Joal (+335,8 m vers le nord et +1139,77 m vers le sud), à l'île aux Oiseaux dans l'estuaire du Saloum (+968,97 m vers le nord et +1507,18 m vers le sud). Par contre, l'île d'Adonga présente une façade occidentale en érosion (-1050 m) et une façade orientale en progression (+902,41 m) de 1979 à 2001.
Les extrémités des cordons sableux isolant des vasières libres progressent dans certaines zones comme en Casamance (embouchure de l'Ebédou, de la Kalissaye, pointe de Diogué, pointe Nykine) au nord immédiat de l'embouchure du Rio Cacheu, à l'ouest de l'île de Pexice et au sud du Rio Cumbija. Dans d'autres secteurs, le front maritime de ces cordons sableux est localement affecté par

une évolution régressive. C'est le cas aux deux extrémités de l'embouchure de la Casamance et au sud immédiat du Rio Cumbija en Guinée-Bissau.

Au-delà de ces considérations cinématiques, pour notre approche à l'échelle locale, se pose de manière cruciale le problème de la longueur du linéaire côtier sableux (1892 km) et de la diversité morphologique des rivages sableux ouest-africains. Ce problème nous a amené à porter notre attention plus spécifiquement sur des sections de rivage que l'on peut supposer représentatives de la morphologie et de l'évolution générale du trait de côte régional. Sur la base de ces considérations, huit sites ont été présélectionnés pour aborder l'analyse locale de l'évolution des littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau. Dans certains secteurs, les déplacements de la ligne de rivage ne sont pas encore documentés (Mboro-sur-mer – Fass Boye, Bargny – Yène-sur-mer, Mbour – Pointe Sarène, Varéla). Les autres ont été traités sommairement par des études antérieures (Nouakchott, Saint-Louis, Banjul, la *Tourism development area* de Fajara au Cap Balde). Cette sélection initiale, représentative de la diversité des situations rencontrées tant en termes de forme que de mobilité, doit être validée par la disponibilité réelle en données notamment géospatiales permettant de décrire et d'analyser les changements.

Troisième partie : CINEMATIQUE DES LITTORAUX SABLEUX D'AFRIQUE DE L'OUEST : ANALYSE LOCALE A PARTIR DE SITES SELECTIONNES EN MAURITANIE ET AU SENEGAL

L'approche méthodologique mise en œuvre dans cette étude pour mesurer la mobilité du linéaire côtier ouest-africain à l'échelle locale s'inspire de la démarche adoptée dans de nombreuses études de cinématique littorale utilisant des données multi-sources, traitées, intégrées dans une base d'informations géographiques et exploitée par un SIG (BYRNES et HILAND, 1994 ; GORMAN *et al.*, 1998 ; MOORE, 2000 ; MORTON *et al.,* 2004 ; 2005 ; GUARIGLIA *et al.*, 2006 ; HAPKE *et al.*, 2006 ; etc.). Elle s'articule pour l'essentiel autour des phases suivantes :

- la collecte et l'évaluation des données disponibles, qui permettra de sélectionner les documents les plus à même de répondre à notre problématique et les sites sur lesquels l'analyse de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale est envisageable parmi les huit sites présélectionnés dans la deuxième partie ;
- le traitement des données et l'intégration des informations dans une base d'information géographique ;
- l'estimation des erreurs liées aux données utilisées, à la méthode et aux techniques de traitement.

Cette dernière étape constitue un prélude au dernier chapitre consacré à l'analyse de la base d'information géographique et à l'édition de cartes d'évolution du littoral à l'échelle locale.

CHAPITRE I : LES DONNEES DISPONIBLES A L'ECHELLE LOCALE

L'inventaire des données disponibles pour reconstituer l'évolution historique des littoraux sur les huit sites présélectionnés a été réalisé auprès des institutions détentrices de données iconographiques à grande échelle, en particulier les archives de l'EPSHOM à Brest, la Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques (DTGC) à Dakar, la Direction de la Cartographie et de la Topographie à Nouakchott et la Photothèque Nationale de l'IGN à Saint-Mandé. A la suite de plusieurs visites dans les trois premières structures et des correspondances avec la dernière, nous avons répertorié trois sources potentielles de données pour décrire les modifications locales des rivages sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau. Le recensement et l'évaluation de la qualité des données recensées ont permis de choisir les données les plus adéquates pour répondre à notre problématique, d'établir la liste des sites d'étude et de définir les échelles temporelles retenues pour l'analyse de l'évolution de la position du trait de côte.
Révélées par notre inventaire, ces données disponibles à l'échelle locale se répartissent donc en trois catégories : les minutes topographiques, les cartes marines de grande ou moyenne échelle et les photographies aériennes. Les **annexes 1b, 1c, 1d,** et **3** présentent tous les documents inventoriés. Nous insisterons spécialement dans les paragraphes suivants sur ceux qui se rapportent aux sites présélectionnés.

I – LES CARTES MARINES DU SHOM

Les archives de l'EPSHOM contiennent une quarantaine de cartes locales à grande et moyenne échelles intéressant des portions de côtes sableuses du littoral sénégalo-mauritanien (**Annexe 1-B)**. Elles sont éditées de 1824 à 1998 à des échelles variables (du 1/10 000 au 1/101 000). A la différence des cartes régionales, les documents cartographiques à grande échelle sont issus de sources moins hétérogènes. Ils résultent pour l'essentiel d'une seule campagne de levé hydrographique effectuée par les ingénieurs hydrographes ou les officiers du Service Hydrographique de la Marine française. Comme pour les cartes régionales, les informations fournies sur l'origine des données cartographiées ont été croisées avec les rapports établis par les chefs de mission et publiés dans les Annales Hydrographiques. Cela donne une idée de la date exacte des levés, de leur échelle ainsi que des moyens de mesure et de localisation utilisés qui sont autant d'éléments permettant d'apprécier les conditions d'élaboration des cartes ou de juger de la fiabilité des informations cartographiées et d'en tenir compte dans l'exploitation des résultats.

Le document cartographique le plus ancien parmi la quarantaine de cartes à grande échelle répertoriée aux Archives de l'EPSHOM est la carte N° 300 éditée en 1824. Elle porte sur la région du port de Dakar et a été levée en 1817 par l'Ingénieur hydrographe GIVRY. Cette carte a été rééditée plusieurs fois jusqu'à son remplacement en 1914 par la carte N°5491 issue de levés hydrographiques exécutés de 1909 à 1910 (LEBAIL, 1911).

En général, les cartes à grande échelle intéressent surtout les zones portuaires (Baie du Lévrier, Baie de Tanit, Baie de Gorée, Joal) et les embouchures des fleuves donnant accès à des ports (Sénégal, Saloum, Casamance) qui font l'objet de levés fréquents dont certains sont parfois très rapprochés dans le temps. C'est le cas, par exemple de l'estuaire du Saloum, levés douze fois entre 1838 et 1959 dont trois entre 1907 et 1914 (TROMEUR, 1946) et cinq entre 1950 et 1958 (LE FUR, 1954 ; SAUZAY, 1956 ; MANNEVY, 1959 ; BOURGOIN, 1961 ; PELUCHON, 1961). Dans une moindre mesure, on peut retenir aussi l'estuaire de la Casamance qui a fait l'objet de huit levés entre 1862 et 1958 dont quatre entre 1951 et 1958 (LE FUR, 1954 ; DONIOL, 1957 ; MANNEVY, 1959 ; BOURGOIN, 1961).

Pour les sites présélectionnés, les cartes les plus anciennes intéressent les abords de la Langue de Barbarie. L'ensemble de la flèche a été levé entre 1842 et 1850 par le capitaine de corvette DE KERHALLET. Ses travaux ont donné lieu à la publication en 1851 de la carte N°1295 [40]. Cette carte a été complétée par la carte N°1296 couvrant le cours du fleuve Sénégal de l'embouchure à Podor situé à plus de 200 km en amont. Elle fût éditée aussi en 1851 et résulte de la fusion des travaux du capitaine DE KERHALLET et du levé de 1849 du Sous-ingénieur hydrographe PLOIX. Par la suite, il a fallu attendre la fin du 19e siècle pour que le secteur soit levé de nouveau par le lieutenant de vaisseau BUCHARD en 1894. Les résultats sont parus la même année (carte N° 4892). Ce document a été réactualisé en 1928 grâce à des photographies aériennes de 1927. La dernière campagne de levé hydrographique du SHOM sur la Langue de Barbarie est la mission Agadir – Dakar effectuée dans les années 1930. Les travaux ont été exécutés en 1934 au 1/50 000 (BONNIN, 1938). Une minute topographique de la zone de Saint-Louis à l'embouchure du Sénégal a été dressée au 1/50 000 et les résultats du levé publiés en 1937 par la carte N° 5851 qui contient également un cartouche du port de Saint-Louis à l'échelle du 1/15 000.

Dans la Baie de Gorée, les premières cartes marines relatives au secteur de Bargny à Yène-sur-mer ont été éditées en 1877 avec la carte N° 35 79 et la carte N° 3592 accompagnée d'un cartouche du mouillage de Rufisque au 1/20 000. Ces deux documents nautiques sont issus des travaux du lieutenant de vaisseau BESSON entre 1875 et 1876 dans la zone de Thiaroye au Cap de Naze. La carte N° 3592 a été mise à jour à partir de photographies aériennes de 1927 pour sa réédition en 1929. Le second levé de la Baie de Gorée a été exécuté entre le 1er novembre 1935 et le 1er mars 1936 par la mission hydrographique Agadir – Dakar. Les levés ont été effectués au 1/10 000 de Thiaroye à Toubab Dialao et sont accompagnés de quatre minutes topographiques établies au 1/10 000 en partie grâce à des photographies aériennes de 1936 (BONNIN, 1938).

Après le désarmement de la mission hydrographique Agadir – Dakar, la mission hydrographique d'A.O.F.[41] a pris le relais. Constituée en 1947 pour poursuivre les travaux

[40] La deuxième édition de cette carte en 1890 comporte des erreurs de positionnement considérables signalées par un avertissement. L'erreur est de 40'' en latitudes et de 35" en longitudes d'après l'Ingénieur Hydrographe, BOUQUET DE LA GRYE (1885)

[41] Afrique Occidentale Française

hydrographiques d'avant guerre (BRIE, 1951), elle a entrepris, depuis cette date jusqu'en 1959, un levé de toute la côte sénégalaise du sud de la Somone au Saloum (BRIE, 1951 ; MANNEVY, 1953, 1959 ; LE FUR, 1954 ; SAUZAY, 1956 ; DONIOL, 1957 ; PELUCHON, 1961) et en Casamance (LE FUR, 1954 ; MANNEVY, 1959 ; BOURGOIN, 1961). D'ailleurs, la carte N°6073 couvrant la région de Mbour à la Pointe Sarène parue en 1953 provient de cette mission. Elle fût levée au 1/25 000 d'avril à septembre 1948 pour le secteur de la Somone à la Pointe Sarène (BRIE, 1951) et de janvier à juillet 1949 pour la zone de la Pointe Sarène à la Pointe Senti (MANNEVY, 1953). La carte N° 6073 a été rééditée en 1955 à la suite des travaux de l'Ingénieur hydrographe SAUZAY effectués de novembre 1953 à mars 1954 pour le segment côtier au sud de la Pointe Senti. C'est aussi à l'occasion de la mission hydrographique d'A.O.F. qu'ont été levés du 29 janvier au 24 février 1955, les abords de Nouakchott au 1/20 000 et que deux minutes topographiques du site ont été dressées à l'échelle du 1/19 925 (MANNEVY, 1959).

En ce qui concerne l'aspect technique des levés[42], le positionnement des objets s'appuyait sur un canevas géodésique local basé sur la triangulation d'un réseau de signaux en mer (balises, bouées) ou de signaux côtiers à terre (maison, particularités du paysage, arbres, signaux en madriers, etc.). Les instruments de positionnement utilisés étaient l'astrolabe (LEBAIL, 1911 ; BONNIN, 1938), le cercle hydrographique (BONNIN, 1938 ; TROMEUR, 1946), le théodolite ou le niveau de précision (BONNIN, 1938 ; DE GEFFRIER et MILLIAU, 1946 ; TROMEUR, 1946 ; BRIE, 1951 ; MANNEVY, 1953, 1959 ; LE FUR, 1954 ; SAUZAY, 1956 ; DONIOL, 1957 ; PELUCHON, 1961 ; BOURGOIN, 1961). Les mesures de profondeurs étaient effectuées exclusivement au plomb-poisson pour les levés anciens (LEBAIL, 1911 ; TROMEUR, 1946) tandis que la mission hydrographique Agadir – Dakar et la mission hydrographique d'A.O.F. ont mobilisé, en plus de ces outils, des sondeurs acoustiques (BONNIN, 1938 ; DE GEFFRIER et MILLIAU, 1946 ; TROMEUR, 1946 ; BRIE, 1951 ; MANNEVY, 1953, 1959 ; LE FUR, 1954 ; SAUZAY, 1956 ; DONIOL, 1957). Toutes les sondes sont rapportées au niveau local de la plus basse mer. Sur les cartes à grande échelle, est représenté, autant que l'échelle le permet, tout ce *«qui couvre et découvre»* pendant les basses mers, en d'autres termes, tout ce qui est compris entre le niveau de réduction des sondes et la *«laisse de hautes mers»* (MARINE IMPERIALE, 1869 ; SERVICE HYDROGRAPHIQUE DE LA MARINE, 1914 ; 1949).

La codification des détails hydrographiques et topographiques (réseau hydrographique, aménagements, morphologie du terrain, etc.) représentés sur les cartes se faisait conformément aux conventions édictées dans les *«Dispositions générales … Signes conventionnels et abréviations adoptés au dépôt des cartes et plans de la Marine»* pour les documents du 19e jusqu'aux années 1940 et l'ouvrage 1 D *«Symboles et abréviations figurant sur les cartes marines françaises»* pour les cartes plus récentes. Ces ouvrages indiquent la signification de tous les figurés conventionnels adoptés pour représenter les objets et les contours de la côte. De plus, sur les cartes, surtout les plus anciennes (19e – début 20e siècle), un système de hachures et d'estompage des niveaux de gris donne une perspective aérienne des objets et permet de figurer en élévation les éléments remarquables de la topographie littorale comme les falaises, les dunes, etc. sans oublier les amers

[42] Sont concernées uniquement les missions réalisées au 20e siècle et dont nous avons pu consulter les rapports

particulièrement utiles pour le géoréférencement des cartes. Cette représentation en perspective permet de distinguer le pied et le haut de dune ou de falaise. Ces éléments donnent à ces documents anciens un graphisme très soigné. Par exemple, sur la Langue de Barbarie, les deux éditions de la carte N°1295 et la carte N° 4892 de 1894 contiennent même un dessin de la ville de Saint-Louis, vue du large au droit du quartier de Guet Ndar et de l'embouchure du fleuve.

Le choix des cartes pour l'analyse locale de l'évolution du trait de côte sur les différents sites présélectionnés repose sur les mêmes principes que celui des cartes à petite échelle. Nous avons choisi de préférence des cartes ayant des échelles proches ou les différentes éditions d'une même carte couvrant les sites présélectionnés (Langue de Barbarie, Baie de Gorée) pour éviter les simplifications de tracés dues aux variations d'échelle (**Tableau 15**).

Tableau 15 : Documents cartographiques sélectionnés pour l'analyse de l'évolution du littoral de la Langue de Barbarie et de la Baie de Gorée

Numéro de la carte	Année d'édition	Titre	Origine des données cartographiées (zone littorale uniquement)	Extension spatiale	Echelle
3592	1877	Côte occidentale d'Afrique. Carte particulière de la Baie de Gorée	Levé en 1875 – 1876 par le lieutenant de vaisseau BESSON, à bord de la «Vénus».	14°32' – 14°45' N 17°06' – 17°26' W	1/39 900
	1929		La topographie a été corrigée en 1928 d'après les photographies aériennes prises en 1927		
5852	1939	Afrique Occidentale Française. Sénégal. Baie de Gorée	Levé exécuté de 1935 à 1937 par la mission hydrographique d'A.O.F. sous les directions de BONNIN et DE GEFFRIER, lieutenants de vaisseau et de MILLIAU, enseigne de vaisseau	14°29' – 14°46' N 17°05' – 17°31' W	1/50 000
4892	1894	Côte occidentale d'Afrique. Mouillage de Saint-Louis ou de Guet Ndar et barre du fleuve Sénégal	La topographie provient du levé fait en 1894 par le lieutenant de vaisseau BUCHARD.	15°48'–16°03' N 18°45' – 18°57' W	1/50 990
	1928	Côte ouest d'Afrique. Sénégal. Mouillage de Saint-Louis. Barre du fleuve Sénégal	En 1928, la topographie a été corrigée d'après les photographies aériennes prises en 1927		

Les cartouches et les minutes topographiques auraient pu présenter un grand intérêt mais aucun des sites présélectionnés n'est couvert par deux minutes ou deux cartouches de même échelle et de dates différentes. En outre, les minutes portant sur la Langue de Barbarie et Nouakchott sont très dépouillées et limitées uniquement au trait de côte, alors que sur la Baie de Gorée, elles datent de 1936 et ont été élaborées à partir de photographies aériennes que nous avons pu acquérir.

II – LES PHOTOGRAPHIES AERIENNES DU SHOM ET DE L'IGN

Plus d'une cinquantaine de missions photographiques datant de 1927 à 2005 et couvrant les littoraux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau a été recensée principalement aux archives de l'EPSHOM à Brest, à la DTGC de Dakar et à la Photothèque Nationale de l'IGN à Saint-Mandé (**Annexe 3**). En fonction des missions disponibles, de leur qualité, des zones couvertes, des coûts d'acquisition et des intervalles chronologiques séparant les missions photographiques, nous avons retenu, pour chaque site présélectionné, les missions qui nous permettaient de procéder à des études comparatives pour retracer l'évolution diachronique du trait de côte.

Les archives de l'EPSHOM disposent d'une trentaine de missions photographiques (**Annexe 3-A**) consacrées, en partie ou en totalité, aux côtes sableuses de Mauritanie, du Sénégal et de Gambie. Ces photographies aériennes acquises par l'aviation maritime française à des échelles diverses (du 1/5 000 au 1/20 000) s'étendent sur une soixantaine d'années de 1927 à 1988. Malheureusement leur qualité est parfois médiocre. De nombreuses prises de vue sont annotées et d'autres sont affectées par des aberrations chromatiques. On y observe entre autres, des zones surexposées, un léger voile, des rayures ou des taches jaunâtres dues aux conditions de conservation, surtout pour les photographies très anciennes (1927, 1936). Autant de facteurs qui gênent leur interprétation et sur lesquels nous reviendrons ultérieurement pour les missions sélectionnées. Cela étant, les prises de vue sont, dans l'ensemble, d'assez bonne qualité. Une fois assemblées, elles servaient de support à l'élaboration de minutes topographiques à grande échelle ainsi qu'à la cartographie ou à la mise à jour de la topographie littorale sur les cartes marines.

La couverture aérienne la plus ancienne remonte aux mois de février – mars 1927. Il s'agit de la mission photographique Agadir-Dakar conduite par l'escadrille 5 B 2 sous la direction du lieutenant de vaisseau CAMPARDON. Cette mission au 1/11 600[43] qui a servi à la mise à jour de plusieurs cartes marines comme, par exemple, les cartes N° 33 85, 4892, 3592, … couvre toute la façade maritime d'Agadir (Maroc) jusqu'à l'estuaire du Saloum (frontière sénégalo-gambienne). Le cours du Saloum a fait l'objet aussi à la même période d'une reconnaissance aérienne effectuée par le lieutenant de vaisseau CACCIA de l'estuaire à Kaolack. Cette mission faiblement contrastée, d'une qualité moyenne à médiocre, est accompagnée d'un calque de la Pointe de Sangomar. Par ailleurs, elle a été partiellement utilisée par le lieutenant de vaisseau TROMEUR pour dessiner, en 1930-1931, la topographie et les limites des bancs dans l'embouchure du Saloum. Par la suite, de nombreuses missions ponctuelles ont été exécutées à partir des années 1950 jusqu'à la fin des années 1980 par le service photographique de la base aéronavale de Bel Air (Dakar) à l'occasion des missions de levés hydrographiques de la côte ouest-africaine. Quatre des sites présélectionnés sont concernés par sept de ces missions ponctuelles.

La section de côte de Bargny à Yène-sur-mer a été couverte entièrement en février 1936 au 1/9000 environ par la mission de l'escadrille de reconnaissance 7.S.1 du porte-avion «Béarn». Cette

[43] L'échelle de la mission est variable selon les zones mais en moyenne, elle est de 1/11600

couverture aérienne a été commandée par la mission hydrographique Agadir – Dakar pour l'établissement de minutes topographiques au 1/10 000 sur tout le secteur de Mbao aux environs de Toubab Dialao (BONNIN, 1938). Néanmoins, la plupart des clichés se rapportant au secteur de Bargny à Yène-sur-mer sont peu contrastés et présentent une très grande différence d'exposition lumineuse entre le centre (surexposé) et les bords (très sombres). Il s'agit en particulier des clichés N° 17 à 20 correspondants à la zone de Bargny Guedj à Siendou.

Le deuxième site intéressé par les photographies aériennes de l'aviation maritime est la zone de Saint-Louis qui a fait l'objet de trois missions : une en janvier 1952 au 1/8 000 couvrant le port, cette couverture a été prolongée jusqu'à Gandiole en mai 1953. La dernière mission en date est celle de 1986 portant sur la zone portuaire de la ville.
Toujours en 1986, le port de Banjul a été photographié deux fois en septembre.
Le port de Nouakchott est le dernier secteur concerné par les missions ponctuelles de l'aéronavale française avec une couverture datant de 1988 et tirée à deux échelles (1/5 000 et 1/7 100). Signalons cependant que toutes ces missions sont axées avant tout sur les infrastructures portuaires et ne couvrent qu'une faible partie du littoral. Leur intérêt pour notre problématique est donc très limité.

Tout bien considéré, pour les données photographiques du SHOM, nous avons retenu la mission Agadir – Dakar comme la mission la plus ancienne pour l'ensemble des sites au Sénégal et en Mauritanie. Les tirages photographiques ont été numérisés par nos soins à 600 dpi.

A la DTGC, l'essentiel des missions photographiques disponibles sur les sites présélectionnés est un héritage des fonds de l'ancienne antenne de l'IGN installée à Dakar. Celle-ci a légué toutes ses couvertures photographiques à cette structure qui en assure la gestion et la diffusion. Notons au passage qu'il est difficile de recenser toutes les photographies aériennes existantes à la DTGC et les secteurs concernés en l'absence d'un catalogage des données photographiques disponibles. En dépit de ces difficultés, nous avons pu en dénombrer une quinzaine portant sur les segments de côte présélectionnés au Sénégal et en Gambie. Les photographies les plus anciennes dont dispose la DTGC datent de 1954 (**Annexe 3-B**). Elles sont issues de la mission A.O.F.1954, qui constitue une couverture systématique du territoire sénégalais exécutée au 1/50 000 pour l'élaboration de cartes topographiques au 1/200 000. Deux autres couvertures aériennes à petite échelle[44] (1/60 000) réalisées à des fins cartographiques sont également disponibles : une de l'IGN datant de 1978 – 1979 et une autre de 1989 effectuée par la JICA mais qui ne concerne que le littoral sénégalais entre 16 et 17°W excluant donc la côte de Bargny à Yène-sur-mer par exemple.
L'avantage des ces photographies aériennes à petite échelle est qu'elles permettent de couvrir l'étendue des segments de côte présélectionnés avec peu de clichés (en général 1 à 3) mais les détails sont estompés du fait de l'échelle d'acquisition relativement grossière.

[44] D'après PROVENCHER et DUBOIS (2007), les photographies aériennes peuvent être classées en trois catégories selon l'échelle de prise de vue : grande échelle du 1/100 au 1/10 000, moyenne échelle du 1/15 000 au 1/30 000 et petite échelle du 1/40 000 au 1/100 000.

Par ailleurs pour certaines missions, les photographies couvrant les sites présélectionnés sont introuvables aux archives de la DTGC. C'est le cas des missions de 1954, 1978-1979 pour la zone de Saint-Louis et de Mboro-sur-mer. Pour le secteur de Bargny à Yène-sur-mer, les prises de vues de 1978-1979 n'ont pas non plus été retrouvées.

D'autres missions exécutées à petite échelle (1/50 000) ont été recensées également à la DTGC. Elles couvrent entièrement les bassins versants des fleuves Sénégal et Gambie et sont l'œuvre de firmes privées américaines sur commande des organismes transnationaux gestionnaires des eaux de ces deux fleuves. Ainsi, en janvier – février 1980, la société *Teledynes Geotronics* a photographié tout le bassin du Sénégal de sa source à la Langue de Barbarie pour le compte de l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal). Outre le 1/50 000, les clichés de cette couverture photographique ont été tirés au 1/20 000 et au 1/10 000.
En 1982, à la demande de l'OMVG (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie), la firme *Mark Hurd Aerial Surveys* a couvert tout le bassin du fleuve Gambie dont l'ensemble du littoral de la frontière sénégalo-gambienne au nord à Saniang Point au sud.

En plus de ces couvertures aériennes, il existe une dizaine de missions IGN à grande échelle (du 1/5 000 au 1/25 000) sur les segments de côte présélectionnés au Sénégal à savoir :

- la zone de Saint-Louis, pour laquelle il existe trois couvertures : une en 1964 au 1/25 000 dont nous n'avons pu retrouver que deux clichés et deux autres missions en 1995 et 2005 au 1/10 000 ;
- le secteur de Bargny à Yène-sur-mer couvert par trois missions : une de 1976 au 1/15 000 et deux autres au 1/20 000, de 1980 et de 1997 ; cette dernière couverture s'arrête néanmoins à 1,5 km au nord de Yène-sur-mer ;
- le segment de Mbour à la Pointe Sarène qui est concerné par quatre missions : une de 1966 au 1/6 000, une de 1971 au 1/5 000, une de 1972 au 1/10 000 et enfin une autre de 1997. Cette dernière est la seule mission qui s'étend au-delà de la ville de Mbour et qui nous intéresse véritablement. Cependant, elle ne couvre pas la Pointe Sarène.

En définitive, après dépouillement des données photographiques recensées à la DTGC, ont été retenus dans le cadre de notre étude :

- pour la Langue de Barbarie, la mission OMVS de 1980 au 1/20 000, celle de 1989 uniquement pour les alentours de Ndiago, d'une part, et, d'autre part, afin de tirer profit des données disponibles, les prises de vues de 1964, 1980, 1995 et 2005 pour les abords de Saint-Louis ;
- pour le secteur de Mboro-sur-mer à Fass Boye, la seule mission disponible est celle de 1989 ;
- pour le segment de Bargny à Yène-sur-mer, les photographies aériennes de 1954, 1976 (qui ont été préférées aux prises de vue de 1980, d'échelle plus petite et de netteté moindre) et celles de 1997 ;

- pour la zone de Mbour à Pointe Sarène, toutes les couvertures aériennes existantes, sauf celle de 1989 en raison de son mauvais contraste ;
- pour les sites de Banjul et de la *Tourism Development Area*, les prises de vues de l'OMVG de 1982.

La DTGC ne disposant plus de laboratoire de développement fonctionnel et de tirages papiers en réserve, elle ne cède ces photographies qu'au format numérique (**Tableau 16**).

Les recherches de prises de vue aériennes des littoraux de la Mauritanie réalisées à la Direction de la Cartographie et de la Topographie à Nouakchott se sont révélées infructueuses. Néanmoins à la Photothèque Nationale de l'IGN à Saint-Mandé, cinq missions sont disponibles. Une couverture systématique du pays (mission A.O.F. 1954) au 1/50 000 et quatre autres couvertures (1963-64, 1980, 1984, 1991) concernant les abords de Nouakchott à l'échelle du 1/10 000 au 1/21 500 (**Annexe 3-C**). Toutefois, l'acquisition des tirages photographiques est soumise à l'autorisation préalable de l'ambassade de Mauritanie à Paris. Quelques images numériques de ces cinq missions de l'IGN nous ont été fournies par les responsables du PRCM en plus de prises de vues aériennes datant de 2005 réalisées par la société *Hauts-Monts* dans le cadre du schéma de développement urbain de la ville de Nouakchott. Au demeurant, ces images, d'emprise spatiale diverse, ne couvraient qu'à des degrés divers la zone allant du sud du port de pêche artisanale au sud du port de l'Amitié. Dans l'optique de compléter les photographies IGN manquantes permettant de couvrir tout le littoral nouakchottois qui nous intéressait, nous avions soumis une demande d'autorisation à l'ambassade de Mauritanie à Paris en janvier 2007. Malheureusement, notre demande est restée sans suite en dépit de multiples relances auprès des autorités diplomatiques. Nous n'utiliserons donc que les missions acquises auprès du PRCM (**Tableau 16**).

Finalement les sites de Mboro-sur-mer à Fass Boye ainsi que ceux situés en Gambie ont été exclus de l'étude faute de données suffisantes, tout comme le site de Varéla pour lequel aucune donnée n'a été acquise. Dans la littérature, on retrouve des missions intéressant ces sites mais nous n'avons pas réussi à nous les procurer. C'est le cas des photographies aériennes de 1974 au 1/35 000 (74 SEN9/350) utilisées par DIAW (1980) dans la zone de Cayar à Lompoul ainsi que celles portant sur la Langue de Barbarie utilisées par MICHEL *et al.* (1993). Pour leur étude de vulnérabilité de la côte gambienne à l'élévation du niveau marin, JALLOW *et al. (*1996) avaient employé des photographies aériennes de 1993[45] au 1/25 000. PNUE-UNESCO-ONU/DAESI (1985) mentionnent également l'existence de documents photographiques plus anciens[46] datant de 1946 au 1/30 000 et de 1972 au 1/10 000. Pour le littoral bissauguinéen, DIOP (1986, 1990) s'était appuyé sur des prises de vues datant de 1958 au 1/30 000 et de 1956 au 1/50 000. En dehors des images aériennes de Saint-Louis de 2005, toutes les prises de vue utilisées sur les autres secteurs d'étude sont en noir et blanc.

[45] Mission réalisée dans le cadre du projet *Agriculture and Natural Resources* (ANR) afin de fournir des données de base pour la gestion des ressources naturelles en Gambie.
[46] Ces documents seraient disponibles en Grande Bretagne auprès du *Directorate of Overseas Surveys* (DOS) devenu aujourd'hui l'*Ordnance Survey International*.

Tableau 16 : Missions photographiques utilisées pour l'analyse diachronique de l'évolution de la position du trait de côte aux abords de Nouakchott, Ndiago, Saint-Louis, de Bargny à Yène-sur-mer et de Mbour à la Pointe Sarène

Date d'acquisition	Références de la mission	Echelle des clichés	Numéro des clichés utilisés	Taille du pixel (m)
Nouakchott				
Février – mars 1927	Mission photographique Agadir – Dakar	1/11 600	F9 N°44 ; F9 N°46 ; F9 N°47 ; F9 N°48 ; F9 N°51 ; F9 N°53 ; F9 N°56 ; F9 N°58 ; F9 N°65 ; F9 N°66	0,49
1954	AOF 1954 – 096	1/50 000	068 ; 072	2,11
1980	80 MAU – 4 – 215	1/21 500	03 ; 05 ; 07 ; 09 ; 11	0,91
1991	1991 MAU – 12 – 150	1/15 000	03 ; 05 ; 07 ; 09 ; 11	0,63
10/05/2005	MR 05 – 01	1/15 000	B1-12 ; B1-15 ; B1-16	0,53
Abords du village de Ndiago				
Février – mars 1927	Mission photographique Agadir – Dakar	1/18 600	F13 N°56 ; F13 N°57 ; F13 N°58 ; F13 N°59 ; F13 N°60	0,49
03/02/1980	OMVS SENG 1	1/20 000	R22 L1-N°201792 ; R22 L1-N° 201793	0,63
Mars 1989	CT.SGN.JICA.MAR89	1/60 000	L5 N°000002	1,27
Abords de Saint-Louis				
Février – mars 1927	Mission photographique Agadir – Dakar	1/11 600	F13 N°12 ; F13 N°33 ; F13 N°34 ; F13 N°36 ; F13 N°38 ; F13 N°43 ; F13 N°42	0,49
1964	AO 637 / 250	1/25 000	552 ; 553	0,79
03/02/1980	OMVS SENG 1	1/20 000	R22 L1-N°201799 ; R22 L1-N°201800 ; R22 L1-N°201802 ; R22 L1-N°201803 ; R 22 L1-N°201804	0,63
22/02/1995	1995 SEN 097 / 100 IGN	1/10 000	N°38 ; N°40 ; N°42 ; N°44 ; N°46 ; N°48 ; N°50	0,31
17/11/2005	2005 – SEN183 – C – 10000	1/10 000	0082 ; 0085 ; 114 ; 117 ; 140 ; 143 ; 172	0,84
Bargny – Yène-sur-mer				
Février – mars 1927	Mission photographique Agadir – Dakar	1/11 600	F20 N°37 ; F20 N°38 ; F20 N°39 ; F20 N°40 ; F20 N°41; F20 N°42 ; F20 N°43 ; F20 N°43 ; F20 N°44 ; F20 N°45 ; F20 N°47 ; F20 N°48	0,49
1954	AOF 1954 – 078	1/50 000	22	1,05
	AOF 1954 – 079		518	
1976	76 – SEN 26 / 150	1/15 000	135 ; 155 ; 173 ; 169	0,47
12/01/1997	SEN 129 / 200 IGN	1/20 000	0075 ; 106 ; 107	0,63
Mbour – Pointe Sarène				
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

L'analyse de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale reposera donc en définitive sur quatre segments de côte (les abords de Nouakchott, le secteur de Ndiago à Saint-Louis, le segment de Bargny à Yène-sur-mer, la zone de Mbour à la Pointe Sarène) qui feront l'objet d'une présentation détaillée dans les développements ultérieurs.

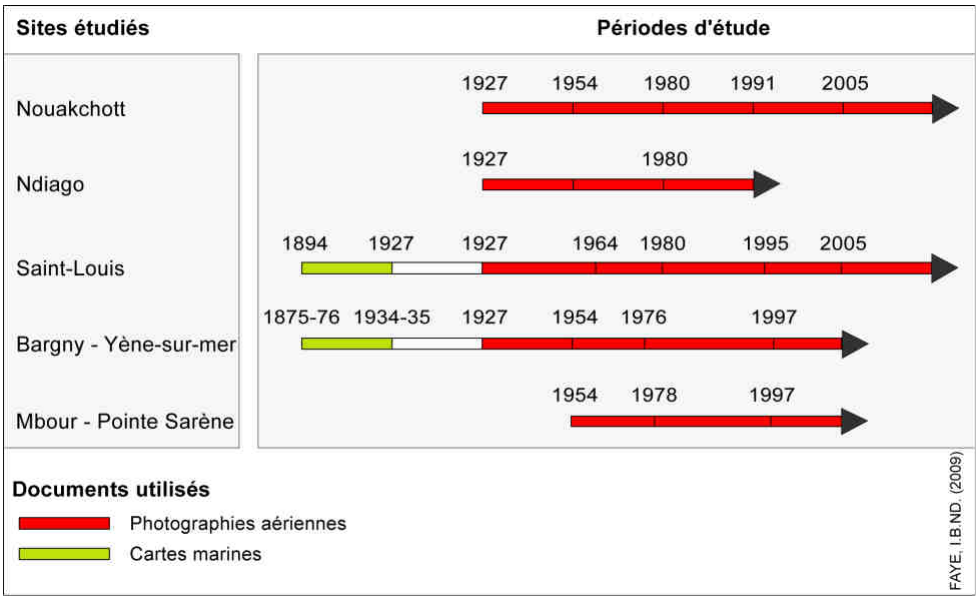
Conclusion du Chapitre I

L'inventaire des données concernant les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau fait état d'un volume considérable de documents cartographiques et photographiques dispersés dans plusieurs services, structures européennes (IGN et SHOM en France, *Ordnance Survey* en Grande Bretagne et peut-être au Portugal) et ouest-africaines (Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques à Dakar, Direction de la Topographie et de la Cartographie à Nouakchott). Malheureusement, l'examen de ces documents a conduit néanmoins à exclure la moitié des sites présélectionnés faute de données suffisantes (problème de disponibilité ou de qualité).

L'évolution spatio-temporelle de la position du trait de côte sera analysée dans ces différents secteurs avec une profondeur historique variable, conditionnée par l'ancienneté des documents collectés (**Figure 80**). Ainsi à Nouakchott, la mobilité du trait de côte sera retracée par photo-interprétation durant 78 ans de 1927 à 2005. Sur la Langue de Barbarie, les prises de vues de 1927 à 1989 offrent la possibilité de reconstituer une soixantaine d'années de cinématique littorale aux abords du village de Ndiago. Pour Saint-Louis, outre les missions de photographies aériennes exécutées entre 1927 et 2005, les cartes marines anciennes nous permettront de remonter jusqu'à 1894 et de disposer ainsi d'un intervalle chronologique de 111 ans.
A Bargny – Yène-sur-mer, les documents cartographiques et photographiques acquis couvrent une période de 121 ans de 1876 à 1997 alors que de Mbour à la Pointe Sarène, les photographies aériennes collectées s'échelonnent sur 43 ans de 1954 à 1997.

L'exploitation diachronique de l'ensemble de ces données d'échelles diverses (du 1/10 000 au 1/60 000 suivant les sites) nécessite au préalable des traitements numériques pour leur homogénéisation géométrique, leur mise en conformité et leur comparaison afin de mettre en évidence les modifications du littoral d'une année à une autre.

Figure 80 : Périodes d'étude et documents utilisés sur les sites retenus pour l'analyse locale de la cinématique littorale



CHAPITRE II : APPROCHE METHODOLOGIQUE MISE EN ŒUVRE POUR L'ETUDE DE LA CINEMATIQUE DU TRAIT DE CÔTE DANS LES SITES ETUDIES

La méthodologie utilisée dans ce travail repose sur des techniques classiques de traitement numérique de l'information géographique largement éprouvées en cinématique littorale. L'objectif de ce chapitre est de détailler, présenter la démarche méthodologique qui nous a permis d'extraire des lignes de référence à partir des documents retenus pour observer et analyser l'évolution spatio-temporelle des littoraux sableux ouest-africains à l'échelle régionale et locale. L'approche adoptée en fonction des données disponibles est fondée sur les étapes suivantes :

- sélection d'une ligne de référence adaptée au terrain d'étude et/ou aux types de documents utilisés ;
- rectification géométrique des données disponibles ;
- extraction des lignes de référence sélectionnées photo-interprétation assistée par ordinateur.

I – LES INDICATEURS SELECTIONNES POUR LE REFERENCEMENT DU TRAIT DE CÔTE

Compte tenu des nombreuses possibilités offertes par la littérature traitant des lignes de référence en géomorphologie littorale (MORTON et SPEED, 1998 ; KRAUS et ROSATI, 1997 ; BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR, 2002 ; 2003 ; ROBIN, 2002 ; BOAK et TURNER, 2005), des secteurs d'étude et des données acquises, nous avons sélectionné les indicateurs les plus adaptés à la reconstitution de la cinématique des côtes sableuses de la Mauritanie à la Guinée-Bissau.

1 – … Sur les documents cartographiques du SHOM

Comme nous l'avons souligné dans le premier chapitre de la première partie, l'utilisation des documents cartographiques anciens suppose au préalable une vérification de la cohérence de la définition du trait de côte reporté sur les cartes. Dans cette optique, deux ouvrages couvrant les dates de publication des cartes utilisées sur la Langue de Barbarie et la Baie de Gorée ont été consultés. Il s'agit des *«Dispositions générales – Signes conventionnels et abréviations adoptés au Dépôt des cartes et plans de la Marine pour les cartes et les plans hydrographiques»* édition de 1869 et des *«Dispositions Générales relatives aux cartes et plans de l'hydrographie française – Signes conventionnels et abréviations»* édition de 1914[47]. Dans ces publications du SHOM, il est précisé que le trait de côte représenté sur les cartes nautiques à grande échelle correspond à la *«laisse de haute mer»*. Il est figuré sur les côtes sableuses par un trait fin et continu lorsque son tracé est certifié et par un trait discontinu s'il a été positionné approximativement. Toutefois, aucune indication n'est donnée sur la nature de la *«haute mer»* de référence. S'agit-il d'une pleine mer moyenne, de vive-eau, de

[47] Toute carte publiée à une date postérieure à la date d'édition des *«Dispositions générales»* est exécutée selon les conventions édictées dans cet ouvrage.

vive-eau exceptionnelle, de morte-eau, etc.? Cette imprécision fait qu'il est très difficile de s'assurer que le trait de côte a été défini d'une manière identique d'une carte à l'autre.

Nous avons recherché par ailleurs des précisions supplémentaires sur la nature du trait de côte cartographié en consultant les «Annales hydrographiques» où sont publiés les rapports de mission des levés hydrographiques. Cependant, là aussi, le flou persiste car les hydrographes ne précisent pas toujours ce qui a été levé pour matérialiser le trait de côte. Les indications restent très vagues à ce sujet en ce qui concerne notre secteur d'étude, d'autant plus, que dans certaines zones, comme les littoraux désertiques et semi-désertiques du Cap Timiris au Cap Vert, le front de mer est dépourvu de végétation et est occupé par des dunes vives peu élevées. Ainsi par exemple, BONNIN (1938) notait que *«toute la côte étant monotone et nue, … la mesure des distances des signaux côtiers à la plage a permis de tracer exactement le trait de côte»* sans plus de précisions. La même remarque a été relevée par MANNEVY (1958) dans les environs de Nouakchott où il soulignait dans son rapport que *«la côte étant à peu près rectiligne dans la partie étudiée et composée uniformément de dunes toutes semblables, on a tout simplement défini la laisse de pleine mer par mesure de distance au droit de chaque signal»*. Pour les levés anciens concernant la Langue de Barbarie (1894) et la Baie de Gorée (1875-1876), aucune indication n'est fournie sur la nature des indicateurs utilisés comme trait de côte. Dans ces conditions, soit on admet que le trait de côte a été défini de manière identique sur les cartes, soit on recherche d'autres marqueurs, c'est-à-dire d'autres objets présents sur les cartes et pouvant servir de référence (végétation ou dunes par exemple). A cet égard, l'examen des deux éditions de la carte N° 4892 portant sur la Langue de Barbarie permet de faire deux constats. Sur l'édition de 1894, les dunes littorales sont représentées avec un système de hachures permettant de distinguer la limite du front dunaire et la ligne censée représenter la *«laisse de haute mer»*. En revanche sur l'édition de 1928, le graphisme a été simplifié et ne figure plus que le trait de côte. Nous avons donc digitalisé dans ce secteur, le trait de côte tel qu'il a été matérialisé sur les documents cartographiques en supposant que sa définition est la même sur les cartes. Sur les éditions de 1877 et de 1929 de la carte N° 3592 ainsi que l'édition de 1939 de la carte N° 5852 de la Baie de Gorée, deux lignes sont représentées : d'une part, le trait de côte matérialisant peut-être la limite supérieure de l'estran et, d'autre part, le niveau de réduction des sondes. Ce zéro correspondant au niveau des *«plus basses mers»* était déterminé en concordance avec la marée observée à Dakar sur la base de calculs et d'observations du niveau des marées à Rufisque. En l'absence d'informations concernant les indicateurs utilisés pour la définition du trait de côte d'une date à une autre, le niveau de réduction des sondes semble être la ligne de référence la mieux indiquée, d'autant plus qu'on a affaire à des cartes bathymétriques dont le principal objectif est de représenter au niveau de la côte et, en fonction de l'échelle, tout *«ce qui couvre et découvre»* durant les basses mers (MARINE IMPERIALE, 1869 ; SERVICE HYDROGRAPHIQUE DE LA MARINE, 1914). Le zéro des cartes a donc servi de marqueur pour mesurer l'évolution du littoral entre 1875-1876 et 1935-1936. Nous avons quand même digitalisé en plus de cette ligne, le *«trait de côte»* pour avoir uniquement des données comparatives et vérifier les tendances enregistrées avec le zéro hydrographique.

2 – … Sur les images aériennes

Les observations de terrain effectuées lors de nos excursions sur les sites d'étude au Sénégal et en Mauritanie, l'échelle ainsi que la qualité des photographies aériennes nous ont permis de définir la ligne de référence la plus pertinente dans les secteurs de Nouakchott, de la Langue de Barbarie, de Bargny à Yène-sur-mer et de Mbour à la Pointe Sarène.

Pour le secteur de Nouakchott, sur les images aériennes de 1927, trois entités sont identifiables : la ligne instantanée de rivage, la ligne des pleines mers précédant les prises de vue symbolisée par la limite supérieure d'humectation de l'estran en amont de la zone de saturation d'eau et le pied de dune qui représente la limite du front dunaire, matérialisée par une rupture de pente en avant de la limite de végétation dunaire. Ces deux derniers traits sont visibles sur les images de 1954, contrairement à la ligne de pleines mers qui se confond avec la ligne instantanée de rivage du fait de l'échelle de prise de vue. Sur les photographies aériennes de 1980, ces trois lignes peuvent être individualisées alors que sur les images de 1991 et 2005, seules la ligne instantanée de rivage et la ligne de pleines mers sont discernables. Le contact entre la plage et la dune est difficilement exploitable sur ces images en l'absence d'une nette rupture de pente.

En définitive, la ligne instantanée de rivage est la seule ligne de référence présente sur toutes les images. Elle n'est cependant pas utilisable car aucune information n'est disponible sur les dates et heures des prises de vue et les hauteurs de marées correspondantes pour pouvoir effectuer les corrections nécessaires. Dans ces conditions, choisir une seule ligne comme le pied de dune ou la ligne de pleines mers implique l'exclusion de certaines images à savoir 1954 pour la ligne de pleines mers, 1991 et 2005 pour le pied de dune. Rappelons qu'en choisissant ce site, notre objectif était de retracer son évolution durant la période antérieure à la construction du port et de réactualiser, au passage, les données d'évolution disponibles sur l'ensemble du linéaire côtier de la ville depuis la fin des années 1980. Sur cette base, pour exploiter toutes les données disponibles et répondre à nos objectifs, deux lignes de référence ont été retenues pour les deux périodes d'étude. Ainsi, le pied de dune a été utilisé pour positionner et mesurer l'évolution du site de 1927 à 1980 (**Photo 22**). Pour la réactualisation des taux d'évolution après l'aménagement du port, la seule alternative possible est de retenir la ligne des pleines mers précédant la prise de vue que l'on peut distinguer sur les images de 1980, 1991 et 2005 (**Photo 23**). Comme elle est visible également sur les images de 1927, nous proposerons une nouvelle synthèse de son évolution de 1927 à 2005. Toutefois, à l'instar de la ligne instantanée de rivage, la position de cette limite sur la plage reste également dépendante de la marée, des conditions météo-marines et de la pente de la plage. Nous verrons néanmoins dans un paragraphe ultérieur comment la méthode que nous avons mise en œuvre a permis d'évaluer les différences de hauteurs d'eau entre une pleine mer de vive-eau et de morte-eau et, par-là même, d'estimer, en fonction de la pente de la plage, les marges d'erreur en matière de positionnement de la limite supérieure d'humectation de l'estran.

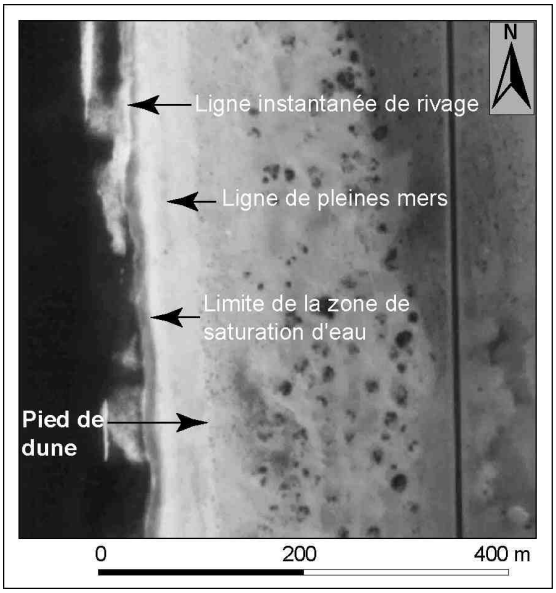


Photo 22 : Aperçu du pied de dune, de la ligne instantanée de rivage et de la ligne de pleines mers à Nouakchott (Extrait d'une photographie aérienne, mission IGN 80 MAU-4-215, 1980, cliché n°9)

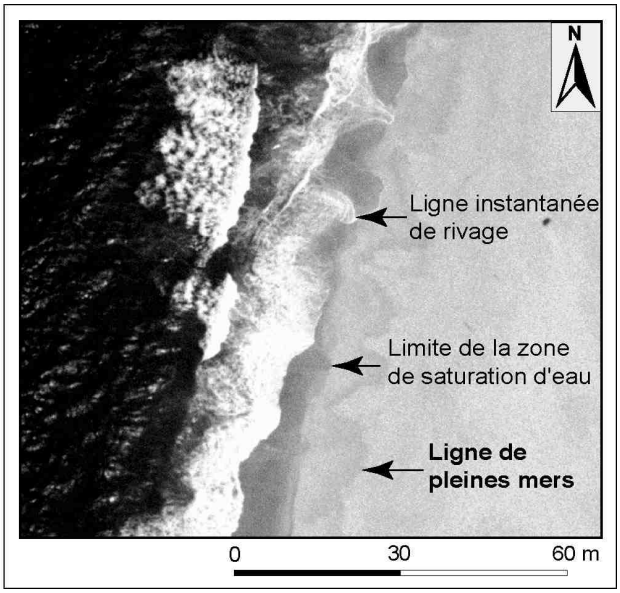


Photo 23 : Aperçu de la ligne de pleines mers et de la ligne instantanée de rivage à Nouakchott (Extrait d'une photographie aérienne, Société Hauts Monts, mission MR 05-01, cliché n°B1-15)

Sur la Langue de Barbarie, les seules lignes de référence visibles sur les images aériennes couvrant le littoral de Ndiago (1927, 1980) et de Saint-Louis (1927, 1964, 1980, 1995 et 2005) sont la ligne instantanée de rivage et la limite supérieure d'humectation de l'estran qui n'est toutefois pas visible sur les vues aériennes de 1989[48] de la zone de Ndiago. Comme sur les images du site précédent, les données relatives aux dates et heures de prises de vue ne sont pas disponibles pour pouvoir filtrer les effets de la marée. Il existe un couvert végétal un peu fourni dans les dunes au sud de Saint-Louis mais il ne concerne que l'extrémité des missions de 1927, 1980 et 1995. Au final, la limite supérieure d'humectation de l'estran a été utilisée dans ces deux localités (**Photo 24** et **25**). La marge d'erreur inhérente à l'utilisation de cette ligne a été estimée avec une méthodologie identique à celle utilisée pour le site de Nouakchott.

[48] C'est en raison d'une échelle inadaptée pour la détection de la ligne de pleines mers que la mission de 1989 concernant les environs de Ndiago a été utilisée uniquement comme image de référence pour redresser les images antérieures de ce site.

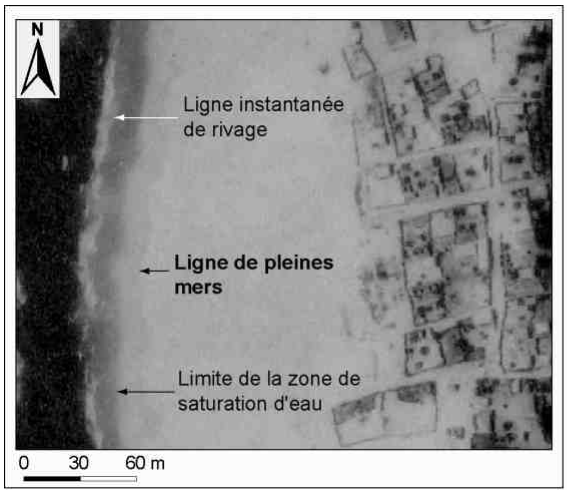


Photo 24 : Aperçu de la ligne de pleines mers et de la ligne instantanée de rivage à Ndiago (Extrait d'une photographie aérienne, mission OMVS, SENG1, 1980, cliché n° 201792, R22-L1).

Photo 25 : Aperçu de la ligne de pleines mers et de la ligne instantanée de rivage à Saint-Louis (Extrait d'une photographie aérienne, mission IGN, 2005-SEN 183-C-10000, cliché n° 143).

Pour le site de Bargny – Yène-sur-mer, sur les images aériennes disponibles (1927, 1936, 1954, 1976, 1997), deux à trois lignes de référence sont visibles : la limite supérieure de la plage et la ligne instantanée de rivage. S'y ajoute la limite supérieure d'humectation de l'estran, sauf sur les images de 1954 acquises au 50 000e. Par ailleurs, sur les autres images aériennes (1927, 1936, 1976, 1997), cette ligne est localement masquée par le *beach-rock* présent dans certaines zones comme Bargny Miname ou, un peu plus au sud, vers Siendou. Aucune information n'étant disponible sur les dates et pente de la plage pour estimer la marge d'erreur des niveaux instantanés de marée, la limite supérieure de la plage a été utilisée. Elle est matérialisée par une limite de végétation (**Photo 26**) sur les images datant de 1927, 1936 et 1954, alors que sur les images de 1976 et 1997, elle est assimilable localement à la limite des maisons, le plus souvent des résidences secondaires ou des installations touristiques atteintes par les vagues à haute mer (**Photo 27** et **28**).

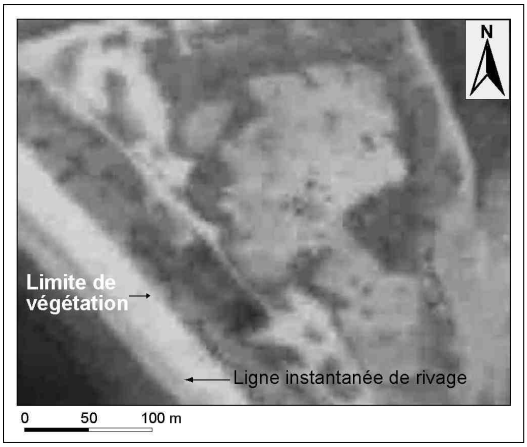


Photo 26 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite de végétation au sud de Siendou (Extrait d'une photographie aérienne, mission IGN, AOF 1954-978, cliché n° 22).

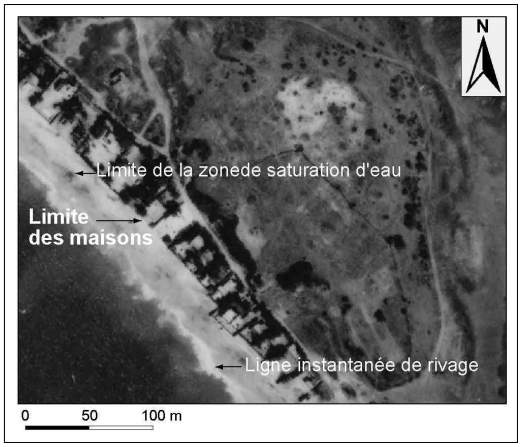


Photo 27 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite des maisons au sud de Siendou (Extrait d'une photographie aérienne, mission SEN 129/200 IGN 1997, cliché n° 106).

Photo 28 : Résidences secondaires battues par les vagues à marée haute. Dans ces secteurs, la ligne de référence assimilée au pied des maisons est artificielle. Photo prise dans la zone de la photo 27 au sud de Siendou en direction du nord, le 05-08-2007.

Pour le secteur de Mbour à la Pointe Sarène, les images de 1954 et 1978 permettent d'individualiser deux lignes : 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 Mbour à la Pointe Sarène 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 sur les images de 1954 et de 1978 (**Photo 29**) et partiellement sur les images de 1997. Comme dans le secteur de Bargny à Yène-sur-mer, sur les images de 1997, la plage est délimitée localement par des maisons ayant les pieds dans l'eau à marée haute (**Photo 30** et **31**).

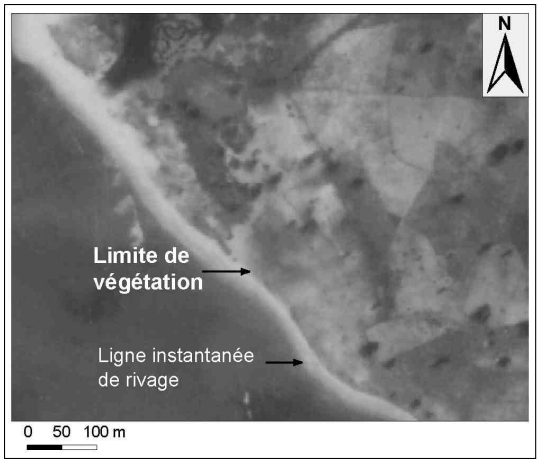


Photo 29 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite de végétation au droit de Warang (Extrait d'une photographie aérienne, mission IGN 78.ND28-XIII-XV/600, cliché n°163)

Photo 30 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite des maisons au droit de Warang (Extrait d'une photographie aérienne, mission SEN 142/200 IGN, 1997, cliché n°15)

Photo 31 : Campement touristique sur pilotis. Photo prise à Warang dans la zone de la photo 30 en direction du nord, le 03-08-2007.

II – LE TRAITEMENT DES DONNEES CARTOGRAPHIQUES ET DES IMAGES AERIENNES

Le protocole de traitement appliqué varie suivant les types de données mobilisés. Toutefois d'une manière générale, les cartes et les images disponibles sont géoréférencées dans un même datum (le WGS84) et dans un système de projection unique (l'UTM, Zone 28 Nord) avant l'extraction semi-automatique ou manuelle de la ligne de référence.

1 – Les cartes du SHOM

Le traitement des cartes marines à petite et grande échelles a été réalisé sur une table à digitaliser pilotée par le progiciel *ArcInfo*®. La procédure permettant l'acquisition de couches vectorielles (linéaires côtiers et occupation des sols) est résumée dans la **figure 81** (**volume 2**). Elle s'articule principalement autour des étapes suivantes :

1 - fixation de la carte à numériser sur la table, à l'intérieur du plan de travail, en veillant à ce que le document soit bien tendu et en évitant toute pliure ou toute ondulation du papier ;

2 - sélection, numérotation et enregistrement des coordonnées cartographiques des points de calage qui sont digitalisés ensuite dans leur ordre de numérotation. D'habitude, il est conseillé d'utiliser les croisillons ou les croisements du carroyage géographique (CROWELL *et al.*, 1991 ; EVENDEN, 1991 ; THIELER et DANFORTH, 1994b). Cette méthode s'est avérée peu satisfaisante ici dans la mesure où les cartes marines que nous avons utilisées sont élaborées dans des systèmes géodésiques locaux qui peuvent différer d'une carte à une autre, même si la projection reste identique. Nous avons donc plutôt choisi des amers communs aux différentes

cartes (forts, phares, feux et mâts essentiellement). Quatre points suffisent pour transformer les coordonnées «table» en coordonnées cartographiques (EVENDEN, 1991 ; THIELER et DANFORTH, 1994b ; LANGLEY *et al.,* 2003) ;

3 - numérisation des points de calage sélectionnés, de la *«laisse de haute mer»*, du zéro hydrographique et des éléments remarquables (dunes, habitations, hydrographie, etc.).

Après la digitalisation, les couches sont importées sous *Arcedit*® pour leur géoréférencement dans le système de projection UTM. Le passage des coordonnées cartésiennes obtenues à partir de la digitalisation aux coordonnées métriques UTM nécessite au préalable la conversion des coordonnées des points de calage de la carte exprimées en degrés, minutes, secondes en degrés décimaux[49]. L'autre opération indispensable est la mise à jour des coordonnées des longitudes des cartes anciennes. En effet, la carte N° 4892 éditée en 1894 sur la Langue de Barbarie et la carte N° 3592 de 1877 de la Baie de Gorée utilisent le méridien de Paris comme origine. Il faut donc soustraire 2°20'14,045'' aux longitudes des points de calage pour obtenir les coordonnées par rapport au méridien de Greenwich, origine des cartes éditées en 1928 et 1939. Les couvertures sont projetées d'abord en coordonnées géographiques (latitudes et longitudes exprimées en degrés décimaux) puis en UTM/WGS84 Zone 28 Nord en appliquant une fonction affine (translation, rotation, mise à l'échelle). A l'issue de l'opération de géoréférencement, le logiciel génère un rapport qui indique tous les paramètres utilisés pour le calcul des nouvelles coordonnées et l'erreur moyenne quadratique (*Root Mean Square*, RMS error) résultant de l'ajustement entre les coordonnées «tables» et les coordonnées UTM. L'erreur RMS est exprimée en unités «cartes» (pouces) et en unités réelles (m). Une erreur RMS trop grande génère un mauvais ajustement des objets numérisés à partir de cartes diachrones (**Figure 81, volume 2**). Dans ce cas, la procédure est réitérée jusqu'à ce que l'erreur quadratique moyenne autorise une superposition acceptable d'une série diachronique (**Figure 81, volume 2**).

2 – Les images aériennes

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 de rechercher un modèle de déformation permettant de corriger ces défauts et de mettre en conformité les images[50]. Cette opération autorise des mesures précises et conditionne la qualité des résultats ; c'est la raison pour laquelle nous y insisterons d'abord avant d'exposer ensuite la procédure d'interprétation et de numérisation des lignes de référence sélectionnées dans les sites de Nouakchott, Ndiago, Saint-Louis, Bagny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène.

[49] Le calcul se fait selon la formule suivante : degrés + (minutes/60) + (secondes/3600)
[50] Pour rappel, toutes les photographies aériennes utilisées ont été acquises en format numérique.

2.1 – La rectification des images

Plusieurs méthodes de corrections géométriques sont rapportées dans la littérature, qu'il s'agisse d'images satellitaires uniquement (DE LEEUW *et al.,* 1988 ; BANNARI *et al.,*1995 ; ROBIN, 1995 ; MATHER, 1999 ; CALOZ et COLLET, 2001 ; THAO et HU, 2001 ; TOUTIN, 2004) et/ou d'images aériennes (NOVAK, 1992). La transformation des coordonnées des pixels de l'image non redressée à l'image rectifiée se fait soit par des modèles approximatifs à partir de points d'appui, sans considération des caractéristiques techniques du système de prise de vue ou du relief du terrain photographié, soit par des modèles plus sophistiqués qui intègrent tous ces paramètres pour produire des ortho-images. Ces deux modèles font aussi appel à des techniques d'interpolation radiométrique qui interpolent la radiométrie du nouveau pixel de l'image redressée par un rééchantillonnage à partir de la radiométrie soit du pixel le plus proche dans l'image originale (technique du plus proche voisin), soit des quatre pixels les plus proches (méthode bilinéaire) ou des seize pixels les plus proches (convolution cubique).

Ces trois méthodes d'interpolation radiométriques sont intégrées dans le module de redressement du logiciel ENVI 4.2 à notre disposition. Il propose quatre approches pour rectifier une image :

- la méthode RST *(Rotation, Scaling and Translation)* correspond à une correction polynomiale classique de premier degré. Elle ne déforme pas les images et s'opère à partir d'un minimum de trois points de calage ;
- la transformation polynomiale de premier ou de second degré en fonction du nombre de points de calage disponibles. Dans les modèles polynomiaux classiques, il en faut au minimum 3 pour le premier degré et 6 pour le second degré. Toutefois, les algorithmes de redressement polynomial implémentés dans *ENVI 4.2* ne sont pas des algorithmes standards. Il est précisé dans l'aide du logiciel qu'il faut saisir au minimum un nombre de points supérieur à (degré + 1)^2, soit 4 pour une correction polynomiale de premier ordre et 9 pour le second ordre afin que la transformation puisse être réalisée correctement ;
- la triangulation de DELAUNAY construit un réseau de triangles reliant les points de calage et applique ensuite un modèle de déformation aux pixels situés à l'intérieur des triangles ;
- l'orthorectification requiert, en plus des points de calage, la focale de l'appareil de prise de vue, la position des marques fiduciaires des images et un modèle numérique de terrain de la zone concernée.

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. Cette méthode approximative en deux dimensions est bien adaptée aux reliefs plats (BANNARI *et al.,*1995 ; MATHER, 1999 ; CALOZ et COLLET, 2001) et sera donc retenue, d'autant plus que les altitudes dans les sites étudiés sont comprises entre 0 et 7 m.

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, **Figure 82**). Puis, les images anciennes ont été calées sur les images récentes rectifiées (correction image à image, **Figure 83**).

Pour redresser les images de «référence», les coordonnées de points d'amers (point central de carrefour, angles de trottoirs, de clôtures, de propriétés, épaves de bateau, etc.) aisément repérables sur les images les plus récentes de chaque site ont été collectées sur le terrain au moyen d'un GPS (MLR®, modèle SP24 XC). Afin de faciliter cette opération, les images de référence ont été imprimées et ont servi de guide sur le terrain pour retrouver les amers sélectionnés. De plus, un carnet de notes permettait de décrire les caractéristiques précises de l'amer et la position exacte du récepteur pour éviter les erreurs de pointé au moment du géoréférencement au bureau. L'enregistrement des coordonnées du point se faisait après environ un quart d'heure à une vingtaine de minutes d'acquisition, une fois que la position affichée par le récepteur s'était stabilisée sur une valeur donnée. Durant ce laps de temps, le modèle de GPS utilisé offre la possibilité de vérifier des paramètres déterminants dans la précision des positions enregistrées. Il s'agit du nombre de satellites dont les signaux sont reçus par le récepteur, de leur position dans le ciel, l'espace, de l'intensité du signal émis, de la DOP *(Dilution of Precision)* et de l'ECP (Erreur Circulaire Probable[51]) correspondante. Ces deux derniers paramètres sont exprimés en mètres et dépendent du nombre et de la géométrie de la constellation des satellites par rapport au récepteur. Si les satellites sont concentrés, la DOP ainsi que l'ECP sont très élevées et la précision est mauvaise. En revanche, si les satellites sont éloignés les uns des autres avec une répartition homogène, la DOP et l'ECP sont faibles, ce qui est synonyme d'une bonne précision. Lors de l'acquisition de nos points de calage, la DOP variait de 1,1 à 1,5 et l'ECP de 1,9 à 2,8 m.

12 à 43 points de calage ont été saisis par image pour la rectification avec un modèle polynomial du second degré et un rééchantillonnage des pixels selon la méthode du plus proche voisin pour préserver la radiométrie des images originales. La résolution de sortie a été fixée en faisant la moyenne de la taille des pixels des images originales. Cela nous permettait de ne pas trop dégrader les images originales et d'obtenir une bonne résolution spatiale[52].

Durant la saisie des points de calage, il convient de minimiser autant que possible l'erreur quadratique moyenne (EMQ ou *RMS error*) qui indique l'imprécision du modèle de transformation. Cette erreur est calculée par le logiciel à partir des erreurs en X et Y dès la saisie du cinquième point. Il constitue un premier indicateur de la qualité du modèle de déformation à appliquer à l'image à redresser. De manière à 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,

[51] L'ECP désigne le rayon du cercle contenant 50% des positions calculées par le récepteur.
[52] Taille des pixels : Nouakchott, 0,9 m ; Ndiago, 0,8 m ; Saint-Louis, 0,6 m ; Bargny – Yène-sur-mer, 0,7 m ; Mbour – Pointe Sarène, 1 m

aménagements, ou tout autre élément remarquable). En cas de décalages (**Figure 84, volume 2**), des points de calage sont ajoutés ou supprimés s'ils présentent une erreur RMS trop élevée. Dans la plupart des cas, une simple RST suffit pour obtenir une superposition satisfaisante des images afin de les assembler et extraire les lignes de référence.

Figure 82 : Géoréférencement des images de référence sous *Envi 4.2.* L'opération consiste à saisir manuellement les coordonnées des points GPS et à appliquer un modèle de correction polynomiale de second degré

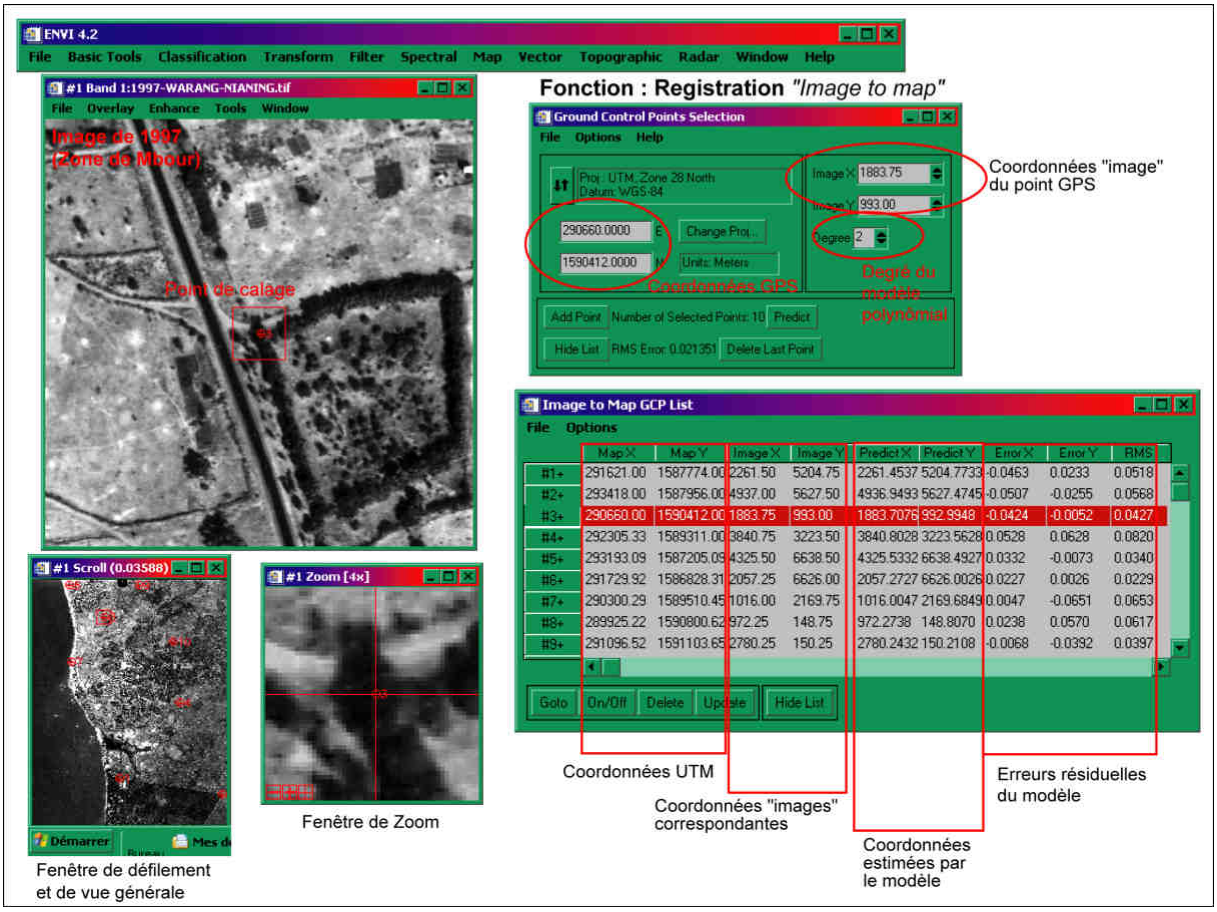
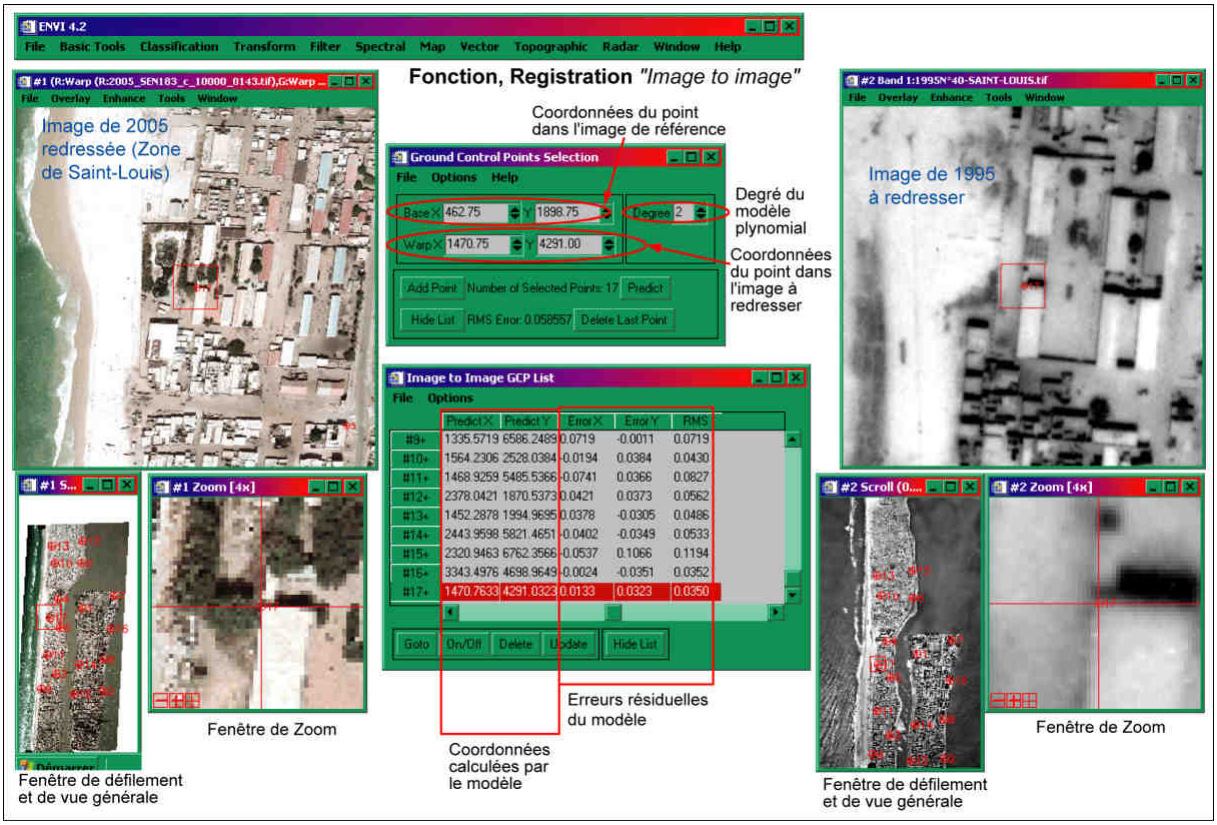


Figure 83 : Rectification des images aériennes sous *Envi 4.2.* A la différence du cas précédent, les deux images sont affichées côte à côte et les points homologues sont saisis de manière interactive.



2.2 – 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*. Selon CHEVALIER (1971), BAKIS et BONNIN (2000), PROVENCHER et DUBOIS (2007), la démarche de photo-interprétation s'articule autour de deux à trois phases :

- la reconnaissance des objets qui dépend de la perception, de la connaissance visuelle que l'on a de l'objet recherché ;
- l'analyse et l'interprétation qui conduisent à l'identification des objets observés par un raisonnement inductif, déductif et par vérification ;
- la synthèse de l'information par modélisation des contours de ou des objets recherchés.

En s'appuyant sur ces principes, la première phase a consisté 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 d'images redressées. En fonction des contrastes, on choisit les pixels attribuables à la ligne de référence sur la base d'une convention fixe. Ainsi, la limite

supérieure d'humectation de l'estran sur les images panchromatiques a été fixée à l'interface entre les pixels sombres et les pixels blancs en partant de la mer (**Figure 84, volume 2**). Sur les images en couleur de 2005 de la zone de Saint-Louis, la limite supérieure d'humectation est établie à la frontière entre les pixels blancs et les pixels en couleurs marron-clair (**Figure 84, volume 2**). Pour la limite supérieure de la plage dans les secteurs de Bargny à Yène-sur-mer et de Mbour à la Pointe Sarène, la ligne de référence est placée à l'interface entre les pixels noirs et les pixels blancs lorsqu'il s'agit de la limite de végétation (**Figure 84, volume 2**) ou des aménagements (maisons, enrochements) (**Figure 84, volume 2**). La détection du pied de dune, dont la netteté est moindre par rapport à la limite de végétation ou des aménagements se fait plutôt de manière déductive grâce aux différences de tons. Ce pied de dune marque une nette rupture radiométrique entre les pixels sombres représentant les dunes et les pixels représentant la plage qui sont beaucoup plus clairs. La ligne de référence se trouve alors à la lisière entre les pixels sombres et les pixels blancs en partant de la terre (**Figure 84, volume 2**).

Outre les lignes de référence, l'occupation du front de mer (dunes, habitat, réseau routier, installations touristiques, culture, unité industrielle) a été également numérisée et constitue une seconde couche d'information vectorielle.

Après l'opération de saisie, un attribut est affecté à chaque élément numérisé. De cette manière, on obtient un fichier relatif à l'occupation du sol et un fichier du linéaire côtier lié chacun à une table attributaire. Dans ces tables attributaires, sont indiqués, pour tous les segments de côte cartographiés, la nature de l'entité numérisée (limite supérieure d'humectation, limite de végétation, limite des maisons, des enrochements, pied de dune), sa longueur et le degré de fiabilité de la numérisation (certaine, incertaine). Pour l'occupation des littoraux, la nature et la surface de chaque entité sont aussi spécifiées.

En complément, lors des campagnes de terrain, des informations relatives aux indicateurs des lignes de référence (niveau des pleines mers, limite de végétation, limite des maisons) 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 dans les sites où les collections d'images acquises sont relativement anciennes, en particulier Ndiago, Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène.

Conclusion du chapitre II

L'analyse de la mobilité du trait de côte à l'échelle locale est fondée sur plusieurs marqueurs choisis selon leur pertinence par rapport aux types, à la nature des données disponibles et aux sites étudiés.

Sur les photographies aériennes, la limite supérieure de la plage a été sélectionnée pour mesurer l'évolution du littoral des sites de Bargny à Yène-sur-mer de 1927 à 1997 ainsi que de Mbour à la Pointe Sarène de 1954 à 1997. Elle se confond avec la limite de végétation sur les photographies anciennes comme celles de 1927 ou 1954 alors que, sur les images récentes comme celles de 1997, elle peut correspondre localement à la limite de végétation ou à des aménagements côtiers (mur d'habitations, enrochements).
Sur les sites de la Langue de Barbarie, la seule ligne exploitable sur les images aériennes est la ligne des pleines mers précédant les prises de vue aériennes de 1927 à 2005 pour celles de Saint-Louis et de 1927 à 1980 pour celles de Ndiago. Cette entité a été utilisée aussi à Nouakchott pour réactualiser la cinématique du site de 1980 à 2005. Pour la période antérieure à la construction du port de 1927 à 1980, nous avons choisi le pied de dune.

Pour élargir l'échelle temporelle de notre étude locale, les images aériennes ont été complétées par les cartes anciennes disponibles sur l'embouchure du Sénégal et la Baie de Gorée. Dans cette optique, sur la Langue de Barbarie, en l'absence du zéro hydrographique sur les documents cartographiques, la *«laisse de haute mer»* a été retenue pour mesurer l'évolution de la flèche entre 1894 et 1928, avec, cependant, quelques réserves car nous ne disposons pas d'indications sur la nature de la haute mer de référence (pleine mer moyenne, de vive-eau, de vive-eau exceptionnelle, de morte-eau, etc.). En revanche, dans la Baie de Gorée pour les périodes 1875-1876 et 1935-1936, le choix s'est porté sur le zéro des cartes marines matérialisant le niveau des plus basses mers ou de réduction des sondes.

Après le choix des lignes de référence, les données ont été rectifiées géométriquement et projetées dans le système de projection UTM/WGS84/Zone 28 Nord pour être superposables et comparables. La cartographie des lignes de référence a été effectuée avec deux approches en fonction des données utilisées :

- la table à digitaliser pour extraire les lignes de référence sur les cartes marines ;
- la photo-interprétation assistée par ordinateur pour extraire les lignes de référence et l'occupation des sols sur les images aériennes.

Ces opérations, nous ont permis de constituer une base de d'informations géographiques contenant deux thèmes : un thème occupation des sols, un thème «trait de côte» exploitable dans un SIG pour l'analyse de l'évolution spatio-temporelle de la position du linéaire côtier.

En prélude à cette analyse, il est indispensable de poser les limites méthodologiques et techniques de notre démarche. Cette étape nous permettra de définir des marges d'erreur afin de distinguer les écarts qui relèvent de la nature ou de la manipulation des données et ceux qui correspondent aux évolutions réelles du littoral.

CHAPITRE III : INCERTITUDES, ESTIMATION DES ERREURS ET OUTIL DE MESURE DE LA CINEMATIQUE DU TRAIT DE CÔTE

Quelles que soient la démarche méthodologique et la technique utilisées pour mesurer l'évolution d'un littoral à partir de documents iconographiques, les taux d'évolution obtenus comportent toujours une certaine part d'incertitude qu'il est nécessaire d'évaluer pour juger du degré de représentativité des résultats et les exploiter convenablement (THIELER et DANFORTH, 1994a). L'objectif de ce chapitre est d'analyser toutes les sources d'incertitude liées à la qualité des données mobilisées, aux variations sur le court terme de la position de la ligne de pleine mer et aux traitements appliqués pour extraire les lignes de référence à partir des cartes anciennes et des images aériennes. Sur la base de cette analyse, des marges d'incertitude ont été calculées, permettant d'établir des seuils à partir desquels on peut mesurer une avancée ou un recul du littoral.

I – LES SOURCES D'INCERTITUDE AFFECTANT LES LIGNES DE REFERENCE EXTRAITES DES CARTES MARINES

La qualité des mesures d'évolution obtenues à partir des cartes anciennes dépend avant tout de la fiabilité des cartes originales tant en termes de précision des levés de terrain que de l'échelle du document cartographique à partir duquel les données ont été extraites (ANDERS et BYRNES, 1991 ; CROWELL *et al.,* 1991). A cela s'ajoutent les limites du matériel technique et de la méthode utilisés pour extraire l'information géographique (THIELER et DANFORTH, 1994a).
Nous avons relevé deux sources d'incertitudes sur les cartes anciennes :

- les erreurs de cartographie (représentation erronée des objets ou erreurs de positionnement) ;
- le traitement des données cartographiques (digitalisation de la *«laisse de haute mer»* ou du zéro hydrographique et géoréférencement des couches digitalisées).

1 – Les incertitudes liées à la précision des documents cartographiques utilisés

Les erreurs de représentation et de positionnement des objets cartographiés s'observent sur les cartes marines indépendamment de leur échelle. Comme dans le cas des cartes à petite échelle, elles ont été mises en évidence grâce aux indications générales mentionnées en marge des cartes, à la bibliographie et à la comparaison des documents cartographiques afin de déceler d'éventuelles incohérences. Ainsi sur l'édition de 1877 de la carte N°3592, on note des incohérences toponymiques et topographiques. Par exemple, les marigots de Bope et de Pann'thior, entre Siendou et Yène ne sont pas représentés ; la région était figurée comme une zone de culture. De plus, la répartition spatiale des sondes montre une densité accrue entre Dakar et Rufisque alors qu'elle est moindre au jusqu'au cap de Naze, en limite de la carte. Les levés ont donc été sommaires ou réalisés à une plus petite échelle au sud de Rufisque même si nous ne connaissons pas l'échelle exacte du levé de 1875-1876. Déjà en 1938, BONNIN signalait dans son rapport de mission que le levé BESSON n'était pas très précis, même entre Dakar et Rufisque, car les sondes étaient espacées de 500 à 600 m en

moyenne et un Banc au large de Mbao n'a pas été détecté par ces travaux. Tout compte fait, l'édition de 1877 de la carte N°3592 est d'une précision dis cutable et doit être considérée avec prudence pour la quantification de l'évolution ancienne du littoral dans la zone au sud de Rufisque. Quant à l'édition de 1929, élaborée à partir de photographies aériennes de 1927, elle n'est pas exempte d'aberrations, comme l'a noté NIANG-DIOP (1995). Par exemple, l'isobathe -3 m chevauche l'isoligne du zéro hydrographique aux abords du Cap de Diokoul (**Figure 85b**). Aussi, dans la mesure où la mise à jour n'a concerné que la topographie et qu'aucun levé hydrographique n'a été réalisé entre les deux éditions, seule la position de la *«laisse de haute mer»* devait subir des variations tandis que les zéros hydrographiques auraient dû s'accorder, ce qui est loin d'être le cas (**Figure 85c**) sauf dans de petits secteurs comme le wharf de Rufisque (**Figure 85d**). C'est la raison pour laquelle nous l'avons finalement écartée lors des mesures d'évolution.

Figure 85 : Quelques incohérences relevées sur les éditions de 1877 et de 1929 de la carte N° 3592

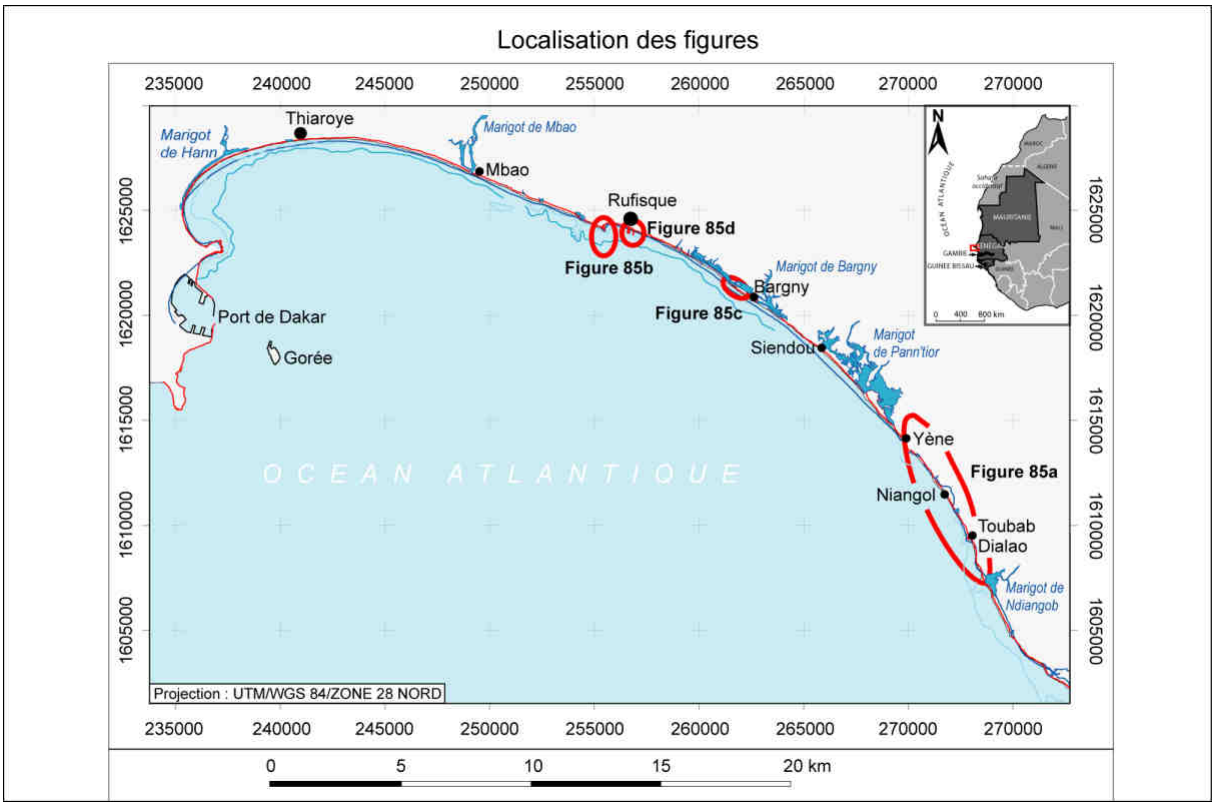


Figure 85a : Comblement du golfe au droit de Niangol dans un secteur à falaises entre 1875-1876 et 1927

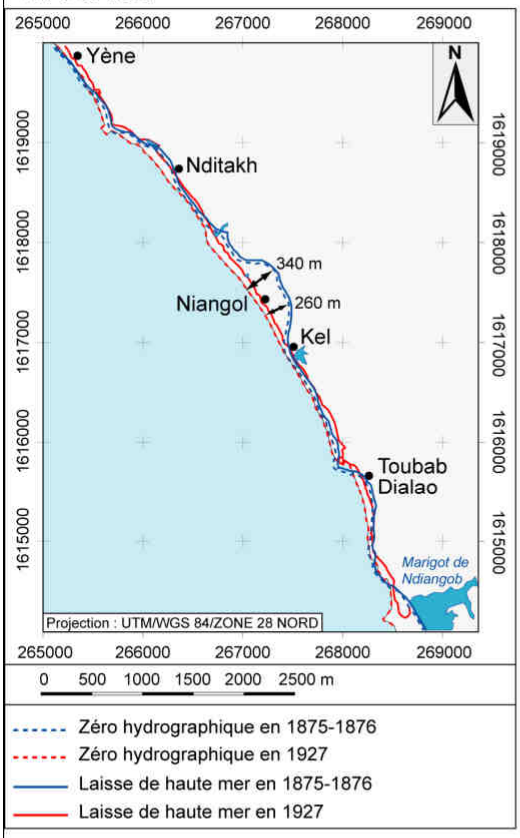


Figure 85b : Chevauchement du zéro hydrographique et de l'isobathe -3m aux environs du Cap de Diokoul (Rufisque) sur l'édition de 1929

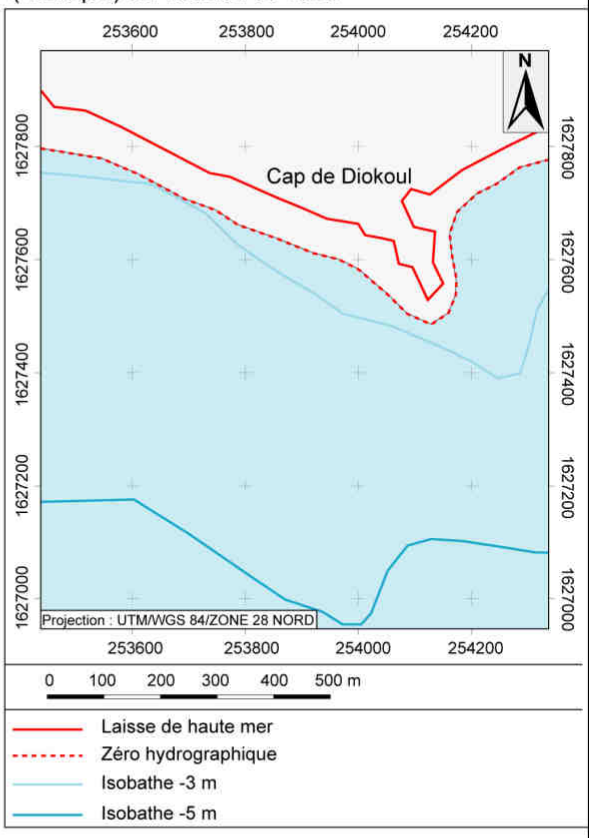


Figure 85c : Désaccord du tracé du zéro hydrographique entre les éditions de 1877 et de 1929 à Bargny

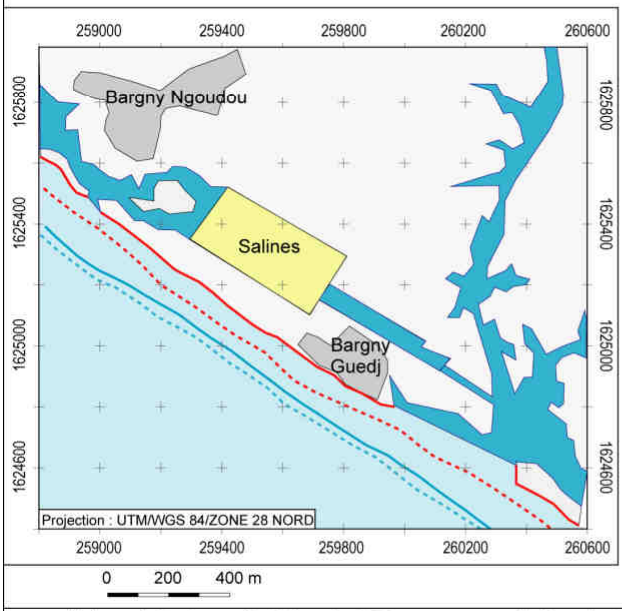
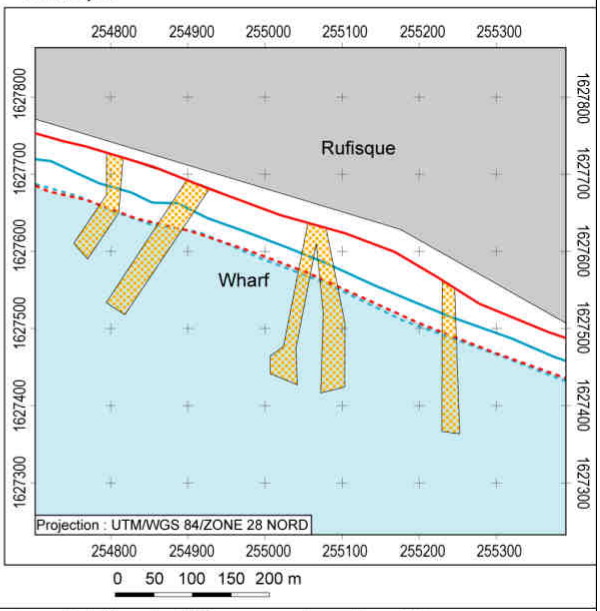


Figure 85d : Accord du tracé du zéro hydrographique entre les éditions de 1877 et de 1929 au wharf de Rufisque

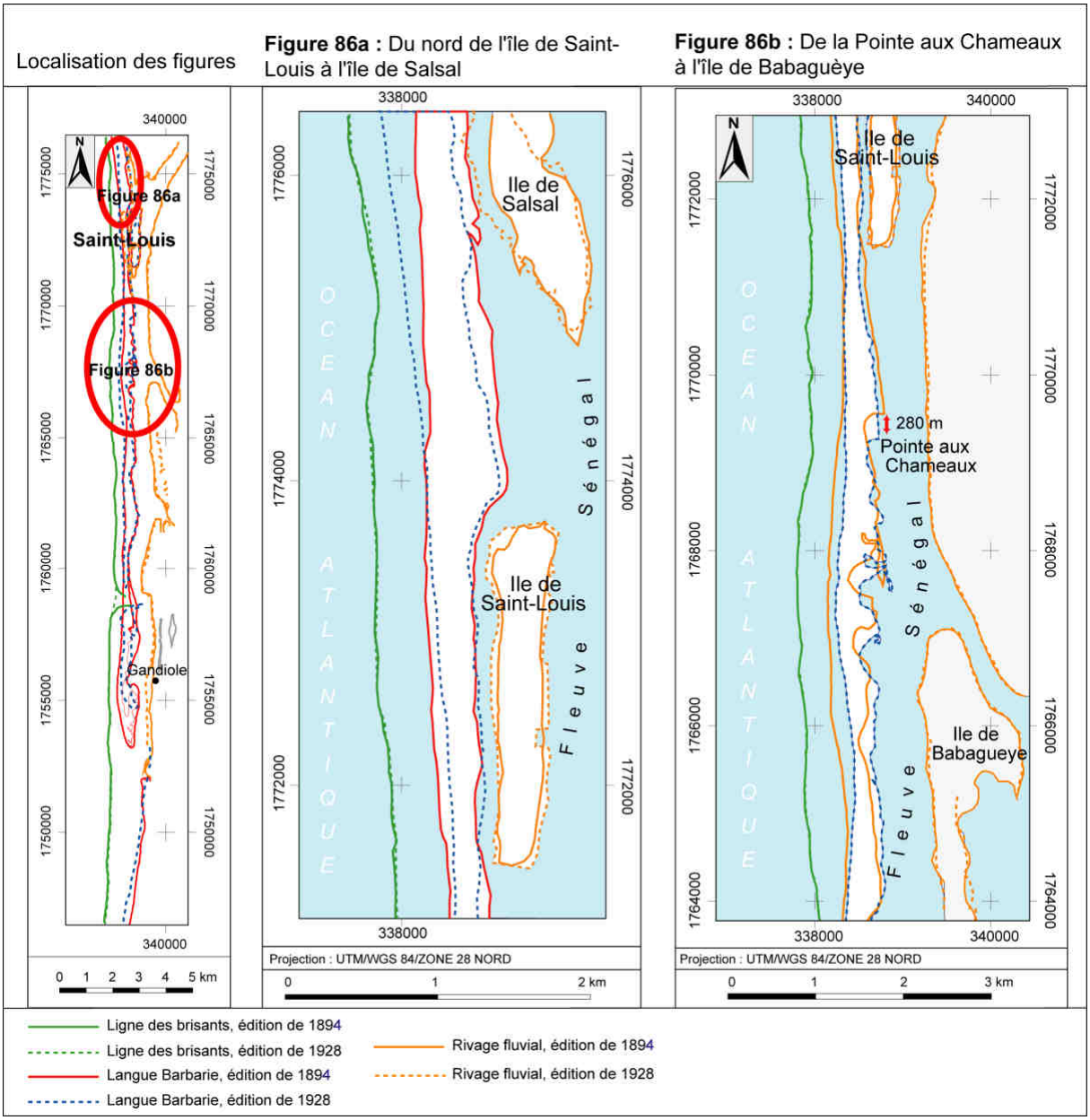


"Laisse de haute mer", édition de 1929
Zéro hydrographique, édition de 1929
"Laisse de haute mer", édition de 1877
Zéro hydrographique, édition de 1877
Localités
Marigots temporaires

La deuxième carte utilisée sur la Baie de Gorée (N° 5852 éditée en 1939) ne semble montrer aucune anomalie particulière. Elle a été levée entre le 1er novembre 1935 et le 1er mars 1936 au 1/10000e (BONNIN, 1938) mais les données ont été restituées au 1/50000e, ce qui implique des opérations de généralisation sources d'imprécision (CARR, 1962 ; 1980).

Concernant la Langue de Barbarie, la carte N° 4892 levée en 1894 et publiée en 1894 présente *a priori* d'informations fiables. En revanche, l'édition de 1928 laisse apparaître des erreurs de positionnement des objets au nord de Saint-Louis (**Figure 86a**) et au sud de la Pointe aux Chameaux jusqu'à l'île de Babaguèye (**Figure 86b**). En effet, dans ces zones, on observe un déplacement important (jusqu'à 280 m) des contours de la Langue de Barbarie par rapport au levé de 1894 alors que, dans les autres secteurs, la ligne des brisants, les contours de l'île de Saint-Louis ou du rivage fluvial se superposent assez bien (**Figure 86b**). Ces décalages peuvent être dus aussi à une déformation locale du papier support de la carte ou à un mauvais raccordement des photographies aériennes de 1927 ayant servi à la révision de la carte à une époque où les techniques photogrammétriques étaient peu élaborées. Il est à noter que la réactualisation de la topographie ayant été réalisée à l'aide de photographies aériennes, des erreurs liées à leur interprétation, en particulier la difficulté d'identification de la *«laisse de pleine mer»,* peuvent subvenir.

Figure 86 : Décalage des contours de la Langue de Barbarie sur la carte N° 4892 aux abords de Saint-Louis



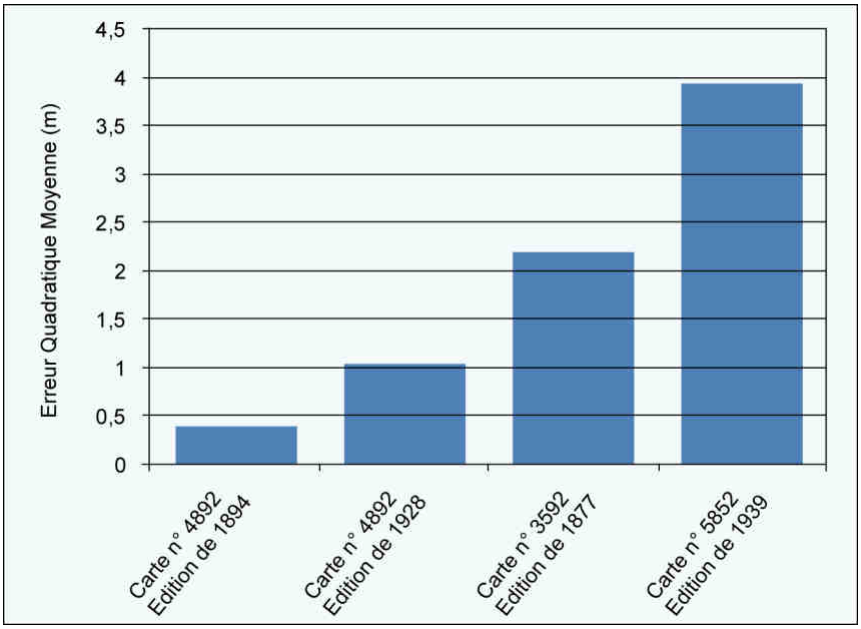
2 – Les erreurs dues à la digitalisation et au géoréférencement des lignes de référence

L'un des principaux inconvénients de la digitalisation sur table des données cartographiques est que l'imprécision dans la saisie peut se traduire par des décalages considérables en unités métriques. Ainsi par exemple, un écart d'un millimètre à la saisie équivaut à un décalage de 50 m sur la carte N° 5852 ; 39,9 m sur la carte N° 3592 et 5 0,99 m sur la carte N° 4892. Vu l'ampleur de ces décalages potentiels, lors de la phase de digitalisation, il importe de rester très concentré et de bien fixer la carte sur la table afin d'éviter tout déplacement du papier lors du report des lignes de référence. Cela étant, le report des contours des objets est relativement aisé car à la différence des

images où on peut être confronté à des difficultés d'identification des marqueurs du trait de côte, le zéro hydrographique et la *«laisse de haute mer»* sont figurés sans équivoque. Toutefois la qualité du report des données dépend de la dextérité de l'opérateur de saisie, de la précision du digitaliseur et de l'épaisseur du trait représentant la ligne de référence. Cette épaisseur est déterminée par le diamètre de la pointe de la plume de dessin. Il est d'un quart de millimètre (0,25 mm) sur toutes les éditions des cartes utilisées. Cela génère un trait correspondant en réalité à une bande large de 9,97 m sur la carte N° 3592 ; 12,5 m sur la carte N° 585 2 et 12,74 m sur la carte N° 4892. On retiendra donc pour le zéro hydrographique dans le secteur de Bargny à Yène-sur-mer une incertitude de 9,97 m (carte N° 3592) et de 12,5 m (carte N° 5852) et d ans les abords de Saint-Louis, une marge de 12,74 m pour la *«laisse de haute mer»* (carte N° 4892).

En plus de ces «erreurs», la précision du référencement de la *«laisse de haute mer»* et du zéro hydrographique est affectée par l'erreur moyenne quadratique (*RMS error*) résultant de la projection des couches digitalisées, des coordonnées «table» aux coordonnées UTM. Ces erreurs RMS indiquées par le logiciel sont inférieures ou égales à 4 m pour toutes les cartes mobilisées dans notre étude (**Figure 87**).

Figure 87 : Erreurs RMS résultant du géoréférencement des couches cartographiques



Pour les cartes marines, en additionnant l'erreur résultant de l'épaisseur des traits et du géoréférencement du zéro hydrographique et de la *«laisse de haute mer»*, on obtient donc une marge d'erreur de 26,91 m pour la période de 1894 à 1927 dans les environs de Saint-Louis. L'incertitude totale est de 28,57 m dans le segment côtier de Bargny à Yène-sur-mer pour la période 1875-1876 – 1935-1936.

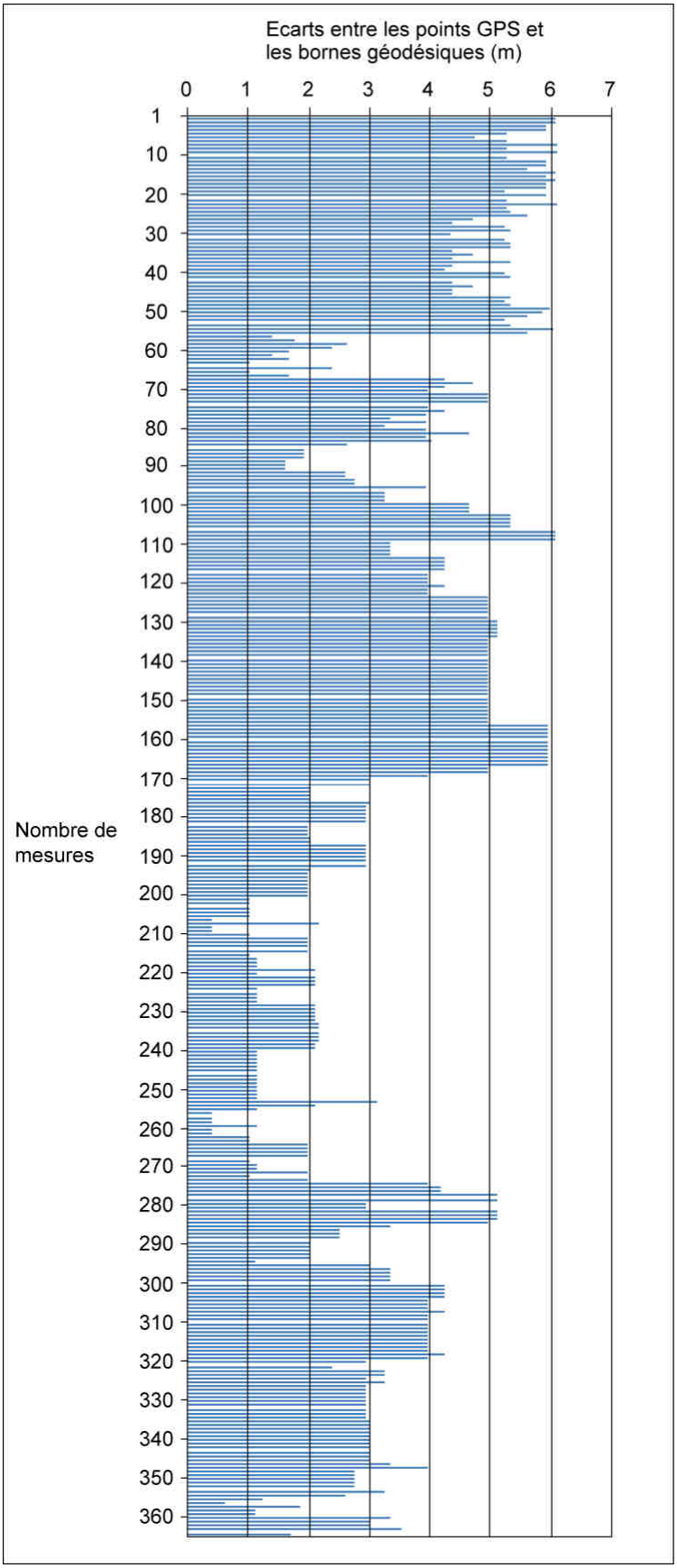
II – LES SOURCES D'INCERTITUDE AFFECTANT LES LIGNES DE REFERENCE PROVENANT DES IMAGES AERIENNES

En dépit du redressement des images aériennes et de l'automatisation des mesures, il demeure un certain nombre d'incertitudes. Quatre sources potentielles d'erreurs ont été répertoriées pour les lignes de référence numérisées par photo-interprétation : la collecte des amers sur le terrain, le géoréférencement des images, la numérisation des lignes de référence et les oscillations du niveau de pleines mers. Dans le cadre de synthèses diachroniques, tous ces éléments sont des facteurs d'incertitudes qu'il convient d'évaluer avant de tirer des conclusions sur la cinématique littorale (ANDERS et BYRNES, 1991 ; CROWELL *et al.*, 1991 ; THIELER et DANFORTH, 1994a ; BYRNES et HILAND, 1994 ; MCBRIDE *et al.,* 1995 ; DURAND, 1998, 2000 ; GORMAN *et al.,* 1998 ; COYNE *et al.,* 1999 ; MORTON et MCKENNA, 1999 ; MOORE, 2000 ; GAILLOT et CHAVEROT, 2001 ; MOORE et GRIGGS, 2002 ; ROBIN, 2002 ; FLETCHER *et al.,* 2003 ; RUGGIERO *et al.,* 2003 ; MORTON *et al.,* 2004 ; HAPKE *et al.,* 2006).

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 fabriquant, le modèle utilisé est précis à 3 m RMS en mode 2 D (X, Y). Pour valider la précision communiquée par le fabriquant, il conviendrait de comparer les mesures GPS avec celles d'un GPS différentiel ou avec les coordonnées de bornes géodésiques comme l'ont fait AUGUST *et al.* (1994) ainsi que MORTON et MCKENNA (1999). Nous avons ainsi comparé les mesures GPS avec les coordonnées de trois bornes géodésiques de l'IGN situées dans la région de Brest. 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. Notons au passage que tous les écarts constatés sont compris dans un rayon, diamètre de 6 m (**Figure 88**). 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 référencées l'une par rapport à l'autre.

Figure 88 : Ecarts mesurés entre les coordonnées des points GPS et des bornes géodésiques de l'IGN



2 – Les erreurs liées au géoréférencement des images aériennes

Le géoréférencement correct d'une image nécessite un nombre suffisant d'amers bien répartis sur l'ensemble du cliché. Or sur les images utilisées, il n'a pas été aisé de réunir ces conditions. Si dans la plupart des cas (Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer et dans une moindre mesure Mbour – Pointe Sarène), la densité de l'occupation des sols nous a permis de trouver suffisamment d'amers bien distribués pour caler les images récentes, dans certaines zones comme à Nouakchott, les amers potentiels sont concentrés autour du Wharf et du port. Pour pallier ce problème, en plus des amers classiques (coins de bâtiments, murs, croisement de routes, etc.), nous avons dû utiliser comme amers des touffes de végétation notamment de *Nitraria retusa* et de *Tamarix sp*. Ces touffes constituent l'essentiel des points de calage sur les images de 1991, 1980 et sont les seuls repères disponibles sur les images anciennes (1954 et 1927). Dans les autres sites (Ndiago, Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer, Mbour – Pointe Sarène), ce sont des arbres isolés qui nous ont servi de points de calage. Cependant, dans certaines parties des images anciennes, nous n'avons pas pu retrouver suffisamment de touffes ou d'arbres bien répartis pour redresser convenablement les images. Lors de la vérification du géoréférencement, des décalages de plusieurs mètres sont apparus localement. Les segments côtiers en question ont été mesurés et exclus de l'étude. Ils concernent les images de 1954 et de 1927 du site de Nouakchott (**Figure 89a** et **89b**) ainsi que celles de 1927 couvrant Saint-Louis (**Figure 90**) et Bargny (**Figure 91**).

C'est également en raison d'amers insuffisamment nombreux que nous n'avons pas pu utiliser les photographies aériennes de 1927 de la zone de Mbour – Pointe Sarène. Dans ce secteur, le couvert végétal était très dense sur les images de 1927 rendant difficile le repérage d'arbres isolés susceptibles de servir de repères.

Figure 89 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte du fait d'un mauvais géoréférencement des images aériennes de 1927 et 1954 du site de Nouakchott

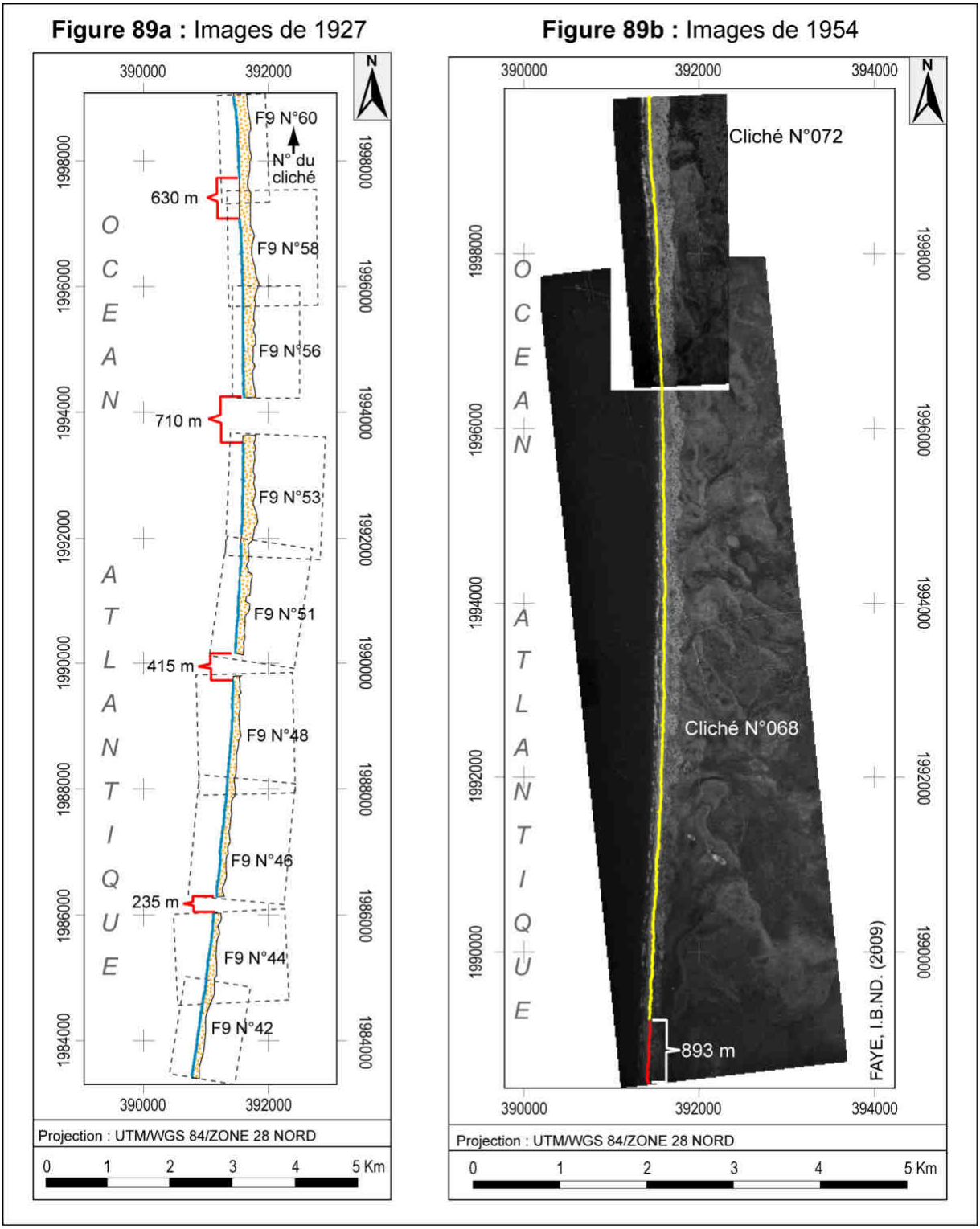


Figure 90 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte du fait d'un mauvais géoréférencement des images aériennes de 1927 du site de Saint-Louis

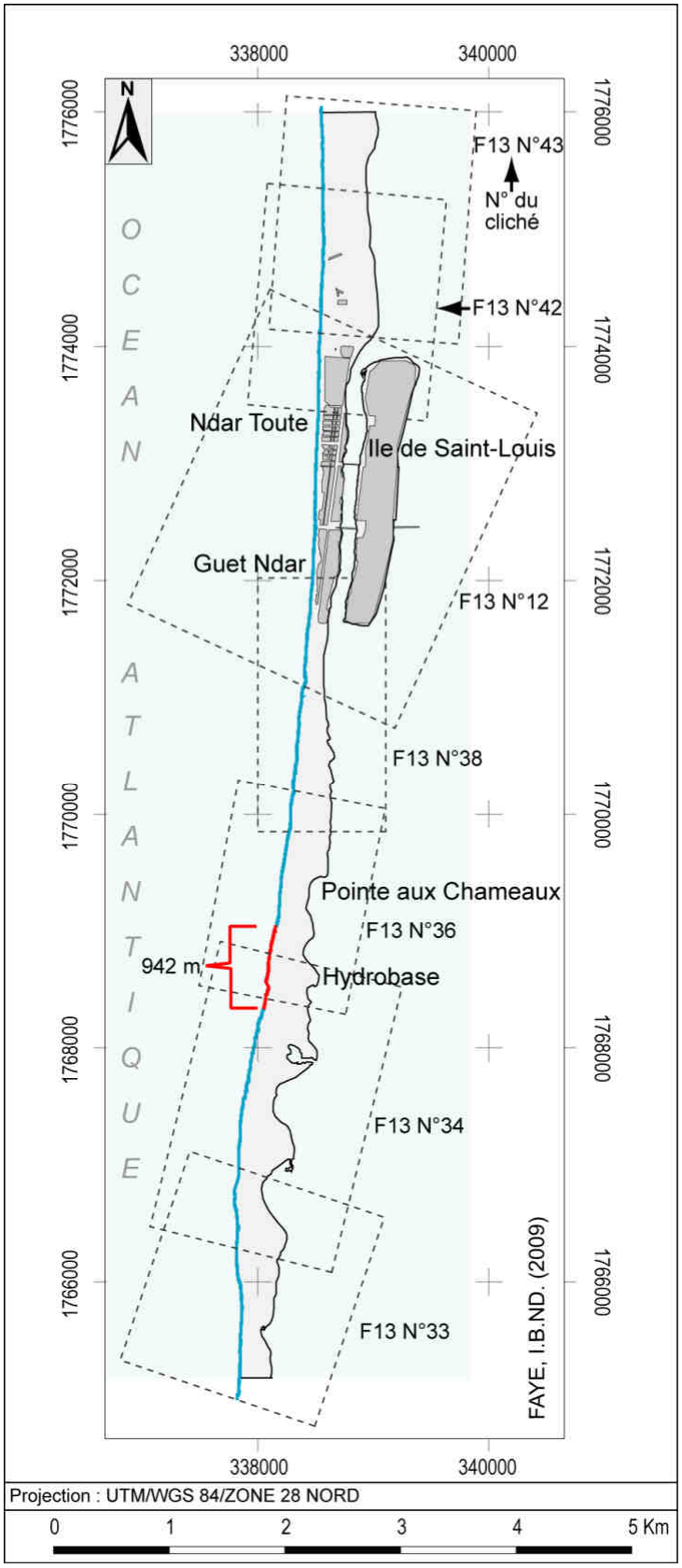
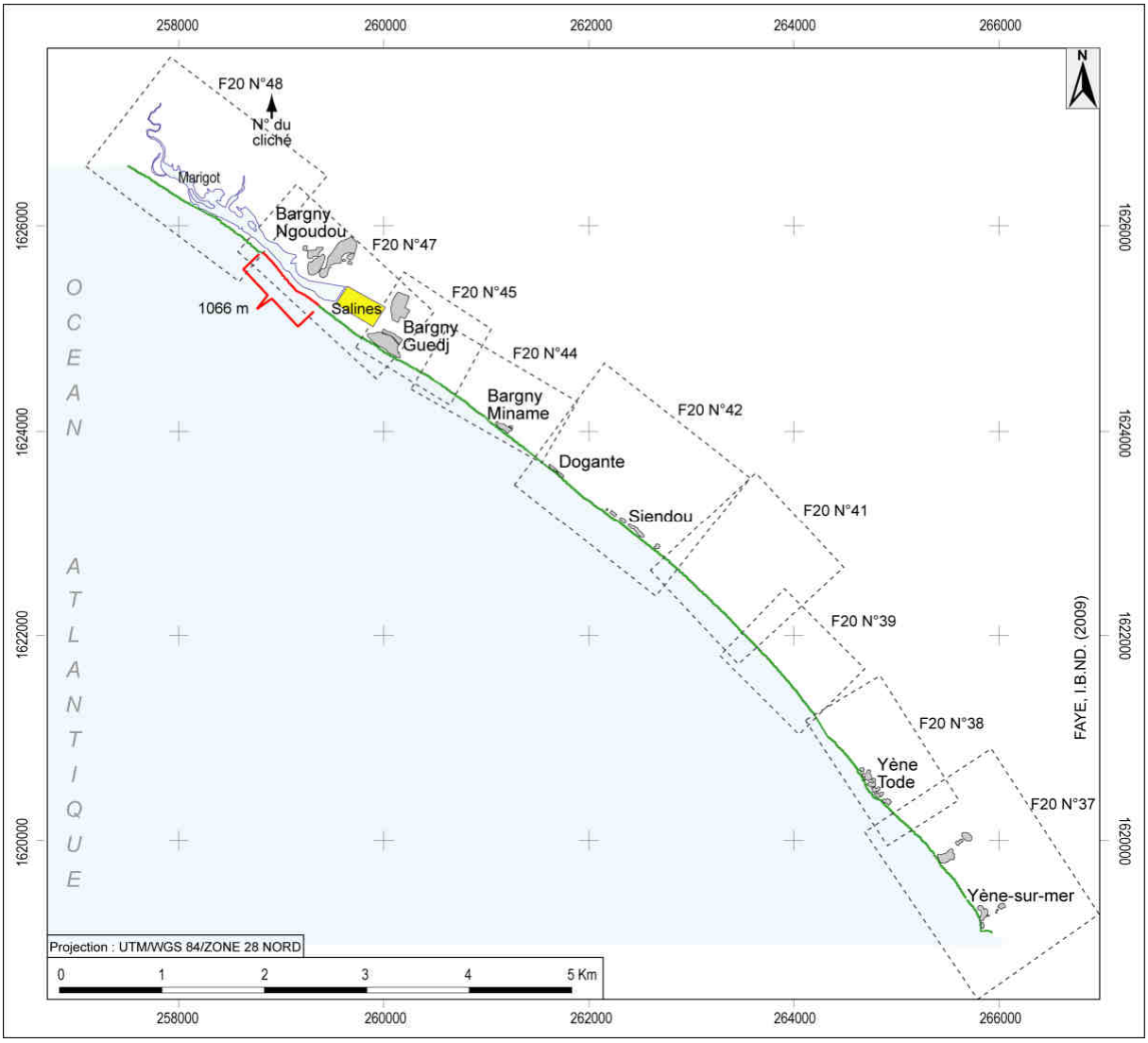


Figure 91 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte du fait d'un mauvais géoréférencement des images aériennes de 1927 au nord de Bargny Guedj



Généralement, les erreurs RMS des images redressées étaient inférieures ou égales à 0,5 pixel (**Figure 92a, 92b, 92c, 92d et 92e**). 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 92 : Erreurs RMS liées au géoréférencement des images aériennes utilisées pour l'analyse de l'évolution du trait de côte à Nouakchott, Ndiago, Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène

Figure 92a : Nouakchott
(Taille du pixel : 0,9 m)

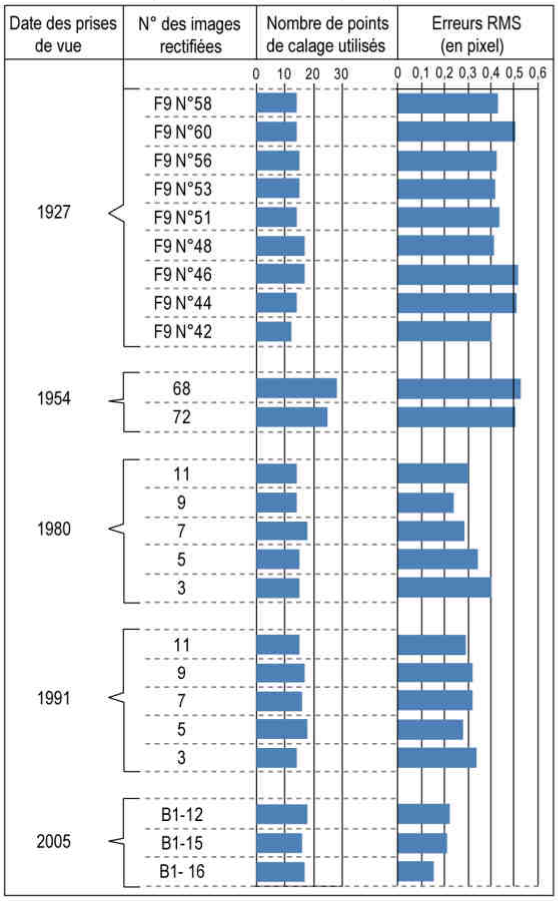


Figure 92b : Saint-Louis
(Taille du pixel : 0,6 m)

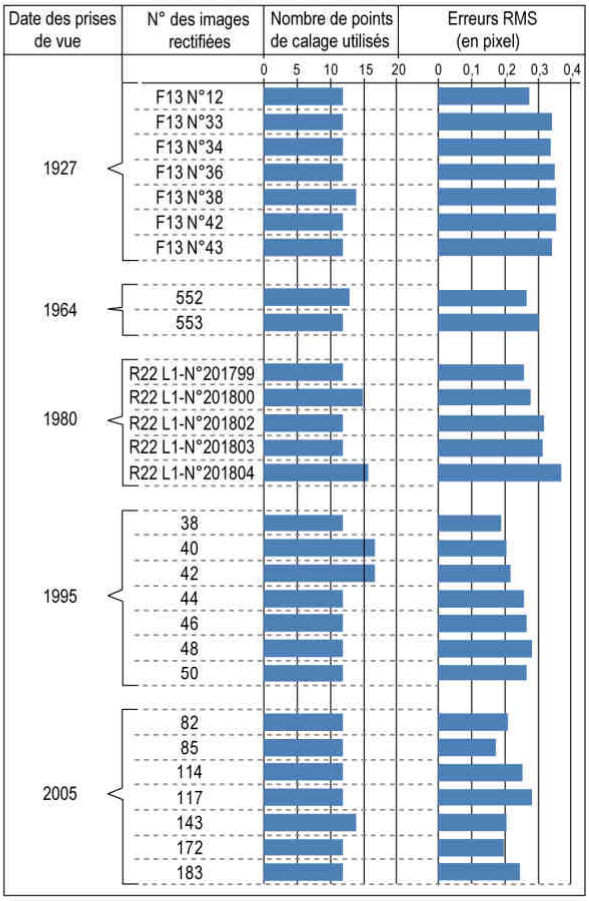


Figure 92c : Ndiago
(Taille du pixel : 0,8 m)

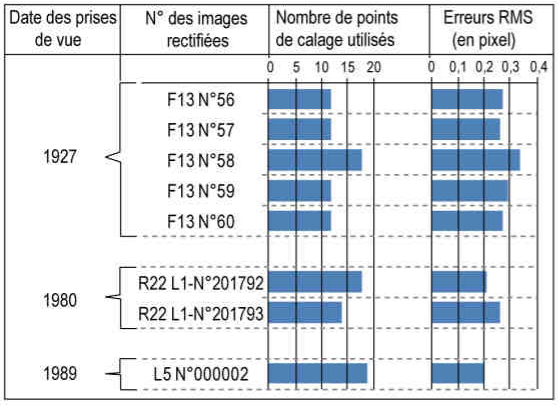


Figure 92d : Mbour - Pointe Sarène
(Taille du pixel : 1 m)

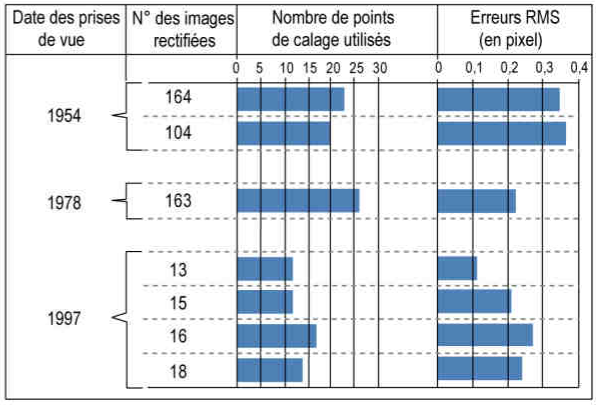
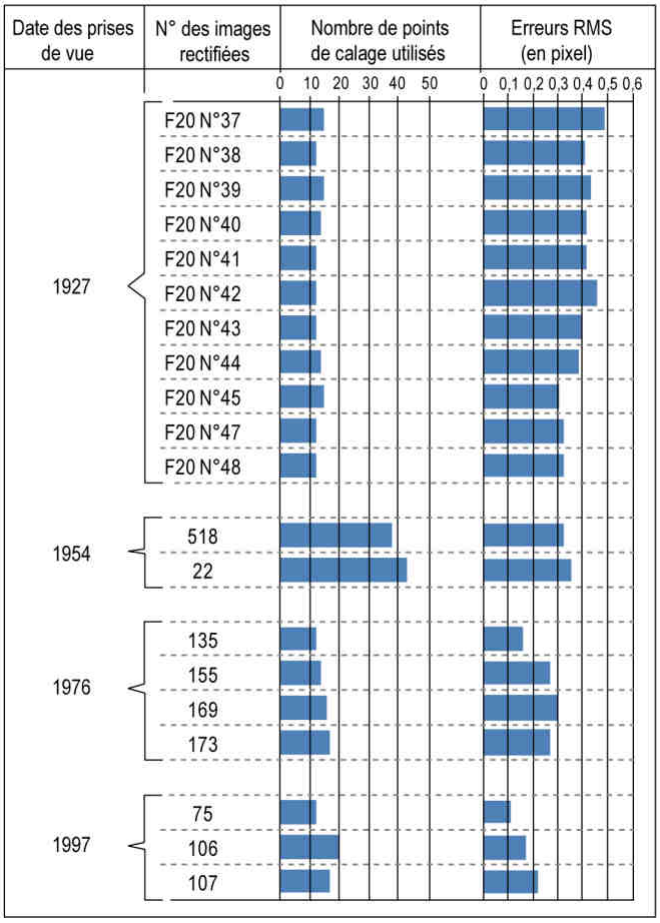


Figure 92e : Bargny - Yène-sur-mer (Taille du pixel 0,7 m)



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 soit d'un mauvais contraste de l'image (pour la ligne des pleines mers), soit de l'étalement de la dune ou d'un front de végétation très échancré. Leurs coordonnées ont été enregistrées et leurs longueurs mesurées. Ce sont en général des petits segments de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de long. A Nouakchott, ils concernent le pied de dune mais surtout la ligne de pleines mers essentiellement sur les images de 1980 (**Figure 93a, 93b et 93c**). En effet, alors que sur les missions de 1927 et 1954, on observe un front dunaire continu sur l'ensemble des images, la mission de 1980 témoigne de la disparition de la dune au nord du wharf, devant les installations portuaires en construction (passerelle, entrepôts, etc.) (**Photo 32**) ainsi qu'aux environs de l'hôtel Ahmedy (accès à la plage). Il n'a donc pas été possible d'extraire le

pied de dune dans ces secteurs. De plus, de l'absence de contrastes des images de 1980 résulte l'impossibilité d'extraire localement la ligne des pleines mers (**Photo 32**).

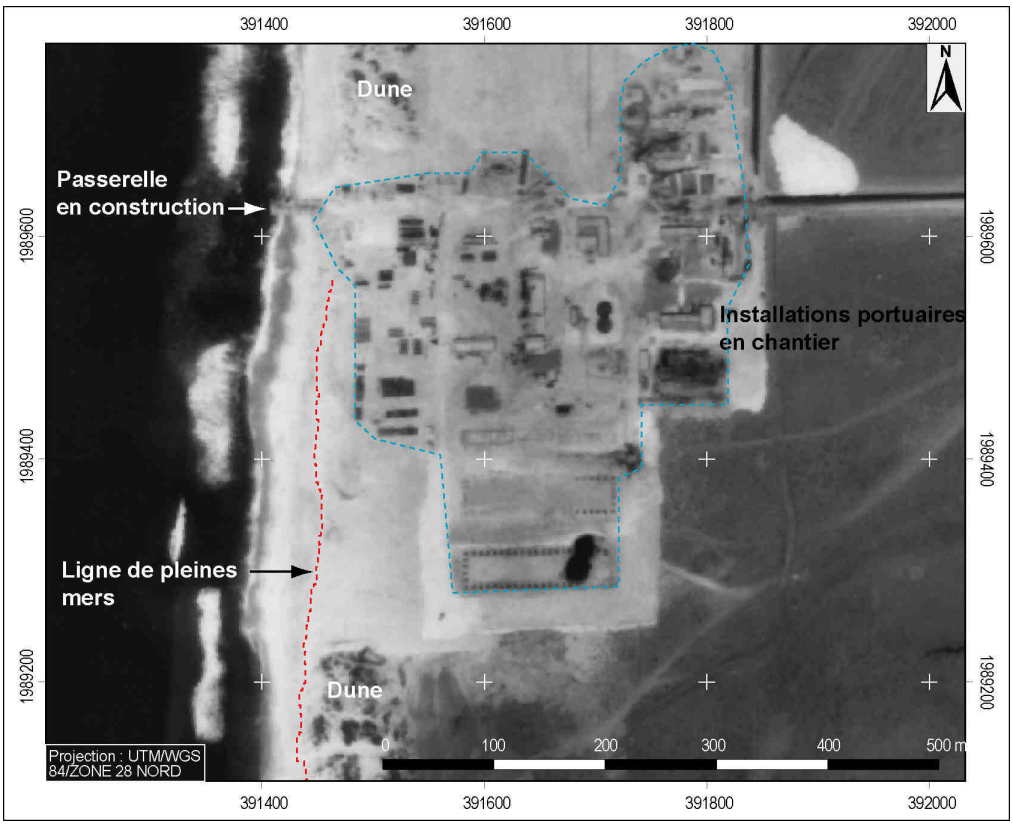


Photo 32 : Démantèlement de la dune devant les infrastructures portuaires en chantier. La ligne de pleines mers est également peu nette en raison d'un contraste très médiocre au niveau de la plage sur les images aériennes de Nouakchott (Extrait d'une photographie aérienne, mission IGN MAU-4-215, 1980, cliché n°5).

Figure 93 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte en raison d'un mauvais contraste des images aériennes (ligne de pleines mers) ou de l'étalement du cordon dunaire à Nouakchott

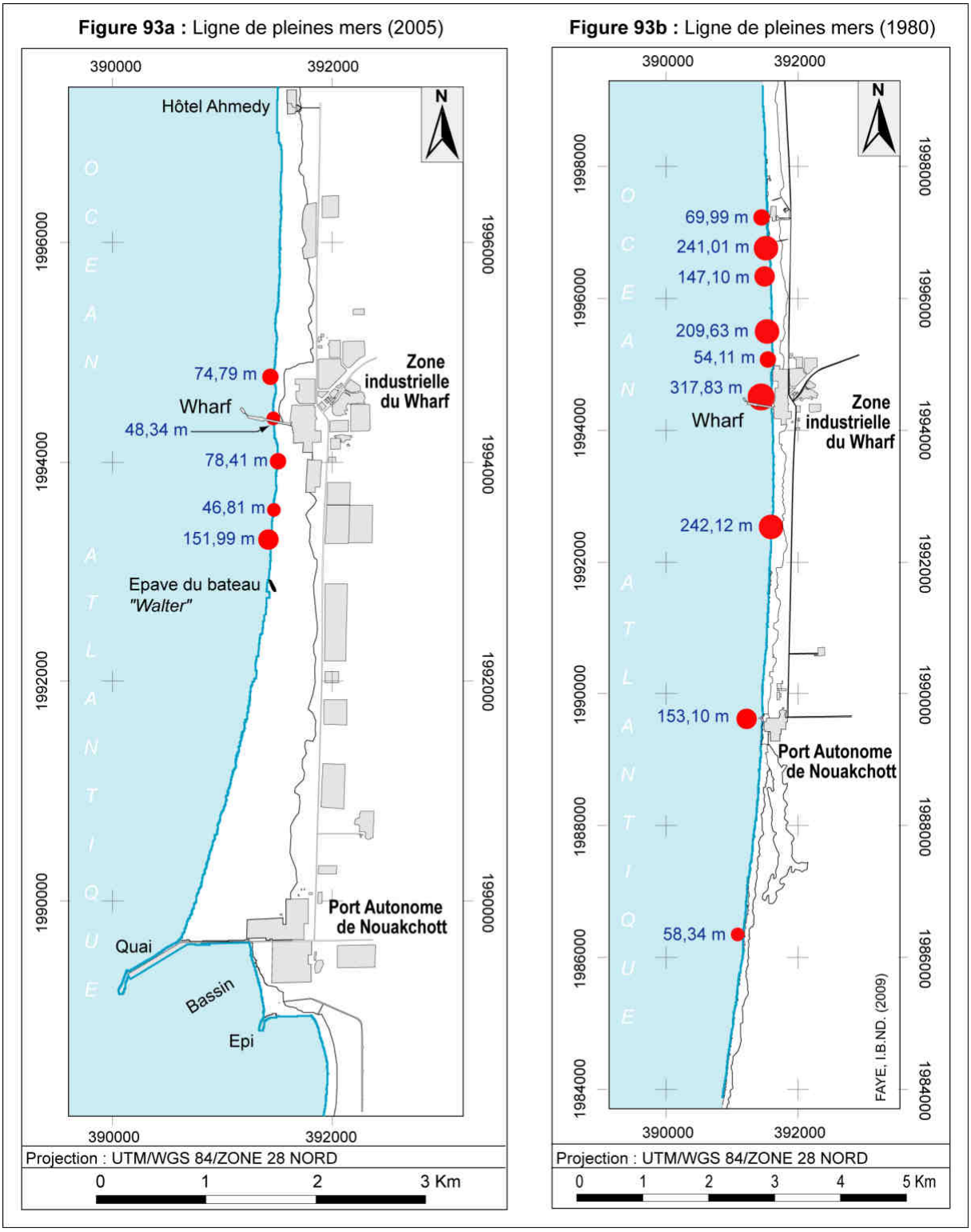
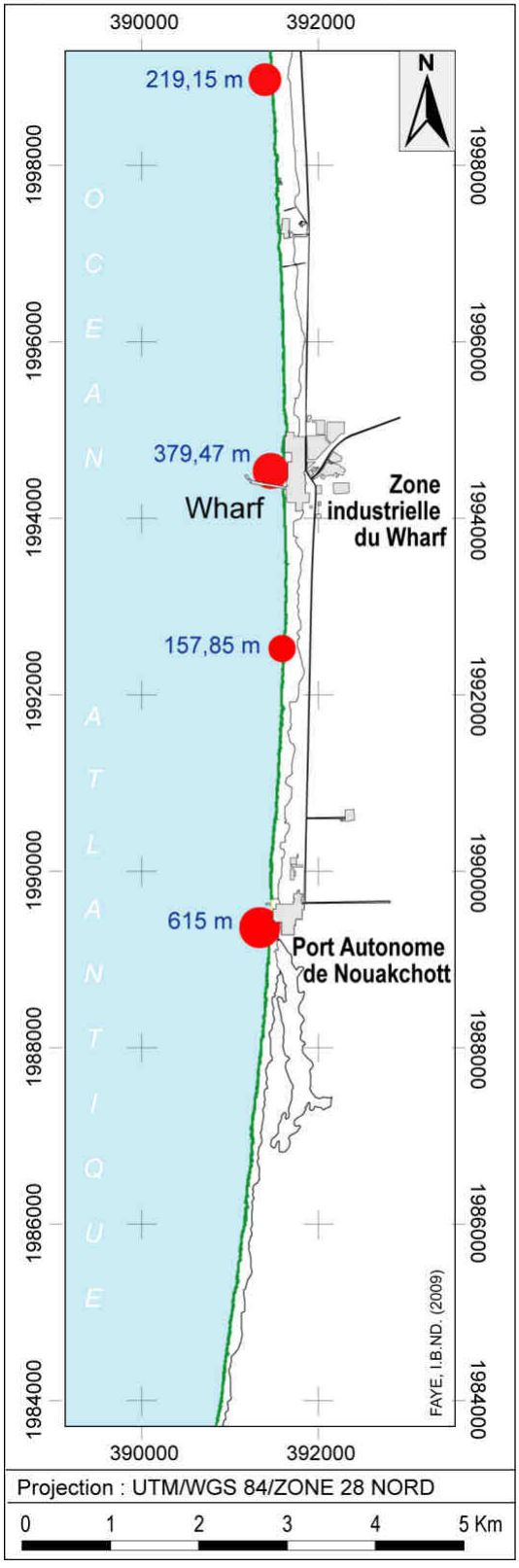


Figure 93c : Pied de dune (1980)



Dans quelques secteurs de rivage de Bargny à Yène-sur-mer, la limite supérieure de la plage n'a pas pu être numérisée du fait de l'absence locale de végétation, notamment à proximité des embouchures des marigots jalonnant la côte (**Figure 94a, 94b, 94c** et **94d**). Dans ces secteurs (nord

de Bargny Guedj, entre Bargny Guedj et Miname, au sud de Siendou et Yène Tode), le cordon sableux, submersible par grande marée, peut être complètement nu ou porter une végétation très éparse (**Photo 33**) ; il s'agit là d'une situation qui ne permet pas de déterminer la limite de végétation.

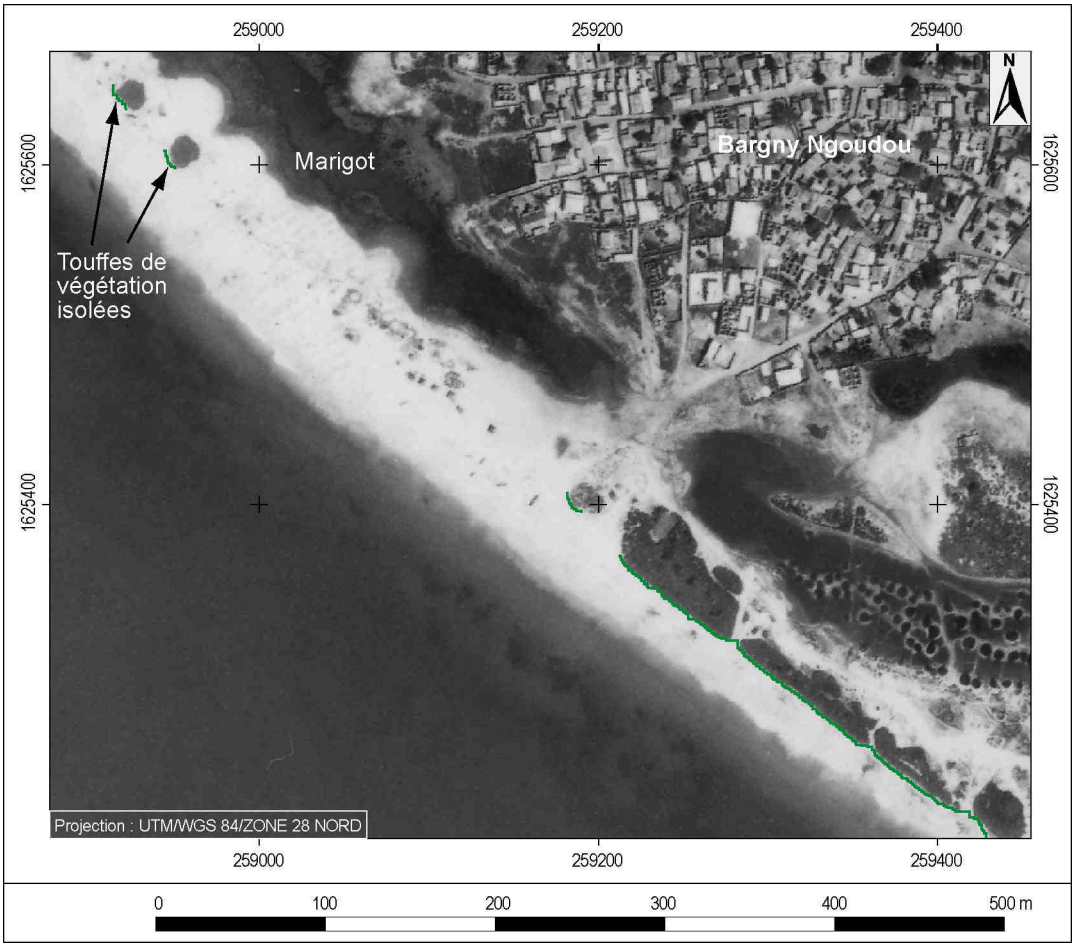


Photo 33 : Disparition de la végétation sur le cordon sableux isolant le marigot de Bargny au droit de Bargny Ngoudou (Extrait d'une photographie aérienne de 1976, mission IGN 76-SEN 26/150, cliché n°135).

Figure 94 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte en raison de la disparition de la limite de végétation entre Bargny et Yène-sur-mer

Figure 94a : Images de 1997

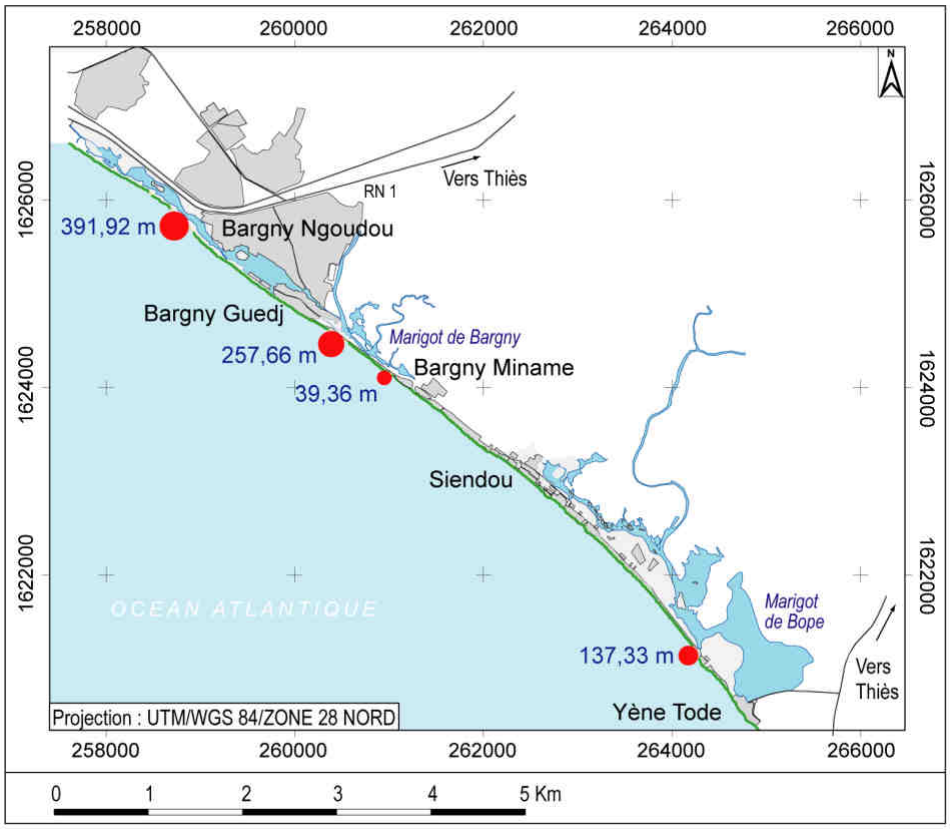


Figure 94b : Images de 1976

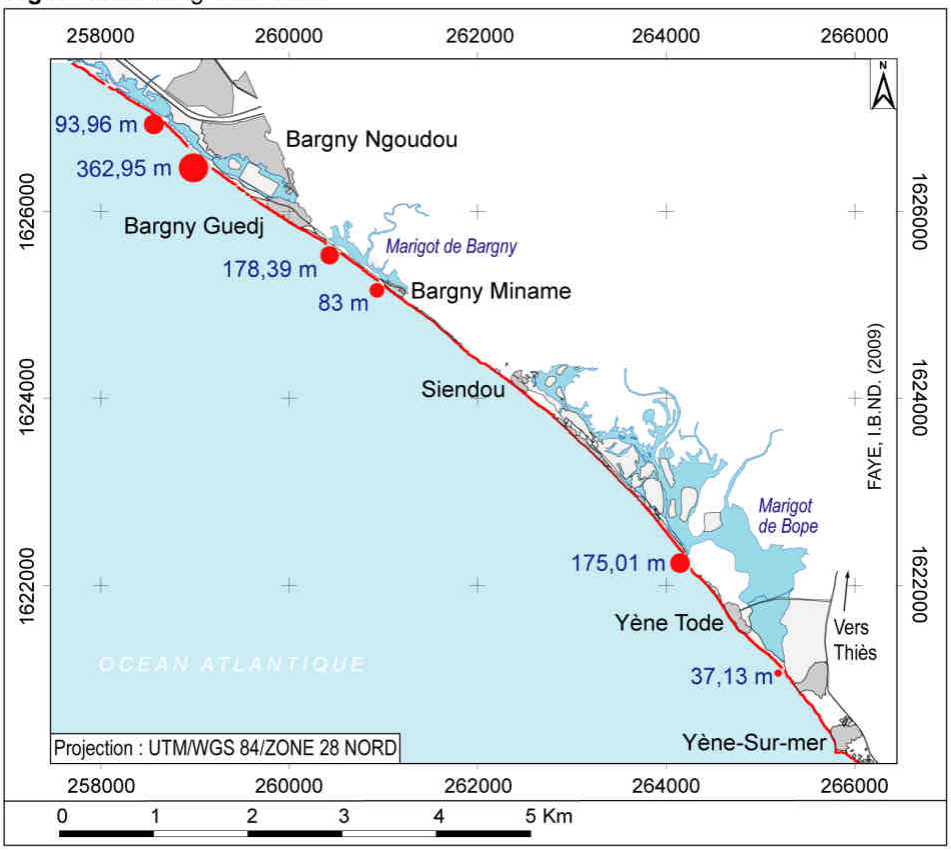


Figure 94c : Images de 1954

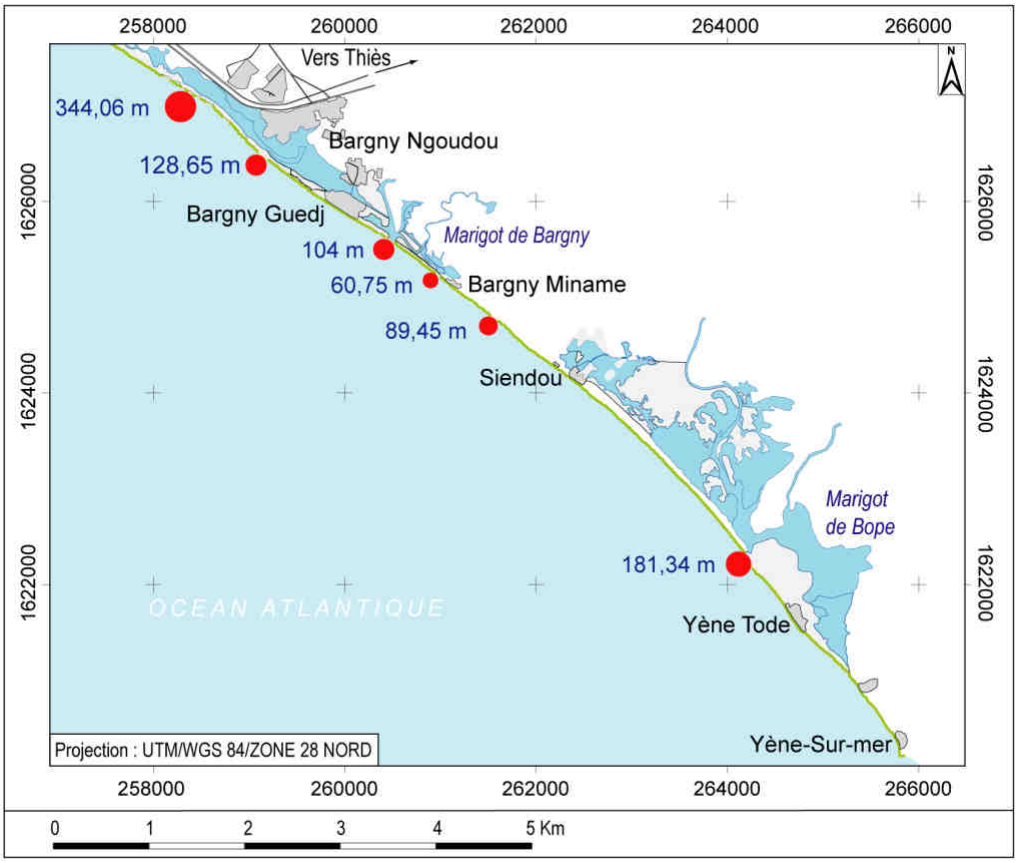
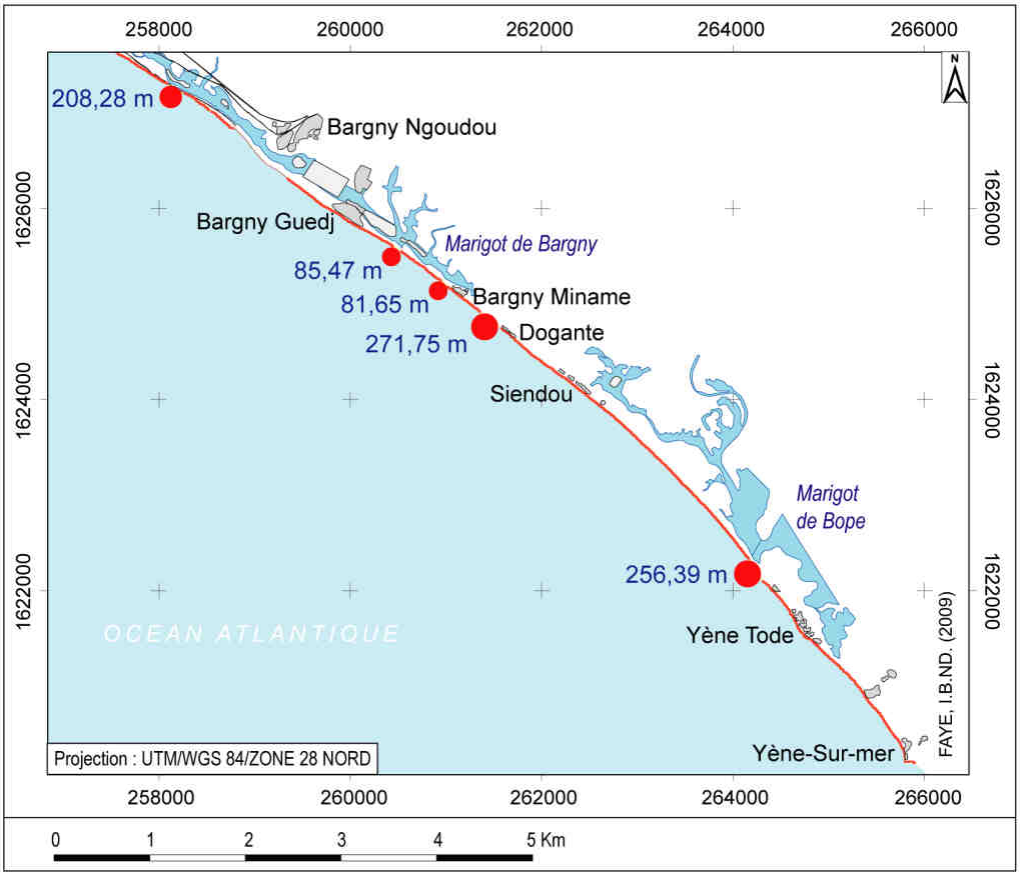
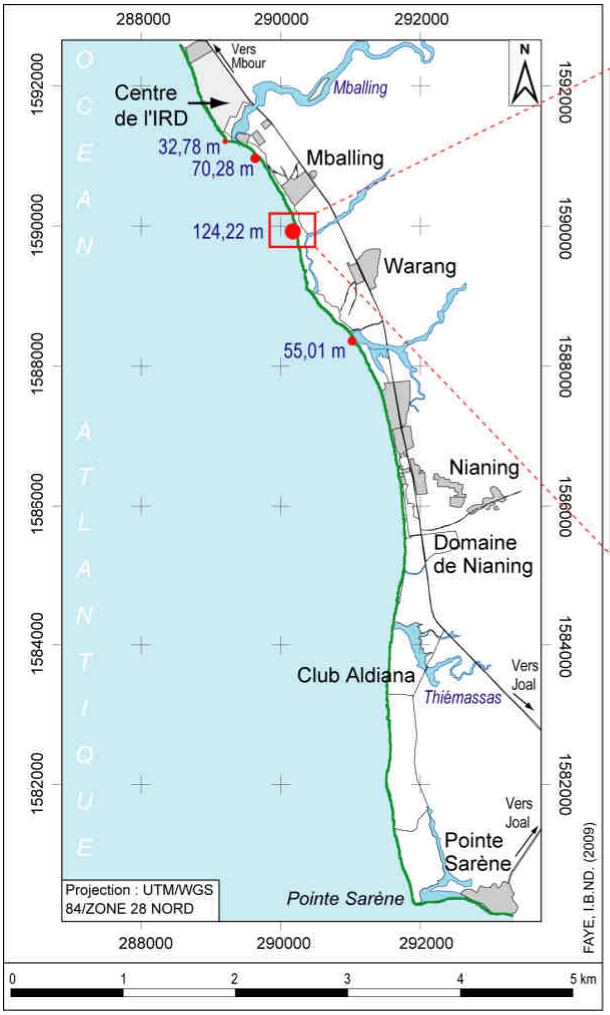


Figure 94d : Images de 1927



L'absence d'un front de végétation continu s'observe aussi sur les images de 1978 concernant le segment de Mbour à la Pointe Sarène (**Figure 95**) au nord et au sud de l'embouchure du marigot de Mballing ; au sud du village de Mballing, (**Photo 34**) et à l'embouchure du marigot au sud de Warang. Sur les autres missions, la limite de végétation est bien marquée.

Figure 95 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte en raison de l'absence d'une couverture végétale ou d'une limite de végétation très échancrée entre Mbour et Pointe Sarène



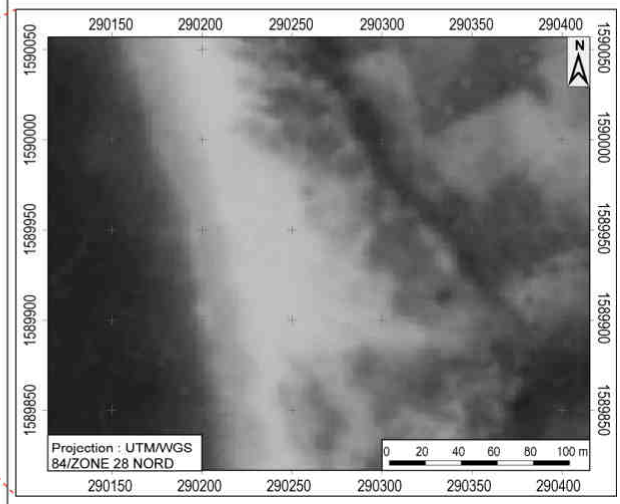


Photo 34 : Echancrure sur le front de végétation au sud de Mballing (Extrait d'une photographie aérienne, mission IGN 78.ND28-XIII-XV/600, cliché n°163).

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 revient à mesurer le degré de subjectivité du photo-interprète. Or comme le rappelle RUGGIERO *et al.*

(2003), il n'existe aucune méthode objective pour estimer ce paramètre qui fait partie des erreurs aléatoires (THIELER et DANFORTH, 1994a ; MORTON et MCKENNA, 1999). Néanmoins, les différents auteurs qui ont abordé la question recommandent de répéter les mesures d'évolution au minimum trois fois (ANDERS et BYRNES, 1991 ; THIELER et DANFORTH, 1994a ; GORMAN *et al.,* 1998), de comparer le trait de côte photo-interprété avec des mesures de terrain simultanées aux prises de vue (RUGGIERO *et al.,* 2003) ou de répéter la numérisation plusieurs fois (COYNE *et al.,* 1999 ; FLETCHER *et al.,* 2003).

Nous nous sommes inspirés de cette démarche, pour estimer la marge d'erreur induite lors de la numérisation à l'écran. 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 comparés. Cette répétition a permis de calculer les écart-types et les variations moyennes des décalages enregistrés lors du positionnement des lignes de référence (**Tableau 17**). D'après THIELER et DANFORTH (1994a) et 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).

Au demeurant, quelques difficultés limitant la précision de la numérisation de la ligne de pleines mers, du pied de dune et de la limite supérieure de la plage, notamment la limite de végétation dans les sites d'étude, sont à signaler.

A Nouakchott, pour la ligne de pleines mers, les images de 2005 offrent un bon contraste dans l'ensemble mais leur partie centrale est un peu surexposée, ce qui atténue le contraste entre les sables humides et les sables secs de la haute plage. Sur les images de 1991, la principale source d'erreur réside dans la sinuosité de la ligne de pleines mers. Sur les images de 1980, la faible netteté de la ligne de pleines mers, particulièrement de l'hôtel Ahmedy au Wharf, gêne la numérisation. Quant aux images de 1927, elles présentent un bon contraste dans l'ensemble, excepté sur le cliché F9 N°44 situé au sud du port.
Pour le pied de dune, la netteté est moyenne sur les images de 1980 et de 1954 acquises à une échelle plus petite, cela constitue un facteur de difficultés supplémentaires pour une identification précise du pied de dune alors que sur les images de 1927, la grande échelle des prises de vue facilite leur interprétation.

A Ndiago, les images de 1927 et 1980 sont assez nettes mais la ligne de pleines mers est difficile à détecter localement à cause d'un faible contraste. Dans les environs de Saint-Louis, le contraste de la mission de 1980 est très médiocre. En dépit de l'agrandissement des tirages originaux du 1/50 000 au 1/20 000, les images restent surexposées. Cette aberration chromatique se retrouve

aussi sur les images de 1964 qui sont très peu contrastées, tout comme deux clichés de la mission de 1927 (F13 N°43, F13 N°38). Les meilleures images ac quises sur le site de Saint-Louis sont celles de 1995 et 2005 prises au 10000e où le principal problème rencontré lors de l'identification de la ligne de pleines mers est l'accumulation de déchets et de laisses sur la haute plage. On observe en plus sur les images de 1995, un alignement de pirogues qui gêne l'extraction de la limite supérieure d'humectation de l'estran au droit de Ndar Toute et Guet Ndar.

Pour le site de Bargny à Yène-sur-mer, les images de 1997, 1976, 1954 et 1927 présentent une bonne netteté dans l'ensemble, mais la présence de *beach-rock* entre Miname et Siendou ainsi que la sinuosité de la limite de végétation constituent une source d'erreurs non négligeables.
Dans le secteur de Mbour à Pointe Sarène, les variations d'interprétation de la limite de végétation résultent essentiellement de la présence de touffes de végétation isolées sur la haute plage au sud de Nianing sur les prises de vue de 1954 et 1978 et de petites échancrures locales de la couverture végétale que l'on observe sur toutes les missions.

Tableau 17 : Précision de la numérisation des lignes de référence et estimation des erreurs sur les sites de Nouakchott, Ndiago, Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène

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)
Nouakchott (Taille du pixel : 0,9 m)						
1927	Ligne de pleines mers	647	0,59	0,27	1,13	2,03
1980		525	1,05	0,81	2,67	3,57
1991		775	0,60	0,26	1,12	2,02
2005		557	0,81	0,25	1,31	2,21
1927	Pied de dune	685	0,37	0,13	0,63	1,53
1954		512	1,60	0,53	2,66	3,56
1980		577	0,87	0,43	1,73	2,63
Ndiago (Taille du pixel : 0,8 m)						
1927	Ligne de pleines mers	618	0,64	0,25	1,14	1,94
1980		602	0,70	0,13	0,96	1,76
Saint-Louis (Taille du pixel : 0,6 m)						
1927	Ligne de pleines mers	691	0,82	0,09	1,00	1,6
1964		438	1,28	0,49	2,26	2,86
1980		631	1,83	0,57	2,97	3,57
1995		573	0,54	0,23	1,00	1,6
2005		655	0,30	0,18	0,66	1,26
Bargny – Yène-Sur-Mer (Taille du pixel : 0,7 m)						
1927	Limite supérieure de la plage	837	0,52	0,22	0,96	1,66
1954		772	0,56	0,25	1,06	1,76
1976		881	0,35	0,18	0,71	1,41
1997		677	0,51	0,20	0,91	1,61
Mbour – Pointe Sarène (Taille du pixel : 1 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, on obtient une précision de l'ordre de 1 à 2 m pour la ligne de pleines mers ou la limite supérieure de la plage (limite de végétation, des maisons, pied de dune) sur des prises de vue de bonne qualité et à grande échelle (>1/20 000). En revanche, l'incertitude est plus grande (>3 m), surtout pour la ligne de pleines mers si le contraste de l'image est médiocre comme sur les clichés de 1980 concernant Nouakchott ou Saint-Louis.

4 – Erreurs liées aux oscillations du niveau de pleines mers

Une étude comparative fondée sur la photo-interprétation de la ligne de pleines mers requiert que les images soient acquises aux mêmes périodes dans des conditions de marée identiques ou proches afin de minimiser l'influence des fluctuations du niveau des pleines mers (STAFFORD ET LANGFELDER, 1971). Cette condition n'est respectée que pour les données de Ndiago (1927, 1980) et de Saint-Louis (1927, 1980, 1995 et 2005) dont les photographies ont été acquises en saison sèche dans des conditions météorologiques et océanographiques calmes. Toutefois, les dates exactes et les conditions météorologiques de toutes les prises de vue utilisées à Nouakchott et celles de 1964 à Saint-Louis sont inconnues, comme nous l'avons mentionné précédemment. Il est donc nécessaire d'évaluer les effets des variations du niveau de marée haute sur la position de la ligne des pleines mers entre deux missions successives. Quantifier précisément ces effets est délicat, car, d'une part, nous ne disposons pas de données concernant la pente de la plage lors de l'acquisition des images et, d'autre part, il n'existe pas de marégraphe dans des sites comme Nouakchott. Dans ces conditions, on ne peut que fournir des approximations à partir des informations tirées des études antérieures sur les niveaux des pleines mers et/ou les pentes de la plage pour avoir une idée relative aux ordres de grandeur des variations potentielles de la position de la ligne de pleines mers d'une mission à une autre. Pour ce faire, on applique la même formule que celle qui nous a permis d'estimer les écarts horizontaux entre les lignes instantanées de rivage sur les images Landsat.

Pour cartographier l'aléa de submersion à Nouakchott, le GRESARC (2006) a calculé des niveaux de pleines mers extrêmes pour la période 1980 – 2006 à partir des données marégraphiques de Nouadhibou, Saint-Louis et Dakar qui sont les ports de référence les plus proches. L'estimation du niveau maximum, pour une pleine mer de vive-eau, est de 1,37 m EGM96[53] (2,22 m au-dessus du zéro hydrographique) et le niveau minimum (pour une pleine mer de morte-eau) est de 0,24 m EGM96 (1,29 m au-dessus du zéro hydrographique). Concernant les pentes de la plage, les profils réalisés au clinomètre tous les 5 m par DE LANJAMET (1988) indiquent des pentes allant de 2,5° pour les plus faibles à 8,5° pour les plus fortes. Ainsi, pour une pente de 2,5°, le décalage entre les lignes des pleines mers maximales et minimales sera de 21,62 m et pour une pente de 8,5°, l'écart sera de 6,24 m soit en moyenne ±13,93 m. En l'absence d'informations sur les dates, les conditions météorologiques et marégraphiques des missions aériennes, une valeur moyenne ±14 m a été retenue comme marge d'incertitude approximative associée aux variations de la position de la ligne de pleines mers entre deux dates.

[53] *Earth Gravitational Model 1996*

A Ndiago, aucune description des pentes de la plage n'est disponible dans la littérature. Lors d'une mission de terrain effectuée le 13 juillet 2006, nous avions levé sept profils au tachéomètre sur le site. Le long de ces profils à marée basse, la pente de la plage variait entre 1,6° et 3,13°. Les prédictions marégraphiques du SHOM suggèrent que les photographies aériennes de 1980 ont été acquises après une pleine mer de 1,5 m. Pour celles de 1927, ne connaissant pas les dates exactes des prises de vue, nous avons recherché les hauteurs des pleines mers extrêmes (maximale et minimale) durant les deux mois concernés. Le niveau maximum prédit par le SHOM est de 1,77 m et le minimum est de 1,13 m. Avec une pente de 1,6°, la ligne de pleines mers est susceptible de migrer sur une distance comprise entre 9,66 m et 13,25 m entre février-mars 1927 et février 1980 alors que pour une pente de 3,13°, l'écart varie de 4,93 à 6, 77 m, soit en moyenne 8,65 m.

A Saint-Louis, les travaux de SALL (1982) repris par SOUMARE (1996) indiquent des pentes de 3 à 4% (1,72 à 2,29°) dans le segment compris entre le nord de la ville et l'hydrobase. A partir de ces informations et des marées prédites par le SHOM au port de Saint-Louis, des marges d'erreur ont été définies par période d'étude.

Février-mars 1927 – 1964

Dans la mesure où les dates exactes de la mission de 1927 et de 1964 sont inconnues, nous avons recherché les niveaux maximal et minimal des pleines mers pendant les mois de février-mars 1927 et l'année 1964. Ces niveaux sont respectivement de 1,77 m et de 1,11 m. Ainsi pour une pente de 1,72°, le décalage sera de 21,98 m et pour une pente de 2,29°, l'écart sera de 16,51 m, soit une moyenne de 19,24 m.

1964 – 3 février 1980

Comme dans le cas précédent, les niveaux de la pleine mer maximale et minimale de 1964 ont été recherchés. Ils sont de 1,73 m et de 1,11 m. Par rapport aux images du 3 février 1980, cela implique pour une pente de 1,72°, des écarts de 7,66 m et de 12,99 m. Avec une pente de 2,29°, les décalages seront de 5,75 m et de 9,76 m, soit en moyenne 9,04 m.

3 février 1980 – 22 février 1995

Les photographies aériennes de 1995 ont été exécutées entre 13H20 et 13H30[54], après une pleine mer de 1,36 m. Ainsi, par rapport à la ligne des pleines mers du 3 février 1980, une pente de 1,72°, entraîne un décalage de 4,66 m et une pente de 2,29°, un écart de 3,51 m, donc 4,08 m en moyenne.

22 février 1995 – 17 novembre 2005

Les prises de vue aériennes de 2005 ont été acquises entre 12H35 et 13H12 après une pleine mer de 1,5 m. L'écart potentiel entre cette ligne et celle du 22 février 1995 est identique à celle de la période 1995 – 2005, c'est-à-dire 4,08 m.

[54] Les dates et les heures des photographies des missions aériennes de 1995 et de 2005 sont mentionnées en marge des clichés.

5 – 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, à l'extraction des lignes de référence et aux erreurs induites par les oscillations du niveau des pleines mers, avant le calcul des taux d'évolution, une marge d'erreur globale et par période a été définie pour tous les sites. Cette marge d'erreur est le résultat du cumul de l'ensemble des erreurs qui ont été estimées précédemment (**Tableau 18 et Annexe 6**).

Tableau 18 : Estimation de la marge d'erreur globale dans les sites d'étude sélectionnés pour l'évolution locale de la cinématique littorale

Période d'étude	Ligne de référence	Site concerné	Marge d'erreur (m)
1927 – 1954	Pied de dune	Nouakchott	**±10,89**
1954 – 1980			**±11,99**
1927 – 1980			**±14,42**
1927 – 1980		Sud du port de Nouakchott	**±11,79**
1927 – 1980	Ligne de pleines mers	Nouakchott	**±25,4**
1980 – 1991			**±25,39**
1991 – 2005			**±24,03**
1927 – 2005			**±59,43**
1927 – 1980	Ligne de pleines mers	Ndiago	**±17,95**
1927 – 1964	Ligne de pleines mers	Saint-Louis	**±28,90**
1964 – 1980			**±20,67**
1980 – 1995			**±14,45**
1995 – 2005			**±12,54**
1927 – 2005			**±54,33**
1927 – 1954	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation (1927, 1954) et/ou à la limite des maisons (1976, 1997)	Bargny – Yène-sur-mer	**±8,82**
1954 – 1976			**±8,57**
1976 – 1997			**±8,42**
1927 – 1997			**±13,24**
1954 – 1978	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation (1954, 1978) et/ou à la limite des maisons (1997)	Mbour – Pointe Sarène	**±11,01**
1978 – 1997			**±10,73**
1954 – 1997			**±14,06**

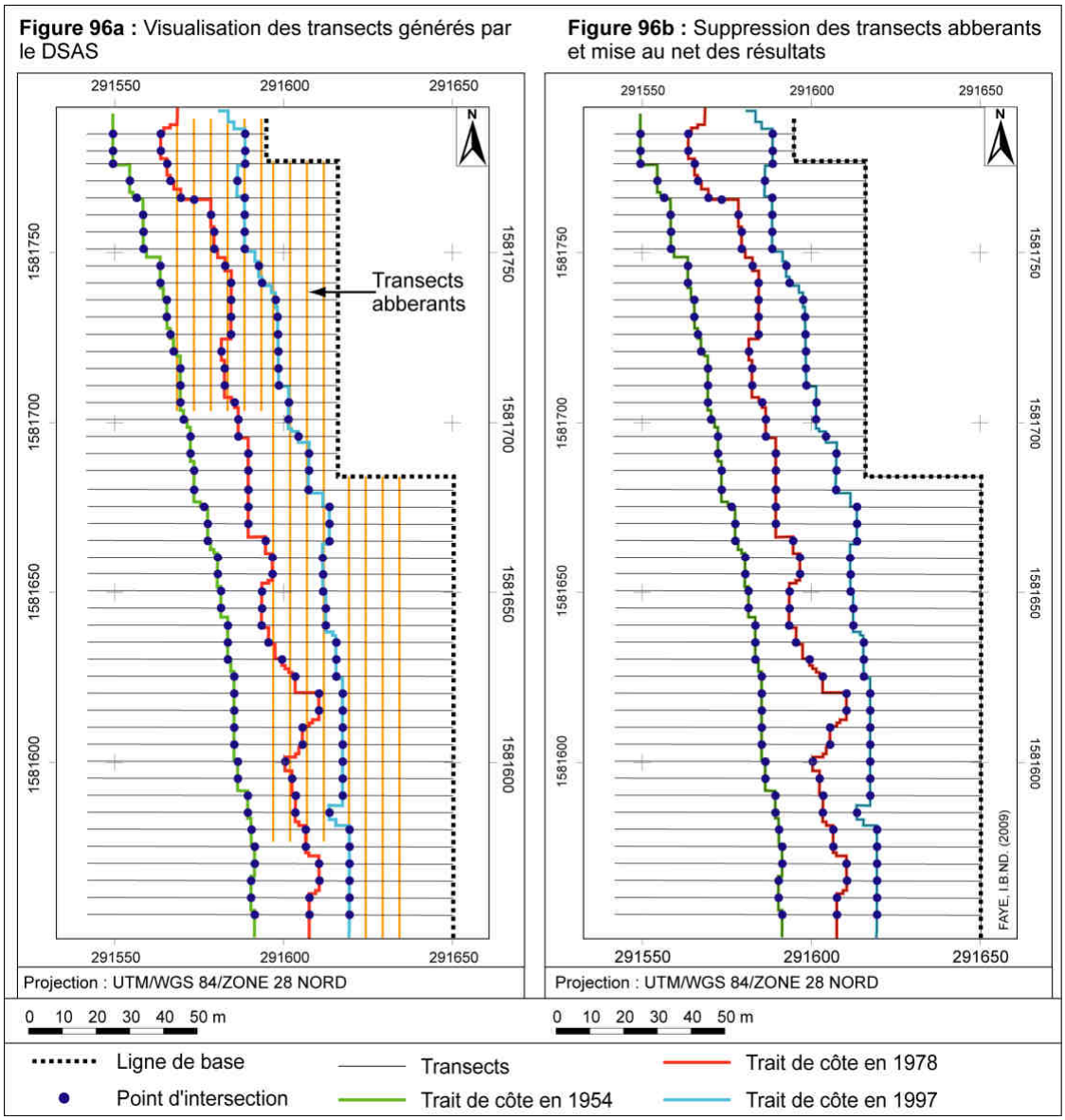
Ces marges d'erreur qui affectent la précision du positionnement des lignes de référence sont requises par ailleurs par l'outil informatique qui a été utilisé pour mesurer la cinématique littorale dans les différents sites.

III – OUTIL DE MESURE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

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 96**). 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. Par la suite, tous les transects générés ont été contrôlés pour vérifier et éliminer les transects aberrants (**Figure 96b**) ou ceux qui étaient situés dans les zones où les lignes de référence n'ont pas pu être numérisées et dans les zones où la qualité du géoréférencement était médiocre.

Figure 96 : Exemple de transects et d'une ligne de base générés par le DSAS pour mesurer l'évolution du trait de côte de Mbour à la Pointe Sarène de 1954 à 1997

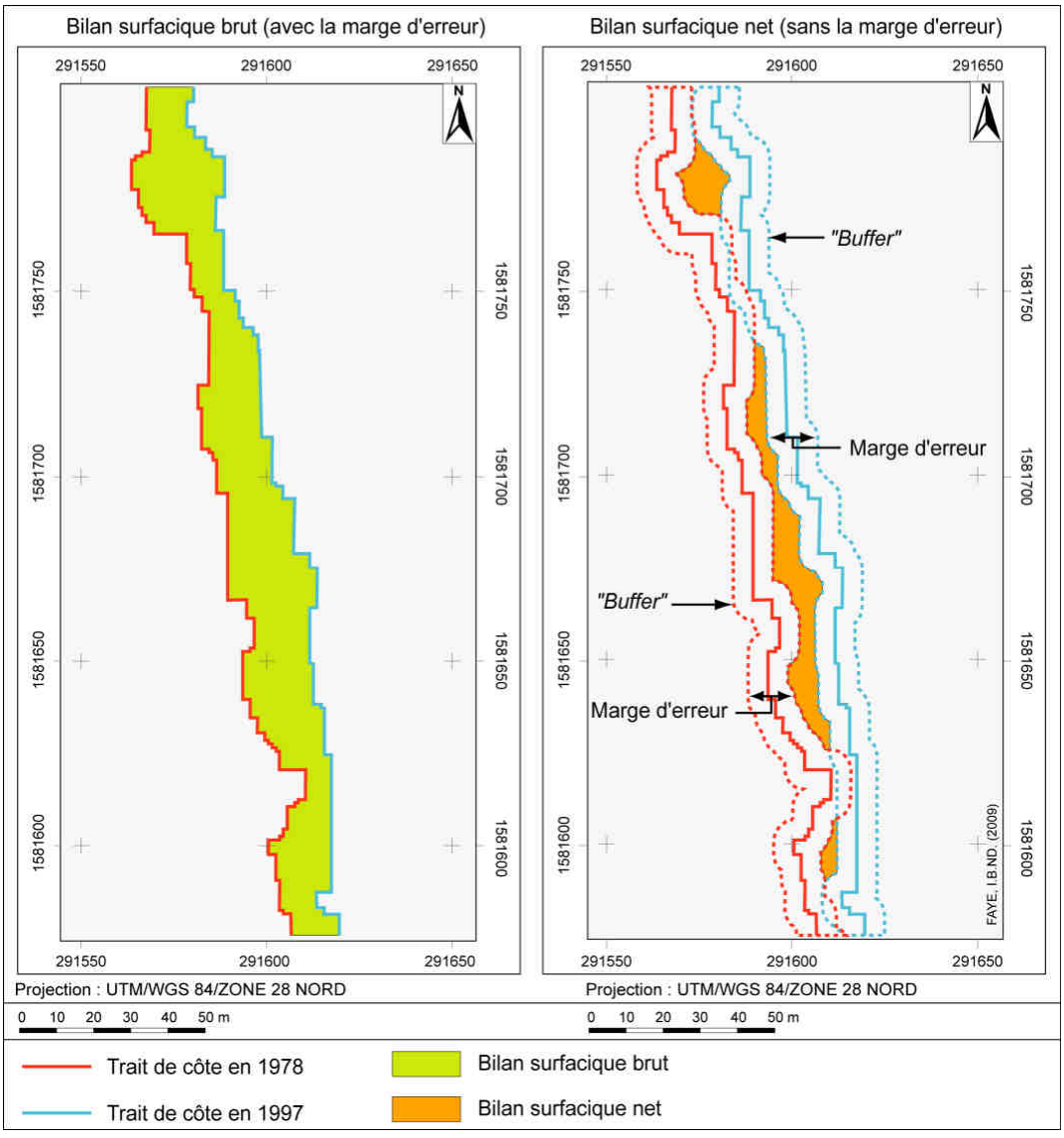


L'estimation de la cinématique littorale et la cartographie des taux d'évolution sont basées sur l'analyse des tables attributaires générées automatiquement. Pour appréhender l'évolution temporelle de la position du trait de côte, nous avons choisi deux indices proposés par le DSAS : l'indice EPR (*End 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 des lignes de référence de chaque site.

Une estimation des surfaces gagnées ou perdues a aussi été effectuée en superposant et en intersectant les lignes de référence à un même niveau. Ensuite, elles sont fusionnées pour constituer un seul thème avec *ArcToolsbox* puis converties en polygones dans *ArcCatalog* ou *MapInfo 6.0* et leurs surfaces calculées automatiquement. Pour tenir compte de la marge d'erreur, on a établi un *buffer,* une zone tampon représentant la marge d'erreur autour de chaque ligne de référence (**Figure 97**).

Figure 97 : Représentation graphique des bilans surfaciques bruts et des bilans surfaciques nets. Exemple de la période 1978 – 1997 concernant un segment du littoral entre Mbour et Pointe Sarène.



Conclusion du chapitre III

Tout comme notre analyse régionale, notre étude diachronique de l'évolution du littoral ouest-africain fondée sur l'analyse de documents cartographiques anciens et d'images aériennes, comportent de nombreuses sources d'incertitude.

Sur les cartes marines, les sources d'incertitude sont de deux ordres. Le premier facteur est lié à la qualité des cartes. Toutefois, cette erreur n'est pas quantifiable en l'absence de détails sur les levés hydrographiques de base et les procédés d'établissement de toutes les cartes utilisées. Dans ces conditions, nous nous sommes basés sur les indications générales portées sur les cartes, les renseignements bibliographiques ainsi que l'examen et la comparaison des documents cartographiques entre eux pour mettre en évidence des incohérences éventuelles. Ainsi, l'analyse de certaines cartes marines, à grandes échelles a révélé quelques faits incohérents avec des processus naturels d'évolution du littoral. En effet, l'édition de 1877 de la carte N° 3592 (Carte particulière de la Baie de Gorée au 1/39 900) contient des détails topographiques inexacts qui se traduisent par une représentation erronée des contours du trait de côte entre Dakar et Mbour. De même, l'édition de 1928 de la carte N° 4892 (Mouillage de Saint-Louis au 1/50 990) est entachée d'erreurs locales de positionnement des objets au nord et au sud de Saint-Louis. Cette précision spatiale variable des cartes marines doit être prise en compte et inviter à la prudence dans l'interprétation des résultats obtenus. Le deuxième type d'erreur qui affecte la précision du zéro hydrographique ou de la *«laisse de haute mer»* relève de l'exploitation des données cartographiques à travers les processus de digitalisation et de géoréférencement. Celle-ci entraîne une erreur inférieure à 4 m dans le premier cas et dans le deuxième cas, une incertitude qui varie de 9 à 12 m selon l'épaisseur des traits et l'échelle des cartes. Il en résulte une marge d'erreur globale de 26,91 m pour les cartes de la Langue de Barbarie et de 28,5 m pour le secteur de Bargny à Yène-sur-mer. Ces marges qui ne tiennent pas compte des incertitudes liées à la précision aléatoire des documents cartographiques ne sont que de simples approximations donnant une idée des erreurs induites par notre méthode de traitement.

Pour les images aériennes, les incertitudes relatives à la précision du GPS lors de l'acquisition des points de calage, au géoréférencement des images, à la numérisation des lignes de référence et aux variations du niveau de deux pleines mers consécutives ont été évaluées.

Les erreurs liées au GPS ont été estimées à ±4 m sur la base de comparaisons entre des points GPS et des coordonnées de bornes géodésiques de l'IGN alors que l'erreur RMS résultant du calage des images s'est révélée toujours inférieure ou égale à 0,5 pixel.

Quant à l'erreur de numérisation des lignes de référence, elle est difficile à estimer puisqu'elle est variable dans le temps et fonction de la qualité des images. De plus, comme l'ont signalé RUGGIERO *et al.* (2003), il n'existe pas de méthodes objectives pour quantifier ce paramètre. Nous nous sommes donc inspirés de la démarche de COYNE *et al.* (1999) et de FLETCHER *et al.* (2003) qui consiste à

répéter la numérisation plusieurs fois. Ainsi, la répétition des données acquises dans un même secteur à plusieurs jours d'intervalle a permis de comparer les résultats et de calculer les variations moyennes et les écart-types des décalages afin d'estimer la marge d'erreur à la moyenne plus deux écarts-types. Ce faisant, nous avons obtenu une précision de 1 à 2 m pour la ligne de pleines mers, la limite de végétation ou des aménagements côtiers sur les prises de vue de bonne qualité et à grande échelle (>1/20 000). En revanche, l'incertitude est supérieure à 3 m pour la ligne de pleines mers si le contraste de l'image est médiocre comme par exemple sur les clichés de 1980 concernant Nouakchott et Saint-Louis.

Les erreurs induites par les oscillations du niveau de pleines mers d'une mission à une autre ont été évaluées suivant le même principe que celui adopté pour les niveaux instantanés de marée sur les ortho-images Landsat de la pointe de la Langue de Barbarie. Là aussi les données de pente proviennent de la bibliographie et des niveaux de marées prédits par le SHOM au port de Saint-Louis pour les sites de la Langue de Barbarie. En se fondant sur ces informations, à Nouakchott, à défaut de disposer d'informations sur les dates exactes de prise de vues et les conditions météo-marines prévalant au moment de l'enregistrement des images de 1927 à 2005, l'incertitude a été estimée en moyenne à ±14 m entre deux lignes de pleines mers. A Ndiago entre février – mars 1927 et février 1980, nous avons défini une erreur de ±8,65 m.

Pour Saint-Louis, les hauteurs de marées prédites et les dates des prises de vue étant plus ou moins connues, des marges d'erreurs ont été définies pour chaque période d'étude. Ainsi entre février – mars 1927 et 1964, l'erreur potentielle est de ±19,24 m. Elle est de ±9,04 m entre 1964 et février 1980, de ±4,08 m entre février 1980 et février 1995 ainsi que février 1995 – novembre 2005.

Les erreurs résultant des oscillations du niveau de pleines mers induisent au final, une incertitude globale très importante de 1927 à 2005 dans les sites de Nouakchott (±59,43 m), Saint-Louis (±54,33 m) et de ±17,95 m à Ndiago pour la période 1927 – 1980. L'erreur sur les taux d'évolution de la ligne de pleines mers est de 0,76 m/an à Nouakchott, 0,69 m/an à Saint-Louis et 0,33 m/an à Ndiago. La forte incertitude enregistrée à Nouakchott et Saint-Louis pose le problème de la variabilité sur le court terme de la ligne de pleines mers qui demeure néanmoins la seule entité de référence visible actuellement utilisable pour évaluer la cinématique littorale.

Dans les sites où nous avons utilisé une ligne indépendante de la marée, la marge d'erreur totale est moindre et provient de la somme des incertitudes générées par le récepteur GPS et les différentes étapes du traitement des images aériennes. Elle est de ±14,42 m pour le pied de dune à Nouakchott de 1927 à 1980 ; ±13,24 m pour la limite supérieure de la plage à Bargny – Yène-sur-mer de 1927 à 1997, ±14,05 m à Mbour – Pointe Sarène de 1954 à 1997, soit respectivement des taux d'incertitude de 0,27 m/an ; 0,18 m/an et de 0,32 m/an.

Ces marges d'erreur ont été intégrées dans le programme DSAS qui nous a servi d'outil de mesure automatique des évolutions linéaires du littoral suivant des transects perpendiculaires aux lignes de référence à comparer. L'indice EPR a été utilisé pour calculer l'évolution entre deux périodes successives et l'indice LR pour calculer l'évolution sur le long terme et sur l'ensemble des linéaires côtiers disponibles à Nouakchott, Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène. Ces mesures ont été complétées par des bilans surfaciques calculés automatiquement à partir de la fusion des traits de côte multi-dates de chaque site.

CHAPITRE IV : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET ANTHROPIQUES ACTUELLES DES SITES SELECTIONNES

Sur les huit sites présélectionnés seulement quatre d'entre eux ont été retenus (**Figure 98, volume 2**). Répartis sur le littoral sénégalo-mauritanien, ils présentent des caractéristiques morphologiques, anthropiques et des conditions météo-marines différentes.

Le facteur anthropique s'exprime par des aménagements côtiers et des usages qui peuvent influencer l'évolution du trait de côte soit en favorisant l'érosion ou la progradation, soit en luttant contre ces phénomènes. L'occupation des sols pose également la question des enjeux socio-économiques liés à la cinématique littorale. Ce chapitre détaille les caractéristiques des quatre sites étudiés.

I – LES ABORDS DE NOUAKCHOTT

1 – Caractéristiques physiques

Situé dans la partie centrale de la «grande plage mauritanienne», le littoral de Nouakchott est formé par une plage de sable blanc coquillier associée à un cordon dunaire ensellé barrant une dépression à sebkhas, l'*Aftout es Saheli* (**Figure 99, volume 2**). L'altitude de la ceinture de dunes littorales peut atteindre 7 m au nord du port de pêche tandis qu'au sud, elle varie de 2 à 4 m (GRESARC, 2006). C'est une côte ouverte sur le large, caractérisée par un puissant déferlement en rouleaux lié à la présence de barres prélittorales (BONNIN, 1938 ; MANNEVY, 1958 ; HEBRARD, 1973 ; PITTE, 1977 ; DE LANJAMET, 1988).

La zone couverte par notre étude s'étend sur environ 14 km du sud du port de pêche artisanale jusqu'au sud du port autonome de Nouakchott (**Figure 99, volume 2**). Actuellement la morphologie et l'orientation du trait de côte sont caractéristiques de trois secteurs :

- entre le port de pêche et le wharf, le trait de côte a une orientation nord – sud. La plage de 30 à 50 m de large est bordée par un cordon de dunes vives parsemé de touffes de *Zygophyllum waterlotii, Tamarix sp.,* et de *Nitraria retusa* (largeur : 150 à 200 m) (**Photo 35**).

- Au sud du wharf, l'épave du bateau *Walter* marque un net changement d'orientation du trait de côte qui prend une direction nord-nord-est – sud-sud-ouest. L'accumulation des sédiments au nord de la digue du port est responsable de cette incurvation. C'est dans cette zone que le cordon dunaire tapissé de *Zygophyllum waterlotii* et de *Nitraria retusa* atteint sa largeur maximale. De 300 m aux environs de l'épave du bateau *Walter*, il s'étend sur plus de 800 m de large au niveau de la passerelle du port (**Photo 36**).

- Au sud des installations du port autonome, l'érosion, accélérée par l'épi et la jetée sous la passerelle, donne à la côte un plan incurvé. L'estran, qui suit une direction nord-nord-ouest – sud-sud-est après le quai, s'oriente progressivement vers le nord-nord-est – sud-sud-ouest en aval de l'épi. Dans ce secteur, le cordon dunaire a disparu favorisant ainsi un contact direct de la plage avec les sebkhas de l'*Aftout es Saheli* (**Photo 37**).

Tout le long de cette section de côte, la plage présente localement des structures périodiques notamment des croissants et des gradins de plage ou des falaises de 20 cm à 1,1 m de dénivellation.

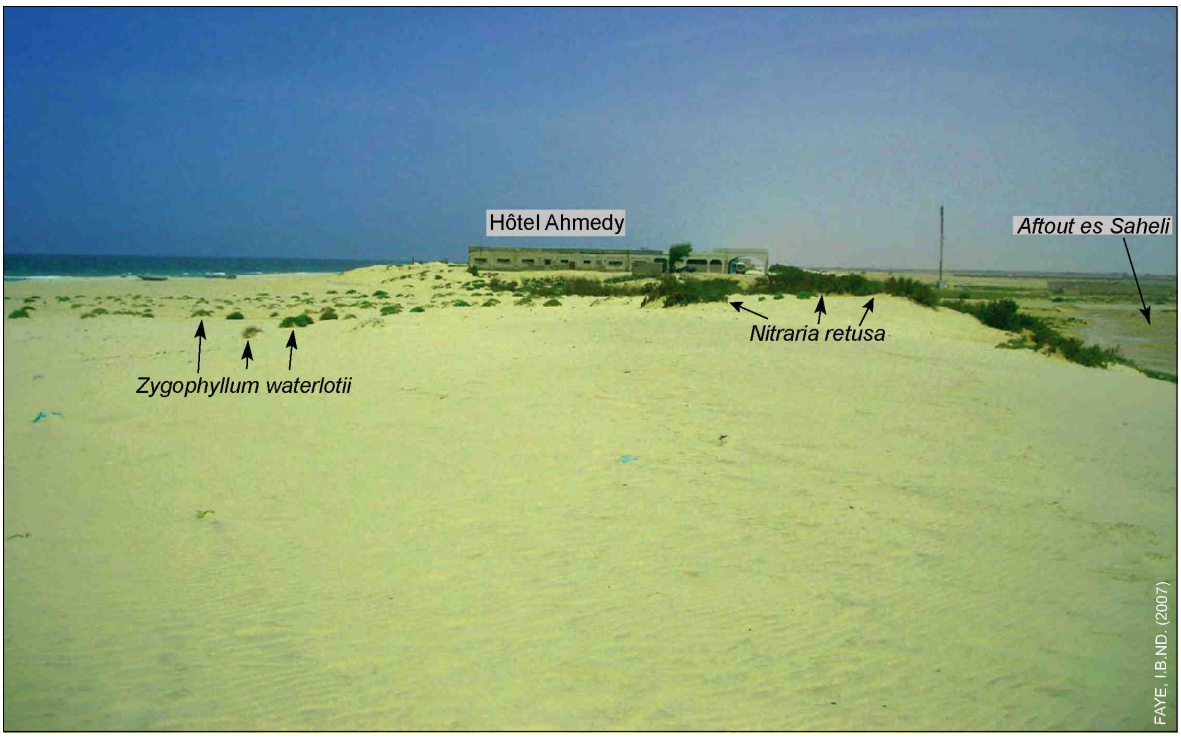


Photo 35 : Le cordon dunaire parsemé de touffes de végétation et d'étendue modeste (150 à 200 m de large) au nord du wharf. Vue prise en direction du nord, le 22-08-2007.

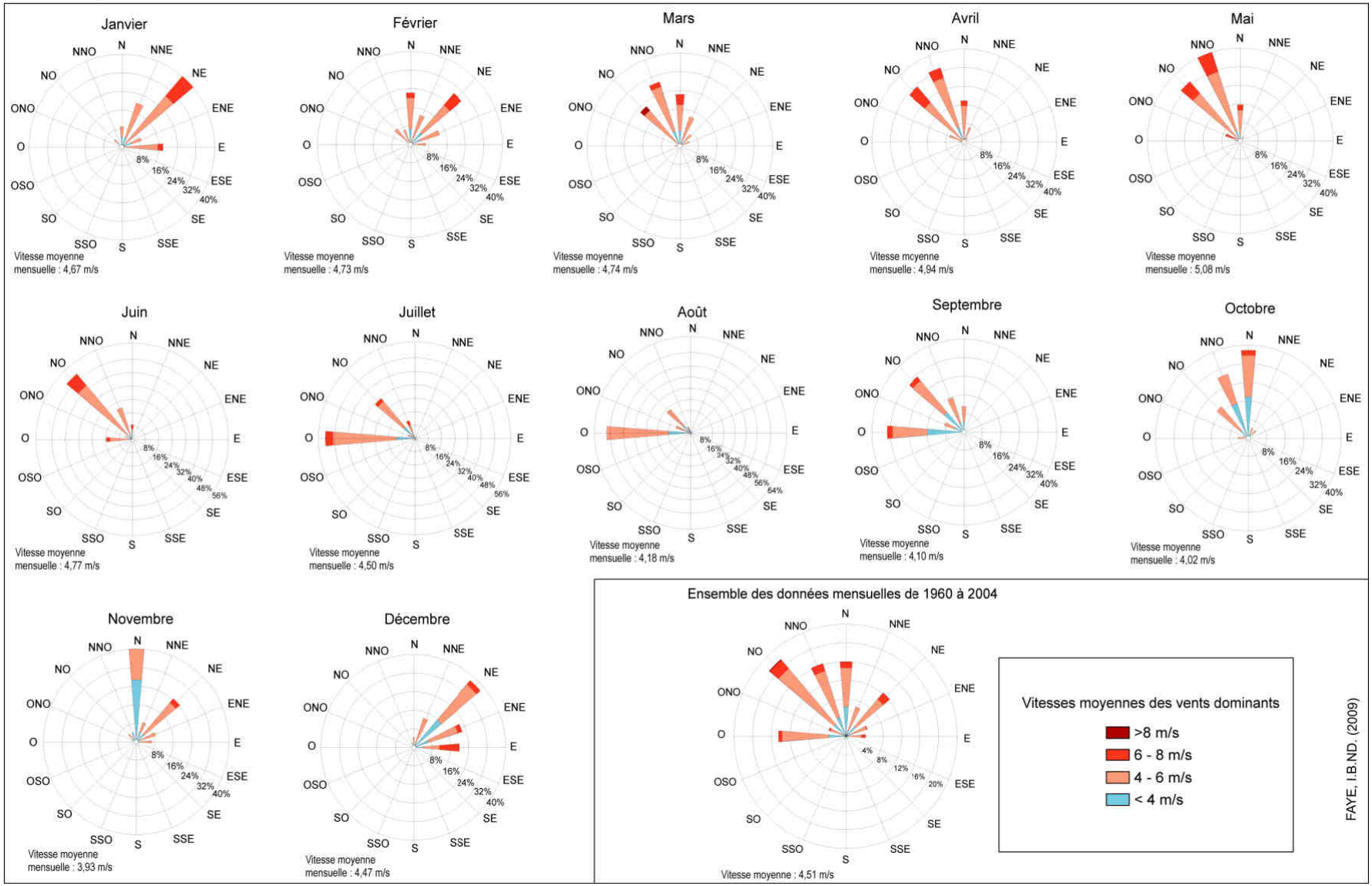
Photo 36 : Aperçu du cordon dunaire au sud du wharf. En avant de la dune préexistante, on observe une banquette pré-dunaire couverte de *Zygophyllum waterlotii*, résultat de l'accumulation des sédiments au nord de la jetée du port. Vue prise en direction du nord, le 16-08-2007.

Photo 37 : Absence de codon dunaire au sud du port de Nouakchott. Un placage sableux sépare l'estran de l'*Aftout es Saheli*. Vue prise en direction du sud, le 03-08-2006.

Concernant les conditions anémométriques à la station de Nouakchott (**Figure 100**), les vents mensuels dominants de 1960 à 2004 ont une vitesse moyenne de 4,51 m/s (essentiellement 4 à 6 m/s soit 66 % des flux) et proviennent essentiellement du secteur nord (63,91% des observations) avec une prépondérance des composantes nord-ouest, nord-nord-ouest, nord et nord-est. La répartition intermensuelle des vents dominants indique trois à quatre saisons dans l'année. Ainsi de décembre à février, le vent dominant est de secteur nord-est. Il passe au nord-nord-ouest et nord-ouest entre mars et juin, alors que de juillet à septembre, les flux dominants viennent de l'ouest et du nord d'octobre à novembre. La vitesse moyenne mensuelle de ces alizés est comprise entre 4 et 5 m/s. D'après les études de MARICO (1996) et PHILIPPON (1999), ces vents sont, d'un point de vue théorique, suffisamment efficaces pour générer un transit éolien, et ce, d'autant plus que le couvert végétal est très épars voire inexistant. D'ailleurs, certains phénomènes météorologiques comme la tempête de sables, les brumes sèches et la chasse sable font parties des éléments marquants du climat de la zone qui est de type côtier sec (COULYBALY, 1994). Toutefois, l'efficacité des vents est contrariée durant la saison pluvieuse par la forte humidité des flux d'ouest de juillet à septembre qui enregistrent l'essentiel des pluies, en moyenne 111 mm/an de 1931 à 2004 selon les données du Service National de la Météorologie.

A Nouakchott, les houles dominantes proviennent essentiellement des secteurs nord-ouest, ouest-nord-ouest et ouest avec des périodes de 8 à 11 secondes et des hauteurs significatives de 1,64 à 2,26 m (OULD EL MOUSTAPHA *et al.*, 2007). Le volume de la charge sédimentaire charrié par la dérive littorale induite, orientée du nord au sud est estimé entre 690 000 et 1 100 000 m^3/an suivant les formules utilisées par les auteurs (BARUSSEAU, 1985a ; 1985b ; SHE-LENG et TEH-FU, 1987 ; OULD EL MOUSTAPHA, 2000).
Le marnage de type microtidal, est en moyenne de 0,93 m/an (BAI *et al.,* 1997)

Figure 100 : Directions et vitesses moyennes des vents dominants à la station de Nouakchott de 1960 à 2004 d'après les données du Service National de la Météorologie



2 – Caractéristiques anthropiques

Le littoral nouakchottois est peu bâti car la ville se trouve à cheval sur l'*Aftout es Saheli* et les dunes continentales de l'Amoukrouz (**Figure 99, volume 2)**. Les premiers quartiers sont localisés à 1,5 – 2 km de la mer. Les observations de terrain et l'analyse des images aériennes montrent trois zones où se concentrent les espaces bâtis : le nord de l'hôtel Ahmedy, le wharf et le port autonome au sud.

Au nord de l'hôtel Ahmedy, l'empreinte de la pêche et de ses activités annexes (mareyage, transformation artisanale des produits halieutiques) se matérialise par l'utilisation de la plage comme débarcadère et l'aménagement, sur le cordon dunaire, de tentes, d'un marché au poisson ainsi que d'un site de transformation artisanale de produits de la mer. A ces installations, s'ajoutent des constructions : l'hôtel Ahmedy plus ou moins abandonné, l'hôtel Cap Timiris en ruines et, au nord du port de pêche, l'hôtel Sabbah et Tergit Vacances.

Dans la zone du Wharf et du port, les aménagements portuaires et les industries associées sont installées en partie sur le cordon dunaire. Au niveau du wharf, on peut noter les entrepôts de la SOMAGAZ, de la Société Mauritanienne d'Entreposage de Produits Pétroliers et les Ciments de Mauritanie. Il en résulte un démantèlement de la dune bordière au voisinage de ces unités industrielles qui font aussi obstacle au transit éolien. Comme nous l'avons vu précédemment, les infrastructures qui ont complètement bouleversé la physionomie du trait de côte restent les épis construits sous la passerelle du port en 1986 et à 600 m au sud en 1991. Pour éviter la submersion des sebkhas et, par la même occasion, celle de la zone portuaire, ce dernier épi a été prolongé vers le sud par une digue d'environ 2 km de long situé dans l'*Aftout es Saheli* à trois cents mètres du rivage.

Par ailleurs, la croissance démographique importante qu'a connue Nouakchott depuis les années 1950 a provoqué la multiplication d'activités anthropiques ayant contribué à divers degrés aux modifications du trait de côte (DE LANJAMET, 1988). En effet, depuis que la ville a été érigée en capitale en 1957, la population nouakchottoise est passée en une cinquantaine d'années de 5000 habitants en 1959 à plus de 700 000 actuellement (PENNOBER et CREUSEVEAU, 2005).

La plage est progressivement devenue un espace de loisir. Le piétinement des dunes par les promeneurs (**Photo 38**) et les voitures (**Photo 39**) participe à la dégradation du couvert végétal déjà maigre du fait des conditions climatiques. Il s'ajoute à d'autres activités anthropiques telles que le prélèvement des espèces ligneuses *(Tamarix)* comme combustibles, le surpâturage et le prélèvement de sables dunaires (THIAM, 1976 ; MARICO, 1996 ; PHILIPON, 1997 ; OULD EL MOUSTAPHA, 2000).

Ces activités ont fragilisé les dunes et semblent avoir favorisé la rupture du cordon dunaire lors de multiples périodes de grandes marées et de fortes houles combinées à des vents forts comme

en février 1987 au sud du port autonome, au nord de l'hôtel Ahmedy en août 1992, en décembre 1997, en décembre 1999 et novembre 2003 (SAINT-MARTIN PAYSAGE et IRC-CONSULTANT, 2004 ; OULD EL MOUSTAPHA *et al.*, 2005).

Aujourd'hui à l'initiative de l'IUCN[55], le cordon dunaire fait l'objet de fixation mécanique par le clayonnage avec des branches d'arbustes ou des tiges de *Typha* à côté de l'hôtel Ahmedy ou entre le port de pêche et Tergit Vacances par exemple (**Photo 40**).

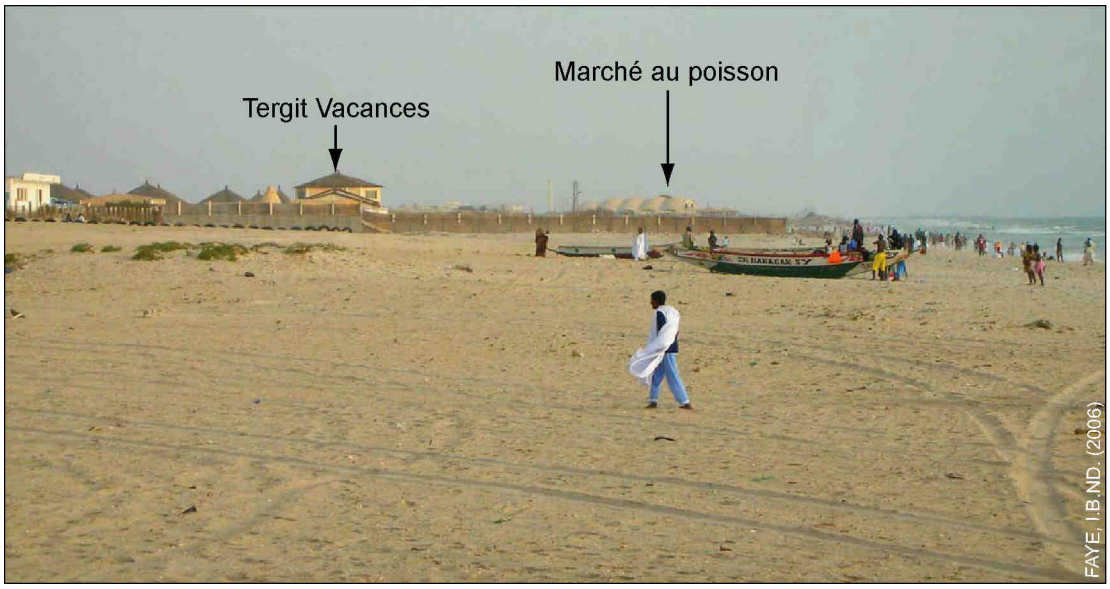


Photo 38 : Fréquentation de la plage de Tergit Vacances. Vue prise en direction du sud, le 02-07-2006.

Photo 39 : Circulation des voitures sur le cordon dunaire au nord de Tergit Vacances. Vue prise en direction du sud, le 02-07-2006.

[55] Union Internationale pour la Conservation de la Nature

Photo 40 : Fixation du cordon dunaire par clayonnage avec des palissades en tige de *Typha* entre le port de pêche et l'hôtel Ahmedy. Vue prise en direction de l'ouest, le 22-08-2007.

II – LA LANGUE DE BARBARIE DE NDIAGO A SAINT-LOUIS

1 – Caractéristiques physiques

Ce secteur transfrontalier de 27 km de linéaire est situé sur le segment proximal de la Langue de Barbarie (**Figure 101, volume 2**). Cette flèche littorale sablo-coquillière se serait formée après 1880±100 ans B.P. par la jonction d'une série d'îles-barrières *«qui ont fermé le vaste golfe nouakchottien où le Sénégal a construit son delta»* (MICHEL *et al.,* 1968 ; MICHEL, 1973). Aujourd'hui, entre Ndiago et Saint-Louis, elle isole de l'océan un bras du fleuve Sénégal en amont de Saint-Louis et en aval, le fleuve lui-même. Dans cette zone, la flèche d'orientation méridienne présente un cordon dunaire d'une largeur variant de 49 à 378 m. Cette bande de dunes vives aux formes diverses (**Photo 41**) est couverte localement d'un tapis herbacé très épars auquel s'ajoutent des ipomées *(Ipomea pes-caprae)*, des buissons, des cocotiers *(Cocos nucifera)*, des palmiers-dattiers *(Phoenix dactylifera)* et des arbustes comme *Calotropis procera* très fréquents aux alentours de Ndiago. Aux abords de Saint-Louis, le tapis herbacé est associé à des filaos *(Casuarina equisetifolia),* plantés dès 1900 par le Service des Eaux et Forêts pour consolider et fixer le sable vif de la flèche (GAC *et al.*, 1982) (**Photo 42**). L'altitude des dunes dans les environs de Ndiago atteint 5 m[56] alors qu'à Saint-Louis, elle tourne autour de 2 m au nord du quartier Gokhoumbathie et de 4 m au

[56] Altitude indiquée sur la carte topographique de l'IGN de 1969, feuille de Saint – Louis.

sud de Fass Dièye[57]. Sur son front maritime, le cordon dunaire borde une plage de 20 à 67 m d'envergure, le long de laquelle s'égrènent des formes mineures comme des microfalaises, des croissants de plage ou encore des crêtes et sillons obliques (**Photo 43**) (GUILCHER, 1954b ; GUILCHER et NICOLAS, 1954).

A l'instar de Nouakchott, c'est une côte à barre prélittorale avec un déferlement en rouleaux (BOUQUET DE LA GRYE, 1886 ; JOIRE, 1947 ; BARUSSEAU *et al.,* 1993). Cette zone de forte agitation ou zone des brisants est matérialisée sur les anciennes cartes marines comme la carte N° 4892 éditée en 1928 par une ligne des brisants qui se situe à 300 – 400 m de la ligne de rivage. Selon PINSON-MOUILLOT (1980), une deuxième barre peut se former à côté de la première suivant les saisons, ce qui rend le déferlement plus puissant ici qu'à Nouakchott (DE LANJAMET, 1988). D'ailleurs, toute cette portion de côte sénégalo-mauritanienne est considérée par VERMEER (1985) comme une côte à forte énergie de houle.

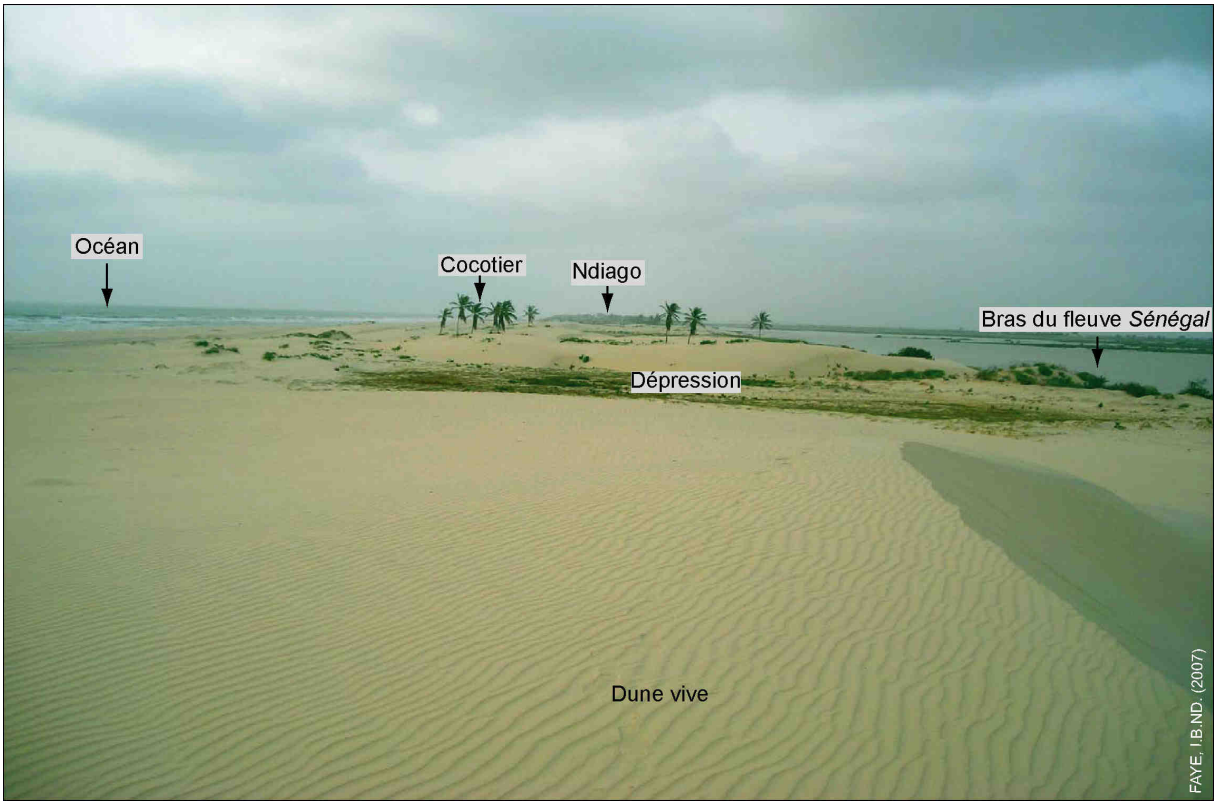


Photo 41 : Aspect de la Langue de Barbarie aux alentours de Ndiago. On observe entre autres au premier plan des rides éoliennes sur une dune vive avec une forme barkhanique dominant une zone déprimée herbacée. Vue prise au sud de Ndiago en direction du nord, le 19-08-2007.

[57] Altitude indiquée sur la carte topographique de la JICA, édition de 1991, feuille de Saint–Louis

Photo 42 : Dune couverte de filaos et de quelques touffes d'herbacées au sud de Fass Dièye. Vue prise en direction du sud, le 10-08-2007.

Photo 43 : Formes périodiques sur le littoral de la Langue de Barbarie avec une falaise marquant la limite des pleines mers récentes. Vue prise au sud de Ndiago, le 13-07-2006.

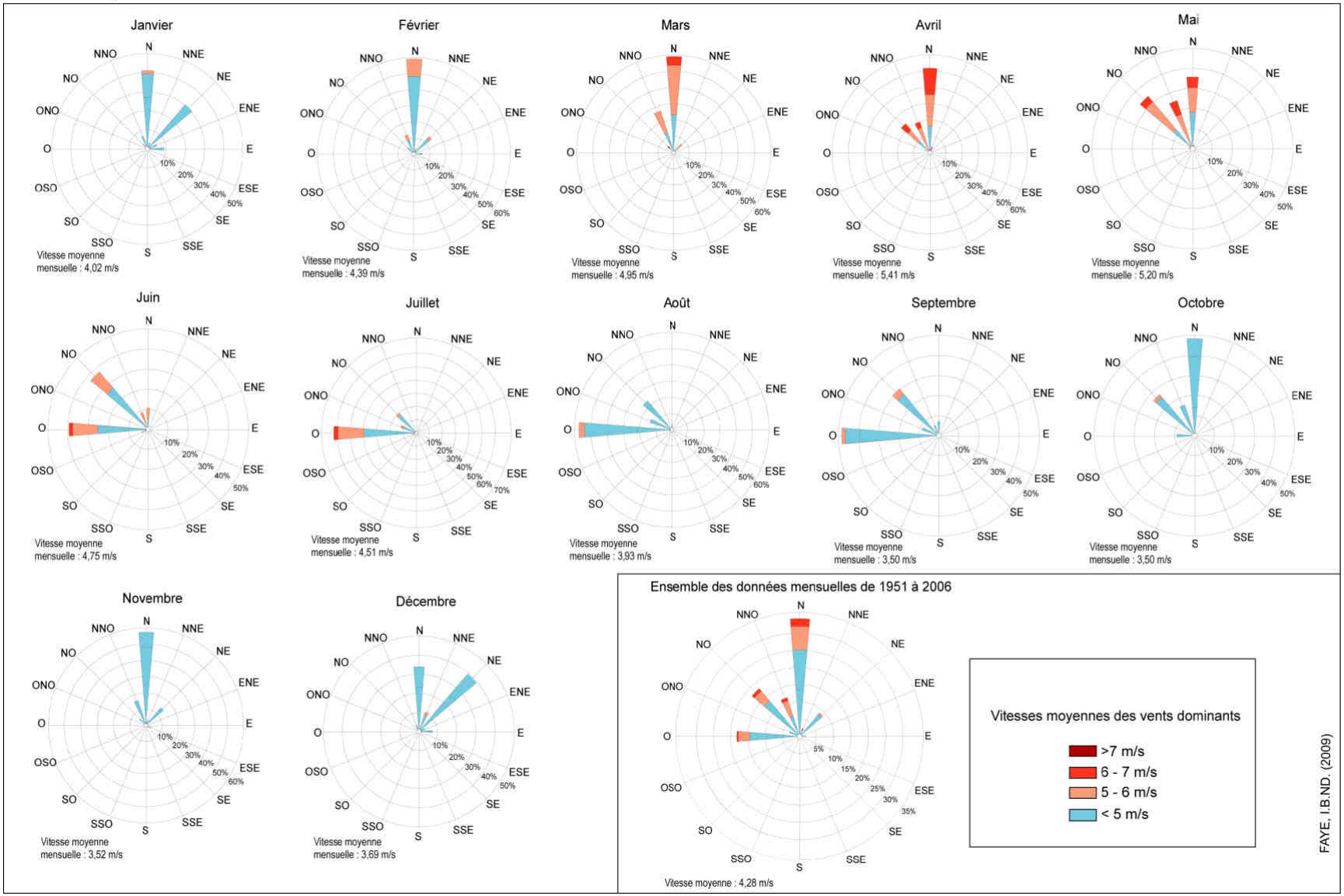
En ce qui concerne les vents, les données mensuelles de la station de Saint-Louis de 1951 à 2006 indiquent des vents dominants d'une vitesse moyenne de 4,28 m/s en provenance du nord pour 34,07 % du temps et plus globalement du quadrant nord à ouest (81,97 %) (**Figure 102**). D'un point de vue intermensuel, l'année peut-être divisée en deux saisons selon la provenance des flux dominants :

- une première saison d'octobre à mai, durant laquelle les vents soufflent avec une vitesse moyenne de 4,34 m/s du nord (48,21 % du temps), du nord-nord-ouest (15,84 %), nord-est (13,39 %) et nord-ouest (13,16%). C'est vers la fin de cette première saison non pluvieuse que les vents atteignent leur vitesse moyenne mensuelle maximale respectivement de 5,41 m/s en avril et 5,2 m/s en mai ;
- une deuxième saison de juin à septembre durant laquelle la composante ouest (51,78%) domine, à côté de celle de nord-ouest (27,67%) et d'ouest-nord-ouest (8,92 %) avec une vitesse moyenne mensuelle de 3,5 à 4,7 m/s. Ces vents d'ouest coïncident avec l'hivernage caractérisé par une pluviométrie moyenne de 269 mm/an.

Si on se réfère aux études de SALL (1993) sur la dynamique éolienne dans le delta du fleuve Sénégal, les vents ne peuvent mobiliser les particules sédimentaires sableuses qu'à partir d'une vitesse supérieure à 5 m/s. Sur la Langue de Barbarie, ils ne seraient efficaces qu'en saison sèche singulièrement dans la seconde moitié de cette période. Les vitesses de vents dépassant ce seuil représentent 55,3% en mars, 75 % en avril et 66,1% en mai.

Au large de la Langue de Barbarie, les houles du quadrant nord à ouest-nord-ouest dominent toute l'année particulièrement d'octobre à mai et cohabitent avec des houles de quadrant sud à ouest-sud-ouest durant la saison des pluies de juin à septembre avec des hauteurs significatives oscillant pour l'essentiel entre 0,75 et 2,25 m (BARUSSEAU *et al.,* 1993 ; BARUSSEAU *et al.,* 1998). Les périodes varient en moyenne de 8 à 12 secondes pour les houles de nord-ouest et 5 à 8 secondes pour celles du sud-ouest (PINSON-MOUILLOT, 1980). Ces houles de nord-ouest sont responsables d'une dérive littorale nord – sud véhiculant 365 000 (SALL, 1982) à 470 000 m^3 de sédiments par an (BARUSSEAU, 1985b). Le marnage est de 0,5 m en morte-eau et 1,1 m en vive-eau.

Figure 102 : Directions et vitesses moyennes des vents dominants à la station de Saint-Louis de 1951 à 2006 d'après les données de la Direction Nationale de la Météorologie



2 – Caractéristiques anthropiques

Dans la zone de Ndiago, l'anthropisation se traduit par l'occupation de la dune par les habitations du village (**Photo 44**) et les jardins maraîchers. Les environs de Saint-Louis en revanche sont densément urbanisés. Les quartiers de Gokhoumbathie, de Ndar Toute, de Guet Ndar, de l'hydrobase et de Fass Dièye sont construits sur la Langue de Barbarie. On note aussi au sud de la ville, la présence de nombreux hôtels et campements touristiques sans oublier les cimetières au nord de Gokhoumbathie et au sud de Guet Ndar. La plage sert également de débarcadère pour les pêcheurs locaux, de zone de transformation de produits halieutiques et même de dépotoirs d'ordures pour les riverains (**Photo 45**).

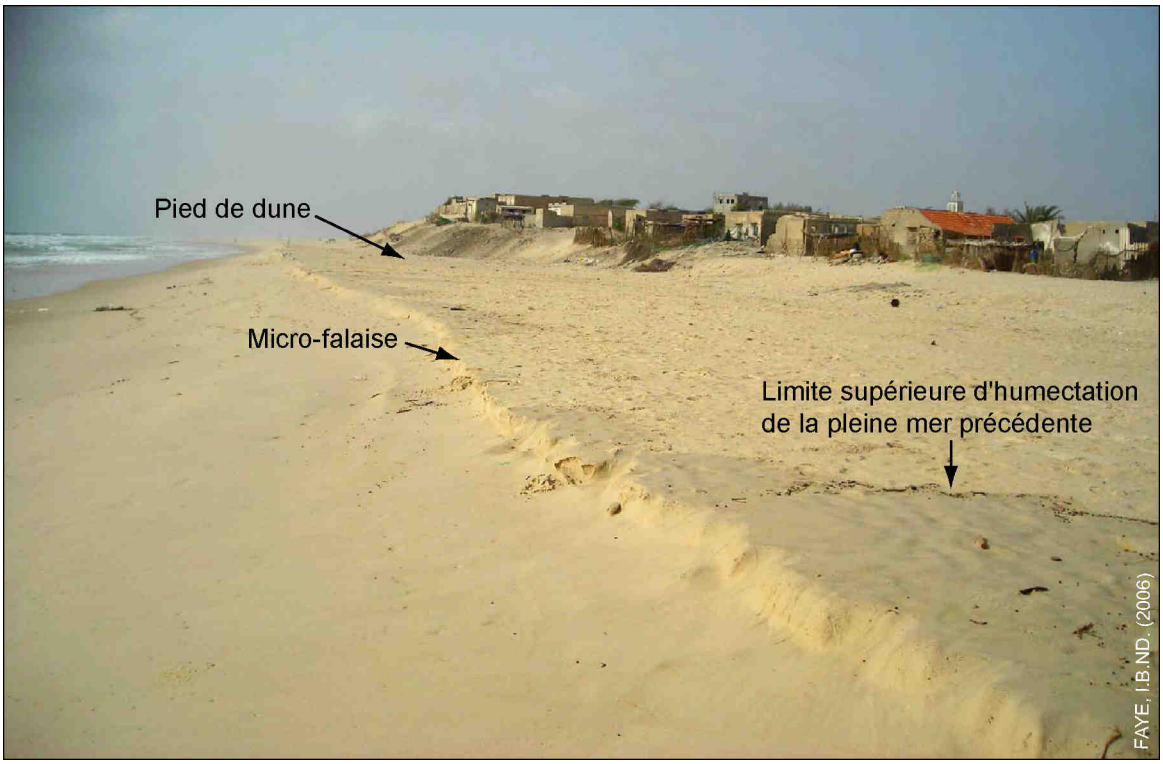


Photo 44 : Aperçu de la façade maritime du village de Ndiago. Photo prise en direction du nord, le 09-08-2007

Photo 45 : Aspect de la frange côtière de la ville de Saint-Louis. On observe un ancien niveau de pleine mer matérialisée par une falaise en voie de démantèlement en raison de la fréquentation de la plage. Photo prise au droit du quartier de Ndar Toute en direction du sud, le 09-08-2007.

III – LE SECTEUR DE BARGNY NGOUDOU A YENE-SUR-MER

1 – Caractéristiques physiques actuelles

C'est un segment côtier de 15 km au tracé légèrement concave orienté nord-ouest – sud-est (**Figure 103, volume 2**). Il correspond à l'extrémité méridionale de la Baie de Gorée et à la limite septentrionale de la bordure littorale de la côte à falaise du massif de Ndiass. Ce site présente une plage de 27 m de large en moyenne bordée localement d'un cordon littoral qui isole des marigots temporaires dans lesquels se déversent de temps à autre le jet de rive durant les grandes marées. Ce cordon sableux à débris coquilliers est large de 30 à 60 m, sauf au nord de Yène Tode où il atteint 400 m. Il peut présenter un aspect dénudé à proximité des zones fréquentées (pistes, accès à la plage, etc.) (**Photo 46**) ou à l'embouchure des marigots alors que dans les régions inhabitées au nord de Bargny Ngoudou, de Yène Tode et un peu plus au sud avant les falaises de grès maestrichtiens de Yène-sur-mer, il est fixé par des plantes rampantes et des figuiers de Barbarie *(Opuntia tuna)* (**Photo 47**). Cette espèce arborescente aurait été plantée comme les filaos sur la Langue de Barbarie pour fixer le cordon et lutter contre la submersion des dépressions situées en arrière (DEMOULIN, 1967).

Le cordon littoral, d'une altitude maximale de 3 m[58] repose, entre Bargny Guedj et Siendou, sur des marnes yprésiennes (ELOUARD, 1980) qui apparaissent sous forme de falaises de 1 à 1,7 m de dénivellation et présentent une pente abrupte ravinée (**Photo 48)**.

La zone de transition entre le cordon et la plage développe souvent des croissants de plage (CLOS-ARCEDUC, 1964 et DEMOULIN, 1967) taillés sur du sable ou des accumulations de galets qui tapissent la plage. Un autre élément caractéristique de l'estran est le *beach-rock* qu'on observe durant les basses mers au droit de Bargny Miname et au nord de Siendou (**Photo 48**). Ce sont des dalles ou des blocs de couleur beige-ocre, datés du Pléistocène supérieur (90260±1200 ans) (GIRESSE *et al.,* 2000).

Photo 46 : Vue du cordon sableux séparant le marigot de Bargny de l'océan. Photo prise au sud de Bargny Guedj en direction du nord, le 28-08-2007.

[58] Altitude indiquée sur la carte topographique de l'IGN, édition de 1983, feuille de Bargny

Photo 47 : Le cordon à *Opuntia tuna* au sud de Yène Tode. La limite inférieure des cactus est parfois atteinte par les vagues à marée haute. Photo prise en direction du nord, le 05-08-2007.

Photo 48 : Estran tapissée de *beach-rock* en avant d'une falaise de marnes yprésiennes au droit du cimetière de Bargny Miname. Photo prise en direction du sud, le 28-08-2007.

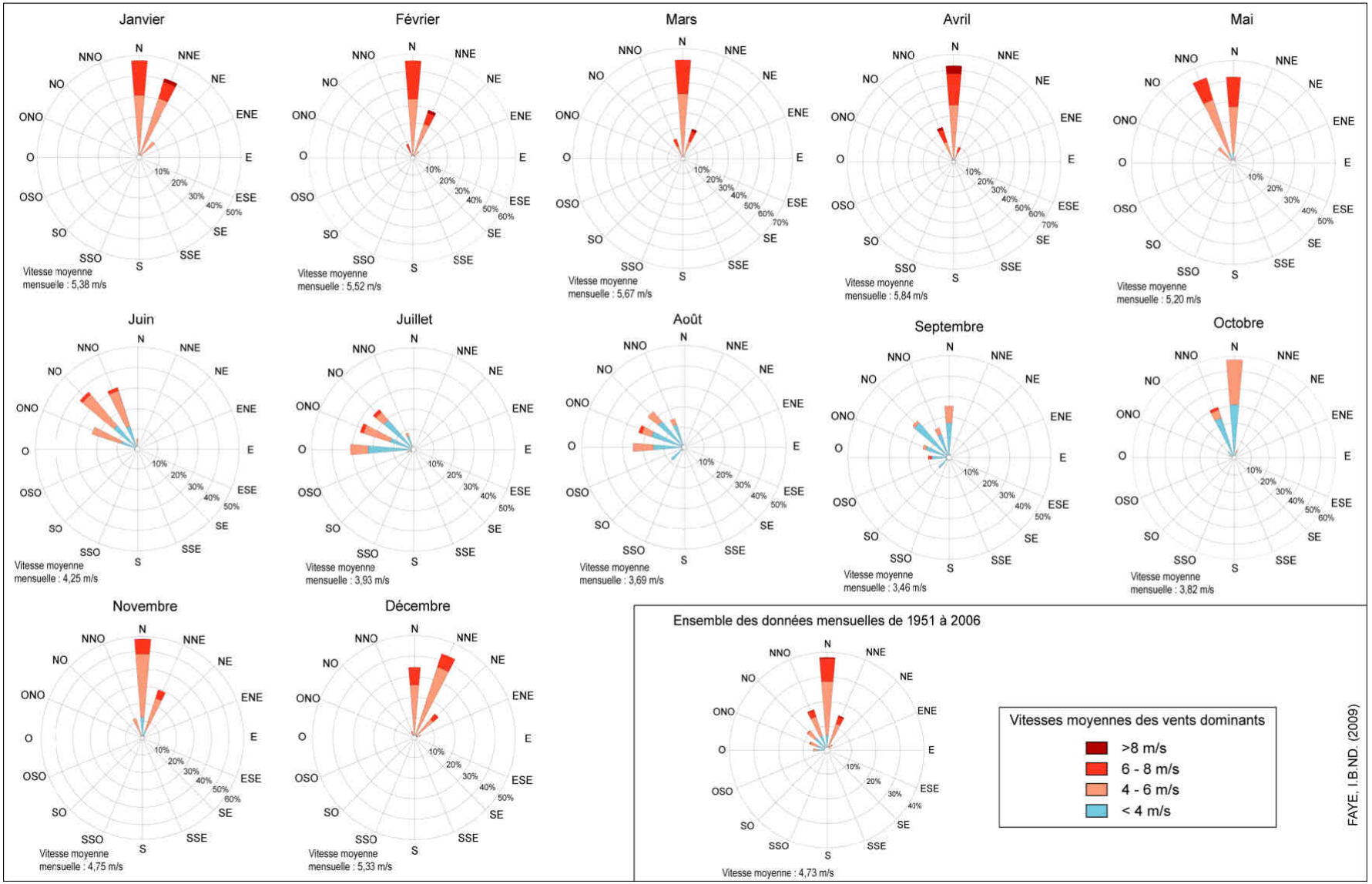
Les paramètres des vents enregistrés à la station de Dakar-Yoff, située à une vingtaine de kilomètres au nord, montrent des flux dominants de direction nord-nord-est à nord-ouest. Ils représentent 81,18 % des observations acquises entre 1951 et 2006 (**Figure 104**). Deux saisons de

vents dominants séparées par des transitions plus ou moins courtes (un à deux mois) apparaissent dans l'année. Ainsi de novembre à mai, les vents dominants soufflent essentiellement du nord (53,69 %), du nord-nord-est (28,69 %) et du nord-nord-ouest (10,51 %) avec des vitesses moyennes mensuelles de 4,75 à 5,84 m/s. Le mois de mai amorce une rotation progressive de la provenance des flux dominants vers les secteurs nord-nord-ouest à ouest, directions dominantes jusqu'en septembre avant que les vents de nord rétablissent leur domination à partir d'octobre marquant la fin de la saison des pluies[59]. Pour ce qui est de l'efficacité des vents, NIANG-DIOP (1995), avait retenu pour la zone de Rufisque, à 3 km au nord de Bargny, un seuil de 4,5 m/s. Néanmoins, l'absence de dunes et l'étroitesse des plages de ce secteur suggèrent plutôt un transit éolien nul.

A l'instar de Saint-Louis, le secteur de Bargny – Yène-sur-mer est sous l'influence des houles du nord-ouest et du sud-ouest avec cependant une légère différence car même si les houles de nord-ouest dominent durant la saison non pluvieuse de novembre à juin, la diffraction exercée par la Presqu'île du Cap vert, les rendent peu énergétiques contrairement aux houles du sud-ouest très énergétiques qui s'établissent durant l'hivernage (DE GEFFRIER et MILLIAU, 1946 ; BOUAKAZ, 1980 ; NIANG-DIOP, 1995). La dérive littorale se fait en général vers le sud-est et transporte des quantités de sédiments évaluées par SALL (1982) à 72 000 m^3/an au nord de Mbour et à 258 000 m^3/an au sud alors que selon BARUSSEAU (1980 ; 1985b), le transit sédimentaire sur toute la Petite Côte varie de 10 à 25 000 m^3/an seulement. La mer marne à 0,6 m en morte-eau et à 1,2 m en vive-eau.

[59] La pluviométrie moyenne est de 434 mm/an de 1950 à 2003 d'après les données de la Direction Nationale de la Météorologie

Figure 104 : Directions et vitesses moyennes des vents dominants à la station de Dakar-Yoff de 1951 à 2006 d'après les données de la Direction Nationale de la Météorologie



2 – Caractéristiques anthropiques

Entre Bargny Ngoudou et Yène-sur-mer, le cordon littoral est très urbanisé (**Figure 103, volume 2**). Sur les 14 km de côte, seuls 5 km sont épargnés par les constructions. Ces dernières sont de deux types : d'une part, les villages (Bargny Guedj, Bargny Miname, Siendou, Yène Tode, Yène-sur-mer) et, d'autre part, les chapelets de résidences secondaires qui s'étirent entre ces localités. Pratiquement toutes les maisons sont battues par les vagues à marée haute étant donné l'étroitesse des plages. Pour se protéger de l'assaut des vagues, les habitants ont aménagé des structures de protection comme des enrochements (**Photo 49**), des dalles de bétons ou des installations de fortune (empilement de pneus) ou tout autre élément susceptible d'amortir le choc des vagues. Comme à Saint-Louis, le cordon littoral abrite aussi des cimetières. Au droit des localités, de nombreux déchets domestiques jonchent la plage (**Photo 50**) qui fait office de port de pêche, notamment à Bargny Guedj et Siendou, sans oublier les sites de transformation de produits de la pêche. Par ailleurs, un site réservé à l'implantation future d'un port minéralier a été aménagé dans la zone de Bargny Miname.

Photo 49 : Enrochement protégeant une résidence secondaire en construction au sud de Siendou. Photo prise en direction du nord, le 05-08-2007.

Photo 50 : Pollution du haut de plage par une déchetterie au nord de Siendou. Le lessivage de déchets accentue la couleur sombre des sables mouillés et masque ainsi la limite supérieure d'humectation de l'estran. Photo prise en direction du nord, le 05-08-2007.

IV – LA CÔTE DE MBOUR A LA POINTE SARENE

1 – Caractéristiques physiques actuelles

Le secteur concerné s'étire du centre de recherche de l'IRD de Mbour à la Pointe Sarène sur un linéaire de 17 km. 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 105, volume 2**). 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 51**) 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 forêt classée 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 m[60], 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.. Le front dunaire est ponctuellement taillé en abrupte pouvant atteindre 2 à 3 m au nord de Nianing (**Photo 52**) 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.

Photo 51 : 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.

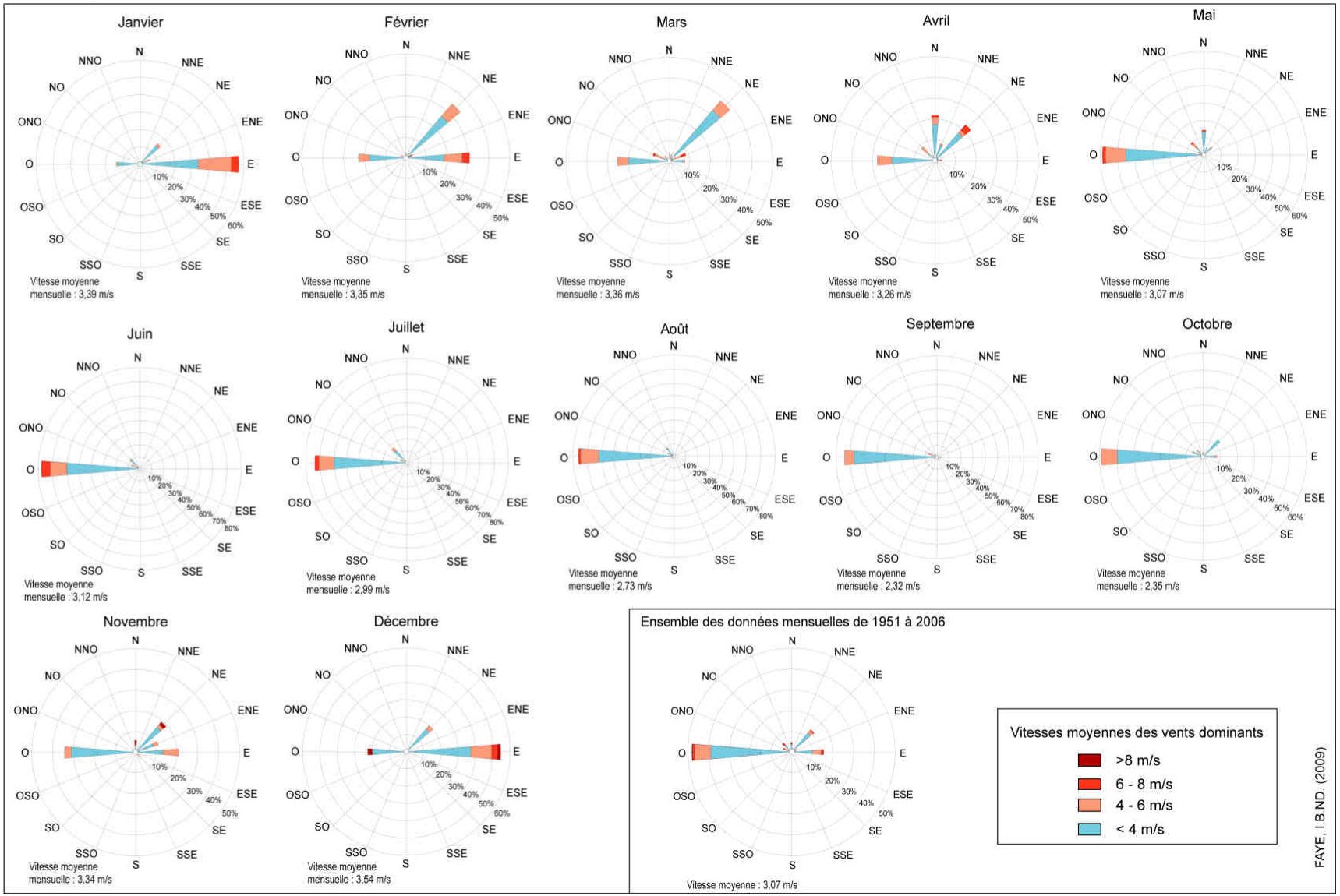
[60] Altitude indiquée sur la carte topographique de la JICA, éditée en 1991, feuille Thiès-1c-ND-28-XIV

Photo 52 : Falaise taillée dans la dune semi-fixée au droit du domaine de Nianing. Photo prise en direction du sud, le 10-08-2007.

A la station de Mbour de 1977 à 2006, sur l'ensemble des données de vents enregistrées, les directions ouest, est et nord-est dominent très largement avec des vitesses moyennes inférieures à 4 m/s dans 75% des cas (**Figure 106**). Comme dans la région de Dakar, 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'hivernage[61] de juin à septembre. Il faut signaler par ailleurs que les vents ont, dans l'ensemble, des vitesses beaucoup plus faibles ici que dans les trois autres stations. 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 à la position 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 ne favorisent pas la mobilisation des sables par les agents éoliens.

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

Figure 106 : 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



Les caractéristiques des houles au large de Mbour – Pointe Sarène sont identiques à celles du site de Bargny – Yène-sur-mer et le marnage varie entre 0,7 m (mortes-eaux) et 1,3 m (vives-eaux).

2 – Caractéristiques anthropiques

De Mbour à la Pointe Sarène, l'occupation du littoral est presque identique à celle observée entre Bargny et Yène-sur-mer (**Figure 105, volume 2)**. S'ajoutent aux résidences principales et secondaires, des campements touristiques, des hôtels et des villages de vacances dont les plus importants sont le domaine de Nianing et le club Aldiana installés dans les années 1970 au sud de Nianing. Ce sont les autorités de ce village de vacances qui ont construit un épi à la limite sud du club pour sauvegarder la plage. Démantelé 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. Le club est protégé actuellement par un cordon d'enrochement de 900 m (**Photo 53**). On observe également une petite portion de côte enrochée sur une centaine de mètres au nord de Nianing ainsi qu'au droit de quelques résidences secondaires. 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 54**) et un débarcadère à Nianing.

Photo 53 : Vue du cordon d'enrochement au droit du club Aldiana. Photo prise en direction du sud, le 02-08-2007.

Photo 54 : 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.

Conclusion du Chapitre IV

Les quatre sites retenus sont répartis sur le littoral sénégalo-mauritanien et présentent des caractéristiques physiques différentes. D'une part, nous avons des plages associées à des dunes vives isolant des sebkhas (Nouakchott) ou des plages associées à des flèches sableuses (Ndiago – Saint-Louis) qui connaissent un fort charriage sableux. D'autre part, nous avons des plages associées à des cordons littoraux isolant des marigots (Bargny Ngoudou – Yène-sur-mer) ou des plages associées à des dunes semi-fixées (Mbour – Pointe Sarène) avec un transit sédimentaire beaucoup plus faible. Les principaux agents marins responsables de ces transits sont des houles du nord-ouest.

Sur l'ensemble des sites, les vents dominants sont en général du secteur est à ouest selon les saisons. Le quadrant nord à est domine pratiquement de novembre à février et le quadrant nord à ouest de mars à octobre avec des vitesses moyennes mensuelles inférieures à 6 m/s dans la plupart des cas en considérant l'ensemble des moyennes mensuelles émanant des services météorologiques locaux. Ces vitesses moyennes augmentent progressivement pendant la saison sèche (novembre à juin), alors qu'en saison pluvieuse (juillet à octobre) les vents ont une vitesse nettement moins élevée. Même si l'hivernage s'accompagne de quelques coups de vents forts, leur efficacité est inhibée par la forte humidité ambiante. L'essentiel du transit éolien se produit donc en saison sèche. À Nouakchott, les vents efficaces sont présents pratiquement toute l'année et ils bénéficient de conditions propices du fait d'un climat sec et d'un faible couvert végétal. Sur la Langue de Barbarie, c'est plutôt entre les mois de mars, avril et mai que se concentrent les flux efficaces tandis qu'à Bargny – Yène-sur-mer, le transit éolien est presque inexistant comme en témoigne l'absence de dunes. Entre Mbour et Pointe Sarène, l'action des vents est freinée par la densité du couvert végétal.

L'occupation du littoral est beaucoup plus dense dans les sites de Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène qu'à Nouakchott et sur certains secteurs de la Langue de Barbarie la Langue de Barbarie. Les aménagements côtiers lourds concernent uniquement le wharf et le port de Nouakchott. Ailleurs c'est le bâti qui domine : résidences principales et secondaires, infrastructures touristiques ; autant d'éléments susceptibles d'être menacés par une dynamique régressive de la ligne de rivage.

CHAPITRE V : ANALYSE LOCALE DE LA CINEMATIQUE DES LITTORAUX DE NOUAKCHOTT, NDIAGO, SAINT-LOUIS, BARGNY – YENE-SUR-MER ET MBOUR – POINTE SARENE

Ce chapitre tente de dresser une synthèse des changements littoraux intervenus depuis le 19e ou la première moitié du 20e siècle dans les sites de Nouakchott, Ndiago, Saint-Louis, Bargny-Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène s'étendant sur un linéaire côtier cumulé de 67 km. Dans un premier temps, les positions successives de chaque ligne de référence retenue sont comparées pour appréhender les variations temporelles de la cinématique littorale. Dans un deuxième temps, toutes les lignes disponibles sont superposées pour déterminer la tendance sur le long terme en utilisant la régression linéaire[62]. Dans certains sites où nous disposions de données historiques sur les conditions anémométriques et l'occupation des sols, nous avons comparé les variations de ces éléments avec les tendances évolutives du trait de côte pour essayer de déceler d'éventuelles corrélations.

I – NOUAKCHOTT

Dans la mesure où l'analyse de l'évolution historique du littoral nouakchottois a été menée avec deux indicateurs différents (pied de dune et ligne de pleines mers), nous présenterons d'abord les résultats concernant le pied de dune de 1927 à 1980 avant de traiter de l'évolution diachronique de la position de la ligne de pleines mers entre 1927 et 2005.

1 – Evolution de la position du pied de dune entre 1927, 1954 et 1980

Phase 1 : 1927 – 1954 (**Figure 107, volume 2**)

Les variations de la position du pied de dune durant ces 27 années témoignent d'une tendance évolutive régressive le long des 12,8 km de côte étudiés. En effet, sur les 1588 transects analysés, 1289 (81,17 %) sont en érosion et 299 (18,82 %) sont en progradation. En raison du chevauchement des lignes comparées, l'écart moyen est faible, seulement -5,26 m, soit un taux d'érosion de -0,19 m/an. Cette faiblesse des évolutions mesurées fait que 84,19 % (1337 transects) des mesures tombent dans la marge d'erreur (10,89 m). Seuls 251 transects présentent des valeurs supérieures à la marge d'erreur. Sur ces 251 points de mesure, l'évolution moyenne est de -15,33 m, soit un taux de -0,56 m/an correspondant à un bilan surfacique net de -5251,38 m² (-0,52 ha).

[62] Les résultats obtenus sont très variables d'un site à un autre. Dans la plupart des cas, la faiblesse des écarts fait qu'il faudrait des cartes à très grande échelle, pour mettre en évidence certains décalages. Cela nécessiterait un nombre trop important de pages pour couvrir tous nos sites, c'est pourquoi, nous avons décidé de présenter les écarts mesurés sous la forme de courbes en coordonnées cartésiennes avec en abscisses le nombre de points mesurés et en ordonnées les valeurs obtenues ; de plus une carte localise les secteurs étudiés.

Du point de vue sectoriel, 4 secteurs se distinguent sur la courbe de la **figure 107** (**volume 2**). Aux abords de l'hôtel Ahmedy et au nord immédiat du port, les lignes de référence superposées se chevauchent ; la marge d'incertitude concerne 98,29 % des mesures dans le premier cas et 91,38 % dans le deuxième cas. L'évolution de ces secteurs est donc trop faible pour faire l'objet de mesure ou d'évaluation. De surcroît, on note une tendance à la régression de la position du pied de dune beaucoup plus nette de part et d'autre du wharf et au sud du port, en recul respectivement de -0,5 m/an[63] et -0,75 m/an.

Phase 2 : 1954 – 1980 (**Figure 108, volume 2**)

Au cours de cette période, la tendance érosive amorcée au cours de la phase 1927 – 1980 se confirme nettement du nord de l'hôtel Cap Timiris au sud du port. Le bilan surfacique global exprime une perte nette de 59897,29 m² (5,98 ha). Sur le linéaire de rivage, le taux moyen de recul est de -0,72 m/an si on tient compte de toutes les mesures (1718). Si on exclut les valeurs situées dans la marge d'incertitude (11,99 m) soient 21,94 % des transects analysés, le taux moyen de recul passe à -0,85 m/an. Cette marge d'erreur concerne en particulier les secteurs à faible évolution comme le nord immédiat de l'hôtel Cap Timiris (97,47 % des mesures) ou les installations portuaires en construction (82,75 % des points mesurés). L'influence de la marge d'incertitude est négligeable pour tous les autres segments qui présentent des valeurs de recul largement supérieures à la marge d'erreur. Les plus forts taux d'érosion sont localisés au nord de l'hôtel Cap Timiris (-0,75 m/an) ainsi que de part et d'autre du wharf, soit -0,76 m/an au nord et -0,94 m/an au sud. Ces deux secteurs s'étirent sur un linéaire de 8,2 km, soit plus de 64 % du linéaire côtier étudié (12,8 km).

Synthèse des deux phases : 1927 – 1954 – 1980 (**Figure 109, volume 2**)

L'analyse de l'évolution historique de la position du pied de dune par régression linéaire pour les deux périodes étudiées révèle un taux moyen de recul de -0,42 m/an sur les 1360 transects retenus du nord de l'hôtel Cap Timiris au port de Nouakchott. La marge d'erreur (0,27 m/an) affecte 24,70 % des taux. La moyenne calculée sur les 1024 taux supérieurs à la marge d'erreur révèle une vitesse de recul de -0,50 m/an.

Le découpage sectoriel réalisé sur la **figure 109** (**volume 2**) recoupe à peu près celui de la période 1954 – 1980. C'est au nord de l'hôtel Ahmedy que l'on observe les taux d'évolution les plus faibles comme le montre l'importance de la marge d'erreur (plus de 3/4 des taux calculés). Dans les autres zones, cette marge d'incertitude ne dépasse pas 20 % des taux calculés. Les vitesses d'érosion les plus élevées s'observent de part et d'autre du wharf avec une moyenne de -0,76 m/an.

Le cordon littoral a perdu sur son front maritime depuis 1927, une surface totale de 61846,23 m² (-6,18 ha) nets dans ce secteur d'une douzaine de km.

[63] Cependant, 75,11 % des points mesurés s'inscrivent dans la marge d'erreur.

Au sud du port, nous ne disposions que de deux positions du pied de dune, celui de 1927 et de 1980, car la mission de 1954 s'arrête au port. Le long des 8,3 km couverts par les missions de 1927 et 1980, la mer a gagné 78935,25 m² (7,89 ha) nets. Durant ces 53 ans, le taux moyen d'érosion est de -0,46 m/an sur les 1158 transects exploités. L'impact de la marge d'erreur (11,79 m) sur les valeurs d'évolution est faible puisqu'elle ne concerne que 5,35 % des transects. Sur les 1096 transects présentant des valeurs supérieures à 11,79 m, la vitesse moyenne d'érosion est de -0,48 m/an. La **figure 110** (**volume 2**) laisse apparaître quand même une certaine disparité dans les taux d'érosion. Ainsi au droit de la lagune, les taux d'érosion sont beaucoup plus faibles (en moyenne -0,41 m/an) qu'au sud (-0,52 m/an en moyenne).

Si on compare les vitesses d'érosion des deux périodes étudiées, on remarque clairement une exacerbation des phénomènes d'érosion après 1954. En effet, si entre 1927 et 1954, le recul du pied de dune est dans l'ensemble trop faible pour être mesurée précisément ; de 1954 à 1980, il a reculé en moyenne de -0,85 m/an du nord de l'hôtel Cap Timiris jusqu'au port de Nouakchott.
Par rapport aux travaux antérieurs sur le site, les résultats obtenus dans l'intervalle 1954 et 1980 sont cohérents par rapport aux conclusions de BARUSSEAU (1985a) qui dans son étude qualitative avait indiqué que le littoral était en recul à une vitesse moyenne annuelle certainement inférieure à 1 m.
Cette évolution s'expliquerait par des causes naturelles en l'absence de toute infrastructure ou aménagement susceptible de perturber la dynamique du rivage. En effet, comme le montrent les **figures 108**, **109** et **110**, la côte apparaît vierge de toute occupation humaine en 1927 et 1954 alors qu'en 1980, les quelques infrastructures présentes sur le littoral se limitent aux alentours du wharf, à l'hôtel Ahmedy et aux installations portuaires en construction.

2 – Evolution de la position de la ligne de pleines mers de 1927 à 2005

Phase 1 : 1927 – 1980 (**Figure 111, volume 2**)

Les variations de la position de la ligne de pleines mers entre 1927 et 1980, expriment comme dans le cas du pied de dune une régression du littoral du nord de l'hôtel Cap Timiris jusqu'au sud de la lagune du port long de 18,61 km.
En termes de surface, le recul a été de -332048,55 m² bruts et 68736,91 m² (6,87 ha) nets.
Le long des 2424 transects analysés, la ligne de pleines mers a reculé en moyenne de -27,19 m par rapport à sa situation de 1927, soit un taux moyen d'érosion de -0,51 m/an. La marge d'erreur (25,4 m) concerne 46,08 % des points mesurés. Si on exclut ces mesures des calculs d'évolution, le taux d'érosion moyen sur les 1307 transects supérieurs à la marge d'erreur passe à -0,70 m/an. Cette marge d'erreur intéresse surtout les secteurs situés au nord du wharf ainsi que le segment compris entre le port et la lagune. Ces derniers présentent les valeurs d'évolution les plus faibles. Par exemple, 72,68 % des points mesurés entre le wharf et l'hôtel Ahmedy ou 82,85 % des mesures au nord de l'hôtel Ahmedy sont inférieurs à 25,4 m. Les taux les plus élevés se retrouvent dans la zone allant du wharf au port et au sud de la lagune avec respectivement -0,78 et -0,73 m/an.

Phase 2 : 1980 – 1991 (**Figure 112, volume 2**)

Le fait marquant durant ces 11 années est le bouleversement de la tendance évolutive observée dans la période 1927 – 1980 à la suite de la construction d'un mur en dessous de la passerelle du port et d'un épi quelques centaines de mètres plus au sud. Ces aménagements ont perturbé le transit sédimentaire et divisé le littoral en deux parties de part et d'autre de l'épi (**Figure 112, volume 2**) : une zone septentrionale en progradation et une zone méridionale en érosion.

Dans le segment côtier en progradation, la vitesse d'avancée du trait de côte est de 5,67 m/an de l'hôtel Ahmedy à l'épave du bateau *«Walter»*. De part et d'autre de ce secteur, la progression de la ligne de pleines mers est très faible comme en témoigne l'importance des valeurs concernées par la marge d'erreur (±25,39 m). Elles constituent 94,74 % des mesures au nord de l'hôtel Ahmedy et 84 % au sud immédiat de l'épave du bateau *«Walter»*. L'échouage de ce navire perpendiculairement à la ligne de rivage bloque les sédiments de la dérive littorale au nord et génère un déficit sédimentaire au sud. En amont de ce secteur, le rythme de progradation du linéaire côtier augmente graduellement en direction du port en passant de 5,08 m/an au sud de l'épave du bateau «*Walter»* à 29,14 m/an immédiatement au nord de la passerelle.
Au droit du bassin portuaire, l'épi construit entre mai 1990 et juillet 1991 pour éviter l'inondation des installations portuaires a créé une zone d'accumulation longue de 900 m où le trait de côte a progressé à un taux moyen de 9,16 m/an depuis 1980. *A contrario*, durant cette période, le recul a été très important au sud de l'épi. Il est de l'ordre -19,01 m/an au sud immédiat de l'ouvrage et -16,70 m/an entre ce secteur et l'extrémité de la lagune. Plus au sud, l'influence des ouvrages portuaires se fait moins sentir et la ligne de pleines mers de 1991 tend à retrouver sa position de 1980 comme le montre la décroissance brutale des valeurs d'évolution mesurées.

Au total, sur les 21,5 km étudiés et les 2650 transects analysés, la tendance générale est à la progradation, à la vitesse moyenne de 1,23 m/an (13,36 m). Cela s'explique par l'importance des secteurs en progradation par rapport aux segments en érosion. Les secteurs en progradation représentent 1567 transects (59,13 % des mesures) et s'étirent sur 14,13 km. Les segments de côte en érosion regroupent 1083 transects (40,86 % des mesures) et s'étendent sur 7,54 km, soit deux fois moins que les segments en progradation. Les bilans surfaciques nets sur l'ensemble des zones en progression et en recul sont respectivement de +449996,97 m² (+44,99 ha) et -346464,47 m² (-34,64 ha).

Phase 3 : 1991 – 2005 (**Figure 113, volume 2**)

Pour cette période, hormis les environs de l'hôtel Ahmedy où 49,63 % des mesures tombent dans la marge d'incertitude (± 24,03 m), les évolutions mesurées sont largement supérieures à ± 24,03 m. Les tendances évolutives constatées dans la phase 1980-1991 se maintiennent. Sur les 2003 points mesurés, 1603 transects sont en progradation au nord de l'épi et 400 sont en érosion au

sud. Le long des 10,73 km en progradation, +1085714,30 m² (+108,57 ha) ont été accumulés et 561172,04 m² (56,11 ha) ont été érodés.

Dans les zones en progradation, les vitesses d'évolution augmentent graduellement des abords de l'hôtel Ahmedy jusqu'à la passerelle du port. Ainsi d'une valeur de +2,41 m/an au nord du wharf, le taux a été multiplié par 2 du wharf à l'épave du bateau *«Walter»*. Il atteint 23,38 m/an entre ce secteur et la passerelle du port. Le comblement du rentrant au sud de l'épave du bateau *«Walter»*, visible dans l'intervalle 1980-1991, donne à cette section de côte une forme trapézoïdale. Cette progradation du littoral se manifeste sur le terrain, en avant de l'ancienne dune, par une large banquette prédunaire colonisée par une végétation psammophile dominée par *Zygophyllum waterlotii*.
Au droit du bassin, le taux de progression retombe à 4,73 m/an mais au sud immédiat de la passerelle, il est interrompu par un segment long de 200 m environ qui s'est érodé de 55,76 m soit un taux de -3,98 m/an.
Au sud de l'épi, la tendance s'inverse et le littoral a perdu une distance presque équivalente à celle gagnée au nord de la passerelle (-333,9 m contre + 327,38 m). Durant les 14 ans séparant la position des deux lignes de pleines mers, le recul a été de -23,85 m/an le long des 2 km de côte couverts par les prises de vue de 2005. Cette forte régression du littoral s'est traduite par la disparition de la lagune qui précédait la digue sur les images aériennes de 1991.

Synthèse des trois phases étudiées : 1927 – 1980 – 1991 – 2005 (**Figure 114, volume 2**)

La superposition des positions des lignes de pleines mers de 1927, 1980, 1991 et 2005 suggère un schéma d'évolution similaire à celle de la phase 1991 – 2005. Le littoral prograde au nord de l'épi avec une augmentation progressive de la vitesse de progression au fur et à mesure que l'on se rapproche de la passerelle du port. Le secteur de l'hôtel Ahmedy semble être en stabilité étant donnée la faiblesse des taux enregistrés dans ce secteur par rapport à la marge d'erreur. Au sud de cette section de côte, l'évolution devient beaucoup plus significative. Les taux passent de 1,03 m/an de part et d'autre du Wharf, à 1,74 m/an au droit du Walter. Ils atteignent 3,89 m/an au sud immédiat de ce secteur et culminent à 7,93 m/an au nord immédiat de la passerelle du port. Au sud de cet ouvrage, le taux de progression tombe à 0,81 m/an tandis qu'au sud de l'épi, la tendance s'inverse avec une vitesse d'érosion de -5,70 m/an.
Le bilan surfacique de l'évolution de la ligne de pleines mers sur les 78 ans d'étude a été estimé à +1026663,16 m² (102,66 ha) nets pour les surfaces accumulées et -904675,37 m²/an (-90,46 ha) nets pour les surfaces érodées.

La comparaison des vitesses d'évolution de la ligne de pleines mers sur les trois phases étudiées suggère une accélération de la vitesse de recul au sud du port avec des taux qui sont passés de -0,64 m/an (1927 – 1980) à -19,01 m/an (1980 – 1991) et -23,85 m/an (1991 – 2005).

En revanche, dans les secteurs en progradation au nord de l'épi, la situation est plutôt chaotique. La première phase est une période d'érosion faible à modérée alors que les phases de progradation suivantes sont caractérisées par un ralentissement de la vitesse de progression entre les intervalles 1980 – 1991 et 1991 – 2005.
Comme nous l'avons souligné précédemment, cette évolution est due essentiellement aux aménagements portuaires qui, par ailleurs, ont probablement favorisé l'accroissement de la pression anthropique mis en évidence par la **figure 115** (**volume 2**). Par exemple, les surfaces bâties constituées essentiellement d'unités industrielles et de zones habitées à l'est du wharf ont presque doublé en passant de 50,11 ha en 1980 à 91,95 ha en 2005.

Les taux d'évolution que nous avons calculé aux abords du port pour les périodes 1980 – 1991 et 1991 – 2005 sont cohérents avec les tendances relevées dans la littérature. Toutefois, les vitesses d'évolution mesurées sont inférieures à celles estimées par MARICO (1996) (+42,5 m/an et -20,45 m/an) ou le GRESARC (2006) (+22 m/an et -28 m/an) sur des échelles temporelles sensiblement égales aux nôtres, soit 1980 – 1991 pour le premier auteur et 1995 – 2005 pour le les auteurs du groupe de recherche GRESARC. Ces différences notées peuvent s'expliquer par la diversité des lignes de référence, des sources de données et des approches méthodologiques adoptées.

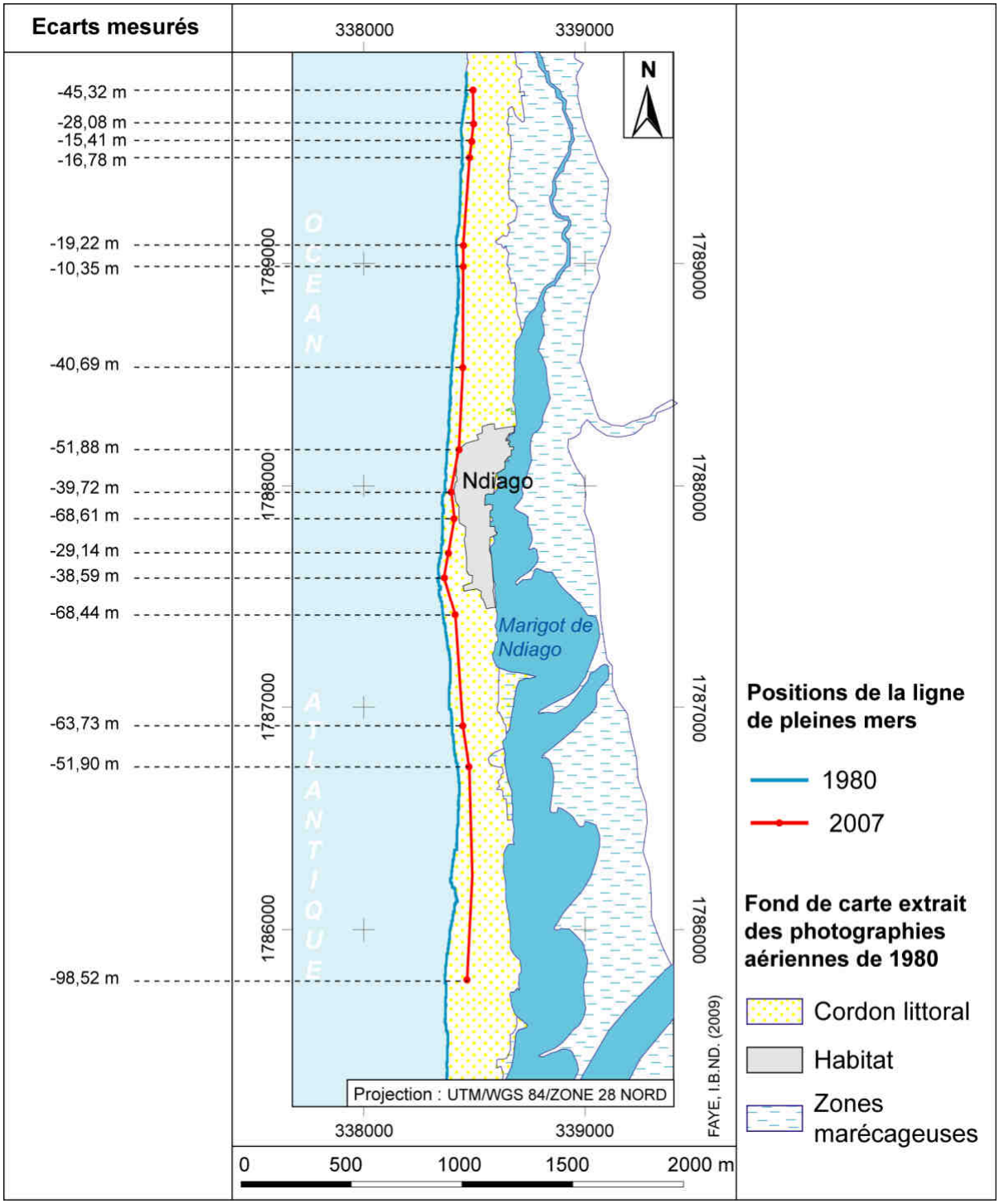
II – NDIAGO

Le long des 5,46 km de côte concernés par notre étude, la ligne de pleines mers a reculé en moyenne de -62,93 m soit une vitesse de -1,18 m/an durant les cinq décennies qui séparent les missions aériennes de 1927 et 1980 (**Figure 116, volume 2**). La marge d'erreur (17,95 m) ne concerne que 6,38 % des évolutions mesurées dans un petit secteur situé à l'extrémité septentrionale de la zone d'étude. Cette section de côte a régressé de -0,40 m/an. Ce taux de recul est multiplié par 2,25 au droit de Ndiago (-0,90 m/an) et par 3,8 au sud du village (-1,53 m/an).
Le calcul des bilans surfaciques donne un résultat brut de -284889,29 m² (28,48 ha) et un bilan net de -193320,98 m² (-19,33 ha).
Durant la même période, on observe une extension des surfaces bâties (village) et des surfaces cultivées (jardins maraîchers) (**Figure 117, volume 2**) au détriment du cordon littoral. Ainsi de 2,4 ha en 1927, la superficie du village est passée à 11,58 ha en 1980 et les jardins maraîchers de 6,54 ha à 14,67 ha.

Dans la période postérieure à 1980, les points GPS que nous avons levés en juillet 2007 confirme la tendance érosive observée par photo-interprétation, particulièrement au droit du village et au sud (**Figure 118**). Comme dans la période 1927 – 1980, les décalages les plus importants ont été enregistrés dans ces secteurs. Sur la **photographie 55,** prise au nord du village par une pleine mer de 1,7 m, les vagues atteignent le pied de dune à marée haute alors qu'en 1980, le pied de dune était à une quarantaine de mètres de la ligne de pleines mers.

Photo 55 : Erosion du pied de dune au nord du village de Ndiago. Photo prise en direction du sud, le 13-07-2006

Figure 118 : Comparaison entre les positions de la ligne de pleines mers extraite des images aériennes de 1980 et celle levée au GPS en juillet 2007 dans les environs de Ndiago



III – SAINT–LOUIS

La reconstitution de l'évolution historique de la ligne de pleines mers durant 111 années le long du littoral saint-louisien a été menée à partir de deux types de documents (cartes marines et images aériennes) qui ont fourni des résultats que nous présenterons dans les paragraphes suivants.

1 – Evolution de la position de la *«laisse de haute mer»* de 1894 à 1927 d'après la carte marine N°4892 du SHOM

L'analyse des écarts mesurés entre les laisses de haute mer extraites des cartes marines de 1894 et 1927 indique une régression du littoral des quartiers de Ndar Toute et de Guet Ndar, seuls quartiers installés sur le cordon littoral à l'époque (**Figure 119, volume 2**). Sur les 410 mesures, le taux d'érosion est de -1,70 m/an en moyenne. L'influence de la marge d'erreur (±26,91 m) est négligeable puisqu'elle ne concerne que 3 transects.
Concernant l'évolution sectorielle, le littoral du quartier de Ndar Toute recule moins rapidement que celui de Guet Ndar avec des taux estimés à -1,47 m/an dans le premier secteur et -1,95 m/an dans le second. Ces deux secteurs ont perdu au total 59943,95 m² (5,99 ha) nets.
Par rapport aux travaux antérieurs, le taux de régression calculé pour le quartier de Ndar Toute est légèrement inférieur à celui proposé GUILCHER et NICOLAS (1954) qui avait estimé la vitesse d'érosion de ce secteur à -1,78 m/an en comparant des cartes entre 1856 et 1926. BOUQUET DE LA GRYE (1886) avait quant à lui évalué empiriquement le recul entre 1 et 2 m/an.

2 – Evolution de la position de la ligne de pleines mers par photo-interprétation entre 1927, 1964, 1980, 1995 et 2005

La comparaison des résultats de l'interprétation des images aériennes utilisées (1927, 1964, 1980, 1995, 2005) a fourni des renseignements qui nous ont permis d'appréhender le comportement évolutif de la ligne des pleines mers durant 78 ans.

Phase 1 : 1927 – 1964 (**Figure 120, volume 2**)

Le littoral saint-louisien a alterné, durant ces 37 ans des secteurs en érosion et en progradation. Les segments en progradation s'étirent sur 2,72 km et concentrent 48,99 % des 892 points mesurés. Ils sont localisés au droit de Guet Ndar et aux environs de la Pointe aux Chameaux. Les secteurs en érosion (2,53 km ; 42,48 % des mesures) concernent le quartier de Ndar Toute et la zone au sud du cimetière. Concernant les taux d'évolution, le seul segment présentant une évolution significative par rapport à la marge d'incertitude de 28,90 m est situé au sud du cimetière. Cette zone a reculé à un taux de -0,98 m/an et perdu une surface nette de 2335,08 m² (0,23 ha). Néanmoins, 68,06 % des mesures sont inférieures à la marge d'erreur et, dans tous les autres secteurs, pratiquement 100% des évolutions mesurées tombent dans la marge d'erreur. L'alternance de

segments en érosion et en progradation et la faiblesse des écarts donnent un bilan global presque nul -2,97 m soit -0,08 m/an sur l'ensemble du linéaire étudié.

Phase 2 : 1964 – 1980 (**Figure 121, volume 2**)

L'évolution de la position de la ligne de pleines mers durant cette période est similaire à celle de la période précédente avec, là encore, une succession de secteurs en érosion et en progradation. Toutefois, à la différence de la période précédente où la marge d'erreur représentait 90,69 % des 892 mesures, celle-ci (20,67 m) ne concerne plus que 70,06 % des 932 transects exploités pour la période 1964 – 1980.

D'un point de vue sectoriel, le nord des quartiers de Ndar Toute, Guet Ndar ainsi que la moitié sud du cimetière sont en progradation. Ils représentent au total 2,51 km (376 transects). Les vitesses de progression sont respectivement de 2,21 m/an pour le premier secteur ; 1,73 m/an pour le troisième alors que, dans le deuxième secteur, 100% des mesures d'évolution tombent dans la marge d'erreur. Le secteur nord de Ndar Toute a gagné 5790,24 m² nets et la moitié sud du cimetière 4862,12 m² nets soit au total 10652,36 m² (1,06 ha).

Les segments en érosion couvrant 3 km (556 transects) sont situés au sud de Ndar Toute, au nord du cimetière et à l'extrémité méridionale de la zone d'étude. La marge d'erreur intéresse 100 % des mesures dans la première zone, 81,73 % dans la deuxième et 44,09 % dans la troisième. C'est donc ce dernier secteur qui présente les valeurs d'érosion les plus fortes, en moyenne -1,54 m/an contre -1,42 m/an au nord du cimetière. Le bilan surfacique net des segments en érosion est évalué à 1048,58 m² pour l'extrémité méridionale de la zone d'étude et seulement 121,61 m² pour le nord du cimetière étant donnée la faiblesse des écarts constatés.

Phase 3 : 1980 – 1995 (**Figure 122, volume 2**)

Les fluctuations de la position de la ligne de pleines mers de 1980 à 1995 s'inscrivent en droite ligne de celles des périodes antérieures. En effet, la courbe de la **figure 122** (**volume 2**) montre une juxtaposition de secteurs en érosion et en progradation. A la différence des deux premières périodes cependant, l'évolution est beaucoup plus significative durant les quinze années d'étude. La marge d'erreur (14,45 m) ne concerne que 33,6 % des 2467 mesures. Le décalage moyen est de 2,27 m/an sur les 2467 transects analysés le long des 15 km étudiés.

Les secteurs en accumulation (1757 transects répartis sur 9,61 km) sont localisés au nord de Gokhoumbathie, au droit de Ndar Toute, de Guet Ndar et au sud de l'hydrobase. Ils présentent des taux de progression variant entre 2,19 et 3,75 m/an. La superficie totale accumulée dans ces différentes zones à estimée 213060,02 m² (21,3 ha) nets.

Les segments en érosion regroupent 710 transects représentant un linéaire de 5,71 km. Le bilan surfacique calculé exprime une perte nette de -23178,99 m² (2,31 ha). Toute la façade du quartier de Gokhoumbathie, les alentours de la Pointe aux Chameaux et l'extrémité sud de la zone d'étude sont

concernés. Les taux d'érosion dans ces zones sont de l'ordre de -1 m/an, sauf à l'extrémité méridionale de la zone d'étude où ils atteignent -4,07 m/an.

Phase 4 : 1995 – 2005 (**Figure 123, volume 2**)

Au cours de cette dernière période, le comportement évolutif de la position de la ligne de pleines mers s'est légèrement modifié. Alors que dans les périodes antérieures, le littoral présentait toujours une succession de segments en érosion et en progradation, entre 1995 et 2005, seul le secteur allant de l'extrémité sud du cimetière à l'hydrobase est en progradation. Dans tous les autres segments, le littoral est nettement en érosion. Les valeurs d'évolution sont largement supérieures à la marge d'erreur de 12,24 m. Celle-ci n'englobe que 16,58 % des 2370 points mesurés le long des 15 km de côte étudiée ; l'évolution moyenne est de -5,60 m/an.
Aux alentours de Saint-Louis, l'érosion affecte particulièrement le nord de Gokhoumbathie et le quartier de Ndar Toute avec, respectivement des vitesses d'érosion de -5,75 m/an et -4,33 m/an. Dans les secteurs de Guet Ndar, du Cimetière et de Goukhoumbathie, les vitesses d'érosion sont plus modérées puisqu'elles oscillent entre -1,4 et -1,9 m/an. Au-delà de cette zone, au sud de l'hôtel Saint-Louis, l'érosion est exacerbée par l'élargissement de la brèche ouverte en 2003 par les autorités pour faciliter l'évacuation des eaux fluviales responsables des inondations de la ville de Saint-Louis. De 4 m à son ouverture le 03 octobre 2003 (SY, 2006), elle s'est rapidement élargie par la suite pour atteindre 1120 m sur les photographies aériennes de 2005. Les taux d'érosion de part et d'autre de la brèche sont sans commune mesure avec ceux des autres secteurs. Ils sont de -20,66 m/an au nord et -33,44 m/an au sud.
En termes de surface, les 11,21 km de côte en érosion ont perdu 497216,35 m² (49,72 ha) nets.
Quant au seul secteur en progradation, entre l'extrémité sud du cimetière et l'hydrobase, long de 3,8 km, le taux d'évolution est de +2,5 m/an et la surface nette accumulée est évaluée à 23504,8 m² (2,35 ha).

Synthèse des quatre phases étudiées : 1927 – 1964 – 1980 – 1995 – 2005 (**Figure 124, volume 2**)

La superposition des courbes d'évolution de la position des lignes de pleines mers durant les quatre périodes d'étude dans la zone allant de Ndar Toute à l'hôtel Dior témoigne d'un littoral à faible évolution. La moyenne des taux calculés par régression linéaire au niveau de chaque transect est de 0,20 m/an sur l'ensemble des 892 points de mesure. Toutefois, tous les taux sont compris dans la marge d'erreur et le coefficient de corrélation de 0,3 traduit une évolution chaotique de la position de la ligne de pleines mers avec une alternance de phases de progradation et d'érosion. La courbe de la **figure 124** (**volume 2**) individualise globalement 2 secteurs :

- de Ndar Toute à l'extrémité du cimetière et au sud de la Pointe aux Chameaux, une zone qui aurait tendance à progader ;
- une zone à tendance érosive voire stable entre le cimetière et la Pointe aux Chameaux.

Ces observations sont en désaccord avec les travaux de NIANG-DIOP (1995) qui, à partir de la mesure de 5 points répartis entre Ndar Toute et Guet Ndar sur des photographies aériennes non rectifiées de 1954, 1975 et 1989, indiquait une érosion continue du littoral depuis 1954 avec un taux d'évolution moyen de -0,61 m. La différence des intervalles chronologiques des lignes de référence, du matériel, des méthodes mais surtout le nombre de mesures utilisées peuvent expliquer ces divergences. Ceci apparaît d'autant plus que cet auteur avait, comme nous, observé une succession de zones en érosion et de zones en accumulation.

Dans les secteurs situés au nord de Ndar Toute et au sud de la Pointe aux Chameaux, en l'absence d'une ligne de pleines mers en 1964, les calculs de taux d'évolution par régression linéaire ont porté uniquement sur les lignes de pleines mers de 1927, 1980, 1995 et 2005. Les résultats obtenus indiquent une tendance régressive sur l'ensemble des segments côtiers concernés (**Figure 125, volume 2**). Cependant 100 % des taux mesurés à Gokhoumbathie et au sud de Fass Dièye sont inférieurs à la marge d'erreur de 0,4 m/an. En dehors de ces deux sections, les vitesses d'érosion varient entre -1,82 et -0,88 m/an de l'hôtel Diamarek à la brèche et -0,69 m/an au nord de Gokhoumbathie. Les pertes nettes de surface entre 1927 et 2005 dans ces secteurs ont été évaluées à -98464,47 m² (-9,84 ha).
D'un point de vue temporel, excepté le secteur de Gokhoumbathie dont l'évolution est régressive depuis 1927, les autres secteurs ont connu deux périodes d'érosion (1927 – 1980, 1995 – 2005) ponctuées par une phase de progradation (1980 – 1995).

Dans l'ensemble, le littoral saint-louisien durant la période antérieure à 1980 présente un alignement de secteurs en érosion et en progradation, ce qui fait que les taux calculés sur l'ensemble du linéaire côtier étudié sont très faibles voire nuls : -0,08 m/an entre 1927 et 1964, 0,03 m/an entre 1964 et 1980. Pour la période 1980 – 1995, la vitesse moyenne de progression est de 2,27 m/an alors que dans la période 1995 – 2005, la côte s'est érodée à un rythme moyen de -5,60 m/an. Un épisode fortement érosif semble donc s'être manifesté dans la dernière décennie.

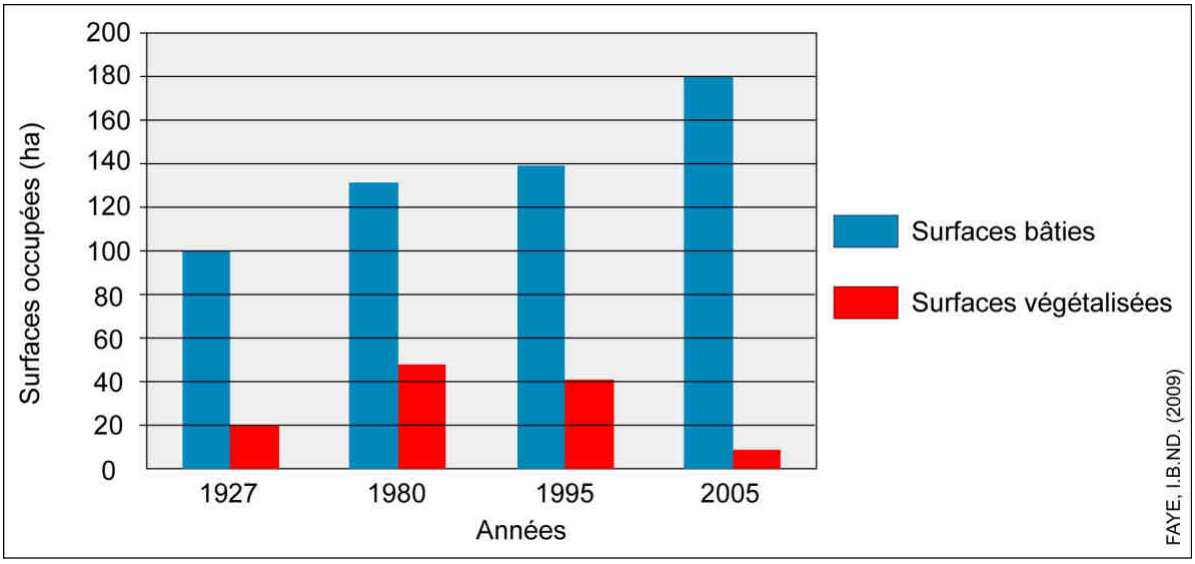
Nous avons recherché les causes de ces variations en analysant les données disponibles sur les agents dynamiques naturels à savoir les vents et le facteur anthropique.
Concernant les données anémométriques, seuls les vents efficaces (vitesse supérieure à 5 m/s d'après SALL, 1993) ont été retenus. Les résultats du tableau 19 indiquent une baisse de la fréquence des vents efficaces pour les trois périodes étudiées. Entre 1964 – 1980 et 1980 – 1995, la réduction de la fréquence des vents efficaces coïncide avec une phase de stabilité (1964 – 1980) et de progradation du littoral (1980 – 1995). Au cours de la période suivante (1995 – 2005), la fréquence des vents efficaces s'est réduite au moment où le littoral a connu un épisode hautement érosif.

Tableau 19 : Fréquence des vents efficaces à la station de Saint-Louis durant les périodes d'étude

Périodes d'étude	Vents de vitesses inférieures à 5 m/s	Vents de vitesses supérieures à 5 m/s
1964 - 1980	68,6 %	**31,4 %**
1980 – 1995	76,5 %	**23,5 %**
1995 – 2005	82,5 %	**17,5 %**

Pour ce qui concerne l'occupation du cordon littoral, les **figures 126** et **127** (**volume 2**) mettent en évidence un accroissement des surfaces bâties entre 1927 et 2005 et à partir de 1980, une réduction des surfaces végétalisées (périmètre de reboisement de filaos) pour fixer les sables de la langue de Barbarie. Cette réduction des surfaces végétalisées s'est faite au profit du bâti, notamment des aménagements touristiques (hôtels, campements, cabanons, etc.) qui ont fortement augmenté entre 1995 et 2005, de 138,86 ha à 180,41 ha. Il est à noter aussi que la forte diminution des surfaces végétalisées (40,58 ha en 1995 à 8,28 ha en 2005) coïncide avec l'épisode hautement érosif de 1995-2005.

Figure 126 : Evolution des surfaces bâties et des surfaces végétalisées aux abords de Saint-Louis de 1927 à 2005



Les véritables causes de l'évolution côtière sont à rechercher ailleurs, probablement du côté des agents marins, facteurs prépondérants qui gouvernent le mouvement des sédiments comme le notait JOIRE (1947) *«le déferlement des rouleaux exerce une action puissante de remaniement sur les sables du rivage. Des quantités énormes de sable peuvent être emportées en quelques jours … la plage, large parfois de trois cents mètres, se trouve entièrement enlevée».*Ces observations ont été confirmées par SALL (1982) qui considère la houle du nord-ouest comme l'agent dynamique déterminant.

IV – BARGNY NGOUDOU – YENE-SUR-MER

Comme pour Saint-Louis, l'analyse diachronique de l'évolution littorale a été menée sur plus d'un siècle à partir de deux cartes marines (1877 et 1939) et de plusieurs missions aériennes (1927, 1954, 1976 et 1997).

1 – Evolution de la position du zéro hydrographique de 1875-1876 à 1935-1936 d'après les cartes marines N°3592 et 5852 du SHOM (Figure 128, volume 2)

La comparaison de la position des deux zéros hydrographiques de la carte N° 3592 et 5852 met en évidence une érosion généralisée du littoral durant les 60 années séparant les deux éditions des documents nautiques du SHOM. Le taux moyen est de -2,48 m/an et les pertes nettes de surfaces ont été estimées à 1274920,22 m² (127,49 ha).
Une certaine disparité spatiale transparaît au regard de la répartition des vitesses d'érosion calculées. Ce sont les secteurs compris entre Yène Tode et Yène-sur-mer ainsi que la zone située de part et d'autre de Bargny Guedj qui présentent les taux d'érosion les plus faibles avec, respectivement, des vitesses d'érosion de -1,06 m/an et -1,99 m/an. Au-delà de ces deux sections, les zones au nord de Bargny Ngoudou, de Bargny Miname – Dogante et de l'embouchure du marigot de Bope à Yène Tode reculent à des rythmes légèrement supérieurs entre -2,14 et -2,3 m/an en moyenne. L'érosion est aussi très sévère entre l'usine abandonnée au nord de Siendou et l'embouchure du marigot de Bope, avec un retrait moyen du zéro hydrographique de -217,59 m soit un rythme de -3,62 m/an. Ces résultats intéressants doivent néanmoins être considérés avec prudence car comme nous l'avons souligné dans la partie consacrée à l'analyse des erreurs, l'édition de 1877 de la carte N° 3592 comporte quelques incohérences dans ce secteur.

2 – Evolution de la position de la limite supérieure de la plage par photo-interprétation entre 1927, 1954, 1976 et 1997

Phase 1 : 1927 – 1954 **(Figure 129, volume 2)**

Durant ces 27 années, la tendance évolutive de la limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation est au recul. Elle a régressé en moyenne de -16,32 m soit un rythme de -0,60 m/an le long des 15,12 km de côte étudiés. La marge d'erreur (±8,82 m) concerne 20,26 % (228 transects) des 1125 transects analysés. Si on exclut les chiffres inclus dans la marge d'erreur, l'évolution moyenne passe à -19,19 m soit un taux de -0,71 m/an. La marge d'erreur affecte en particulier, les secteurs compris entre Bargny Ngoudou et les salines, le sud de Bargny Guedj à Bargny Miname, ainsi que de l'embouchure du marigot de Bope à Yène-sur-mer où les transects inférieurs à 8,82 m constituent 45 à 50 % des mesures. Les taux d'érosion de ces secteurs oscillent entre 0,47 et 0,62 m/an. Dans les autres segments côtiers, les valeurs d'évolution sont beaucoup plus élevées : -1 m/an entre Bargny Miname et Dogante, -0,8 m/an au droit de Bargny Guedj et au nord de Bargny Ngoudou alors que de l'usine abandonnée au nord de Siendou jusqu'à l'embouchure du marigot de Bope, la limite de végétation a reculé à un rythme de -0,66 m/an. En termes de surfaces, la mer a gagné 17456,85 m² (1,74 ha) nets en 27 ans.

Phase 2 : 1954 – 1976 **(Figure 130, volume 2)**

De 1954 à 1976, l'évolution régressive s'est poursuivie. Le bilan des surfaces érodées indique une perte nette de -20845,57 m² (2,08 ha) soit 8,84 % de plus par rapport à la période 1927 – 1954. Le taux d'érosion aussi est légèrement supérieur puisqu'il est passé de -0,71 m/an à -0,95 m/an correspondant à une distance moyenne de -20,90 m si on exclut les valeurs d'évolution supérieures à la marge d'incertitude (8,57 m). Cette marge d'erreur touche 30,62 % des 1084 transects analysés. Ce sont les sections localisées au nord de l'usine abandonnée au nord de Siendou, de l'embouchure du marigot de Bope à Yène-sur-mer et au droit de Bargny Ngoudou qui offrent les taux d'érosion les plus faibles, entre -0,4 et -0,6 m/an mais la marge d'erreur englobe 73 à 88 % des mesures.
Dans les autres segments, la marge d'erreur a nettement moins d'influence puisqu'elle ne concerne qu'entre 3 et 25 % des valeurs d'évolution mesurées. Il s'agit des zones :

- au nord de Bargny Ngoudou qui recule de -1,64 m/an ;
- des salines à l'embouchure du marigot de Bargny, -1,18 m/an ;
- de l'embouchure du marigot de Bargny jusqu'au sud de Bargny Miname ainsi que de l'usine abandonnée au nord de Siendou à l'embouchure du marigot de Bope, 0,7 m/an.

Phase 3 : 1976 – 1997 (**Figure 131, volume 2**)

Pour cette période, la vitesse d'érosion du littoral augmente par rapport à la période 1954 – 1976. Sur les 13,5 km de côte couverts du nord de Bargny Guedj à Yène Tode, le taux de recul est de -1,18 m/an équivalent à un retrait de -24,78 m/an en moyenne. Les valeurs inférieures à la marge d'erreur (8,42 m) constituent 19,72 % des 1029 mesures réalisées. Elles affectent 77,38 % des points mesurés au nord immédiat de Siendou. Dans les autres secteurs, l'influence de la marge d'erreur est faible voire nulle dans les zones à forts taux d'évolution comme par exemple le nord de Bargny Ngoudou -2,66 m/an, Siendou -1,50 m/an ou encore Bargny Guedj -1,20 m/an. Pour tous les autres segments, le taux d'érosion est inférieur à -1 m/an. C'est le cas à Bargny Miname (-0,95 m/an), au nord immédiat de Bargny Ngoudou (-0,84 m/an), au sud de Siendou (-0,8 m/an), de l'embouchure du marigot de Bargny à Bargny Miname, de l'embouchure du marigot de Bope à Yène Tode (-0,6 m/an) et au nord immédiat de l'embouchure du marigot de Bope (-0,5 m/an). Concernant les pertes surfaciques, 40612,02 m² (4,06 ha) nets ont été emportés par la mer du nord de Bargny Ngoudou jusqu'au sud de Yène Tode.

Synthèse des trois phases étudiées : 1927 – 1954 – 1976 – 1997 (**Figure 132, volume 2**)

La régression linéaire appliquée aux variations de distances entre les positions de la limite supérieure de la plage durant les trois périodes d'étude (1927 – 1954 ; 1954 – 1976 ; 1976 – 1997) indique une vitesse moyenne de recul de -0,76 m/an. Il est à noter qu'aucun taux n'est concerné par la marge d'erreur de 0,18 m/an. Par ailleurs, le coefficient de corrélation de 0,94 traduit une bonne corrélation des valeurs d'évolution et une tendance érosive continue depuis 1927. La zone des marigots au nord

de Bargny Ngoudou, de Bargny Guedj et de Siendou sont les segments les plus vulnérables puisqu'ils reculent respectivement de -1,58 m/an ; -1,04 m/an et -0,97 m/an. Au nord de Bargny Guedj et au sud de Siendou le long des résidences secondaires, le recul se réduit à -0,7 m/an. Dans les autres secteurs, les taux oscillent entre -0,4 et -0,5 m/an.

Entre le nord de Bargny Ngoudou et le sud de Yène Tode, la côte a perdu 165675,91 m² (16,56 ha) nets durant les 70 années couvertes par les missions aériennes utilisées.

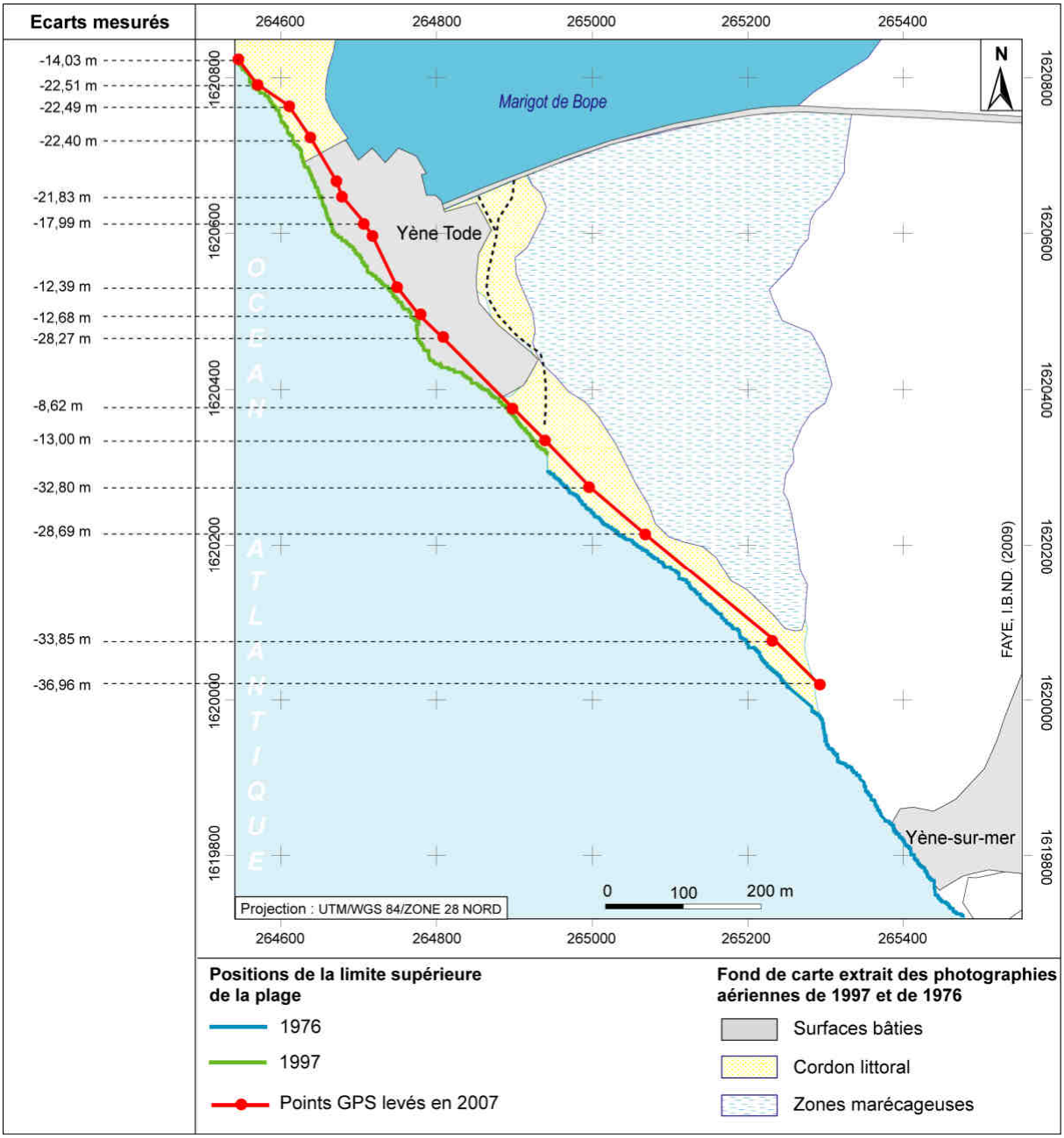
Du point de vue inter temporelle, on constate une nette augmentation de la vitesse de recul du littoral qui est passé de -0,71 m/an entre 1927 et 1954 à -0,95 m/an de 1954 à 1976 pour atteindre -1,18 m/an de 1976 à 1997.

Nous n'avons pas pu comparer nos résultats avec ceux de la littérature car, hormis l'analyse qualitative de DEMOULIN (1967), les phénomènes d'érosion ne sont pas documentés. On peut quand même noter que les taux enregistrés sont inférieurs à ceux de Rufisque (situé à 2 km au nord de Bargny) estimés à 1,2 - 1,3 m/an d'après les travaux de DIALLO (1982) ; SALL (1982) ; NIANG-DIOP (1995).

Dans la période postérieure à 1997, la confrontation de la position des points GPS collectés en août 2007 et du trait de côte de 1997 suggère une tendance érosive mais les décalages sont faibles (-1 à -6,10 m) le long de la zone concernée, excepté le secteur de Yène Tode à Yène-Sur-Mer (**Figure 133**) et la zone des marigots de Bargny. Malheureusement, ce dernier secteur est dépourvu d'une végétation continue sur les images aériennes de 1997. Cette visite de terrain nous a donné l'occasion aussi de constater les stigmates de l'érosion côtière qui s'expriment par la destruction de nombreuses habitations sur le front de mer des villages comme Bargny, Siendou et Yène Tode (**Photo 56**).

Photo 56 : Conséquences de l'érosion côtière à Bargny Guedj : effondrement de concessions et stratégies de protection avec des pneus usagés et des sacs de sables. Photo prise au sud du village en direction du nord, le 28-08-2007.

Figure 133 : Comparaison entre les positions de la limite supérieure de la plage (limite de végétation et/ou des maisons) extraite des images aériennes de 1976, 1997 et celle levée au GPS en 2007 entre Yène Tode et Yène-sur-mer



Concernant les facteurs explicatifs de l'évolution régressive du littoral, l'analyse de la fréquence des vents efficaces (>4 m/s selon NIANG-DIOP, 1995) suggère une diminution entre 1954 – 1976 et 1976 – 1997 alors que l'érosion du littoral s'est renforcée durant cette période. Les vents de vitesses supérieures à 4 m/s représentent 81,5 % des observations dans la première période et 60,63 % seulement dans la seconde période.

De 1927 à 1997, les changements d'occupation des sols sont très importants (**figure 134, volume 2)**. Sur les images de 1927 et de 1954, les installations humaines sur le front de mer se limitent uniquement aux villages. Les années 1970 marquent le début de la construction de résidences

secondaires au détriment du cordon littoral qui ne subsiste plus qu'aux alentours de Yène Tode et de Bargny Guedj. De 1976 à 1997, la surface occupée par les résidences secondaires est passée de 5,35 ha à 23,28 ha.

L'urbanisation croissante du littoral se traduit par une forte demande en matériaux de construction notamment du sable marin. Ainsi chaque année, ce sont plusieurs milliers de m^3 de matériaux qui sont prélevés sur les plages de Bargny comme nous avons pu le constater en août 2007 (**Photo 57**). Ces prélèvements contribuent au déficit sédimentaire d'une plage déjà en forte érosion (-1,58 m/an de 1927 à 1997).

Photo 57 : Prélèvement de sable marin sur la plage de Bargny. Photo prise au nord de Bargny Guedj en direction du nord, le 05-08-2007.

V – MBOUR – POINTE SARENE

L'évolution spatio-temporelle de ce segment côtier a été retracée à partir de l'interprétation d'images aériennes de 1954, 1978 et 1997.

Phase 1 : 1954 – 1978 **(Figure 135, volume 2)**

La comparaison des positions de la limite de végétation entre 1954 et 1978 laisse apparaître comme à Saint-Louis une alternance de secteurs en progradation et de secteurs 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, 75,29 % du littoral sont en érosion (12,8 km, 1646 transects) et seulement 24,70 % sont en progradation (4,2 km, 575 transects).

C'est au droit des espaces boisés, 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 53,8 % 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 75,18 % des mesures. En plus du reboisement de la zone, cette avancée est à mettre au crédit de l'épi construit à l'extrémité méridionale du club pour préserver la plage de ce lieu de villégiature.
Les surfaces accumulées dans ces deux secteurs représentent au total 2882,73 m² (0,28 ha) nets.
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 et le bilan surfacique global indique une perte nette de 35387,32 (3,53 ha) m².

Phase 2 : 1978 – 1997 **(Figure 136, volume 2)**

Au regard de la courbe d'évolution de la figure 136 (**volume 2**), la côte laisse apparaître une succession de secteurs en érosion et en progradation comme dans la période précédente. Le bilan global est négatif (-1,14 m/an), mais à la différence de la première phase, les transects en progradation ne concernent plus que le secteur allant du sud de la Résidence Nianing à l'épi du club Aldiana, soit 1,66 km (227 transects) alors que les secteurs en érosion couvrent 15,12 km au total (1901 transects).
Seul le secteur au nord immédiat de l'épi du club Aldiana est en progradation avec un taux de 0,81 m/an. Cependant la marge d'erreur englobe 84,11 % 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).
Les surfaces perdues ont été évaluées à -59965,30 m² (5,99 ha) nets et les surfaces accumulées à 687,01 m² (0,06 ha) nets.

1954 – 1978 – 1997 **(Figure 137, volume 2)**

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 2187 transects analysés. Néanmoins, deux tendances se distinguent.
Les secteurs en progradation s'étirent sur 3,54 km et se localisent au droit du centre de l'IRD de Mbour, du domaine de Nianing et du club Aldiana. Dans ces secteurs boisés, même si les calculs montrent des bilans positifs, les valeurs d'évolution sont faibles puisque la marge d'erreur (0,32 m/an) concerne, par exemple, 100 % des taux au niveau du centre de l'IRD de Mbour, 86,27 % 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) suivi 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 du bilan sédimentaire. Les gains de surface dans ces trois secteurs ont été estimés à 1634,17 m² (0,16 ha) nets accumulés pour l'essentiel au droit du club Aldiana.
Les secteurs en érosion représentent 13,09 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.

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 dans ce 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.

Pour la période récente, 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 138**). Le renflement du tracé du rivage que l'on peut observer sur les images de 1954, 1978 et 1997 semble avoir été érodé durant ces 10 dernières années. Dans cette zone, nous avons observé de nombreux filaos déracinés sur le haut de plage (**Photo 58**), preuves, d'une évolution régressive du littoral. Nous avons également constaté la destruction de quelques maisons à Nianing (**Photo 59**).

Figure 138 : Comparaison entre les positions de la limite de végétation extraite des images aériennes de 1997 et celle levée au GPS en juillet 2007 au sud de l'épi du club Aldiana

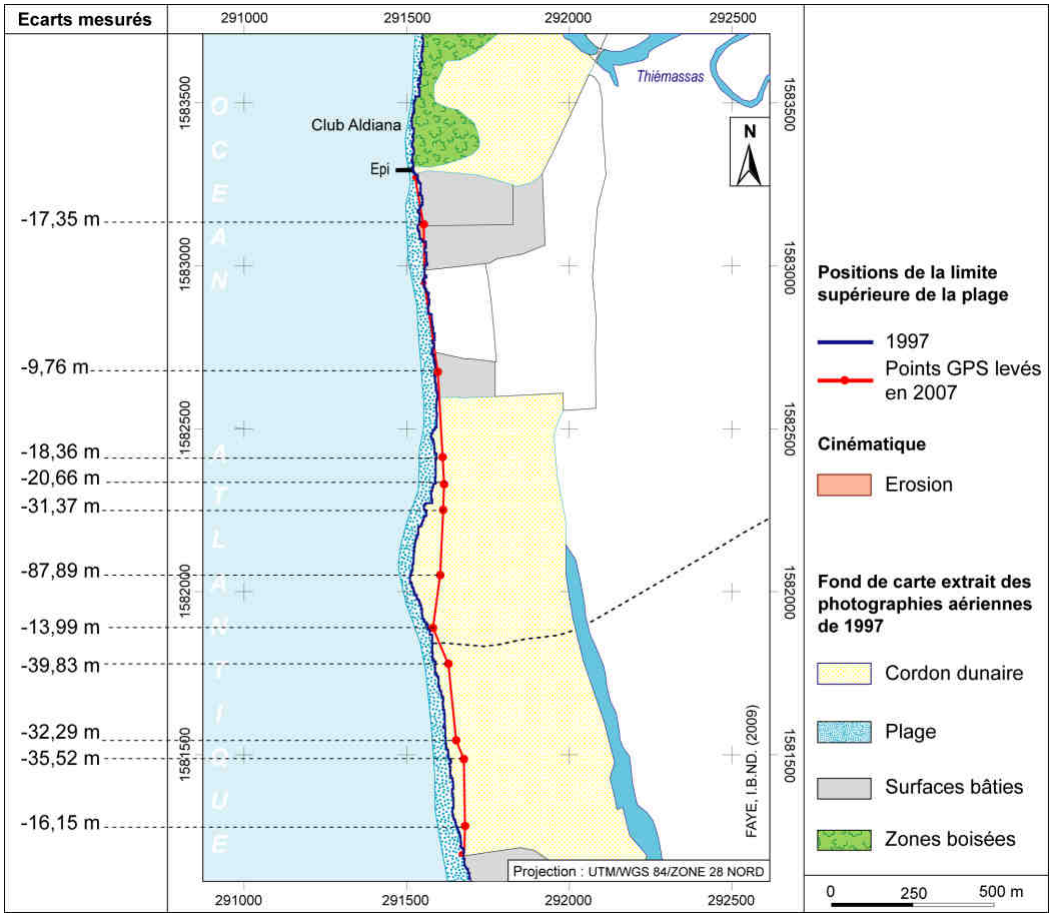
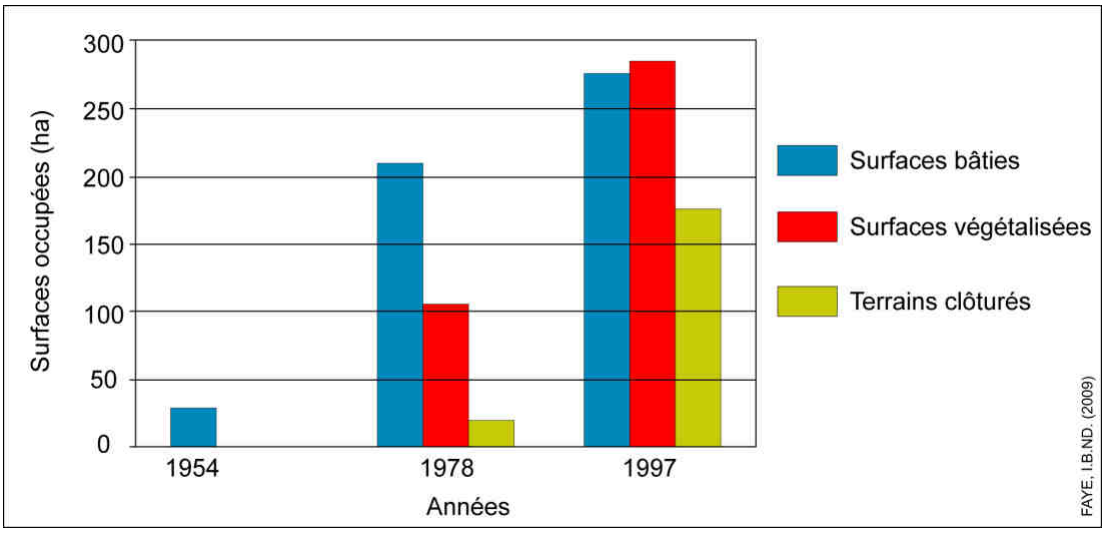


Photo 58 : Filaos déracinés au sud de l'épi du club Aldiana. Photo prise en direction du nord, le 03-08-2007.

Photo 59 : Effondrement de maisons à Nianing sous l'effet de l'érosion côtière. Photo prise en direction du sud, le 03-08-2007.

Concernant l'occupation des sols, la **figure 139** et **140** (**volume 2**) montre une progression des trois classes d'occupation du sol (surfaces bâties, surfaces végétalisées, terrains clôturés). Les surfaces bâties ont considérablement augmenté entre 1954, 1978 et 1997. Les terrains lotis ont, eux aussi gagné en surface, symbole d'une pression foncière accrue sur le littoral. On note également une extension très importante des surfaces reboisées entre 1978 et 1997. Les zones reboisées correspondent en général à des secteurs en progradation ou à faible évolution.

Figure 139 : Evolution des surfaces bâties et des surfaces végétalisées de Mbour à la Pointe Sarène de 1954 à 1997



Conclusion du chapitre V

L'étude des variations spatio-temporelles de la position des traits de côte retenus dans les différents sites étudiés permet de distinguer deux types de situation : d'une part les sites présentant une succession de secteurs en érosion et de secteurs en progradation (Nouakchott, Saint-Louis et Mbour – Pointe Sarène) et d'autre part des sites en érosion généralisée quelle que soit la période considérée (Ndiago et Bargny – Yène-sur-mer).

Pour le site de Nouakchott, l'étude de la cinématique des deux lignes de référence retenues appelle les constats suivants. Pour le pied de dune, la tendance est à l'érosion pour la période 1927-1954-1980 avec un taux moyen de -0,5 m/an. Du point de vue sectoriel, la zone centrée autour du wharf présente les plus forts taux d'érosion (- 0,76 m/an) alors que les alentours de l'hôtel Ahmedy et du port sont des secteurs à faible évolution (-0,4 m/an). D'un point de vue temporel, l'évolution de la position du pied de dune se décline en deux phases. Une première phase marquée par une érosion faible[64] entre 1927 et 1954 suivie d'une phase d'érosion plus marquée de 1954 à 1980 (-0,85 m/an). Pour ce qui concerne les bilans surfaciques, durant les cinq décennies couvertes par notre analyse, le cordon dunaire aurait perdu sur son front maritime une superficie nette de 14,07 ha sur un linéaire d'une vingtaine de kilomètres.

Quant à la ligne de pleines mers, de 1927 à 1980, l'évolution est cohérente avec celle du pied de dune. Toutefois le taux est légèrement plus élevé (- 0,7 m/an). À partir des années 1980, la construction d'un mur de blocage des sédiments en dessous de la passerelle du port en 1980 et d'un épi un peu plus au sud en 1991 a divisé le littoral en deux zones, l'une en progradation et l'autre en érosion. Ainsi au nord, le littoral progade graduellement en direction de la passerelle du port avec des taux passant de 5,67 m/an des environs du wharf à 29,14 m/an au nord immédiat de la passerelle pour la période 1980 et 1991 et 9,16 m/an jusqu'à l'épi. Pour la même période au sud, c'est l'inverse qui est observé, les taux d'érosion décroissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du port. Ils passent de -19 m/an au sud immédiat de la passerelle à -7,52 m/an à 2 km de l'épi. Dans l'intervalle 1991 – 2005, cette tendance s'est maintenue avec des taux compris entre 2,41 et 23,28 m/an au nord du port et des taux d'érosion de -23,85 au sud immédiat de l'épi. La comparaison des taux d'évolution entre les deux périodes laisse apparaître un ralentissement des vitesses de progradation tandis que les vitesses d'érosion au sud du port augmentent.

Au total, sur les 78 années d'étude, le littoral noukchottois paraît stable aux environs de l'hôtel Ahmedy. Il progade du wharf au port (de 1 à 7,93 m/an) et s'érode au sud de l'épi (-5,7 m/an). Les bilans de surface établis pour la période 1927 – 2005 estiment les surfaces accumulées à 102,66 ha et les surfaces érodées à 90,46 ha.

[64] 84 % des mesures tombent dans la marge d'erreur

Pour les sites de la Langue de Barbarie, le littoral aux abords de Ndiago est nettement en érosion entre 1927 et 1980. En une cinquantaine d'années, la ligne de pleines mers a migré sur une distance moyenne de 62,93 m vers les terres soit un taux d'érosion de 1,18 m/an. Les variations spatiales des taux d'évolution individualisent trois secteurs. Le premier secteur situé au nord du village recule de -0,4 m/an. Le deuxième secteur localisé de part et d'autre du village présente un taux d'érosion de -0,90 m/an alors qu'au sud les vitesses sont nettement plus élevées -1,53 m/an. Les surfaces perdues par le cordon littoral de la langue de Barbarie, et donc gagnées par la mer, ont été estimées à 19,33 ha de 1927 à 1980. Dans la période ultérieure, la comparaison de relevés ponctuels de la position de la ligne de pleines mers en 2007 par GPS et celle issue de l'interprétation des images de 1980 suggère la poursuite des phénomènes d'érosion. Ainsi, cette partie située sur la racine de la Langue de Barbarie semble être en déficit sédimentaire.

Pour le deuxième site de la Langue de Barbarie aux abords de Saint-Louis, dans la période 1894 – 1927, la superposition des lignes de pleines mers extraites des deux éditions de la carte marine N° 4892 témoigne d'une évolution régressive du littoral à un rythme de -1,7 m/an avec une certaine disparité spatiale entre les secteurs de Ndar Toute (- 1,47 m/an) et de Guet Ndar (-1,95 m/an). Durant les 33 années séparant les cartes marines, les surfaces érodées ont été évaluées à 5,99 ha.
Dans la période 1927 – 1964 – 1980 – 1995 – 2005, les résultats de la photo-interprétation indiquent une tendance à la progression du littoral de Ndar Toute à la Pointe aux Chameaux. Cependant les valeurs d'évolution sont trop faibles pour être mesurées avec précision du fait d'une part de la succession de segments en érosion et de segments en progradation et d'autre part, de l'inversion des tendances évolutives d'une période à une autre. Globalement, les périodes 1927 – 1964 ; 1964 – 1980 sont des phases de faibles évolution (bilan proche de zéro) alors que la période 1980 – 1995 est caractérisée par une nette progradation de 2,27 m/an et celle de 1995 – 2005 est un épisode très érosif (-5,6 m/an, taux fortement influencé par la brèche).

Dans la zone au nord de Ndar Toute et au sud de la Pointe aux Chameaux, où nous ne disposions pas de trait de côte en 1964, la tendance est à l'érosion. Elle est très faible dans les secteurs de Gokhoumbathie et Fass Dièye. Cette évolution régressive est en revanche beaucoup plus marquée au nord de Gokhoumbathie avec un taux de -0,69 m/an et au sud de Fass Dièye où les vitesses de recul oscillent entre -0,88 et -1,82 m/an. Le cumul des superficies perdues dans ces secteurs a été estimé à 9,84 ha.

Pour le site de Bargny – Yène-sur-mer, l'érosion concerne tout le linéaire côtier quelle que soit la ligne de référence (zéro hydrographique ou limite supérieure de la plage) et les périodes considérées. Ainsi entre 1875-1876 et 1935-1936, la superposition des zéros hydrographiques extraits des cartes marines N°3592 et 5852 donne un taux d' érosion moyen de -2,48 m/an qui se traduit par une perte surfacique de 127,49 ha. D'un point de vue sectoriel, les secteurs de Bargny Guedj, de Yène Tode et Yène-sur-mer présentent des taux d'érosion inférieurs à 2 m/an et la zone de Siendou

concentre les valeurs d'évolution les plus élevées avec un taux de -3,62 m/an. Toutefois, il est possible que ces taux soient légèrement surestimés eu égard aux incohérences relevées sur la carte N°3592 dans la zone de Siendou en particulier.
Cette tendance érosive observée à partir des cartes marines est confirmée par les résultats de l'interprétation des images de 1927, 1954, 1976 et 1997. Le taux d'érosion sur l'ensemble de la période est de -0,76 m/an en moyenne. Les fluctuations spatiales des taux d'érosion révèlent que les zones les plus vulnérables se localisent à Bargny Guedj et Siendou, alors que les zones les moins touchées sont les sections de côte au sud immédiat des embouchures de marigots de Bargny et de Bope. La superficie totale perdue par la côte s'élève à 16,56 ha.

Dans le temps, la vitesse d'érosion est passée de -0,71 m/an entre 1927 – 1954 à -0,95 m/an entre 1954 – 1976 et 1,18 m/an entre 1976 et 1997 indiquant donc une certaine accélération de l'érosion du littoral depuis 1927.

Pour le secteur de Mbour – Pointe Sarène, l'évolution du trait de côte se manifeste par une alternance de segments en érosion et en progradation avec une prépondérance des segments en érosion par rapport aux secteurs en progradation. Dans l'ensemble, le littoral est donc en érosion avec un taux de -0,76 m/an pour la période 1954 – 1978 – 1997. Les secteurs en progradation sont localisés dans les secteurs reboisés : au droit du domaine de Nianing, du club Aldiana et du centre de l'IRD de Mbour avec des taux de 0,11 à 0,35 m/an, mais l'essentiel de ces taux tombe dans la marge d'erreur.
Les secteurs en érosion concernent le segment allant du sud du centre de l'IRD de Mbour jusqu'au domaine de Nianing d'une part et, d'autre part, du sud de l'épi du club Aldiana à la pointe Sarène. Les taux calculés varient entre -0,36 et -1,54 m/an. Les zones les plus exposées sont les environs de Warang et le sud de l'épi du club Aldiana -0,73 à -1,54 m/an.
En termes de surfaces, les zones accumulées ont été estimées à 0,16 ha et les zones érodées à 14,38 ha.
La comparaison des périodes d'étude laisse apparaître une accentuation des phénomènes d'érosion 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 dans la deuxième période (1978 – 1997), seul le rivage devant le club Aldiana était en progradation, les autres zones étaient en érosion.
Les observations réalisées en 2007 sur le terrain laissent à penser que l'évolution régressive du trait de côte se poursuit particulièrement au sud de l'épi du club Aldiana.

Les phénomènes d'évolution observés sur les différents sites, n'ont pas tous d'explication faute de données disponibles, surtout celles relatives aux agents marins (houles et transit sédimentaire induit). On peut quand même noter, en dehors de Nouakchott où l'évolution du trait de côte a été bouleversée par la construction d'ouvrages entravant la dérive littorale, le cas de l'épi à

l'extrémité sud du club Aldiana de Mbour. Cette structure reproduit le même phénomène qu'au port de Nouakchott mais les évolutions observées sont sans commune mesure. En effet, les quantités de sables véhiculées par le transit sédimentaire y sont très différentes : 10 à 25 000 m^3/an pour la Petite Côte selon BARUSSEAU (1980, 1985b) contre 690000 à 1,1 millions de m^3/an pour Nouakchott d'après BARUSSEAU (1985a, 1985b) ; SHE-LENG et TEH-FU (1987) et OULD EL MOUSTAPHA (2000). Il faut noter aussi que les zones en progradation dans les secteurs de Mbour à la Pointe Sarène correspondent à des périmètres qui ont fait l'objet de reboisement pour fixer le cordon dunaire. A Saint-Louis, la brèche artificielle ouverte en 2003 entraîne à proximité des taux d'érosion largement supérieurs à ceux des autres secteurs. On remarque également dans tous les sites, surtout ceux de Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer ainsi que Mbour – Pointe Sarène, une forte pression anthropique sur le front de mer s'exprimant par une progression très importante des surfaces bâties aux dépens des dunes ou des cordons littoraux.

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Le recensement et l'évaluation des données cartographiques et photographiques disponibles en France et au Sénégal, nous ont permis de sélectionner les documents les plus adéquats pour retracer l'évolution des littoraux sableux à l'échelle locale. Un volume important de données iconographiques (photographies aériennes, cartes marines, minutes de topographie) a été recensé dans plusieurs institutions essentiellement françaises et sénégalaises : la Photothèque de l'IGN à Saint-Mandé, les archives de l'EPSHOM à Brest et la Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques à Dakar. A l'issue de ce travail de recensement et d'évaluation des données disponibles, les sites de Mboro – Fass Boye ainsi que ceux présélectionnés en Gambie et en Guinée-Bissau n'ont pas été étudiés en raison du peu de documents cartographiques et photographiques disponibles. Au final, seuls les sites situés au Sénégal et en Mauritanie ont été retenus pour l'étude de la cinématique littorale à l'échelle locale. Il s'agit des secteurs de Nouakchott, de Ndiago à Saint-Louis, de Bargny à Yène-sur-mer et de Mbour à la Pointe Sarène. La fréquence d'observation et l'échelle temporelle de l'analyse de la mobilité du trait de côte dans ces sites ont été conditionnées par l'ancienneté et la qualité des données acquises, en l'occurrence :

- cinq missions de photographies aériennes numérisées pour Nouakchott (1927, 1954, 1980, 1991, 2005) ;
- deux (1927, 1980) pour Ndiago ;
- cinq (1927, 1964, 1980, 1995, 2005) pour Saint-Louis ;
- quatre (1927, 1954, 1876, 1997) pour Bargny – Yène-sur-mer ;
- et enfin trois (1954, 1978, 1997) pour Mbour – Pointe Sarène.

Ces images aériennes ont été complétées par des cartes anciennes datant de 1894 et 1927 (carte N° 4892) dans la zone de Saint-Louis et de 1875 – 1876 (carte N° 3592) et 1935 – 1936 (carte N° 5852) dans le secteur de Bargny à Yène-sur-mer.

La mesure de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte à l'échelle locale est fondée sur la comparaison de la position diachronique de plusieurs marqueurs choisis selon leur pertinence par rapport aux données mobilisées et aux sites concernés. Ainsi, sur les prises de vue aériennes de Nouakchott, de Ndiago et Saint-Louis, la ligne de pleines mers, seule entité exploitable, a été sélectionnée. Elle est assimilée à la limite supérieure d'humectation de l'estran et matérialisée sur les images par le contact entre les pixels sombres et les pixels clairs sur la haute plage. Toutefois, cette ligne n'est pas visible sur les images de 1954 à Nouakchott. C'est pourquoi le pied de dune, plus fiable et visible uniquement sur les images de 1927, 1954 et 1980, a été utilisé pour mesurer l'évolution du site durant la période antérieure à la construction du port. A Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène, la ligne de référence a été fixée à la lisière de la plage aérienne. Elle correspond à la limite de végétation sur les images anciennes (1927, 1954, 1978) alors que, sur les images les plus récentes (1997), cette limite de végétation est remplacée, en certains endroits, par la limite des aménagements côtiers (murs d'habitation et enrochements).

Sur les cartes marines de la zone de Saint-Louis, en l'absence du zéro hydrographique, la *«laisse de haute mer»* a été retenue pour quantifier l'évolution de la flèche de 1894 à 1927 avec cependant quelques réserves puisque aucune indication n'est disponible sur la nature de la haute mer de référence. Ce manque d'informations sur la haute mer de référence a justifié le choix du zéro hydrographique ou niveau de réduction des sondes comme référence entre 1875 – 1876 et 1935 – 1936 dans le secteur de Bargny à Yène-sur-mer.

Après le choix des lignes de référence, les données ont été redressées et projetées dans le système de projection UTM/WGS84 Zone 28 Nord. La numérisation des lignes de référence a été réalisée ensuite avec une table à digitaliser pour les cartes marines et par photo-interprétation assistée par ordinateur sous environnement SIG pour les images aériennes.

Les lignes extraites ont été intégrées dans une base d'information géographique en vue d'être analysées. En prélude à cette opération, les sources d'incertitude affectant la précision des lignes de référence ont été analysées et estimées en fonction des informations disponibles.
Sur les cartes marines, en l'absence de détails sur les levés hydrographiques de base et les procédés d'établissement de tous les documents utilisés, la bibliographie, l'observation et la comparaison des documents ont mis en évidence quelques incohérences. Ainsi, la carte N° 3592 levée en 1875-1876 du secteur de Bargny à Yène-sur-mer recèle de détails topographiques inexacts matérialisés par une représentation erronée du tracé du trait de côte au sud de Dakar. La carte N° 4892 du secteur de Saint-Louis, mise à jour en 1927 à partir de photographies aériennes, contient aussi des erreurs locales de positionnement des objets au nord et au sud de la ville. Il faut noter également que les cartes sont des sources d'informations de seconde main et que les évolutions technologiques, les différentes étapes du processus d'élaboration (levés, traitements des données, dessin, reproduction) sont autant de facteurs d'imprécision pouvant affecter le zéro hydrographique et la *«laisse de haute mer»* extraits des cartes marines. Les autres facteurs d'incertitude concernant ces deux lignes de référence sont la digitalisation et le géoréférencement des données digitalisées. L'épaisseur des traits et l'échelle des cartes entraînent une erreur de digitalisation de 12,74 m pour les cartes de la zone de Saint-Louis, de 9,97 et 12,5 m pour celles du secteur de Bargny – Yène-sur-mer. Quant à l'erreur de géoréférencement indiquée par le logiciel, elle est de 1,43 m pour les deux cartes utilisées dans la zone de Saint-Louis et de 6,1 m pour les documents mobilisés dans le secteur de Bargny – Yène-sur-mer. L'incertitude totale générée par le traitement des données cartographiques est donc de 26,8 m pour les cartes de Saint-Louis et de 28,5 m pour celles de Bargny – Yène-sur-mer. Si on rapporte cette incertitude à l'écart temporel entre les cartes, l'erreur sur les taux d'évolution est de 0,81 m/an entre 1894 et 1927 pour le secteur de Saint-Louis et de 0,5 m de 1875-1876 à 1935-1936 pour Bargny – Yène-sur-mer. Ce ne sont là que des approximations qui ne tiennent pas compte de la précision très aléatoire des cartes marines qui fait que les résultats doivent être considérés avec prudence.

Les sources d'imprécision de l'interprétation des images aériennes sont aussi diverses : précision du GPS utilisé dans la collecte des points de calage sur le terrain, repérage des amers,

numérisation des lignes de référence, oscillations du niveau de pleines mers. L'incertitude du GPS a été estimée à ±4 m après comparaison avec des bornes géodésiques de l'IGN et à un pixel pour le géoréférencement des images.

L'évaluation de l'erreur de numérisation des lignes de référence a été réalisée en répétant la numérisation de secteurs côtiers représentatifs sur les images aériennes utilisées. A partir de la comparaison des résultats des différentes numérisations, des moyennes et des écarts-types ont été calculés et la marge d'erreur a été fixée à la moyenne plus deux écarts-types. Il en résulte une erreur de 1 à 2 m pour la ligne de pleines mers et la limite supérieure de la plage sur des images de bonne qualité alors qu'elle dépasse 3 m pour la ligne de pleines mers sur les images surexposées, en particulier celles de 1980 couvrant Nouakchott et Saint-Louis.

Au demeurant, le principal facteur d'imprécision reste la variabilité sur le court terme de la position de la ligne de pleines mers en raison des variations temporelles du niveau des pleines mers. L'estimation de cette erreur est basée sur le même principe que celui adopté pour la ligne instantanée de rivage sur les images Landsat. Faute de données de terrain, nous avons eu recours aux informations indiquées dans la littérature et aux hauteurs de marée prédites par le SHOM. Ainsi à Nouakchott, une marge de ±14 m a été estimée pour chacune des périodes d'étude en l'absence d'informations sur les dates de prises de vue. A Ndiago où les dates d'exécution des photographies aériennes sont connues, l'incertitude potentielle est de ±8,65 m entre 1927 et 1980. A Saint-Louis, elle est de 19,24 m entre 1927 et 1964 ; 9,04 m entre 1964 et 1980 ; 4,08 m de 1980 à 1995 et de 1995 à 2005 à cause d'une hauteur de pleine mer identique entre la mission de 1980 et 2005.

L'ensemble de toutes ces erreurs aboutit à Nouakchott à une marge d'incertitude de :

- 14,42 m pour le pied de dune de 1927 à 1954 ;
- 59,43 m pour la ligne de pleines mers de 1927 à 2005 ;
- 17,95 m à Ndiago entre 1927 et 1980 ;
- 54,33 m de 1927 à 2005 pour Saint-Louis ;
- 13,24 m de 1927 à 1997 à Bargny – Yène-sur-mer ;
- 14,06 m à Mbour – Pointe Sarène entre 1954 et 1997.

Toutes ces marges d'erreurs sont requises par le DSAS qui nous a servi d'outil de mesure des variations de la position des lignes de référence pour analyser et cartographier dans le dernier chapitre, les tendances évolutives du littoral à l'échelle locale. Les mesures linéaires fournies par le DSAS ont été complétées par des bilans surfaciques.

Au regard de l'analyse diachronique des variations spatio-temporelles de la position des lignes de référence retenues, les sites étudiés peuvent être regroupés en deux catégories : les sites qui présentent une succession de segments en progradation et en érosion (Nouakchott, Saint-Louis et Mbour – Pointe Sarène) et les sites en recul généralisé sur toutes les périodes étudiées (Ndiago et Bargny – Yène-sur-mer).

A Nouakchott, la position du pied de dune est en recul continue dans la période 1927 – 1980 à une vitesse moyenne de -0,5 m/an. Cette érosion affecte surtout les environs du wharf (-0,76 m/an). Pour la ligne de pleines mers de 1927 à 2005, son évolution se résume à une progradation graduelle au nord de l'épi du port (1 à 7,93 m/an) et une érosion au sud (-5,7 m/an). Les bilans surfaciques établis pour le pied de dune de 1927 à 1980 indiquent une perte de 14,07 ha. Pour la ligne de pleines mers, les surfaces accumulées ont été estimées à 102,66 ha et les surfaces érodées à 90,46 ha. D'un point de vue temporel, l'érosion du pied de dune s'est nettement accélérée dans la période 1954 – 1980 par rapport à celle de 1927 – 1954 alors que la ligne de pleines mers en érosion jusqu'en 1980 a vu son évolution bouleversée. Dans les zones en progradation au nord du port, les taux de progression ont baissé entre 1980 – 1991 et 1991 – 2005 tandis qu'au sud, dans les zones en érosion, les vitesses de recul ont augmenté.

Le deuxième secteur présentant des sections de côte en progradation et en érosion concerne les abords de Saint-Louis. La superposition des laisses de pleines mers datant de 1894 et 1927 indique une érosion moyenne de -1,7 m/an au droit des quartiers de Ndar Toute et de Guet Ndar. Les résultats de la photo-interprétation révèlent une légère progression de la ligne de pleines mers entre 1927 et 2005 pour le secteur allant de Ndar Toute à la Pointe aux Chameaux. Toutefois, tous les taux d'érosion (en moyenne 0,20 m/an) sont inclus dans la marge d'erreur. En dehors de ces secteurs, la tendance est à l'érosion. Celle-ci est très faible au droit des quartiers de Gokhoumbathie, Hydrobase, Fass Dièye, alors qu'au nord de Gokhoumbathie et au sud de Fass Dièye, le recul est beaucoup plus marqué avec des taux variant entre -0,69 et -1,82 m/an et un bilan surfacique de -9,84 ha. Les variations temporelles de la position de la ligne de pleines mers montrent une situation proche de la stabilité jusqu'en 1980 (faible taux d'évolution) suivie d'une phase de progression (+2,25 m/an) de 1980 à 1995 et d'une forte érosion dans la période récente (-5,6 m/an entre 1995 et 2005).

Le troisième secteur alternant segments en progradation et en érosion intéresse le secteur côtier de Mbour à la Pointe Sarène. Ce sont les secteurs reboisés (Centre de l'IRD de Mbour, domaine de Nianing et club Aldiana) qui ont enregistré une avancée de la limite de végétation de 1954 à 1997. Néanmoins, plus de 3/4 des taux calculés tombent dans la marge d'erreur et les surfaces accumulées sont très faibles, seulement 0,16 ha. Le bilan global sur l'ensemble du linéaire côtier de Mbour à la pointe Sarène est négatif avec un taux de -0,76 m/an et une perte surfacique de 14,38 ha. L'érosion touche particulièrement les environs de Warang, de Mballing et le sud du club Aldiana. On note également une accentuation des taux d'érosion entre les périodes 1954 – 1978 (-0,64 m/an) et 1978 – 1997 (-1,14 m/an).

Dans les secteurs affectés par une érosion généralisée de leur linéaire côtier, aux abords de Ndiago, la position de la ligne de pleines mers a reculé à une vitesse de 1,18 m/an de 1927 à 1980 et le bilan surfacique correspondant est de -19,33 ha.
Pour le site de Bargny – Yène-sur-mer, la comparaison des zéros hydrographiques datant de 1875-1876 et de 1935-1936 met en évidence un littoral en recul à une vitesse moyenne de -2,48 m/an. La

tendance observée par photo-interprétation est aussi similaire pour la période 1927 – 1997. Le taux moyen d'érosion de la limite supérieure de plage est de -0,76 m/an. Cette évolution régressive concerne essentiellement les zones de Bargny Guedj et de Siendou. Au total, cette section de côte a perdu 16,56 ha. Ici comme dans le secteur précédent, on note une augmentation de la vitesse d'érosion durant les périodes étudiées : -0,71 m/an entre 1927 – 1954 ; -0,95 m/an entre 1954 – 1976 et 1,18 m/an entre 1976 et 1997.
Pour la période récente, la comparaison de points GPS enregistrés sur le terrain en 2007 et des traits de côte les plus récents dans les sites de Ndiago, Bargny – Yène-sur-mer et de Mbour – Pointe Sarène suggère une poursuite de l'érosion dans ces zones.

A partir des données disponibles, nous n'avons pas constaté de corrélation entre les agents littoraux naturels de forçage (les vents notamment) et les phénomènes d'érosion ou d'accumulation observés. En revanche, les agents anthropiques ont manifestement contribué à l'évolution du trait de côte dans certains sites. Au-delà du site emblématique de Nouakchott, l'aménagement d'un épi à l'extrémité du club Aldiana de Nianing a généré, toute proportion gardée, une situation similaire à celle de Nouakchott (accumulation en amont-dérive et érosion en aval-dérive). Il faut noter également que les secteurs en progradation de Mbour à la pointe Sarène se localisent au droit des zones reboisées. Aussi, la brèche artificielle qui a été ouverte sur la Langue de Barbarie en octobre 2003 au sud de Saint-Louis a eu comme conséquence des taux d'érosion sans commune mesure avec ceux notés dans les autres secteurs entre 1995 et 2005.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire portant sur la mobilité du trait de côte en Afrique de l'Ouest, avait pour principal objectif de mettre en évidence et de mesurer les phénomènes d'érosion et d'accumulation intervenus depuis plusieurs décennies aux échelles régionale et locale. Il est fondé sur un important travail d'inventaire qui a révélé l'existence de lacunes importantes au sein des couvertures photographiques et cartographiques disponibles. Alors que les villes portuaires et les grandes agglomérations font l'objet de plusieurs missions, certains secteurs inhabités en sont complètement dépourvus. De plus, l'essentiel des documents cartographiques et photographiques concernant le Sénégal et la Mauritanie est stocké dans des structures françaises, en particulier les archives de l'EPSHOM à Brest et la photothèque nationale de l'IGN à Saint-Mandé. Mais en dehors de ces structures européennes, seule la Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques à Dakar détient un important fonds photographique et cartographique concernant le territoire sénégalais dont certaines données sont indisponibles car non cataloguées.

En dépit de ces contraintes, nous avons recensé une vingtaine de cartes régionales, une quarantaine de cartes locales, une dizaine de cartouches et une trentaine de minutes topographiques du SHOM couvrant un intervalle chronologique allant du 19e à la fin du 20e siècle. A ces données s'ajoutent une cinquantaine de missions de photographies aériennes exécutées, entre autres, par les services photographiques du SHOM et de l'IGN entre 1927 et 2005 ainsi qu'une série de 35 images satellitaires Landsat (MSS, TM et ETM+) disponibles gratuitement sur le site internet du *Global Landcover Facility* (ftp://ftp.glf.umiacs.umd.edu/Landsat/). Ces images datent des années 1970 (MSS), du milieu des années 1980 (TM) et du début des années 2000 (ETM+). Toutes les données répertoriées par nos soins, alimenteront le Catalogue d'Informations pour l'Afrique de l'Ouest (CIAO), accessible en ligne à l'adresse http://soga.univ-brest.fr/MDweb/. Elles constitueront notre apport à cet outil d'inventaire et de vulgarisation des données spatiales intéressant les pays de la zone du PRCM.

Sur la base de notre inventaire, les données satellitaires et cartographiques les plus pertinentes pour répondre à notre problématique à **l'échelle régionale** ont été sélectionnées et traitées. Néanmoins la résolution spatiale des images satellitaires Landsat disponibles (30 m pour les images TM, ETM+ et 79 m pour les données MSS) limite l'analyse régionale de la cinématique littorale aux formes très mobiles comme les flèches, l'extrémité libre des cordons sableux et les îles sableuses associées aux systèmes estuariens du Sénégal à la Guinée-Bissau qui enregistrent des évolutions de plusieurs dizaines de mètres par an. Pour le suivi de ces formes, deux lignes de référence ont été sélectionnées selon les secteurs étudiés et la qualité des images : la ligne instantanée de rivage sur la Langue de Barbarie et la limite de végétation sur le haut de plage dans les zones estuariennes de Joal au Rio Cacine. L'extraction de ces indicateurs a été effectuée par équidensitométrie pour la ligne instantanée de rivage et par classification non dirigée avec la méthode ISODATA pour la limite de végétation. L'analyse des variations historiques de la position de ces deux lignes de référence durant les deux décennies couvertes par les images Landsat nous a permis de retracer l'évolution historique du trait

de côte sur 142 km de plage, soit 7,5 % des 1892 km constituant le linéaire côtier sableux régional. Sur ces 142 km, 73,4 % sont en progradation et 26,6 % sont en érosion.
Les segments de côte en érosion sont situés sur le front des cordons littoraux isolant des mangroves dans les estuaires sénégalais (Saloum, Casamance), bissauguinéens (Rio Cumbija et l'ouest de l'île d'Adonga), les racines des flèches de Varéla (Guinée-Bissau), du Cap Saint-Mary et la pointe de la flèche de Bald Cape (Gambie). Les vitesses moyennes d'érosion estimées dans ces régions sont de l'ordre de -16 à -24 m/an pour les flèches, -13 à -24 m/an pour les cordons littoraux et -47 m/an pour la façade occidentale de l'île d'Adonga.
Les zones en progradation sont situées à la pointe des flèches, des cordons littoraux et autres îles sableuses sur les marges maritimes des estuaires du Sénégal (Langue de Barbarie, Joal, Saloum, Casamance), de la Gambie (Toll Point, Saniang Point, Kartrung Point) et de la Guinée-Bissau (Cap Roxo, Rio Cacheu, ouest de l'île de Pexice, nord du Rio Cacine, flèche d'Acapa, la façade orientale de l'île d'Adonga). Les taux moyens de progression oscillent généralement entre +15 et +140 m/an et atteignent +551 m/an sur la Langue de Barbarie.

Par rapport aux analyses régionales antérieures, ces résultats suggèrent que la tendance à l'accumulation dans les systèmes estuariens du Saloum à la Guinée-Bissau signalée par PNUE/UNESCO/ONU-DAESI (1985) et DIOP (1986 ; 1990) se poursuit de nos jours avec cependant quelques érosions localisées.
Globalement à l'échelle régionale, sur les 1892 km de côtes sableuses, 104 km (5,5 %) progradent, 38 km (2 %) s'érodent et 1750 km (92,5 %) ne montrent pas d'évolutions mesurables par les images Landsat utilisées.

Outre ces aspects cinématiques, les résultats issus du traitement des images Landsat et les informations bibliographiques ont été exploités pour proposer une typologie des côtes sableuses de notre zone d'étude. En fonction de cette classification, huit sites représentatifs de la diversité morphologique ont été sélectionnés pour une analyse de la cinématique littorale à **grande échelle** :

- Nouakchott (plages associées à des cordons dunaires isolant des dépressions de types sebkhas),
- Mboro-sur-mer – Fass Boye (plages associées à des cordons dunaires isolant des dépressions de types niayes),
- Ndiago – Saint-Louis (plages associées à une flèche d'estuaire),
- Bargny – Yène-sur-mer (plages associées à des cordons littoraux isolant des marigots),
- Mbour – Pointe Sarène et la *«Tourism Development Area»* du sud de Fajara à Bald Cape (plages associées à dunes littorales semi-fixées),
- Banjul (plages associées à une flèche de redan),
- Varéla (plages associées à des cordons sableux isolant des vasières à mangrove).

Malheureusement parmi ces huit sites, seule la moitié (Nouakchott, Ndiago – Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène) a été finalement retenue compte tenu du volume et de la qualité des données disponibles. Ces quatre sites s'étalent sur environ 67 km de côte. L'étude de l'évolution spatio-temporelle de la position des marqueurs sélectionnés comme traits de côte (ligne de

pleines mers pour Nouakchott, Ndiago – Saint-Louis, limite supérieure de la plage pour Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène) est fondée essentiellement sur le traitement numérique et l'interprétation d'images aériennes au sein d'un SIG. Les résultats de cette démarche sur l'ensemble du linéaire considéré révèlent une érosion sur 47 km (70 %) de côte et une progradation sur 20 km (30 %). Les phénomènes de progradation concernent surtout le nord de l'épi du port de Nouakchott (+1 à +7,93 m/an de 1927 à 2005) et dans une moindre mesure une portion du littoral de la ville de Saint-Louis (de Ndar Toute à la Pointe aux Chameaux) ainsi que quelques segments situés entre Mbour et Pointe Sarène (Centre de l'IRD de Mbour, domaine de Nianing, club Aldiana). L'accumulation y est cependant trop faible pour être quantifiée avec précision car plus des ¾ des évolutions enregistrées sont inférieurs à la marge d'erreur.

Les secteurs en érosion se localisent :

- au sud du port de Nouakchott (-5,7 m/an entre 1927, 1980, 1991 et 2005),
- aux abords de Ndiago (-1,18 m/an de 1927 à 1980),
- à Saint-Louis au nord du quartier de Ndar Toute et au sud de la ville à proximité de la brèche (-0,69 à -1,82 m/an dans l'intervalle 1927, 1964, 1980, 1995 et 2005),
- sur la côte de Bargny à Yène-sur-mer (-0,76 m/an pour la période 1927, 1954, 1976 et 1997), du centre de l'IRD de Mbour au domaine de Nianing et du sud du club Aldiana à la Pointe Sarène (-0,7 m/an entre 1954, 1978 et 1997).

Les vitesses calculées à Nouakchott pour la période postérieure à la construction du port en 1980 sont cohérentes mais légèrement inférieures à celles proposées par MARICO (1996) ou par GRESARC (2006). En revanche, pour le secteur de Saint-Louis de Ndar Toute à la Pointe aux Chameaux, nos résultats diffèrent de ceux proposés par NIANG-DIOP (1995) qui avait conclu à une érosion du littoral entre 1954 et 1989. Cette divergence est probablement due à des choix différents en termes de lignes de référence, de méthode d'extraction et d'échelle temporelle considérée. Pour le site de Bargny – Yène-sur-mer, l'érosion qu'avait constatée DEMOULIN (1967) sans pouvoir la quantifier se poursuit encore actuellement, comme c'est le cas, d'ailleurs, sur l'ensemble de la côte au sud de Dakar, notamment à Rufisque (DIALLO, 1982 ; SALL, 1982 ; NIANG-DIOP, 1995 ; DIEYE, 2000 ; GUERIN 2003). Pour Mbour – Pointe Sarène, nous ne disposons pas de données comparatives, mais on peut noter que les deux sections de côte jouxtant notre secteur d'étude sont aussi en érosion : la zone de Mbour à Saly au nord (DABO, 2006 ; C.S.E., 2004) et les alentours du village de Pointe Sarène au sud (BARUSSEAU, 1980 ; IBE et QUELENNEC, 1989 ; CESARACCIO *et al.* 2004, NGAMI-NTSIBA-ANDZOU, 2006).

D'un point de vue temporel, les variations des taux d'évolution d'une période à une autre indiquent une accentuation de l'évolution régressive des littoraux au cours de ces dernières décennies dans tous les sites concernés (sud du port de Nouakchott, aux abords de Saint-Louis, de Bargny à Yène-sur-mer ainsi que de Mbour à la Pointe Sarène).

Selon toute vraisemblance, le diagnostic d'IBE et QUELENNEC (1989) et de QUELENNEC (1989) établissant une logique érosive très nette sur les littoraux d'Afrique de l'Ouest et du Centre est toujours d'actualité.

L'analyse des données disponibles concernant les agents naturels de la dynamique littorale ne nous a pas permis d'établir une corrélation entre les vents efficaces et les phénomènes d'érosion ou de progradation enregistrés. Concernant les facteurs anthropiques, ils semblent avoir localement contribué soit à la progradation ou à la stabilisation des dunes littorales (Nianing, entre Mbour et la Pointe Sarène), soit à l'érosion côtière (Saint-Louis).

L'une des limites majeures à la compréhension et à l'explication des mécanismes qui régissent les phénomènes que nous avons observés aux échelles régionale et locale est l'absence de mesures *in situ* concernant les houles, les vagues, les courants, etc.. Une autre contrainte notable est l'accès et la disponibilité des données surtout celles relatives à la Guinée-Bissau et à la Gambie. Des missions photographiques anciennes ont été recensées dans la littérature. Certaines intéressant la Gambie seraient disponibles auprès de l'*Ordnance Survey* en Grande Bretagne mais nous n'avons pas pu nous les procurer, alors que, pour la Guinée-Bissau, aucun organisme détenteur de données photographiques ou cartographiques pertinentes par rapport à notre sujet n'a été identifié.

Ce mémoire a apporté de nouveaux résultats couvrant au total un linéaire de 210 km sur les 1892 km de plage recensés dans notre terrain d'étude ; il reste donc plusieurs centaines de kilomètres à étudier. A l'heure actuelle, l'analyse quantitative régionale avec les images satellitaires Landsat accessibles ne peut-être limitée qu'à deux types de côtes sableuses (flèches et cordons littoraux isolant des vasières à mangroves) quels que soient l'approche et les traitements appliqués à ces données et à cette échelle. Des études futures précises et globales du linéaire côtier régional impliqueront nécessairement la disponibilité de documents iconographiques de qualité (par exemple des images satellitaires à très haute résolution spatiale type Quickbird, IKONOS ou SPOT 5 HRG) qui permettront de disposer d'une cartographie précise, utilisant des indicateurs clairement identifiés, et donc d'une situation de référence pour l'observation et la compréhension de la mobilité du trait de côte régional. Dans le cas contraire, à l'avenir il est plus judicieux de privilégier les études locales sur des sites représentatifs de la diversité des côtes sableuses rencontrées à l'échelle régionale. A ce titre, les résultats acquis sur les 4 sites étudiés mériteraient d'être réactualisés par l'acquisition de données photographiques récentes ou d'images satellitaires (Quickbird, IKONOS ou SPOT 5 HRG) offrant une vision très détaillée des paysages presque identique à celles des prises de vues aériennes. Ces mêmes données satellitaires pourraient être acquises sur les 4 autres sites qui ont été exclus de l'étude et complétées éventuellement par les missions photographiques aériennes que détiendrait l'*Ordnance Survey* pour les sites situés en Gambie. Aussi en complément de l'analyse diachronique sur le moyen et long terme, des études sur le court terme avec des mesures de terrain sur ces huit sites devraient être entreprises. Il s'agit en particulier de 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 dispositif d'observatoires s'appuyant sur cet échantillon de base permettrait d'affiner les connaissances déjà acquises. Dans cette optique, il sera indispensable également d'acquérir simultanément des données sur les agents de la dynamique marine.

Les données numériques produites et mobilisées dans cette thèse sont stockées dans une Base d'Information Géographique qui pourrait être pilotée par un SIG régional appelé à devenir un outil d'observation et de suivi spatio-temporel de l'érosion côtière en Afrique de l'Ouest. De telles bases de données existent déjà en Europe à travers des programmes comme «CORINE Erosion côtière», «Eurosion» (European Commission, 2004) ou aux Etats Unis avec le *National Shoreline Study* auquel a succédé le CEIS (*Coastal Erosion Information Erosion System*) (DOLAN *et al.,* 1983, 1990) et plus récemment le *National assessment of shoreline change* (HAPKE *et al.,* 2006 ; 2007 ; MORTON *et al.*, 2004 ; 2005). Tous ces programmes avaient pour objectifs d'établir un état de référence de l'évolution des littoraux des zones concernées. Dans cet esprit, un nouveau projet «Suivi du trait de côte et mise en place d'un schéma directeur du littoral ouest-africain» vient de démarrer à l'initiative de l'UICN avec la collaboration scientifique du laboratoire Géomer. Il est mis en œuvre dans le cadre du Programme régional de lutte contre l'érosion côtière (PRLEC) de l'UEMOA (Union Economique et Monétaire Ouest-Africaine, www.uemoa.int). Le PRLEC a été lancé en 2007 par la commission de l'UEMOA à la suite des recommandations du conseil des Ministres chargés de l'Environnement de la zone UEMOA tenu à Cotonou (Bénin) le 11 avril 1997. Placé sous la supervision de comités régionaux d'orientation et scientifique, il vise à une meilleure compréhension des phénomènes d'érosion par des actions de recherche et une planification des aménagements côtiers par l'élaboration d'un schéma directeur du littoral de la façade atlantique de l'Afrique de l'Ouest, depuis la Mauritanie jusqu'au Bénin.

Le projet piloté par l'UICN est constitué de plusieurs volets en l'occurrence une synthèse et une cartographie régionale de la géodynamique des littoraux au 1/250 000 qui permettra d'identifier les zones sensibles, de préciser et de spatialiser les enjeux de l'évolution des littoraux, des études de cas sur l'ensemble de la zone concernée et un effort de communication centré sur la diffusion des résultats.

L'un des objectifs à terme du volet «études de cas» est la capitalisation des résultats à travers la mise en place au Centre de Suivi Ecologique de Dakar d'un SIG dédié à l'érosion côtière et si possible d'un observatoire régional du littoral qui aurait pour missions principales :

- la réalisation de synthèses diachroniques locales et le suivi de sites tests répartis sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest de la Mauritanie au Golfe de Guinée. Cet objectif s'appuiera sur la constitution d'un réseau d'échange et de vulgarisation des travaux entrepris dans les différents pays de la façade maritime ouest-africaine,
- la standardisation des méthodes de traitement des données (acquisition, analyse, représentation),
- la valorisation et le «porter à connaissance» des données existantes par la mise à jour de géorépertoires accessibles *via* le Web.

Les acquis méthodologiques et techniques, les inventaires iconographiques, les résultats ainsi que les conclusions auxquelles a aboutie cette thèse contribueront à la réalisation de ce projet.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AAGAARD T., DAVIDSON-ARNOTT R., GREENWOOD B., NIELSEN J. (2004) Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution. *Geomorphology,* n°60 , p. 205 - 224.

AARNINKHOF S.G.J. (2003) *Nearshore bathymetry derived from video Imagery*. Phd Thesis, Delft University of Technology, Delft, 175 p.

AARNINKHOF S.G.J., TURNER I.L., DRONKERS T.D.T., CALJOUW M., NIPIUS L. (2003) A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coastal Engineering*, vol. 49, n°4, p. 275 - 289.

AGENCE CANADIENNE DE DEVELOPPEMENT (1977) *Le Baffin : levé au large Sénégal et la Gambie*. Ministère des Pêches et de l'environnement Canada-Service des Pêches et de la Mer, Direction de l'information et des publications scientifiques, Ottawa, 130 p.

AKONO A., TONYE E., PASSO M.M.D., TANKAM N.T., DZEPA C. (2005) Détermination d'une ligne de rivage de grande taille à l'aide de la multi-résolution hiérarchique sur une image RSO. *SAGEO 2005*, Avignon, 20 p.

ALLAN J.C., KOMAR P. D., PRIEST G.R. (2003) Shoreline variability on the high-energy Oregon coast and its usefulness in erosion-hazard assessments. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 83 - 105.

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.

ANDREW J., COOPER G., PILKEY O.H. (2004) Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global Planetary Change*, vol. 43, n°3-4, p. 157 - 171.

ANDREWS B.D., GARES P.A., COLBY J.D. (2002) Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Geomorphology*, n°48, p. 289 - 308.

ANFUSO G., MARTINEZ DEL POZO J.A. (2005) Towards management of coastal erosion problems and human structure impacts using GIS tools: case study in Ragusa Province, Southern Sicily, Italy. *Environmental Geology*, vol. 48, n°4-5, p. 646 - 659.

APLIN P. (2006) On scales and dynamics in observing the environment. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n°1, p. 2123 - 2140.

ARAUJO R., HONRADO J., GRANJA H.M., DE PINHO S.N., CALDAS F.B. (2002) Vegetation complexes of coastal sand dunes as an evaluation instrument of geomorphologic changes in the coastline. *In* (EUROCOAST) *Littoral 2002. The changing coast,* EUCC Porto, Portugal, p. 337 - 339.

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.

AURROCOECHEA I., PETHICK J.S. (1986) The coastline, its physical and legal definition. *International Journal of Coastal and Estuarine Law*, vol. 1, n°1, p. 29 - 42.

AZANDOSSESSI A. (1988) *Evolution de la ligne de rivage au sud du port de l'Amitié*. Mémoire de fin d'études, Ecole Normale Supérieure de Nouakchott, Nouakchott, 33 p.

BA M., DIOP E. S., DIOUF B., SOUMARE A. (1993) Evolution de l'embouchure du Saloum de 1958 à 1992. *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. 121 - 131.

BA A. G., BARUSSEAU J.-P., DESCAMPS C., SAOS J.-L. (1993) Livret - guide de l'excursion en Mauritanie (26 avril - 1er mai 1993). *In* (PICG) *Changements côtiers au Quaternaire - Coastal evolution in the quaternary.* UNESCO / UISG IRIM, Université de Nice - Sophia Antipolis, 26 p.

BAGLI S., SOILLE P. (2003) Morphological automatic extraction of pan-european coastline from Landsat ETM+ images. *In* (CoastGIS'03) *Fifth International symposium on GIS and computer cartography for coastal zone management*, *Palazzo Ducale 16-17-18 October 2003*. Genova, Italy, 6 p.

BAGLI S., SOILLE P. (2004) Automatic delineation of shoreline and lake boundaries from Landsat satellite images. *In Proceedings of initial ECO-IMAGINE GI and GIS for integrated coastal management*, *Seville, 13th-15th may 2004*, 4 p.

BAI Z., LI D., LI S. (1997) *Report on mathematical model test research of sediment alluvial and wave shielding for Nouakchott fishery terminal project in Mauritania.* Middle Report N° 1 - Synthetical analysis on basic hydrologic data in engineering sea region and verification on sediment transport by mathematical model test in friendship harbor, 25 pages + Annexes.

BAILY B., NOWELL D. (1996) Techniques for monitoring coastal change: a review and case study. *Ocean and Coastal Management*, vol. 32, n°2, p. 85 - 95.

BAIOCCHI V., DOMINICI D., DEL GUZZO F. (2006) Utilisation des images satellites à haute résolution pour la surveillance d'une zone côtière. *Géomatique Expert*, n°51, p. 38 - 44.

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

BANNARI A., MORIN D., BENIE G.B., BONN F.J. (1995) A theoretical review of different mathematical models of geometric corrections applied to remote sensing images. *Remote sensing reviews*, vol. 13, p. 27 - 47.

BARBEY C. (1967) Le littoral de Dakar à Saint-Louis à la lumière de documents anciens. *Notes Africaines,* IFAN, n°116, p. 122 - 124.

BARROW M. (1994) General overview of the Gambia Coastal zone. *In* BARROW M., MANNEH S., CONTEH A., BAH A.R., NJIE E., DANSO A., CAMARA A., JOINER S., CHAM M. (1994) *Land use systems on the Gambia coastal zone*. Natural Resources management in Africa. ROSTA, Dakar, p.4-33.

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. (1985a) *Evolution de la ligne de rivage en République Islamique de Mauritanie*. Rapport UNESCO, 103 p.

BARUSSEAU J.P. (1985b) 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.

BARUSSEAU J.P., DIOP E. S., SAOS J.L. (1985) Evidence of dynamics reversal in tropic estuaries, geomorphological and sedimentological consequences (Saloum and Casamance rivers, Senegal). *Sedimentology*. n°32, p. 543 - 522.

BARUSSEAU J.P., DESCAMPS C., GIRESSE P., LONTEILLET J., PAZDUR M. (1989) Nouvelle définition des niveaux marins le long de la côte nord-mauritanienne (sud du banc d'Arguin) pendant les cinq derniers millénaires. *Comptes Rendus Académie des Sciences Paris.* Tome 309, série II, Sédimentologie, p. 1019 - 1024.

BARUSSEAU J.P., DESCAMPS C., DIOUF B., KANE A., SAOS J.L. (1993). Processus hydro et morpho-sédimentaires et stabilité de la façade du delta. *In* (MICHEL P., BARUSSEAU J.P., RICHARD J.-F., SALL M., Eds) *L'après-barrage dans la vallée du Sénégal. Modifications hydro-dynamiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu et les aménagements agricoles. Résultats des travaux du projet CAMPUS 1989-1992.* Presses Universitaires de Perpignan, p. 83 - 99.

BARUSSEAU J.P., BA M., DESCAMPS C., DIOP E.S., GIRESSE P., SAOS J.L (1995) Coastal evolution in Senegal and Mauritania at 10^3, 10^2, 10^1 year scales: natural and human records. *Quaternary International*, vol. 29 / 30, p. 61 - 73.

BARUSSEAU J.P., AKOUANGO E., BA M., DESCAMPS C. (1996) Evidence of short term retreat of the barrier shorelines. *Quaternary Science Reviews*, vol. 15, p. 763 - 771.

BARUSSEAU J. P., BA M., DESCAMPS C., DIOP E. S., DIOUF B., KANE A., SAOS J. L., SOUMARE A. (1998) Morphological and sedimentological changes in the Senegal river estuary after the construction of the Diama dam. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 26, n°2, p. 317 - 326.

BARUSSEAU J.P., DESCAMPS C., VERNET R., CREUSEVEAU J., RUË O., SALLIEGE J.F. (2005) Niveau marin, forçage sédimentaire et occupation humaine au Banc d'Arguin (Mauritanie) : le cas de Jref el Oustani. *In* (VERNET R., Ed.) *Recherches archéologiques dans le banc d'Arguin. Rapport de Mission dactylographié*. Parc National du Banc d'Arguin (PNBA), Nouakchott, p. 95 - 101.

BASCO D.R., BELLOMO D.A., HAZELTON J.M., JONES B.N. (1997) The influence of seawalls on subaerial beach volumes with receding shorelines. *Coastal Engineering,* n°30, p. 203 - 233.

BATTIAU-QUENEY Y., BILLET J.F., CHAVEROT S., LANOY-RATEL P. (2003) Recent shoreline mobility and geomorphologic evolution of macrotidal sandy beaches in the north of France. *Marine Geology*, vol. 194, n°1-2, p. 31 - 45.

BAULIG H. (1956) *Vocabulaire franco-anglo-allemand de géomorphologie*. Fascicule 130. Société d'édition Les Belles Lettres, Paris, 230 p.

BEER T. (1997) *Environmental oceanography*. CRC Marine Science Series. CRC Press, Boca Raton, New York, London, Tokyo, 367 p.

BIRD E.C.F. (1985) *Coastline changes. A global review*. John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 219 p.

BIRD E. C. F. (2000) *Coastal geomorphology. An introduction*. John WILEY and Sons Ltd, Chichester, 322 p.

BIRD E. C. F. (2007) *Coastal geomorphology. An introduction*. John WILEY and Sons Ltd, Chichester, 411 p.

BLERARD C. (1997) Morphologie sous-marine et états de surface dans le Golfe d'Arguin (Mauritanie) à partir des données du radar à synthèse d'ouverture d'ERS 1. *In* (MAINET G., Ed.) *Iles et Littoraux tropicaux. Actes des VIIème journées de Géographie tropicale. Brest 11, 12 et 13 novembre*. Ouest Edition - Presses Académiques, p. 247 - 252.

BLIVI A. (2001) Impact de l'érosion côtière et éléments d'étude de vulnérabilité : exemple du Togo (Golfe de Guinée). *Revue de l'université de Moncton*, vol. 32, n°1-2, p. 289 - 308.

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

BLIVI A., ADJOUSSI P. (2004) La cinématique du trait de côte au Togo vue par télédétection. *Geo-Eco-Trop*, vol. 28, n°1-2, p. 27 - 38.

BLODGET H.W., TAYLOR P.T., ROARK J.H. (1991) Shoreline changes along the Rosetta-Nile promontory: monitoring with satellite observations. *Marine Geology*, vol. 99, n°1-2, p. 67 - 77.

BO G., DELLEPIANE S., De LAURENTIIS R. (2000) Semiautomatic coastline detection in remotely sensed images. *Geoscience and remote sensing symposium. Proceedings IGARSS 2000*, vol. 5, n°2000, p. 1869 - 1871.

BO G., DELLEPIANE S., De LAURENTIIS R. (2001) Coastline extraction in remotely sensed images by means of texturefeatures analysis. *Geoscience and remote sensing symposium. Proceedings IGARSS 2001,* vol. 3, n°1-2, p. 1493 - 1495.

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

BONN F., ROCHON G. (1992) *Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes*. Presses de l'Université du Québec, AUPELF, Sainte-Foy, Montréal, 485 p.

BONNIN P. (1938) Mission hydrographique du Sénégal et de la Mauritanie (1er mars 1934-21 mars 1936). *Annales Hydrographiques.* 3e série, tome quinzième, volume de 1937, Service hydrographique de la Marine, Paris, Imprimerie Nationale, p. 137 - 213.

BONNOT-COURTOIS C., LEVASSEUR J.E. (2002) *Reconnaissance de la limite terrestre du domaine maritime. Intérêt et potentialités de critères morpho-sédimentaires et botaniques*. Rapport Ministère de l'équipement, CETMEF/RIVAGES, Laboratoire de géomorphologie et environnement littorale, 160 p.

BONNOT-COURTOIS C., LEVASSEUR J.E. (2003) Recherche d'indicateurs "naturalistes" de la limite supérieure du domaine maritime. *Cahiers Nantais,* n°59, p. 47 - 56.

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.

BOUQUET DE LA GRYE A. (1886) Etude sur la barre du Sénégal. *Revue Maritime et Coloniale,* tome 89, p.515 - 547.

BOURGOIN J. (1961) Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique (21 juin 1957 – 25 juin 1959). *Annales Hydrographiques.* 2e série, tome dixième, années 1959-1960, Service Hydrographique de la Marine, Paris, Imprimerie Nationale, p.127 - 193.

BRIE R. (1951) Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique (1947-1948). IV-SENEGAL - Région de Mbour. *Annales Hydrographiques.* 4e série, tome premier, année 1950, Service hydrographique de la Marine, Paris, Imprimerie Nationale, p. 163 - 166.

BRUUN P. (1962) Sea level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 88, p. 117 - 130.

BRUUN P. (1983) Review of conditions for uses of the Bruun rule of erosion. *Coastal Engineering*, vol. 7, n°1, p. 77-89.

BRUUN P. (1988) The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages. *Journal of Coastal Research*, vol. 4, n°4, p. 627 - 648.

BUITEN H.J., VAN PUTTEN B. (1997) Quality assessment of remote sensing image registration and testing of control point residuals. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 52, n°2, p. 57 - 73.

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.

BYRNES M. R., HILAND M.W. (1995) Large-scale sediment transport patterns on the continental shelf and influence on shoreline response: St. Andrew Sound, Georgia to Nassau Sound, Florida, USA. *Marine Geology*, vol. 126, n°1-4, p. 19 - 43.

CALOZ R., COLLET C. (2001) *Précis de télédétection. Volume 3 : Traitements numériques d'images de télédétection*. Presses de l'université du Québec/AUF, Sainte-Foy, 386 p.

CAMERON H.L. (1977) Coastal studies by sequential air photography. *In* (EL-ASHRY M.T., Ed) *Air photographies and coastal problems. Benchmark papers in Geology,* vol. 38, p. 168 - 177.

CARERE/ACROSES (1980) *Glossaire de termes de l'érosion des rivages et de l'ensablement / Glossary of shoreline erosion and sedimentation*. Conseil National de la Recherche / National Research Council - Canada, Ottawa, 60 p.

CARITE D. (1983) Essai de synthèse du quaternaire marin récent (40000 ans à l'actuel) de TIN OUEÏCH (18°4' N – 15°49' W, MAURITANIE). *Geobios*, n°16, Fascicule 3, p.381 - 386.

CARR A.P. (1962) Cartographic record and historical accuracy. *Geography*, vol. 47, p. 135 - 144.

CARR A.P. (1980) The significance of cartographic sources in determining coastal change. *In* (CULLINGFORD R.A.; DAVIDSON D.A.; LEWIN J., Eds), *Timescales in geomorphology.* John WILEY *&* Sons Ltd., p. 69 - 78.

CESARACCIO M., THOMAS Y.-F., DIAW A.T., OUEGNIMAOUA L. (2004) Impacts des activités humaines sur la dynamique littorale : prélèvements de sables sur le site de Pointe Sarène, Sénégal. *Géomorphologie : relief, processus, environnement,* n°1, p. 55 - 64.

CHANG J., LIU G., HUANG C., XU L. (2005) Remote sensing monitoring on coastline evolution in the yellow river delta since 1976. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS Proceedings. IEEE International*, vol. 3, p. 2161 - 2164.

CHEN L. C., RAU J.Y. (1998) Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n°17, p. 3383 - 3397.

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

CHRISTENSEN A. H.J. (2002) A fully automated sea boundary delineator. *In FIG XXII International Congress, Washington D.C., April 19-26, 2002*. 10 p.

CHU Z.X., SUN X.G., ZHAI S.K., XU K.H. (2006) Changing pattern accretion / erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images. *Marine Geology,* n°27, p. 13 - 30.

CISSE I. (1976) *Etude géomorphologique. Secteur de Lompoul (Grande Côte)*. Mémoire de Maîtrise, Université de Dakar, Dakar, 96 p.

CLOS-ARCEDUC A. (1964) *La photographie aérienne et les dépôts prélittoraux*. Etude de photo-interprétation n°1. Imprimerie de l'Institut Géographique National , Paris, 53 p.

CLUS-AUBY C. (2003) *La gestion de l'érosion des côtes : l'exemple aquitain*. Collection "Scieteren". Presses Universitaires de Bordeaux, Pessac, 256 p.

CODJIA C.L., DOMINGO E. (1998) Utilisation des mesures au sol et des données satellitaires pour l'étude de la dynamique du trait de côte de la ville de Cotonou. *In* (AUPELF-UREF, Ed.) *La réalité de terrain en télédétection : pratiques et méthodes,* p. 185 - 190.

COLE G.M. (2007) Delineation of coastal boundaries using tidal data. *In 6th FIG Regional Conference, Coastal Areas and Land Administration – Building the Capacity. San José, 12–15 november 2007*, 13 p.

COLLIER P., INKPEN R., FONTANA D. (2001) The use of historical photography in environmental studies. *Cybergeo,* n°184, 14 p.

COLWELL R.N. (1965) The extraction of data from aerial photographs by human and mechanical means. *Photogrammetria*, vol. 20, n°6, p. 211 - 228.

CONTEH A.F. (1994) Tourism development with specific reference to the Tourism Development Area. *In* BARROW M., MANNEH S., CONTEH A., BAH A.R., NJIE E., DANSO A., CAMARA A., JOINER S., CHAM M. (1994) *Land use systems on the Gambia coastal zone*. Natural Resources management in Africa. ROSTA, Dakar, p.39 - 42.

CORMIER M.C. (Ed), (1999) *Rivières du sud. Sociétés et mangroves ouest-africaines*. Editions de l'IRD (ex ORSTOM). Paris, 1999, 416 p.

COULYBALY O. (1994) Incidences de l'aménagement futur de la sebkha de N'drahamcha sur la ville de Nouakchott. *In* (République Islamique de Mauritanie, Ministère de l'intérieur, des Postes et Télécommunications, Direction de l'Aménagement du Territoire et de l'Action Régionale avec le concours de l'UICN et de AFRICA 70, Eds) *Aménagement du littoral mauritanien. Actes de l'Atelier National sur le Littoral Mauritanien. Nouakchott du (samedi) 26 au (mardi) 29 novembre 1994*, Nouakchott, p.93 - 98.

COUREL M.-F. (1998) Nouakchott, un site à risques multiples. *Cahiers URBAMA / Espaces et Sociétés en Mauritanie. Actes du Colloque de Tours. 19 - 20 octobre 1995*. Fascicule de Recherches, p. 47 - 55.

COUTTS B.J. (1989) Mean high water as a cadastral boundary. *Ocean and Shoreline Management*, vol. 12, p. 309 - 330.

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.

CRACKNELL A. P. (1999) Remote sensing techniques in estuaries and coastal zone: an update. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, n°3, p. 485 - 496.

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.

CROWELL M., LEATHERMAN S., BUCKLEY M.K. (1993) Shoreline change rate analysis: long term versus short term data. *Shore and Beach*, vol. 61, n°2, p. 13 - 20.

CROWELL M., HONEYCUTT M., HATHEWAY D. (1999) Coastal erosion hazards study: Phase one Mapping. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 28, p. 10 - 20.

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

CUQ F., DIAW A. T. (1985). Interprétation des données de simulation du satellite SPOT sur l'embouchure du Saloum. *Revue Métropolis*, n°70-71, p. 76 - 78

CUQ F. (1989) Milieux littoraux de la région du banc d'Arguin. *Bulletin Centre de géomorphologique de Caen,* n°36, p. 43 - 46.

CUQ F. (1997) Paysages littoraux et fonctionnement côtier du golfe d'Arguin. *In* (MAINET G, Ed.) *Iles et Littoraux tropicaux. Actes des VIIèmes journées de Géographie tropicale. Brest 11, 12 et 13 novembre*. Ouest Edition - Presses Académiques, p. 237 - 246.

CUQ F., CAMPREDON P. (1997) Analyse spatiale de l'environnement côtier d'Afrique de l'Ouest. *In* (MAINET G, Ed.) *Iles et Littoraux tropicaux. Actes des VIIèmes journées de Géographie tropicale. Brest 11, 12 et 13 novembre*. Ouest Edition - Presses Académiques, p. 232 - 236.

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.

DAVIS R.A., FITZGERALD D.M. (2004) *Beaches and coasts*. Blackwell Publishing, Oxford, 419 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.

DE LANJAMET I. (1988) *La grande plage mauritanienne*. Collection "Connaissance de la Mauritanie". Centre Culturel Français A. de St Exupéry, Nouakchott - Mauritanie, 93 p.

DE LEEUW A.J., VEUGEN L.M.M., VAN STOKKOM H.T.C (1988) Geometric correction of remotely-sensed imagery using ground control points and orthogonal polynomials. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, n°10-11, p. 1751 - 1759.

DE SPENGLER A., CASTELAIN J., CAUVIN J., LEROY M. (1966) Le bassin secondaire - tertiaire du Sénégal. *In* (REYRE D., Ed) *Symposium Bassins sédimentaires du littoral africain*, *vol.1, Littoral atlantique*. Union Internationale des Sciences géologiques / Association des Services Géologiques Africains, New Delhi, p. 80 - 94.

DEHOUCK A. (2006) *Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère)*. Thèse de Doctorat nouveau régime de Géographie, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 262 p.

DELLEPIANE S., De LAURENTIIS R., GIORDANO F. (2004) Coastline extraction from SAR images and a method for the evaluation of the coastline precision. *Pattern Recognition Letters*, vol. 25, n°13, p. 1461 - 1470.

DEMOULIN D. (1967) *Etude de la morphologie littorale de la Petite Côte de Bargny au marigot de la Nougouna (Sénégal). La côte basse de Bargny Guèdj à Yène Tode*. Mémoire Diplôme d'Etudes Supérieures, Université de Dakar, Dakar, 122 p. + Annexes

DENNIS K.C., NIANG-DIOP I., NICHOLLS R.J. (1995) Sea-level rise and Senegal: Potential impacts and consequences. *Journal of Coastal Research,* Special Issue n°14, p. 243 - 261.

DESCOMBES X., MOCTEZUMA M., MAITRE H., RUDANT J.-P. (1996) Coastline detection by a Markovian segmentation on SAR images. *Signal Processing*, vol.55, n°1, p.123 - 132.

DI K., MA R., LI R. (2003a) Geometric processing of Ikonos stereo imagery for coastal mapping applications. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, n°8, p. 873 - 879.

DI K., WANG J., MA R., LI R. (2003b) Automatic shoreline extraction from high-resolution IKONOS satellite imagery. *In* (ASPRS 2003) *Annual Conference Proceedings*. Anchorage, Alaska. 7 p.

DIA B. (1993) La fixation des dunes au 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. 201 - 210.

DIA S.G. (2007) Avancée de la mer à Rufisque. Les populations de Thiawlène réclament un «Plan Jaxaay». Article de presse extrait du quotidien sénégalais *L'Observateur*, n°0854, mardi 03 juillet 2007, p. 6.

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

DIAW A.T. (1980) *Les ensembles littoraux du Sénégal nord occidental (de Kayar à Lompoul). Approche de la géomorphologie par la télédétection et l'analyse sédimentologique*. Thèse de Doctorat de troisième cycle de Géographie Option : Géomorphologie, Université de Paris I - Panthéon Sorbonne, Paris, 168 p.

DIAW A.T. (1981) Etude morpho-sédimentologique de l'estran sur la côte nord du Sénégal. *Bulletin de l'IFAN*, tome 43, série A, n°1-2, p. 69 - 78.

DIAW A.T., MOUGENOT B., THIAM M.D., THOMAS Y.-F. (1987) Apports de l'imagerie SPOT à la connaissance des milieux littoraux du Saloum (Sénégal). *In Actes du colloque SPOT 1: Utilisation des images, bilans, résultats*, *Paris, 23 – 27 novembre 1987*, Ed. Cépadues Toulouse, p. 1131 - 1141.

DIAW A.T. (1989) Images d'une flèche décochée. La flèche littorale de Sangomar. *Notes de Biogéographie*, n°4, p. 5 - 21.

DIAW A.T., DIOP N., THIAM M.D., THOMAS Y.-F. (1991) Remote sensing of spit development: a case study of Sangomar spit, Sénégal. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplement Band n°81, p. 115 - 124.

DIAW A.T., THIAM M. D. (1992). Cartographie par télédétection du site de Joal-Palmarin, Sénégal. *Revue Photo-Interprétation,* n°92/2, vol. 30, p. 89-92 et 80-82

DIAW A.T. (1997) *Evolution des milieux littoraux du Sénégal. Géomorphologie et Télédétection*. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université de Paris I / Panthéon - Sorbonne, Paris, 270 p.

DIAW A.T. (2000) L'état de la géomatique au Sénégal. *Annales de la Faculté des Lettres et Sciences humaines,* n°30, p. 49 - 63.

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.

DIEYE E.B. (2007) *Les ensembles littoraux de la lagune de Joal-Fadiouth et de l'estuaire du Saloum (Sénégal) : Approche méthodologique de la dynamique de la mangrove entre 1972 et 2005 par Télédétection et Systèmes d'Information Géographique (SIG).* Thèse de Doctorat de 3ème Cycle Physique Atomique et Nucléaire, Spécialité : Physique appliquée aux Sciences Biologiques et Médicales, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 247 p. + Annexes.

DILLENBURG S.R., ESTEVES L.S., TOMAZELLI L.J. (2004) A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Science*, vol. 76, n°3, p. 611 - 623.

DIOP E.S. (1975) *Etude géomorphologique de la pointe de Sangomar et des Iles Gandoul (Iles du Saloum-Sénégal)*. Travail d'Etudes et de Recherches - Maîtrise de Géographie, Université de Dakar, 183 p. + Annexes

DIOP E. S. (1979) L'imagerie Landsat et l'étude géomorphologique de milieux estuariens : le littoral sud du Sénégal de l'embouchure du Saloum à celle de la Casamance. *Photo-Interprétation,* n°5, Fascicule 5, p. 45 - 46.

DIOP E.S. (1985) Guinea Bissau and Republic of Guinea. *In* (BIRD E.C.F., SCHWARTZ M.L., Eds) *The world's coastline*. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York., p. 561 - 567.

DIOP E.S. (1986) *Estuaires Holocènes tropicaux. Etude de Géographie physique comparée des "Rivières du Sud" : du Saloum (Sénégal) à la Mellacorée (République de Guinée)*. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université Louis Pasteur I, Strasbourg, 522 p. + Annexes

DIOP E.S. (1990) *La côte ouest africaine du Saloum (Sénégal) à la Méllacorée (République de Guinée)*. Collection Etudes et Thèses. Institut Français de Recherche Scientifique pour le développement en Coopération, Paris, 379 p.

DIOP N. (1993) Les sciences géomatiques dans la gestion des ressources littorales : les techniques de levés hydrographiques. *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. 65 - 76.

DIOUF M.B. (1989) *Sédimentologie, minéralogie et géochimie des grès carbonatés quaternaires du littoral Sénégalo-mauritanien.* Thèse de Doctorat Géologie marine, Université de Perpignan, 237 p.

DIOUF B. (1993) Evolution interannuelle des environnements littoraux au Sénégal : exemple du littoral de la Langue de Barbarie. *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. 113 - 120.

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

DOLAN R., HAYDEN B., HEYWOOD J. (1978b) Analysis of coastal erosion and storm surge hazards. *Coastal Engineering*, vol. 2, p. 41 - 53.

DOLAN R., HAYDEN B., REA C., HEYWOOD J. (1979) Shoreline erosion rates along the middle Atlantic coast of the United States. *Geology*, vol. 7, n°12, p. 602 - 606.

DOLAN R., HAYDEN B.P., MAY P., MAY S. (1980) The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, vol. 48, n°4, p. 22 - 29.

DOLAN R., HAYDEN B. (1983) Patterns and prediction of shoreline change. *In* (KOMAR P.D., Ed.) *CRC Handbook of coastal processes and erosion.* CRC Series in Marine science, CRC Press, Boca Raton, Florida, p. 123 - 149.

DOLAN R., HAYDEN B.P., MAY S. (1983) Erosion of the US shorelines. *In* (KOMAR P.D., Ed.) *CRC Handbook of coastal processes and erosion.* CRC Series in Marine science, CRC Press, Boca Raton, Florida, p. 285 - 299.

DOLAN R., FENSTER M., HOLME S. (1990) Erosion of U.S. shorelines. *Geotimes*, vol. 35, n°6, p. 22 - 24.

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.

DOLAN R., FENSTER M. S., HOLME S.J. (1992) Spatial analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, vol. 8, n°2, p. 263 - 285.

DOMAIN F. (1977) *Carte sédimentologique du plateau continental sénégambien. Extension à une partie du plateau continental de la Mauritanie et de la Guinée Bissau*. Notice explicative n°68, ORSTOM, Paris-Bondy, 17 p. + 3 cartes

DOMAIN F. (1985) *Carte sédimentologique du plateau continental mauritanien. (Entre le Cap Blanc et 17° N)* . Notice explicative n°105, ORSTOM/CNROP/Nouadhibou, Paris-Bondy, 13 p. + 2 cartes

DOMINGEZ L., ANFUSO G., GRACIA F.G. (2005) Vulnerability assessment of a retreating coast in SW Spain. *Environmental Geology*, vol. 47, n°8, p. 1037 - 1044.

DONG P., CHEN H. (1999) A probability method for predicting time-dependent long-term shoreline erosion. *Coastal Engineering*, vol. 36, n°3, p. 243 - 261.

DONG P., CHEN H. (2000) A simple life-cycle method for predicting extreme shoreline erosion. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,* n°4, p. 79 - 89.

DONIOL R. (1957) Mission hydrographique de la côte occidentale d'Afrique (1952-1953). *Annales Hydrographiques.* 4e série, tome septième, année 1956, Service hydrographique de la Marine, Paris, Imprimerie Nationale, p. 15 - 217.

DOUGLAS B.C., CROWELL M., LEATHERMAN S. (1998) Considerations for shoreline position prediction. *Journal of Coastal Research*, vol. 14, n°3, p.1025 - 1033.

DOUGLAS B. C., CROWELL M. (2000) Long-term shoreline position prediction and error propagation. *Journal of Coastal Research*, vol.16, n°1, p. 145 - 152.

DOUGLASS S.L., SANCHEZ T.A., JENKINS S. (1999) Mapping erosion hazards areas in Baldwin County, Alabama and the use of confidence intervals in shoreline change analysis. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 95 - 105.

DUBOIS R.N. (1977) Predicting beach erosion as a function of rising water level. *Journal of Geology*, vol. 85, p. 470 - 476.

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.

EINSELE G., HERM D, SCHWARZ H.U. (1974) Sea level fluctuations during the past 6000 years at the coast of Mauritania. *Quaternary Research*, vol. 4, p. 282 - 289.

EKERCIN S. (2007) Coastline change assessment at the Aegean sea coasts in Turkey using multitemporal Landsat Imagery. *Journal of Coastal Research*, vol. 23, n°3, p. 691 - 698.

EL ABDELLAOUI J.E., OZER A. (2007) Étude diachronique et historique de l'évolution du trait de côte de la baie de Tanger (Maroc). *Télédétection*, vol.7, n°1-2-3-4, p. 157 - 171.

EL ASMAR H., WHITE K. (2002) Change in coastal sediment transport processes due to construction of new Damietta Harbour, Nile Delta, Egypt. *Coastal Engineering,* vol. 46, p. 127 - 138.

EL-ASHRY M.T. (1977) Shoreline features and their changes. *In* (EL-ASHRY M.T., Ed.) *Air photographies and coastal problems. Benchmark papers in Geology,* vol. 38, p. 178 - 183.

EL-RAEY M., NASR S. M., EL-HATTAB M.M., FRIHY O. E. (1995) Change detection of Rosetta promontory over the last forty years. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, n°4, p. 825 - 834.

EL-RAEY M., SHARAF EL-DIN S.H., KHAFAGY A.A., ABO ZED A.I. (1999) Remote sensing of beach erosion / accretion patterns along Damietta-Port Saïd shoreline, Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, n°6, p. 1087 - 1106.

ELIOT I., CLARKE D. (1989.) Temporal and spatial analysis bias in the estimation of shoreline rate change from beach survey information. *Coastal Management*, vol. 17, p. 129 - 156.

ELOUARD P. (1965) Excursion géologique de Bargny à Toubab Dialao. *Notes Africaines,* IFAN, p. 33 - 42.

ELOUARD P. (1966) Quaternaire du bassin du Sénégal. *In* (REYRE D., Ed) *Symposium Bassins sédimentaires du littoral africain*, *vol.1, Littoral atlantique*. Union Internationale des Sciences Géologiques / Association des Services Géologiques africains, New Delhi, 1964, p. 95 - 97.

ELOUARD P., FAURE H. (1967) *Quatemaire de l'Inchiri, du Taffoli et des environs de Nouakchott*. Rapport Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université de Dakar. Rapport n°19, 64 p. + An nexes.

ELOUARD P. (1968) Le Nouakchottien, étage du Quaternaire de Mauritanie. *Annales de la Faculté des Sciences de l'Université de Dakar,* année 1968, tome 22, Série Sciences de la terre, n°2, p. 121 - 138.

ELOUARD P. (1975) Formations sédimentaires de Mauritanie atlantique. *In* RIM / Ministère de la planification et du développement industriel/Direction des mines et de la géologie (Eds) *Notice explicative de la carte géologique à 1 / 1000000 de la Mauritanie. Monographies géologiques régionales. Texte*. Editions du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Paris, p.171 - 233.

ELOUARD P., FAURE H., HEBRARD L. (1977) Variation du niveau de la mer au cours des 15000 dernières années autour de la presqu'il du Cap-Vert (Dakar - Sénégal). *Bulletin Liaison, ASEQUA*, n°50, p. 29 - 49.

ELOUARD P. (1980) Géomorphologie structurale, lithologique et climatique de la Presqu'île du Cap Vert (Sénégal). *Notes Africaines,* IFAN*,* p. 57 - 68.

ETONGUE MAYER R., NIANG-DIOP I. (2001) Inventaire et évolution des formes littorales : cas de la Presqu'île du Cap Vert. *Cahiers géologiques, Université Pierre et Marie Curie*, n°138, p. 1935 - 1950.

EUROPEAN COMMISSION (2004) *Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability. Part II Maps and statistics*. Report Directorate General of Environment, European Commission, Brussels, 25 p.

EVENDEN G. (1991) Notes on a method to transform digitized coordinates to geographic coordinates. *USGS Open-file report,* n°91-17, Woods Hole, 6 p.

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.

FARELL S., LEPP T, SPEER B., MAURIELLO M. (1999) Mapping erosion hazards areas in Ocean County, New Jersey. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 50 - 57.

FARRIS A.S., LIST J.H. (2007) Shoreline change as a Proxy for subaerial beach volume change. *Journal of Coastal Research*, vol. 23, n°3, p. 740 - 748.

FAYE, B.B. (2007) Thiawlène, voyage en Outre-tombe. Article de presse extrait de l'hebdomadaire sénégalais *Weekend Magazine*, n°16, semaine du 8 au 12 juillet 2007, p.16 – 21.

FAYE G. (2003) Les effets de l'érosion et la protection du littoral sur la Petite Côte (Sénégal). *Annales de la Faculté des Lettres et Sciences humaines / Université Cheikh Anta Diop de Dakar*, tome I, Hors série-Février 2003, p. 213 - 231.

FAYE I.B.ND. (2004) *Etude de la position du trait de côte de la Baie d'Audierne entre Penhors et la pointe de La Torche : comparaison des méthodes de la photo-interprétation (photographies aériennes verticales du S.I.G.I.) et des levés topographiques.* Mémoire de D.E.A «Géomorphologie, aménagement et gestion intégrée des littoraux». Université de Bretagne Occidentale / Institut Universitaire Européen de la Mer, 128 p.

FAYE I.B.ND., HENAFF A., HALLEGOUËT B. (2007) Evolution récente de la ligne de ravage en Baie d'Audierne de Penhors à la pointe de la Torche. *Pen ar Bed*, n°199/200, p. 50 - 61

FAYE I.B.ND., HENAFF A., GOURMELON F., DIAW A.T. (2008) Evolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2001 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.

FENSTER M., DOLAN R. (1994) Large-scale reversals in shoreline trends along the U.S. mid-Atlantic coast. *Geology*, vol. 22, n°6, p. 543 - 546.

FENSTER M.S., DOLAN R. (1999) Mapping erosion hazards areas in the city of Virginia Beach. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 58 - 68.

FENSTER M.S., DOLAN R., MORTON R.A. (2001) Coastal storms and shoreline change: signal or noise? *Journal of Coastal Research*, vol. 17, n°3, p. 714 - 720.

FERREIRA O., GARCIA T., MATIAS A., TABORDAC R., DIAS J.A. (2006) An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. *Continental Shelf Research*, vol. 26, p. 1030 - 1044.

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.

FOODY G.M., MUSLIM A.M. ,ATKINSON P.M. (2003) Super-resolution mapping of the shoreline through soft classification analyses. *In* (*IGARSS Proceedings*) *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003.* IEEE International, vol. 6, p. 3429 - 3431.

FOODY G.M., MUSLIM A.M., ATKINSON P.M. (2005) Super-resolution mapping of the waterline from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, n°24, p. 5381 - 5392.

FRAZIER P.S., PAGE K.J. (2000) Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 66, n°12, p. 1461 - 1467.

FRIHY O.E. (1988) Nile delta shoreline changes: aerial photographic study of 28-year period. *Journal of Coastal Research*, vol. 4, n°4, p. 597 - 606.

FRIHY O.E., NASR S. M., EL HATTAB M.M., EL RAEY M. (1994) Remote sensing of beach erosion along the Rosetta promontory, northwestern Nile delta, Egypt. *International Journal of Remote Sensing*, vol.15, n°8, p. 1649 - 1660.

FRIHY O.E., DEWIDAR K.M., NASR S.M., EL RAEY M.M. (1998) Change detection of the northeastern Nile delta of Egypt: shoreline change, spit evolution, margin change of Manzala lagoon and its islands. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n°10, p. 1901 - 1912.

FROIDEFOND J.-M. (1989) Analyses cartographiques appliquées à l'étude des domaines côtiers. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine / Bordeaux,* n°45, p. 229 - 238.

FROIDEFOND J.-M. (1989) Introduction à la géomorphologie côtière. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine / Bordeaux,* n°45, p. 13 - 22.

GAC J.-Y., KANE A., MONTEILLET J. (1982) Migration de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, vol. 12, n°1, p. 73 - 75.

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.

GALGANO F.A., DOUGLAS B.C. (2000) Shoreline position prediction: method and errors. *Environmental Geosciences*, vol. 7, n°1, p. 23 - 31.

GALVIN C. (2000) Comment on "Sea level rise shown to drive coastal erosion". *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 81, n°38, p. 437 et 440.

GAYET J. (1989) Les milieux deltaïques : morphologie et sédimentation. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine,* n°45, p. 45 - 61.

GENZ A.S., FLETCHER C.H., DUNN R.A., FRAZER L.N., ROONEY J.J. (2007) The predictive accuracy of shoreline rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, vol. 23, n°1, p. 87 - 105.

GILL S.K., SCHULTZ J.R. (Eds) (2001) *Tidal datums and their applications*. NOAA Special publication NOS CO-OPS, Silver Spring, Maryland, 112 p. + Annexes.

GIORDANO F., DELLEPIANE S., De LAURENTIIS R. (2003) Coastline extraction in remotely sensed images. *In* (CoastGIS'03) *Fifth International Symposium on GIS and Computer Cartography for coastal zone management*, *Palazzo Ducale, 16, 17, 18 October 2003.* Genova, Italy, 7 p.

GIRARD M.-C., GIRARD C. (1999) *Traitement des données de télédétection*. DUNOD, Paris, 529 p.

GIRESSE P. (1983) Recherches 1979-1980 sur les lignes de rivage d'Afrique. *Bulletin de Liaison-ASEQUA,* n°58-59, p. 9 - 22.

GIRESSE P., BARUSSEAU J.P. (1986) La succession des lignes de rivage quaternaires du continent africain - Evolution jusqu'aux environnements margino-littoraux actuels. *In* (INQA, Ed.) *Symposium "Changements globaux en Afrique"*, Dakar, p. 165 - 168.

GIRESSE P., BARUSSEAU J.P., CAUSSE C., DIOUF B. (2000) Successions of sea-level changes during the Pleistocene in Mauritania and Senegal distinguished by sedimentary facies study and U/Th dating. *Marine Geology*, vol. 170, n°1-2, p. 123 - 139.

GOPINATH G., SERALATHAN P. (2005) Rapid erosion of the coast of Sagar island, West Bengal-India. *Environmental Geology*, vol. 48, n°8, p. 1058 - 1067.

GORMAN L., MORANG A., LARSON R. (1998) Monitoring the coastal environment, part IV: mapping shoreline changes and bathymetric analysis. *Journal of Coastal Research*, vol. 14, n°1, p. 61 - 92.

GRAHAM D., SAULT M., BAILEY J. (2003) National Ocean Service Shoreline: past, present and future. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 14 - 32.

GRENIER A., DUBOIS J.M.M. (1990) Evolution littorale récente par télédétection : synthèse méthodologique. *Photo*-Interprétation, n°6, p. 3 - 16.

GRESARC (2006) *Cartographie des risques littoraux de Nouakchott*. Rapport Université de Caen-Unité de morphodynamique continentale et côtière, 22 p. + Annexes

GUARIGLIA A., BUONAMASSA A., LOSURDO A., SALADINO R., TRIVIGNO M. L., ZACCAGNINO A., COLANGELO A. (2006) A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes. *Annals of Geophysics*, vol. 41, n°1, p. 295 - 304.

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.

GUILCHER A. (1951) Essai de terminologie française des plages marines et autres accumulations littorales. *Revue de Géomorphologie dynamique*, p. 32 - 35.

GUILCHER A. (1954a) Chroniques océanographiques. *Norois,* n°1, p. 88 - 92.

GUILCHER A. (1954b) Présence de crêtes et de sillons obliques sur la plage de la langue de Barbarie. *Extrait du C.R.S. de la Société géologique de France, séance du 24 mai 1954,* n°10, p. 101 - 102.

GUILCHER A. (1954c) Dynamique et morphologie des côtes sableuses de l'Afrique atlantique. *Cahiers de l'information géographique*, n°1, p. 57 - 68.

GUILCHER A., NICOLAS J.P. (1954) Observations sur la langue de Barbarie et les environs du Sénégal aux environs de Saint-Louis. *Bulletin d'information du comité central d'océanographie et d'étude des côtes*, vol. VI, n°1, p. 227 - 242.

GUILCHER A. (1985) Senegal and Gambia. *In* (BIRD E.C.F., SCHWARTZ M.L., Eds) *The world's coastline*. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, p. 555 - 560.

GUILLEN J., STIVE M.J.F., CAPOBIANCO M. (1999) Shoreline evolution of the Holland coast on a decadal scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 24, n°6, p. 517 - 536.

GUY D.E. (1999) Erosion hazard area mapping, Lake County, Ohio. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p.185 - 196.

HANSON H. (1989) GENESIS - A generalized shoreline change numerical model. *Journal of Coastal Research*, vol. 5, n°1, p. 1 - 27.

HAPKE C., RICHMOND B. (2000) Monitoring beach morphology changes using small-format aerial photography and digital softcopy photogrammetry. *Environmental Geosciences*, vol. 7, n°1, p. 32 - 37.

HAPKE C.J., REID D., RICHMOND B.M., RUGGIERO P., LIST J. (2006) *National Assessment of shoreline change Part 3: Historical shoreline change and associated coastal land loss along sandy shorelines of the California coast.* U.S. Geological Survey, Open-file Report 2006-1219, 72 p.

HAPKE C.J., REID D. (2007) *National assessment of shoreline change, Part 4: historical coastal cliff retreat along the California coast.* U.S. Geological Survey, Open-file Report 2007-1133, 51 p.

HAUHOUOT C., ROBIN M., MIOSSEC A. (1997) Etude cinématique du littoral de Grand Lahou (Côte d'Ivoire) à l'aide d'un SIG. *In* (MAINET G., Ed.) *Iles et Littoraux tropicaux. Actes des VIIèmes journées de Géographie tropicale. Brest 11, 12 et 13 novembre*. Ouest Edition - Presses Académiques, p. 269 - 275.

HAYDEN B.P., DOLAN R., CARY R.C., FELDER W.N. (1979a) Erosion rates: how representative are they? *Shore and Beach*, vol. 47, n°2, p. 25 - 30.

HAYDEN B.P., DOLAN R., FELDER W.N. (1979b) Spatial and temporal analyses of shoreline variations. *Coastal Engineering*, vol. 2, p. 351 - 361.

HEALY T. (1991) Coastal erosion and sea level rise. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplement Band, n°81, p. 15 - 29.

HEBRARD L. (1973) *Contribution à l'étude géologique du Quaternaire du littoral mauritanien entre Nouakchott et Nouadhibou. Participation à l'étude des désertifications du Sahara*, Thèse de Doctorat de Géologie, Université de Lyon / Rapport Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de l'université de Dakar, 483 p. + Annexes.

HEIJBOER D. (2000) Saving the coastline of Gambia. *Dredging and Port Construction,* november 2000, p. 20 - 21.

HESS K.W. (2003) Tidal datums and tide coordination. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 33 - 43.

HOEKE R.K., ZARILLO G. A., SYNDER M. (2001) A GIS based tool for extracting shoreline positions from aerial imagery (BeachTools). *Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note CHETN-IV-37,* U.S. Army Engineer Research and Development Center, 12 p.

HONEYCUTT M. G., CROWELL M., DOUGLASS B.C. (2001) Shoreline position forecasting: Impact of storms, Rate calculation methodologies, and temporal scales. *Journal of Coastal Research*, vol. 17, n°3, p. 721 - 730.

HORIKAWA K. (Ed.), (1988) *Nearshore dynamics and coastal processes. Theory, measurement and predictive model*. University of Tokyo Press, 522 p.

IBE A.C., ANTIA E.E. (1983) *Preliminary assessment of the impact of erosion along the Nigerian coastline*. Rapport Nigerian Institute for oceanography and marine research, Lagos, 17 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.

IFEN (2006) Un quart du littoral recule du fait de l'érosion. *Le 4 pages de l'IFEN,* n°13, 4 p.

INMAN D.L., NORDSTROM C.E. (1971) On the tectonic and morphologic classification of coasts. *The journal of Geology*, vol. 79, n°1, p. 1 - 21.

JALLOW B.P., BARROW M.K.A., LEATHERMAN S.P. (1996) Vulnerability of the coastal zone of the Gambia to sea level rise and development of response strategies and adaptation options. *Climate Research*, vol. 6, p. 165 - 177.

JALLOW B.P., TOURE S., BARROW M., MATHIEU A.A. (1999) Coastal zone of the Gambia and the Abidjan region in Côte d'Ivoire: sea level rise vulnerability, response strategies, and adaptation options. *Climate Research*, vol. 12, p. 129 - 136.

JANARDANAN K., SUNDAR V. (1997) Effect of uncertainties in wave characteristics on shoreline evolution. *Journal of Coastal Research*, vol. 13, n°1, p. 88 - 95.

JIMENEZ J.A., SANCHEZ-ARCILLA A., BOU J., ORTIZ M. A. (1997) Analysing short-term shoreline changes along the Ebro delta (Spain) using aerial photographs. *Journal of Coastal Research*, vol. 13, n°4, p. 1256 - 1266.

JOIRE J. (1947) Amas de coquillage du littoral sénégalais dans la banlieue de Saint-Louis. *Bulletin de l'Institut Français d'Afrique noire*, Tome 9, n°1-4, p. 170 - 340.

KAMINSKY G.M., DANIELS R. C., HUXFORD R., McCANDLESS D., RUGGIERO P. (1999) Mapping erosion hazard areas in Pacific county, Washington. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 158 - 170.

KANE A. (1997) *L'après-barrage dans la vallée du fleuve Sénégal : Modifications hydrologiques, morphologiques, géochimiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu naturel et les aménagements hydro-agricoles.* Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 551 p.

KANE A.F. (1993) Evolution historique et découpage du littoral sénégalais. *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. 23-27.

KARANTZALOS K.G., ARGIALAS D., GEORGOPOULOS A. (2002) Towards automatic detection of coastlines from satellite imagery. *14th International Conference on Digital Signal Processing*, vol. 2, n°2002, p. 897 - 900.

KERGOMARD C. (2000) Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. *Cybergeo: European Journal of Géographie. Dossiers, Actes des journées de Télédétection en Sciences Humaines, document 181, document électronique,* http://www.cybergeo.eu/index1679.html, 17 p., consulté le 04-08- 2008.

KLINGEBIEL A. (1989) Les environnements côtiers tropicaux (exposé introductif). *Bulletin de Géologie du Bassin* d'Aquitaine, n°45, p. 7 - 11.

KNIGHT M., THOMAS D.S.G., WIGGS G.F.S. (2004) Challenges of calculating dunefield mobility over the 21st century. *Geomorphology*, n°59, p. 197 - 213.

KOMAR P.D. (1983) Computer modeling of shoreline changes. *In* (KOMAR P.D., Ed.) *CRC Handbook of coastal processes and erosion.* CRC Series in Marine science, CRC Press, Boca Raton, Florida, p. 205 - 216.

KOMAR P.D. (1983) Beach processes and erosion – An introduction. *In* (KOMAR P.D., Ed.) *CRC Handbook of coastal processes and erosion.* CRC Series in Marine science, CRC Press, Boca Raton, Florida, p. 1 - 20.

KRAUS N.C., ROSATI J.D. (1997) Interpretation of shoreline – Position data for coastal engineering analysis. *Coastal Engineering Technical Note*, CETN II - 39 (12 / 97), 15 p.

LAFON V., FROIDEFOND J.-M., CASTAING P. (2000) Méthode d'analyse de l'évolution morphodynamique d'une embouchure tidale par imagerie satellite. Exemple du bassin d'Arcachon (France). *Comptes Rendus Académie des Sciences Paris. Série IIa, Sciences de la Terre et des planètes*, vol.331, n°5, p.373 - 378.

LAFON V., DUPUIS, H., HOWA H., FROIDEFOND J.-M. (2002) Mesure du déplacement des barres et baïnes parallèlement au trait de côte à l'aide de l'imagerie spatiale Spot. *Oceanologica Acta*, vol. 25, n°3-4, p.149 - 158.

LANCASTER N., KOCUREK G., SINGHVI A., PANDEY V., DEYNOUX M., GHIENNE J.-F., LÔ K. (2002) Late Pleistocene and Holocene dune activity and wind regimes in the Western Sahara desert of Mauritania. *Geology*, vol. 30, n°11, p. 991 - 994.

LANGLEY S.K., ALEXANDER C.R., BUSH D.M., JACKSON C.W. (2003). Modernizing shoreline change analysis in Georgia using topographic survey sheets in a GIS environment. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 168 - 177.

LARSON M., KRAUS N.C., WISE R. (1999) Equilibrium beach profiles under breaking and non-breaking waves. *Coastal Engineering*, n°36, p. 59 - 85.

LE BERRE I., HENAFF A., DEVOGELE T., MASCRET A., WENZEL F. (2005) SPOT 5 : un outil pertinent pour le suivi du trait de côte? *Norois*, n°2005 / 3, p. 23 - 35.

LE FUR A. (1954) Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique (11 mai 1950-18 mai 1952). *Annales Hydrographiques.* 4e série, tome quatrième, année 1953, Service hydrographique de la Marine, Paris, p. 117 - 192.

LEATHERMAN S.P. (1983) Shoreline mapping: a comparison of techniques. *Shore and Beach*, vol. 51, n°3, p. 28 - 33.

LEATHERMAN S.P. (1997a) Beach rating. A methodological approach. *Journal of coastal research*, vol. 13, n°1, p. 253 - 258.

LEATHERMAN S.P. (1997b) Beach erosion trends and shoreline forecasting. *Journal of Coastal Research*, vol. 13, n°4, p.iii - iv.

LEATHERMAN S. (2003) Shoreline change mapping and management along the US East Coast. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 5 - 13.

LEATHERMAN S.P., ANDERS F.J. (1999) Mapping and managing coastal erosion hazards in New York. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 34 - 42.

LEATHERMAN S.P., ESKANDARY L.S. (1999) Evaluation of coastal erosion hazards along Delaware's Atlantic Coast. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 43 - 49.

LEATHERMAN S.P., ZHANG K., DOUGLAS B.C. (2000a) Sea level rise shown to drive coastal erosion. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 81, n°6, p. 55 - 67.

LEATHERMAN S.P., ZHANG K., DOUGLAS B.C. (2000b) Reply to Comment on "Sea level rise shown to drive coastal erosion". *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 81, n°38, p. 437, 439 et 441.

LEATHERMAN S.P., DOUGLAS B.C., LABRECQUE J.L. (2003) Sea level and coastal erosion require large-scale monitoring. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, vol.84, n°2, p. 13 et 16.

LEBAIL J. (1911) Mission hydrographique de l'Afrique occidentale 1909 – 1910. Rapport sur les travaux exécutés par la mission. *Annales Hydrographiques.* 2e série, tome 31, année 1911, Service Hydrographique de la Marine, Paris, Imprimerie Nationale, p.143 - 198.

LEE J-S. , JURKEVICH I. (1990) Coastline detection and tracing in SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, n°4, p. 662 - 668.

LEVOY F., FLAGEOLLET J.C. (1986) Les risques d'érosion et de submersion en milieux littoraux sableux. Approche méthodologique appliquée à la côte ouest du Cotentin. *Revue de Géomorphologie* dynamique, vol. XXXV, n°2, p. 63 - 73.

LI R., KEONG C.W., RAMCHARAN E., KJERFVE B., WILLIS D. (1998) A coastal GIS for shoreline monitoring and management - Case study in Malaysia. *Surveying and land information systems*, vol. 58, n°3, p. 157 - 166.

LI R., DI K., MA R. (2001a) A comparative study of shoreline mapping techniques. *In The 4th International symposium on computer mapping and GIS for coastal zone management*, Halifax, Nova Scotia, Canada, non paginé.

LI R., LIU J.-K. , FELUS Y. (2001b) Spatial modeling and analysis for shoreline change detection and coastal erosion monitoring. *Marine Geodesy*, vol. 24, n°1, p. 1 - 12.

LI R., MA R., DI K. (2002) Digital tide-coordinated shoreline. *Marine Geodesy*, n°25, p. 27 - 36.

LI R., DI K., MA R. (2003) 3-D shoreline extraction from IKONOS satellite imagery. *Marine Geodesy*, n°26, p. 107 - 115.

LIST J.H., FARRIS A.S., SULLIVAN C. (2006) Reversing storm hotspots on sandy beaches: spatial and temporal characteristics. *Marine Geology*, vol. 226, n°3-4, p. 261 - 279.

LIU H., JEZEK K.C. (2004a) Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating canny edge detection and locally adaptive thresholding methods. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n°5, p. 937 - 958.

LIU H., JEZEK K.C. (2004b) A complete high-resolution coastline of Antarctica extracted from orthorectified Radarsat SAR imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 70, n°5, p. 605 - 616.

LIU H., SHERMAN D., GU G. (2007) Automated extraction of shorelines from airborne light detection and ranging data and accuracy assessment based on Monte Carlo simulation. *Journal of Coastal Research*, vol. 23, n°6, p. 1359 - 1369.

LO S.F. (1996) 65 millions pour le transfert de Djiffère. Article de presse extrait du quotidien sénégalais *Le Soleil*, n°7969, mardi et mercredi 25 décembre 1996.

LOOS E.A., NIEMANN K.O. (2002) Shoreline feature extraction from remotely-sensed imagery. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002*. IGARSS 2002 IEEE International, vol. 6, n°2002, p. 3417 - 3419.

LY C.K. (1980) The role of the Akossombo dam on the Volta river in causing coastal erosion in central and eastern Ghana (West africa). *Marine Geology*, vol. 37, p. 323 - 332.

MAGUE S. T., FOSTER R.W. (2007) Where's the shoreline? Sources of historical high water lines developed in the context of Massachusetts coastal regulations. *In* (6th FIG Regional Conference) *Coastal Areas and Land Administration – Building the Capacity*, *San Jose, Costa Rica 12-15 November 2007*, 18 p.

MAILLY D., NDIAYE P., HANK A. M., PINEAU M. (1994) Fixation des dunes et reboisement avec le filao (*Casuarina equisetifolia*) dans la zone du littoral nord du Sénégal. *Forestry Chronicle*, vol. 70, n°3, p. 282 - 290.

MAKOTA V., SALLEMA R., MAHIKA C. (2004) Monitoring shoreline change using remote sensing and GIS: A case study of Kunduchi area, Tanzania. *Western Indian Ocean Journal Marine Science*, vol. 3, n°1, p. 1 - 10.

MALTHUS T.J., MUMBY P.J. (2003) Remote sensing of the coastal zone: an overview and priorities for future research. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, n°13, p. 2805 - 2815.

MANNEVY P. (1953) Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique (5 janvier 1949 - 12 mai 1950. *Annales Hydrographique.* 4e Série, tome troisième, année 1952, Service hydrographique de la Marine, Paris, p. 9 - 53.

MANNEVY P. (1959) Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique (6 janvier 1955 - 13 janvier 1956). *Annales Hydrographique.* 4e série, tome neuvième, année 1958, Service hydrographique de la Marine, Paris, p. 43 - 112.

MARICO D. (1996) *Contribution à l'étude géomorphologique des côtes mauritaniennes : du Cap Timiris à Ndiago*. Thèse de Doctorat de Troisième cycle (Diplôme de Recherches Approfondies : DRA) - Option Géographie physique, Université des Lettres, des Arts et des Sciences Humaines - Tunis I, Tunis, 227 p.

MARICO D., PENNOBER G., CREUSEVEAU J.G., THIAM A., OULD EL MOUSTAPHA SENHOURY A., LEVOY F. (2006) Préservation des défenses naturelles du littoral mauritanien : démarche de l'Observatoire du littoral autour du suivi du cordon dunaire. *In* (UMR 6554 LETG) *Actes du colloque Interactions Nature-Société, Analyse et modèles*, La Baule, France, 7 p.

MARINE IMPERIALE (1869) *Dispositions générales. Signes conventionnels et abréviations adoptés au dépôt des cartes et plans de la Marine pour les cartes et plans de la hydrographiques.* Imprimerie Adolphe LAINE, Paris, non paginé.

MASON D.C., DAVENPORT I.J. (1996) Accurate and efficient determination of the shoreline in ERS-1 SAR Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, n°5, p. 1243 - 1253.

MASSE J.-P. (1968) *Contribution à l'étude des sédiments actuels du plateau continental de la région de Dakar (République du Sénégal). Essai d'analyse de la sédimentation biogène*. Rapport n° 23, Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de l'université de Dakar, 84 p.

MCBETH F.H (1956) A method of shoreline delineation. *Photogrammetric engineering*, vol. 22, p. 400 - 405.

MCBRIDE R.A., BYRNES M.R., HILAND M.W. (1995) Geomorphic response-type model for barrier coastlines: a regional perspective. *Marine Geology*, vol. 126, n°1-4, p. 143 - 159.

MCCURDY P.G. (1950) Coastal delineation from aerial photographs. *Photogrammetric Engineering*, vol. 16, p. 550 - 555.

MCGLASHAN D.J., DUCK R.W., REID C.T. (2005) Defining the foreshore: coastal geomorphology and british law. *Estuarine coastal and shelf science*, vol. 62, n°1-2, p. 183 - 192.

MENANTEAU L., THOMAS Y.-F. (1999) L'estuaire du Saloum et la flèche de Sangomar (Sénégal). *Atlas Permanent du Littoral,* n°4, p.12.

MICHEL P. (1960) *Recherches géomorphologiques en Casamance et en Gambie méridionale*. Rapport BRGM / République du Sénégal, Dakar 1960, 64 p. + 14 cartes dépliantes.

MICHEL P. (1973) *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique*. Mémoires ORSTOM n°63, Paris, 810 p.

MICHEL P., ELOUARD P., FAURE H. (1968) Nouvelles recherches sur le Quaternaire récent de la région de Saint-Louis (Sénégal). Bulletin de l'IFAN, Série A, Sciences Naturelles, tome XXX, n°1, p.1-38

MILLER J.K., DEAN R.G. (2004) A simple new shoreline change model. *Coastal Engineering*, vol. 51, n°7, p. 531 - 556.

MILLER J.K., DEAN R.G. (2007) Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part I temporal and spatial characteristics. *Coastal Engineering*, vol. 54, n°2, p. 111 - 131.

MILLS J.P., BUCKLEY S.J., MITCHELL H.L., CLARKE P.J., EDWARDS S.J. (2005) A geomatics data integration technique for coastal change monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 30, p. 651 - 664.

MIOSSEC A. (1994) La défense des côtes en France, d'abord un problème de société. *In Défense des côtes ou protection de l'espace littoral, quelles perspectives? Actes du colloque international de Nantes, 17 - 20 oct. 1991*. Numéro spécial Cahiers Nantais n°41-42, Nantes, p. 341 - 348.

MIOSSEC A. (1998) Erosion marine, les réponses. *Mappemonde*, vol. 52, n°4, p. 1 - 6.

MITASOVA H., OVERTON M., HARMON R.S. (2005) Geospatial analysis of a coastal sand dune field evolution: Jockey's Ridge, North Carolina. *Geomorphology*, n°72, p. 204 - 221.

MONTEILLET J. (1986) *Environnements sédimentaires et paléoécologie du delta du Sénégal au Quaternaire. Evolution d'un écosystème fluvio-marin tropical au cours des derniers 100 000 ans*. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Perpignan, Perpignan, 267 p. + Annexes.

MOORE L. J., BENUMOF B.J., GRIGGS G.B. (1999) Coastal erosion hazards in Santa Cruz and San Diego. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 121 - 130.

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.

MOORE L. J., RUGGIERO P., LIST J.H. (2006) Comparing Mean High Water and High Water Line Shorelines: Should proxy-datum offsets be incorporated into shoreline change analysis? *Journal of Coastal Research*, vol. 22, n°4, p. 894 - 905.

MORANG A., LARSON R., GORMAN L. (1997) Monitoring the coastal environment. Part I: Waves and currents. *Journal of coastal research*, vol. 13, n°1, p. 111 - 133.

MORIN S. (1973) Le plateau de Bargny (Sénégal occidental) et son évolution au quaternaire récent. *Bulletin de l'IFAN, Série A Sciences Naturelles*, tome 35, n°4, p. 764 - 811.

MORTON R.A., PAINE J.G. (1985) Beach and vegetation-line changes at Galveston Island, Texas: Erosion, deposition, and recovery from Hurricane Alicia. *Geological circular*, vol. 85-5, p.39.

MORTON R.A., LEACH M.P., PAINE J.G., CARDOZA M.A. (1993) Monitoring beach changes using GPS surveying techniques. *Journal of Coastal Research*, vol. 9, n°3, p. 702 - 720.

MORTON R.A., SPEED M.F. (1998) Evaluation of shorelines and legal boundaries controlled by water levels on sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, vol. 14, n°4, p. 1373 - 1384.

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.

MORTON R.A., MILLER T.L., MOORE L. J. (2004) *National assessment of shoreline change: Part 1. Historical shoreline changes and associated land loss along the U.S. Gulf of Mexico.* U.S. Geological Survey, Open-file report 2004-1043, 42 p.

MORTON R.A., MILLER T., MOORE L.J. (2005) Historical shoreline changes along the US gulf of Mexico: A summary of recent shoreline comparisons and analyses. *Journal of Coastal Research*, vol. 21, n°4, p. 704 - 709.

MORTON R.A., MILLER T.L. (2005) *National assessment of shoreline change: Part 2. Historical shoreline changes and associated coastal land loss along the U.S. Southeast Atlantic Coast*. U.S. Geological Survey Open-file Report 2005-1401, 35 p.

MUSLIM A.M., FOODY G.M., ATKINSON P.M. (2006) Localized soft classification for super resolution mapping of the shoreline. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n°11, p. 2271 - 2285.

MUSLIM A.M., FOODY G.M., ATKINSON P.M. (2007) Shoreline mapping from coarse-spatial resolution remote sensing imagery of Seberang Takir, Malaysia. *Journal of Coastal Research*, vol. 23, n°6, p. 1399 - 1408.

NATESAN U., SUBRAMANIAN S.P. (1994) Identification of Erosion-Accretion regimes along the Tamilnadu coast, India. *Journal of Coastal Research*, vol. 10, n°1, p. 203 - 205.

NDIAYE A. (1975) *Le Gandiolais, l'estuaire du Sénégal, la Langue de Barbarie. Etude géomorphologique*. Université de Dakar, Dakar, 88 p. + Annexes

NDIAYE P. (1993) Propositions d'aménagements des plantations de filao de la Grande Côte (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. 211 - 222.

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, 214 p.

NIANG-DIOP I. (1993) Conséquences de l'élévation du niveau marin sur les côtes sénégalaises. *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. 133 - 138.

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.

NICHOLS S., MCLAUGHLIN J. (1984) Tide mark or tidal datum: the need for an interdisciplinary approach to tidal boundary delimitation. *The Canadian Surveyor*, vol. 38, n°3, p. 193 - 208.

NIEDERMEIER A., ROMANEEßEN E., LEHNER S. (2000) Detection of Coastlines in SAR Images using Wavelet Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, n°5, p. 2270 - 2281.

NIEDERMEIER A., HOJA D., LEHNER S. (2005) Topography and morphodynamics in the German Bight using SAR and optical remote sensing data. *Ocean Dynamics*, vol. 55, n°2, p. 100 - 109.

NAHOSSIO G. (2002) *Utilisation des données de télédétection et études géomorphologiques de la position charnière du secteur littoral de Joal-Fadiouth, Sénégal : Fonctionnement, unités paysagères et évolutions.* Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université Paris VII, 207 p.

NORCROSS Z.M., FLETCHER C.H., MERRIFIELD M. (2002) Annual and interannual changes on a reef-fringed pocket beach: Kailua Bay, Hawaii. *Marine Geology*, vol. 190, n°3-4, p. 553 - 580.

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

O'CONNEL J.F., LEATHERMAN S.P. (1999) Coastal erosion hazards and mapping along the Massachusetts shore. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 27 - 33.

O'CONNEL J.F. (2003) The art and science of mapping and interpreting shoreline change data: the Massachusetts experience. *In Proceedings of the 13th Biennial Coastal Zone Conference*, *Baltimore, MD July 13–17, 2003*, 6 p.

OJEDA ZUJAR J., BORGNIET L., PEREZ ROMERO A.M., LODER J.F. (2002) Monitoring morphological changes along the coast of Huelva (SW Spain) using soft-copy photogrammetry and GIS. *Journal of coastal conservation,* vol. 8, n°1, p. 69 - 76.

ONANA V.P., MVOGO NGONO J., TREBOSSEN H., RUDANT J.P., TONYE E. (2001) Coastline detection in SAR images using texture analysis in textural or geometrical multi-resolution. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001.* IGARSS. IEEE 2001 International, vol. 3, n°2001, p. 1549 - 1551.

OULD EL GHASSEM D. (1987) *Le littoral mauritanien au sud de Nouakchott. Evolution morphologique au voisinage du Port de l'Amitié*. Mémoire de fin d'études, Ecole Normale Supérieure de Nouakchott, Nouakchott, 51 p.

OULD EL MOUSTAPHA A., LEVOY F., MONFORT O., KOUTITONSKY V.G. (2007) A numerical forecast of shoreline evolution after harbour construction in Nouakchott, Mauritania. *Journal of Coastal Research*, vol. 23, n°6, p. 1409 - 1417.

OULD EL MOUSTAPHA SENHOURY A. (2000) *Influence d'un ouvrage portuaire sur l'équilibre d'un littoral soumis à un fort transit sédimentaire. L'exemple du port de Nouakchott (Mauritanie)*. Thèse de Doctorat d'Université, spécialité Terre solide et enveloppe superficielle, Université de Caen / Basse Normandie, Caen, 162 p.

OULD EL MOUSTAPHA SENHOURY A. (2005) *Rapport portant sur les données hydrodynamiques et climatiques aux environs de Nouakchott (Mauritanie)*. Rapport Royal Haskoning Rotterdam, Nouakchott, 25 p.

OULD EL MOUSTAPHA SENHOURY A., CISSOKO B., OULD EL BAH M., OULD ABIDINE OULD MAYIF M., FAVENNEC J., LE RHUN J., BENEDITTINI H. (2005) *Rapport sur les risques d'inondation de la zone littorale de Nouakchott*. Rapport Ministère des pêches et de l'économie maritime / Ambassade de France, UICN, Nouakchott, 30 p.

OULD EL MOUSTAPHA SENHOURY A., LEVOY F. (2006) Impact des aménagements sur les côtes sableuses : l'exemple du port de Nouakchott (Mauritanie). *In* (SYMOENS J.-J., Ed.) *Les écosystèmes côtiers de l'Afrique de l'ouest*. SBWOA / PRCM, Bruxelles, p. 147 - 157.

OULD ELEYA A.B. (1994) Le port et les modifications du profil du rivage. *In* (République Islamique de Mauritanie, Ministère de l'intérieur, des Postes et Télécommunications, Direction de l'Aménagement du Territoire et de l'Action Régionale avec le concours de l'UICN et de AFRICA 70, Eds) *Aménagement du littoral mauritanien. Actes de l'Atelier National sur le Littoral Mauritanien. Nouakchott du (samedi) 26 au (mardi) 29 novembre 1994*, Nouakchott, p. 99 - 103.

OVERTON M.F., GRENIER R.R. Jr, JUDGE E.K., FISHER J.S. (1999) Identification and analysis of coastal erosion hazards areas: Dare and Brunswick, North Carolina. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°28, p. 69 - 84.

PAINE J.G., MORTON R.A. (1989) Shoreline and vegetation-line movement, Texas Gulf coast, 1974 to 1982. *Geological circular*, vol. 89-1, 50 p.

PAJAK M.J., LEATHERMAN S. (2002) The high water line as shoreline indicator. *Journal of Coastal Research*, vol. 18, n°2, p. 329 - 337.

PANDIAN P.K., RAMESH S., MURTHY M.V.R., RAMACHANDRAN S., THAYUMANAVAN S. (2004) Shoreline changes and near shore processes along Ennore Coast, East Coast of South India. *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n°3, p. 828 - 845.

PARKER B. (2001) Where is the shoreline? The answer is not as simple as one might expect. *Hydro international*, vol. 5, n°5, p. 6 - 9.

PARKER B. (2003) The difficulties in measuring a consistently defined shoreline – The problem of vertical referencing. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 44 - 56.

PASKOFF R. (1981) *L'érosion des côtes*. Collection Que sais-je ? Éditions P.U.F., Paris, 127 p.

PASKOFF R., KELLETAT D. (1991) Introduction: Review of coastal problems. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplement Band, n°81, p. 1 - 13.

PASKOFF R. (1994) La cartographie prospective du trait de côte : un instrument indispensable pour l'aménagement des espaces littoraux. *In* (MIOSSEC A., Ed.) *Défense des côtes ou protection de l'espace littoral, quelles perspectives? Actes du colloque international de Nantes, 17 - 20 oct. 1991*. Nantes, numéro spécial Cahiers Nantais n°41 - 42, p. 291 - 297.

PASKOFF R. (1998) La crise des plages : pénurie de sédiments. *Mappemonde*, vol. 52, n°4, p. 11 - 15.

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. (2004a) Les littoraux sableux et dunaires : de l'abondance à la pénurie en sédiments. *Bulletin de l'Association des Géographes Français / Géographies,* p. 373 - 382.

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

PASKOFF R. (2005) *Les plages vont-elles disparaitre?* Les Pommiers. Collection Les petites pommes du savoir. Paris, 57 p.

PELUCHON P. (1961) Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique (janvier 1956 – juin 1957). *Annales Hydrographiques.* 2e série, tome dixième, années 1959-1960, Service hydrographique de la Marine, Paris, Imprimerie Nationale, p.49 - 126.

PENLAND S., BOYD R. (1981) Shoreline changes on the Louisiana barrier coast. *Oceans '81 IEEE Proceedings*, vol.13, p. 209 - 219.

PENNOBER G. (1999) *Analyse spatiale de l'environnement côtier de l'Archipel des Bijagos (Guinée-Bissau)*. Thèse de Doctorat de Géographie Physique, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 193 p. + Annexes

PENNOBER G. (2003) Dynamique littorale d'un delta estuarien : les Bijagos (Guinée Bissau). *Cahiers Nantais*, n°59, p. 139 - 148.

PENNOBER G., GEORIS-CREUSEVEAU J. (2005) La démarche SIG de planification côtière en Mauritanie. *In* (GOURMELON F., ROBIN M., Eds) *SIG et littoral*. Lavoisier, Paris, p. 109 - 126.

PHILIPPON S. (1999) *La côte de Nouakchott (Mauritanie) : une évolution naturelle et anthropique*. Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université Paris 1 / Panthéon - Sorbonne, Paris, 165 p.

PHILIPS M.R., JONES A.L. (2006) Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone: Problems, consequences and management. *Tourism Management*, vol. 27, n°3, p. 517 - 524.

PHILLIPS J.D. (1986) Spatial Analysis of shoreline erosion, Delaware Bay, New Jersey. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 76, n°1, p. 50 - 62.

PILKEY O.H., YOUNG R.S., RIGGS S.R., SMITH A.W.S., WU H., PILKEY W.D. (1993) The concept of shoreface profile of equilibrium: A critical review. *Journal of coastal research*, vol. 9, n°1, p. 255 - 278.

PILKEY O.H., YOUNG R. S., BUSH D.M. (2000) Comment on "Sea level rise shown to drive coastal erosion". *Eos, Transactions, American Geophysical Union,* vol. 81, n°38, p. 436.

PILKEY O.H. (2004) Society and sea level rise. *Science*, vol. 303, n°5665, p. 1781 - 1782.

PINOT J.P. (2001) Vocabulaire de Géomorphologie. Document électronique, www.oceano.org/io/voca, Institut océanographique / Paris.

PINSON-MOUILLOT J. (1980) *Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais (Nord de la Presqu'île du Cap Vert)*. Thèse de Doctorat en Géologie et applications au domaine marin, Université de Bordeaux 1, Bordeaux, 106 p. + Annexes.

PIRAZZOLI P. (1977) Les variations des lignes de rivage depuis 2000 ans et leurs causes possibles. *Bulletin Liaison, ASEQUA,* n°50, p. 95 - 105.

PITTE J.-R. (1977) *Nouakchott, capitale de la Mauritanie*. Publication du Département de Géographie de l'Université de Paris - Sorbonne, n°5, 198 p.

PLANT N.G., HOLMAN R.A (1997) Intertidal beach profile estimation using video images. *Marine Geology*, vol. 140, n°1-4, p. 1 - 24.

PLANT N.G., AARNINKHOF S.G.J., TURNER I.L., KINGSTON K.S. (2007) The performance of shoreline detection models applied to video imagery. *Journal of Coastal Research*, vol. 23, n°3, p. 658 - 670.

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.

PRIEST G.R. (1999) Coastal shoreline change study northern and central Lincoln county, Oregon. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 28, p. 140 - 157.

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.

QUARTEL S., KROON A., RUESSINK B.G. (2008) Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach. *Marine Geology*, vol. 250, n°1-2, p. 19 - 33.

QUELENNEC R.E. (1984) Intérêt de l'analyse des profils de plage pour l'étude de la dynamique sédimentaire littorale. Cas du delta du Nil. *In* (SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE) *L'hydraulique et la maîtrise du littoral. Problèmes côtiers posés par le mouvement des sédiments et la pollution. Question II: Mécanismes et évolution du littoral. Dix huitièmes journées de l'hydraulique, Marseille 11-13 septembre 1984*. Rapport n°8, Société Hydrotechnique de France, Paris, 6 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.

QUENSIERE J., DIAW A.T., OULD EL MOUSTAPHA SENHOURY A., CHARLES-DOMINIQUE E. (2006) Un réseau ouest-africain de recherche sur la gestion durable des zones côtières : le projet "Bilan Prospectif. *In* (SYMOENS J.-J., Ed.) *Les écosystèmes côtiers de l'Afrique de l'ouest*. SBWOA / PRCM, Bruxelles, p. 159 - 176.

REEVE D.E., FLEMING C.A. (1997) A statistical-dynamical method for predicting long term coastal evolution. *Coastal* Engineering, vol. 30, n°3-4, p. 259 - 280.

REEVE D.E., SPIVACK M. (2004) Evolution of shoreline position moments. *Coastal Engineering*, vol. 51, n°8-9, p. 661 - 673.

PROJET APPUI AU SECTEUR DE LA PECHE (2003) *Atelier sur la validation de l'étude d'impact environnemental et social du port de pêche de Tanit. Actes de l'atelier tenu à Nouakchott le 10 juillet 2003*. République islamique de Mauritanie, Ministère des Pêches et de l'économie maritime, Nouakchott, 33 p.

REY P., IZARD M. (1969) *Notions pratiques de photo-interprétation*. Editions du CNRS, Paris, 62 p.

ROBERTSON W., WHITMAN D., ZHANG Z., LEATHERMAN S.P. (2004) Mapping shoreline position using Airborne Laser altimetry. *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n°3, p. 884 - 892.

ROBIN M. (1990) Cinématique d'un littoral par squelettisation de formes. *Photo-Interprétation,* n°1990/2, p. 65 - 67.

ROBIN M. (1995) *La télédétection. Des satellites aux systèmes d'information géographiques*. Nathan, Paris, 318 p.

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.

ROMAGNOLI C., MANCINI C., BRUNELLI R. (2006) Historical shoreline changes at an active island volcano: Stromboli, Italy. *Journal of Coastal Research*, vol. 22, n°4, p. 739 - 749.

ROMANCZYK W., BOCZAR-KARAKIEWICZ B., BONA J.L. (2005) Extended equilibrium beach profiles. *Coastal Engineering*, n°52, p. 727 - 744.

ROSEN P. S. (1978) A regional test of the Bruun Rule shoreline erosion. *Marine Geology*, vol. 26, n°1-2, p. M7 - M16.

ROSSI G. (1988) Un exemple d'utilisation d'une défense naturelle contre l'érosion littorale : le grès de plage. *Revue de Géomorphologie dynamique*, vol. XXXVII, n°1, p. 1 - 10.

ROSSI G. (1989a) L'érosion du littoral dans le Golfe du Bénin : un exemple de perturbation de l'équilibre dynamique. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplement Band, n°73, p. 139 - 165.

ROSSI G. (1989b) Erosion côtière et aménagements dans le golfe du Bénin. *Bulletin Centre de géomorphologie de Caen*, n°36, p. 213 - 216.

ROUBERTOU A., BONNEVAL H. (1965) La photographie aérienne en hydrographie marine. *In* (CHEVALIER R., Ed.) *La photographie aérienne. Panorama intertechnique*. Gauthier - Villars Editeur, Paris, p. 51 - 56.

RUDANT J.P., TREBOSSEN H., FRUNEAU B., CLASSEAU N., FRISON P. L., COUREL M. F., MVOGO J., ONANA V., TONYE E. (1999) Apport des données INSAR à la connaissance de l'environnement littoral : exemples au Cameroun et en Mauritanie. Document électronique http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/fringe1999/Papers/rudant.pdf, consulté le 20-03- 2006.

RUGGIERO P., KAMINSKY G.M., GELFENBAUM G. (2003) Linking proxy-based and datum-based shorelines on a high-energy coastline: implications for shoreline change analyses. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 57 - 82.

RUIZ L.A., PARDO J.E., ALMONACID J., RODRÍGUEZ B. (2007) Coastline automated detection and multiresolution evaluation using satellite images. *Proceedings of Coastal Zone 07*, *Portland, Oregon July 22 to 26, 2007*, 5 p.

RUË O. (2002) *Evolution de l'environnement physique de l'estuaire de Gambie. Impacts possibles des modifications du régime du fleuve sur les mangroves*. Rapport OMVG-Cabinet Gressard, 42 p.

RYAN T.W., SEMENTILLI P.J., YUEN P., HUNT B.R. (1991) Extraction of shoreline features by Neural nets and image processing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, n°7, p. 947 - 955.

RYU J.-H., WON J.-S., MIN K.D. (2002) Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat. A case study in Gomso Bay, Korea. *Remote Sensing of environment*, vol. 83, n°3, p. 442 - 456.

SABATIER F., SUANEZ S. (2003) Evolution of the Rhône delta coast since the end of the 19th century. *Gémorphologie : relief, processus, environnement,* n°4, p. 283 - 300.

SAINT-MARTIN PAYSAGE, IRC-CONSULTANT (2004) *Etude de l'environnement aux abords de Nouakchott*. Rapport Définitif Cellule de Coordination du Programme de Développement Urbain, République Islamique de Mauritanie, Nouakchott, 233 p.

SALI E., WOLSON H. (1992) Texture classification in aerial photograph and satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, n°18, p. 3395 - 3408.

SALL M.M. (1971) *Dynamique et morphogénèse actuelles (Contribution à l'étude géomorphologique du Sénégal occidental)*. Thèse de Doctorat de troisième cycle de Géographie, Université de Dakar, 290 p.

SALL M. M. ; DIOP E. S. (1977) Géomorphologie et évolution des lignes de rivage holocène dans les îles du Saloum. *Bulletin Liaison ASEQUA*, n°50, p.51 - 58.

SALL M. (1979a) Géomorphologie et sols de la Presqu'île du Cap Vert (Sénégal) d'après les images Landsat du 5 mai 1973. *Photo-Interprétation*, n°5, Fascicule 2a, p.9 - 18.

SALL M. (1979b) Hydrologie et Géomorphologie du delta du fleuve Sénégal et de ses bordures (Aftout es Saheli et Ferlo Nord-occidentale). *Photo-Interprétation*, n°5, Fascicule 4a, p. 33 - 37.

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.

SALL (1993) La dynamique éolienne. *In* (MICHEL P., BARUSSEAU J.P., RICHARD J.-F., SALL M., Eds) *L'après-barrage dans la vallée du Sénégal. Modifications hydro-dynamiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu et les aménagements agricoles*. *Résultats des travaux du projet CAMPUS 1989-1992.* Presses Universitaires de Perpignan, p.9-17.

SALLENGER A.H., MORTON R.A., FLETCHER C., THIELER R.E., HOWD P. (2000) Comment on "Sea level rise shown to drive coastal erosion". *Eos, Transactions,* American Geophysical Union, vol. 81, n°38, p. 436.

SAUZAY A. (1956) Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique (1er octobre 1953-1er novembre 1954). *Annales Hydrographiques.* 4e série, tome sixième, année 1955, Service hydrographique de la Marine, Paris, Imprimerie Nationale, p. 233 - 263.

SCHOONEES J.S. (2000) Annual variation in the net longshore sediment transport rate. *Coastal engineering*, n°40, p. 141 - 160.

SCHWABISCH M., LEHNER S., WINKEL N. (1997) Coastline extraction using ERS SAR interferometry. *In* (ESA SP-414, Ed) *Proceedings 3rd ERS Symposium on Space at the service of our environment* Florence, Italy, 17-21 March 1997, p. 1049 - 1053.

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.

SERVICE HYDROGRAPHIQUE DE LA MARINE (1914) *Dispositions générales relatives aux cartes de l'hydrographie française. Signes conventionnels et abréviations.* Imprimerie Nationale, Paris, 49 p. + 29 planches annexes.

SERVICE HYDROGRAPHIQUE DE LA MARINE (1949) *Dispositions générales relatives aux cartes de l'hydrographie française. Signes conventionnels et abréviations.* Imprimerie Nationale, 2e édition, Paris, 49 p. + 29 planches annexes.

SHAGHUDE Y. W. (2004) Remote sensing for studying nearshore bottom morphology and shoreline changes. *Boletim Direcção Nacional de Geologia, Mocambique*, vol. 43, p. 14 - 19.

SHERMAN D.J., JACKSON D.W.T., NAMIKAS S.L., WANG J. (1998) Wind-blown sand on beaches: an evaluation of models. *Geomorphology*, n°22, p. 113 - 133.

SHI-LENG S., TEH-FU L. (1987) Long-term variation of longshore sediment transport. *Coastal engineering*, vol. 11, p. 131 - 140.

SHOM (1979) Répertoire des zones de marée et des zéros hydrographiques des côtes métropolitaines. *Annales Hydrographique.* 5e série, Service Hydrographique et Océanographiques de la Marine, Paris, vol.7 Fascicule 1, n°751, 61 p.

SHOSHANY M., DEGANI A. (1992) Shoreline detection by digital image processing of aerial photography. *Journal of Coastal Research*, vol.8, n°1, p. 29 - 34.

SIMON B. (1996) Détermination des hauteurs d'eau extrêmes pour la délimitation du domaine public maritime. *Annales Hydrographiques.* 5e série, Service Hydrographique et Océanographiques de la Marine, Paris, vol.20, n°67, p. 17 - 43.

SIMON B. (2006) Références de hauteur en hydrographie. *Annales Hydrographiques.* 6e série, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, vol. 4, n°773, p. 3.1 - 3.12.

SMITH S.E., ABDEL-KADER A. (1988) Coastal erosion along the egyptian delta. *Journal of Coastal Research*, vol. 4, n°2, p. 245 - 255.

SMITH G.L., ZARILLO G.A. (1990) Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photographic and beach profiling techniques. *Journal of Coastal Research*, vol. 6, n°1, p. 111 - 120.

SONG C., WOODCOCK C.E., SETO K.C., LENNEY M.P., MACOMBER S.A. (2001) Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects. *Remote Sensing of environment*, vol. 75, n°2, p. 230 - 244.

SOUMARE A. (1996) *Etude comparative de l'évolution géomorphologique des bas-estuaires du Sénégal et du Saloum. Approche par les données de terrain et de télédétection*. Thèse de Doctorat de Troisième cycle de Géographie, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 265 p.

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

STAUBLE D.K. (2003) The use of shoreline change mapping in coastal engineering project assessment. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 178 - 206.

STEPHAN P. (2008) Les *flèches de galets de Bretagne : morphodynamiques passé, présente et prévisible.* Thèse de Doctorat nouveau régime Géographie, Université de Bretagne Occidentale, 558 p.

STIVE M.J.F., AARNINKHOF S.G.J., HAMM L., HANSON H., LARSON M., WIJNBERG K.M., NICHOLLS R.J., CAPOBIANCO M. (2002) Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering,* n°47, p. 211 - 255.

STOCKDON H.F., SALLENGER A.H. Jr, LIST J.H., HOLMAN R.A. (2002) Estimation of shoreline position and changing using airborne topographic lidar data. *Journal of Coastal Research*, vol. 18, n°3, p. 502 - 513.

SUANEZ S., SIMON B. (1997) Utilisation de l'analyse diachronique dans l'étude de l'évolution du littoral oriental du delta du Rhône (France, Sud-est). *Photo-Interprétation,* n°1997/3-4, p. 147 - 154.

SUANEZ S., DEHOUCK A., STEPHAN P. (2008) Incertitude de la mesure de terrain en géomorphologie littorale. Approche statistique et quantification des marges d'erreur. *In* (ALLARD P., FOX D., PICON B., Eds) *Incertitude et environnement. La fin des certitudes scientifiques*, Collectif Edisud, p. 127 - 139.

SY A. (1982) *Etude géomorphologique des flèches sableuses du littoral sénégalais : - Langue de Barbarie (Nord Sénégal) - Pointe de Sangomar (Saloum) - Presqu'île aux Oiseaux (Casamance)*. Mémoire de Maîtrise, Université de Dakar, 103 p.

SY B.A. (2006) L'ouverture de la Langue de Barbarie et ses conséquences. *Annales de la Faculté des lettres, langues, arts et sciences humaines de Bamako*, n°5, Document électronique (http://www.recherches-africaines.net/document.php?id=344), consulté le 11-04-2007.

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.

TAO C.V., HU Y. (2001) Use of the rational function model for image rectification. *Canadian journal of remote sensing*, vol. 27, n°6, p. 593 - 602.

TCHOTSOUA M., DASSE P. (1997) Phénomène d'érosion et gestion de l'environnement littoral camerounais. *In* (G. MAINET, Ed.) *Iles et Littoraux tropicaux. Actes des VIIèmes journées de Géographie tropicale. Brest 11, 12 et 13 novembre.* Ouest Edition - Presses Académiques, p. 653 - 659.

TECASEN (1983) *L'exploitation des données simulées SPOT en domaine littoral tropical "Les îles du Saloum",* Rapport n°4, Dakar, 95 p.

THIAM A.K. (1985) *Les ensembles dunaires du sud- ouest de la Mauritanie. Trarza sud-occidental. Approche par la télédétection et la sédimentologie*. Thèse de Doctorat de Troisième cycle de Géographie Physique (Géomorphologie), Université de Dakar, 181 p.

THIAM A. K. (1976) Etude géomorphologique de l'Aftout ès Saheli septentrional et ses bordures (Région de Nouakchott, Mauritanie). Travail d'études et de Recherches, Maîtrise de Géographie, Université de Dakar, 139 p. + Annexes

THIAM M. D., DIAW A. T. (1992). La porte de Fata : un hiatus historico géographique dans le troisième cycle du mythe Gelwar. *Revue Ethiopiques*, p. 45-50

THIAM M.D. (2007) *Environnement et évolution des bordures lacustres et lagunaires du Sénégal.* Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, 513 p. + Annexes

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., DANFORTH W.W. (1994b) Historical shoreline mapping (II): Application of the digital shoreline mapping and analysis systems (DSMS / DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico. *Journal of Coastal Research*, vol. 10, n°3, p. 600 - 620.

THIELER E.R., O'CONNEL J.F., SCHUPP C.A. (2001) *The Massachusetts shoreline change project: 1800s to 1994.* Technical report, USGS, Woods Hole, 39 p.

THIELER E.R., HIMMELSTOSS E., MILLER T. (2003) *User guide and tutorial for the Digital shoreline analysis system (DSAS) version 3.2*, USGS Open-File Report 2005-1304, 33 p.

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., DIAW A.T. (1989a) Cinématique de la flèche littorale de Sangomar (Sénégal). *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection,* n°114, p. 14 - 16.

THOMAS Y.-F., DIAW A.T. (1989b) Cinématique de la flèche littorale de Sangomar (Sénégal). *Notes de Biogéographie,* n°4, p.233 - 240.

THOMAS Y.-F., DIAW A.T. (1997) Suivi (1984-1993) de la rupture de la flèche de Sangomar, estuaire du Saloum, Sénégal. *Photo-Interprétation*, vol. 35, n°1997/3-4, p. 199 - 204.

THOMAS Y.-F., DIAW A.T., MENANTEAU L., DEVIGNAC C. (1998) Approche satellitaire de la dynamique du trait de côte. Etude d'un cas : évolution de la flèche de Sangomar (estuaire du fleuve Saloum, Sénégal) entre 1981 et 1997. *In Séminaires de l'UMR 6554 Géomatique en environnement, Brest, IUEM, 15 septembre 1998,* p. 23 - 26.

THOMAS Y.-F., ANSELME B. (2005) Modèle numérique de terrain de l'Afrique de l'Ouest 8 à 22° N – 12 à 26 °W. Rapport Programme Régional de Conservation de la Zone Côtière et Marine en Afrique de l'Ouest, Nouakchott, 48 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.

THOMAS Y.-F., OULD EL MOUSTAPHA SENHOURY A. (2007) La hauteur significative des vagues en Afrique de l'Ouest, observation par altimétrie Radar. *Photo-Interprétation*, vol. 43, n°2007/1, p. 25 - 29.

THORNTON E.B., SALLENGER A., SESTO J.C., EGLEY L., MCGEE T., PARSONS R. (2006) Sand mining impacts on long-term dune erosion in southern Monterey Bay. *Marine Geology*, vol. 229, n°1-2, p. 45 - 58.

TOUTIN T. (2004) Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n°10, p. 1893 - 1924.

TREBOSSEN H. (2002) *Apport des images RADAR à Synthèse d'Ouverture à la cartographie marine*. Thèse de Doctorat Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne la Vallée, 161 p.

TREPANIER I., DUBOIS J. M. M., BONN F. (2002) Suivi de l'évolution du trait de côte à partir d'images HRV (XS) de SPOT : application au delta du fleuve rouge, Viêt-nam. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n°5, p. 917 - 937.

TRICART J. (1961) *Notice explicative de la carte géomorphologique du delta du Sénégal*. Mémoire du BRGM n°8, Ed. TECHNIP, 137 p. + Annexes.

TRICART J., RIMBERT S., LUTZ G. (1970) *Introduction à l'utilisation des photographies aériennes en Géographie, Géologie, Ecologie, Aménagement du territoire*. Tome 1 : Notions générales, données structurales, Géomorphologie, Société d'Edition d'Enseignement Supérieur, Paris, 247 p.

TROMEUR J.-Y.-M.-M. (1946) Mission hydrographique du Saloum (1930-1931). *Annales Hydrographiques.* 3e série, tome seizième, années 1938-1939, Service hydrographique de la Marine, Paris, Imprimerie Nationale, p.5 - 33.

TURMINE V. (2000) *La dynamique littorale entre Mbour et Joal (Petite Côte, Sénégal).* Mémoire de Maîtrise de Géographie, Université Paris VII, 249 p.

TURNER I.L., LEYDEN V., SYMONDS G., MCGRATH J., JACKSON A., JANCAR T., AARNINKHOF S.G.J., ELSHOFF I. (2000) Comparison of observed and predicted coastline changes at the gold coast artificial (surfing) reef. *In International Conference on Coastal Engineering*, Sydney, Australia, 2 p.

TURNER I.L., AARNINKHOF S.G.J., DRONKERS T.D.T., MCGRATH J. (2004) CZM Applications of Argus coastal imaging at the Gold coast, Australia. *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n°3, p. 739 - 752.

TURNER I.L., AARNINKHOF S.G.J., HOLMAN R.A (2006) Coastal imaging applications and research in Australia. *Journal of Coastal Research*, vol. 22, n°1, p. 37 - 48.

US ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION / COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (1986) Measuring shoreline change. *Coastal Engineering Technical note,* 7 p.

VERGER F. (1996) La télédétection des domaines littoraux. *In* (BONN F., Ed.) *Précis de télédétection. volume 2. Applications thématiques*. Presses de l'Université du Québec / AUPELF, Sainte-Foy, p. 323 - 343.

VERMEER D.E. (1985) Mauritania. *In* (BIRD E.C.F., SCHWARTZ M.L., Eds) *The world's coastline*. Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York, p. 549 - 553.

WEBER O. (1989) Méthodes et techniques d'étude du domaine littoral. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine / Bordeaux,* n°45, p. 223 - 227.

WEBER O. (1989) Les agents dynamiques et le transport sédimentaire dans la zone côtière. *Bulletin de l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine / Bordeaux,* n°45, p. 23 - 36.

WHITE K., EL ASMAR H.M. (1999) Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper Imagery, an example from Nile Delta. *Geomorphology*, vol. 29, p. 93 - 105.

WILSON P. (1997) Rule-based classification of water in Landsat MSS images using the variance filter. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 63, n°5, p. 485 - 491.

WOOLARD J.W., ASLAKSEN M., LONGENECKER L.T.J., RYERSON A. (2003) Shoreline mapping from Airborne LIDAR in Shilshole Bay, Washington. *In* (NOAA-NOS) *US HYdrographic conference 2003*, 11 p.

WU W. (2003) *Application de la géomatique au suivi de la dynamique environnementale en zone aride. Exemple de la région de Nouakchott en Mauritanie, du Ningxia nord et du Shaanxi nord en Chine du nord-ouest*. Thèse de Doctorat de Géographie, Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne, Ecole Pratique des Hautes Etudes, Paris, 217 p.

WU W. (2007) Coastline evolution monitoring and estimation-a case study in the region of Nouakchott, Mauritania. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, n°24, p. 5461 - 5484.

YAMANO H., SHIMAZAKI, H., MATSUNAGA T., ISHODA A., MCCLENNEN C., YOKOKI H., FUJITA K., OSAWA, Y., KAYANNE, H. (2006) Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands. *Geomorphology,* vol.82, n°3-4, p.398 - 411.

YOUNG R. S., PILKEY O.H., BUSH D.M., THIELER E.R. (1995) A discussion of the generalized model for simulating shoreline change (GENESIS). *Journal of Coastal Research*, vol. 11, n°3, p. 875 - 886.

ZHANG D., VAN GOOL L., OOSTERLINCK A. (1994) Coastline detection from SAR images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994.* IGARSS IEEE International, vol. 4, p. 2134 - 2136.

ZHANG K., HUANG W., DOUGLAS B.C., LEATHERMAN S.P. (2002) Shoreline position variability and long term trend analysis. *Shore and Beach*, vol. 70, n°2, p. 31 - 35.

ZHANG K., DOUGLAS B.C., LEATHERMAN S.P. (2004) Global warming and coastal erosion. *Climate change,* n°64, p. 41 - 58.

ZHANG H., LI D., HUANG W. (2005) Scale characteristics of remote sensing information: a case of shoreline. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005.* IGARSS Proceedings. IEEE International, vol.8, p. 5383 - 5385.

ZHU X. (2001) Remote sensing monitoring of coastline change in Pearl River estuary. *In* (CRISP, SISV, AARS) *22nd Asian Conference on remote sensing, 5 - 9 november 2001*, Singapore, 5 p.

ZUZEK P.J., NAIRN R.B., THIEME S. (2003) Spatial and temporal considerations for calculating shoreline change rates in the Great Lakes basin. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p.125 - 146.

LISTE DES FIGURES

Volume 1

Figure 1 : Profil schématique d'une côte sableuse et terminologie anglo-saxonne équivalente d'après SHEPARD (1973)..... 15
Figure 2 : Représentation schématique de quelques exemples de lignes de référence géomorphologiques..... 18
Figure 3 : Représentation schématique de la limite de végétation dunaire et pérenne..... 19
Figure 4 : Disposition schématique de quelques datums utilisés comme référence sur un profil de plage..... 23
Figure 5 : Etendue de la plage entre le pied de dune ou la limite de végétation et la ligne instantanée de rivage, la ligne de pleines mers ou le pied de la plage sous-marine..... 25
Figure 6 : Représentation schématique de la limite de pénétration d'*overwash* dans une île barrière..... 26
Figure 7 : Histogramme d'une image infrarouge du satellite Terra Aster concernant une plage de l'Atoll de Majuro dans les îles Marshall..... 33
Figure 8 : Comparaison des traits de côte extraits par classification «dure» (Maximum de vraisemblance) et par classification «souple»..... 34
Figure 9 : Extraction de la ligne d'intensité lumineuse maximum par le modèle SLIM d'après PLANT *et al.* (2007)..... 36
Figure 10 : Détection de la ligne de rivage par le modèle CCD *(Color Channel Divergence)* d'après PLANT *et al.,* (2007)..... 37
Figura 11 : Extraction de la ligne des pleines mers moyennes à partir d'un profil Lidar concernant le secteur de Kitty Hawk en Caroline du Nord (Etats Unis), d'après MORTON *et al.,* (2005)..... 38
Figure 12 : Intersection entre une surface représentant le datum des pleines mers moyennes et des profils de plage provenant d'un modèle numérique de terrain..... 39
Figure 13 : Comparaison de deux squelettes de plage obtenus par squelettisation de formes..... 40
Figure 14 : Localisation de la zone d'étude..... 52
Figure 16 : Dynamique et segmentation du littoral sénégalo-mauritanien..... 55
Figure 17 : Zones ayant fait l'objet de mesures quantitatives de l'évolution côtière en Mauritanie..... 57
Figure 18 : Zones ayant fait l'objet de mesures quantitatives de l'évolution côtière sur le littoral sénégambien..... 60
Figure 19 : Migration et évolution de la pointe de Sangomar entre 1927 et 1995..... 69
Figure 20 : Positions successives de l'embouchure du fleuve Sénégal de 1658 à 1981 d'après les données de GAC *et al.,* (1982)..... 70
Figure 22 : Emprise spatiale de la carte N°3385..... 81
Figure 23 : Emprise spatiale des images satellitaires Landsat utilisées pour l'analyse de l'évolution de la position du trait de côte à l'échelle régionale..... 84
Figure 24 : Profils radiométriques extraits des images Landsat de la Langue de Barbarie..... 90
Figure 27 : Modification du tracé du trait de côte probablement du fait d'une erreur de cartographie sur la carte N° 3385 publiée en 1874 au 1/492 250..... 96
Figure 28 : Répartition du linéaire côtier selon le type de côte du Cap Blanc (frontière mauritano-sahraouie) au sud sud du Rio Cacine (frontière Guinée-Bissau – République de Guinée)..... 99
Figure 29 : Profils et coupes schématiques des falaises à matériaux volcaniques de la Presqu'île du Cap Vert..... 103
Figure 30 : Localisation des flèches sableuses sur le littoral sénégalo – bissauguinéen..... 116
Figure 31 : Répartition proportionnelle du linéaire côtier selon les types de côte recensés au sein de chacune des cinq zones identifiées du Cap Blanc au Rio Cacine..... 121
Figure 40 : Localisation des secteurs où une évolution significative du trait de côte a été enregistrée après superposition des lignes de référence extraites des images Landsat..... 128
Figure 80 : Périodes d'étude et documents utilisés sur les sites retenus pour l'analyse locale de la cinématique littorale..... 156
Figure 82 : Géoréférencement des images de référence sous *Envi 4.2*..... 167

Figure 83 : Rectification des images aériennes sous *Envi 4.2*....168
Figure 85 : Quelques incohérences relevées sur les éditions de 1877 et de 1929 de la carte N°3592....172-173
Figure 86 : Décalage des contours de la Langue de Barbarie sur la carte N°4892 aux abords de Saint-Louis..175
Figure 87 : Erreurs RMS résultant du géoréférencement des couches cartographiques....176
Figure 88 : Ecarts mesurés entre les coordonnées des points GPS et des bornes géodésiques de l'IGN....178
Figure 89 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte du fait d'un mauvais géoréférencement des prises de vues aériennes de 1927 et 1954 du site de Nouakchott....180
Figure 90 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte du fait d'un mauvais géoréférencement des images aériennes de 1927 du site de Saint-Louis....181
Figure 91 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte du fait d'un mauvais géoréférencement des images aériennes de 1927 au nord de Bargny Guedj....182
Figure 92 : Erreurs RMS liées au géoréférencement des images aériennes utilisées pour l'analyse de l'évolution du trait de côte à Nouakchott, Ndiago, Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène....183
Figure 93 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte en raison d'un mauvais contraste des images (ligne de pleines mers) ou de l'étalement de la dune à Nouakchott....186
Figure 94 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte en raison de la disparition de la limite de végétation entre Bargny et Yène-sur-mer....189
Figure 95 : Secteurs exclus des mesures d'évolution du trait de côte en raison de l'absence d'une couverture végétale ou d'une limite de végétation très échancrée entre Mbour et Pointe Sarène....191
Figure 96 : Exemple de transects et d'une ligne de base générés par le DSAS pour mesurer l'évolution du trait de côte de Mbour à la Pointe Sarène de 1954 à 1997....197
Figure 97 : Représentation graphique des bilans surfaciques bruts et des bilans surfaciques nets. Exemple de la période 1976 – 1997 concernant le site de Mbour à la Pointe Sarène....198
Figure 100 : Directions et vitesses moyennes des vents dominants à la station de Nouakchott de 1960 à 2004 d'après les données du Service National de la Météorologie....206
Figure 102 : Directions et vitesses moyennes des vents dominants à la station de Saint-Louis de 1951 à 2006 d'après les données de la Direction Nationale de la Météorologie....213
Figure 104 : Directions et vitesses moyennes des vents dominants à la saison de Dakar-Yoff de 1951 à 2006 d'après les données de la Direction Nationale de la Météorologie....219
Figure 106 : 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....224
Figure 118 : Comparaison entre les positions de la ligne de pleines mers extraite des images aériennes de 1980 et celle levée au GPS en juillet 2007 dans les environs de Ndiago....235
Figure 126 : Evolution des surfaces bâties et des surfaces végétalisées aux abords de Saint-Louis de 1927 à 2005....240
Figure 133 : Comparaison entre les positions de la limite supérieure de la plage (limite de végétation et/ou des maisons) extraite des images aériennes de 1976, 1997 et celle levée au GPS en 2007 entre Yène Tode et Yène-sur-mer....244
Figure 138 : Comparaison entre les positions de la limite de végétation extraite des images aériennes de 1997 et celle levée au GPS en juillet 2007 au sud de l'épi du club Aldiana....248
Figure 139 : Evolution des surfaces bâties et des surfaces végétalisées de Mbour à la Pointe Sarène de 1954 à 1997....249

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Limites d'humectation et ligne instantanée de rivage 22
Photo 2 : Aspect de la ligne d'intensité lumineuse maximum sur une image vidéographique moyennée d'après PLANT et HOLMAN (1997) 24
Photo 3 : Variations de contraste indiquant la ligne de pleines mers ou la limite de végétation sur une photographie aérienne panchromatique 30
Photo 4 : Variations de couleur marquant la limite d'humectation ou la limite de végétation sur une photographie aériennes en couleur 30
Photo 5 : Ligne instantanée de rivage sur la Langue de Barbarie à l'embouchure du fleuve Sénégal 86
Photo 6 : Limite de végétation sur la Presqu'île aux oiseaux dans l'estuaire de la Casamance 86
Photo 7 : Illustration du décalage entre les images Landsat MSS et ETM+ sur le littoral gambien 87
Photo 8 : Visibilité de la ligne des brisants dans les canaux proche et moyen infrarouges de Landsat 7 ETM+ 88
Photo 9 : Aspect des falaises du Cap Blanc 100
Photo 10 : Falaise vive d'une dizaine de mètres d'altitude taillée dans les grès maestrichtiens 101
Photo 11 : Vue d'une sebkha dans le Banc d'Arguin 104
Photo 12 : Mangrove se développant sur un estran vaso-sableux avec quelques individus isolés sur des bancs rocheux 105
Photo 13 : Dune ogolienne d'une vingtaine de mètres se raccordant à la mer par une plage de sable «rougeâtre» et un front dunaire en pente douce 106
Photo 14 : Aspect de la plage et haut de plage entre Mehejrat et Tioulit 107
Photo 15 : Affleurement de *beach-rock* au bord d'une plage en érosion entre Lemcid et Ablawakh 108
Photo 16 : Monticules de sables colonisées par *Zygophyllum waterlotii* en bord de mer aux environs de Tioulit 109
Photo 17 : Aspect du front de mer au nord de Fass Boye 110
Photo 18 : Vue du cordon d'enrochement protégeant le littoral rufisquois 111
Photo 19 : Brèche à travers le cordon à *Opuntia tuna* 112
Photo 20 : Dune semi-fixée au sud de Nianing 113
Photo 21 : Vue d'une plage en avant d'un cordon sableux fixé par une végétation de savane sur l'île d'Orango dans les Bijagos près d'Eticoga 114
Photo 22 : Aperçu du pied de dune, de la ligne instantanée de rivage et de la ligne de pleines mers à Nouakchott 160
Photo 23 : Aperçu de la ligne de pleines mers et de la ligne instantanée de rivage à Nouakchott 160
Photo 24 : Aperçu de la ligne de pleines mers et de la ligne instantanée de rivage à Ndiago 161
Photo 25 : Aperçu de la ligne de pleines mers et de la ligne instantanée de rivage à Saint-Louis 161
Photo 26 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite de végétation au sud de Siendou 161
Photo 27 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite des maisons au sud de Siendou 161
Photo 28 : Résidences secondaires battues par les vagues à marée haute au sud de Siendou 162
Photo 29 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite de végétation au droit de Warang 162
Photo 30 : Limite supérieure de la plage matérialisée par la limite des maisons au droit de Warang 162
Photo 31 : Campement touristique sur pilotis à Warang 163
Photo 32 : Démantèlement de la dune devant les installations portuaires en chantier 185
Photo 33 : Disparition de la végétation sur le cordon sableux isolant le marigot de Bargny au droit de Bargny Ngoudou 188
Photo 34 : Echancrure sur le front de végétation au sud de Mballing 191
Photo 35 : Le cordon dunaire parsemé de touffes de végétation et d'étendue modeste (150 à 200 m de large) au nord du wharf 203
Photo 36 : Aperçu du cordon dunaire au sud du wharf 204
Photo 37 : Absence de codon dunaire au sud du port de Nouakchott 204
Photo 38 : Fréquentation de la plage de Tergit Vacances 208

Photo 39 : Circulation des voitures sur le cordon dunaire au nord de Tergit Vacances 208
Photo 40 : Fixation du cordon dunaire par clayonnage avec des palissades en tige de *Typha* entre le port de pêche et l'hôtel Ahmedy 209
Photo 41 : Aspect de la Langue de Barbarie aux alentours de Ndiago 210
Photo 42 : Dune couverte de filaos et de quelques touffes d'herbacées au sud de Fass Dièye 211
Photo 43 : Formes périodiques sur le littoral de la Langue de Barbarie avec une falaise marquant la limite des pleines mers récentes 211
Photo 44 : Aperçu de la façade maritime du village de Ndiago 214
Photo 45 : Aspect de la frange côtière de la ville de Saint-Louis 215
Photo 46 : Vue du cordon sableux séparant le marigot de Bargny de l'océan au sud de Bargny Guedj 216
Photo 47 : Le cordon à *Opuntia tuna* au sud de Yène Tode 217
Photo 48 : Estran tapissée de *beach-rock* en avant d'une falaise de marnes yprésiennes au droit du cimetière de Bargny Miname 217
Photo 49 : Enrochement protégeant une résidence secondaire en construction au sud de Siendou 220
Photo 50 : Pollution du haut de plage par une déchetterie au nord de Siendou 221
Photo 51 : Front de dune végétalisé au droit de Mballing 222
Photo 52 : Falaise taillée dans la dune semi-fixée au droit du domaine de Nianing 223
Photo 53 : Vue du cordon d'enrochement au droit du club Aldiana 225
Photo 54 : Déchets de produits halieutiques utilisés comme protection contre l'inondation du site de transformation artisanale au sud de l'usine IKAGEL de Mbour 226
Photo 55 : Erosion du pied de dune au nord du village de Ndiago 234
Photo 56 : Conséquences de l'érosion côtière à Bargny Guedj 243
Photo 57 : Prélèvement de sable marin sur la plage de Bargny Guedj 245
Photo 58 : Filaos déracinés au sud de l'épi du club Aldiana 248
Photo 59 : Effondrement de maisons à Nianing sous l'effet de l'érosion côtière 249

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Exemples de lignes de référence relevées dans la littérature 26
Tableau 2 : Synthèse bibliographique méthodes d'extraction semi-automatiques de lignes de référence 41
Tableau 3 : Synthèse des sources de données et résultats des travaux sur les mesures de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale en Mauritanie 58
Tableau 4 : Synthèse des sources de données et résultats des travaux sur les mesures de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale au Sénégal 62
Tableau 5 : Sources de données et mesures de l'évolution de la pointe des flèches sableuses sénégalaises 67
Tableau 6 : Synthèse des sources de données et résultats des travaux sur les mesures de l'évolution du trait de côte à l'échelle locale en Gambie 71
Tableau 7 : Origine des renseignements hydrographiques de quelques cartes régionales 79
Tableau 8 : Documents nautiques du SHOM utilisés pour l'analyse qualitative de l'évolution du littoral à l'échelle régionale 80
Tableau 9 : Imagerie Landsat utilisée pour l'analyse de l'évolution de la position du trait de côte à l'échelle régionale 83
Tableau 10 : Gammes de réflectance et seuils utilisés pour isoler la ligne instantanée de rivage sur les images Landsat de la Langue de Barbarie 91
Tableau 11 : Estimation de la marge d'erreur pour l'analyse de l'évolution de la pointe de la Langue de Barbarie à partir des images Landsat 94
Tableau 12 : Estimation de la marge d'erreur pour l'étude de l'évolution des flèches et des modifications à l'embouchure des systèmes estuariens de Joal (Sénégal) au Rio Cacine (Guinée-Bissau) à partir des images Landsat 94
Tableau 13 : Dimensions et orientations des flèches sableuses du Sénégal à la Guinée-Bissau 117
Tableau 14 : Répartition du linéaire côtier selon le type de côte du Cap Blanc à la Guinée-Bissau 120
Tableau 15 : Documents cartographiques sélectionnés pour l'analyse de l'évolution du littoral sur la Langue de Barbarie et la Baie de Gorée 150
Tableau 16 : Missions photographiques utilisées pour l'analyse diachronique de l'évolution de la position du trait de côte aux abords de Nouakchott, Ndiago, Saint-Louis, de Bargny à Yène-sur-mer et de Mbour à la Pointe Sarène 155
Tableau 17 : Précision de la numérisation des lignes de référence et estimation des erreurs sur les sites de Nouakchott, Ndiago, Saint-Louis, Bargny – Yène-sur-mer et Mbour – Pointe Sarène 193
Tableau 18 : Estimation de la marge d'erreur globale dans les sites d'étude sélectionnés pour l'évolution locale de la cinématique littorale 196
Tableau 19 : Fréquence des vents efficaces à la station de Saint-Louis durant les périodes d'étude 239

ANNEXES

ANNEXE 1 : Cartes marines et minutes topographiques du SHOM concernant le littoral ouest-africain de la Mauritanie à la Guinée-Bissau, données disponibles aux archives de l'EPSHOM à Brest

Annexe 1-A : Cartes régionales à petites échelles. Série Océan Atlantique

N°de la carte	Année d'édition	Echelle	Titre de la carte – Zone concernée
1313	1852	?	Du cap Roxo aux îles de Los (transcriptions de cartes anglaises)
1712	1857	?	De la Casamance à la Sierra Léone (transcriptions de cartes anglaises)
1883	1861	?	Carte du fleuve Sénégal, de la Falémé et de la Gambie
2835	1867	?	Côte occidentale d'Afrique des Iles Canaries à la Sierra Léone
3385	1874	?	Côte occidentale d'Afrique du Sénégal au Cap Roxo
	1929	1 / 492 250	Côte occidentale d'Afrique du Sénégal au Cap Roxo
5847	1941	1 / 539 800	Côte ouest d'Afrique du fleuve Sénégal au Cap Roxo
	1953		
5850	1924	1 / 660 000	Côte ouest d'Afrique du cap Blanc à Saint–Louis
5957	1924	1 / 547 000	Côte ouest d'Afrique du Rio Cacheu aux Iles de Los
	1955		Côte ouest d'Afrique du Rio Cacheu aux Iles de Los
5979	1949	1 / 933 590	Côte ouest d'Afrique de Dakar à l'île de Sherbro
	1954	1 / 934 000	Côte ouest d'Afrique de Dakar à l'île de Sherbro
6113	1958	1 / 882 000	Côte ouest d'Afrique du Cap Blanc au Cap Vert
6114	1976	1 / 291 000	Côte ouest d'Afrique du Cap Blanc au Cap Timiris
6115	1957	1 / 294 190	Côte de Mauritanie de Ras Timiris[65] au Marais de Toumbos[66]
	1992	1 / 294 000	Côte de Mauritanie de Ras Timiris au Marais de Toumbos
6116	1957	1 / 298 000	Côte ouest d'Afrique des Marais de Toumbos à Dakar
6125	1962	1 / 301 000	Côte ouest d'Afrique de Dakar au Cap Roxo
7185	1992	1 / 1 000 000	De Cabo Roxo à Moronvia
7388	1997	1 / 340 000	Côte du Sénégal de Saint – Louis au fleuve Saloum
7389	1997	1 / 342 000	Côtes du Sénégal, de Gambie et de Guinée-Bissau du fleuve Saloum à Ilhéu de Caió
7386	1998	1 / 331 000	Côte de Mauritanie de Nouadhibou à Nouakchott
7387	1998	1 / 336 000	Côte de Mauritanie et du Sénégal de Nouakchott à Saint – Louis

[65] Ras Timiris : autre nom du Cap Timiris
[66] Marais de Toumbos : ancien nom du Chott Boul

Annexe 1-B : Cartes locales à grandes et moyennes échelles

Vu que l'origine des données est moins hétérogène et peut-être plus précise dans certains cas que sur les cartes à petite échelle, il nous a paru intéressant de mentionner lorsque cela était possible, les sources de données cartographiées en ce qui concerne la zone côtière uniquement, en particulier la topographie.

N° de la carte	Année d'édition	Echelle	Titre – Zone concernée / Origine des données cartographiées (topographie littorale uniquement)
300	1824	Graphique en milles marins	Plan de la Presqu'île du Cap Vert et Rade de Gorée situées à la côte occidentale d'Afrique. Levé en 1817 par GIVRY, Ingénieur Hydrographe
	1868	Graphique en milles marins	Plan de la Presqu'île du Cap Vert et Rade de Gorée situées à la côte occidentale d'Afrique. Levé en 1817 par GIVRY, Ingénieur Hydrographe
	1908	1 / 30 000	Côte Ouest d'Afrique. Presqu'île du cap Verd, Rade de Dakar. Plan levé en 1817 par GIVRY, Ingénieur Hydrographe
1295	1851	1 / 85 000	Plan du mouillage de Saint-Louis ou de Guet Ndar et de la barre du fleuve du Sénégal (Côte occidentale d'Afrique). Levé en 1842 et complété en 1850 par CH. PHILLIPE DE KERHALLET, capitaine de frégate
	1890	1 / 85 000	Plan du mouillage de Saint-Louis ou de Guet Ndar et de la barre du fleuve du Sénégal (Côte occidentale d'Afrique). Levé en 1842 et complété en 1850 par CH. PHILLIPE DE KERHALLET, capitaine de frégate
1296	1851	?	Cours du fleuve Sénégal depuis Podor jusqu'à son embouchure. Levé en 1849 par CH. PLOIX, Sous-ingénieur Hydrographe
	1867	?	Cours du fleuve Sénégal depuis Podor jusqu'à son embouchure. Levé en 1849 par CH. PLOIX, Sous-ingénieur Hydrographe
2830	1867	?	Côte occidentale d'Afrique. Mouillage et bancs de Joal. Levé en 1863
3019	1867	?	Côte occidentale d'Afrique. Cours de la Casamance de son embouchure à Diannak
2866	1869	?	Côte occidentale d'Afrique. Baie du Lévrier. Levé en 1869
3006	1869	?	Entrée de la Casamance et Mouillage de Carabane. Levé en 1862
3579	1877	?	Côte occidentale d'Afrique. Carte des atterrages du Cap Vert de Cayar au Cap de Naze. Levé en 1875 – 1876 par A. BESSON, lieutenant de vaisseau. La partie comprise entre le Cap Manuel et l'île d'Yof est la reproduction de la carte N°300, levée en 1817 et é ditée en 1824. Le mouillage de Cayar a été emprunté à un croquis de VALLON, capitaine de frégate.
3592	1877	1 / 39 900	Côte occidentale d'Afrique. Carte particulière de la Baie de Gorée. Levé en 1875 – 1876 par A. BESSON, lieutenant de vaisseau. La configuration de l'île de Gorée est extraite de la carte N°300.
	1929		La topographie a été corrigée d'après les photos prises en 1927 par l'escadrille 5 B 2 de l'aviation maritime française
4264	1888	?	Côte occidentale d'Afrique. Baie d'Arguin
4804	1893	?	Fleuve Sénégal et Port de Saint-Louis
4850	1894	?	Côte occidentale d'Afrique. Du Cap Sainte-Anne au Cap Mesurado. Levés anglais exécutés entre 1836 et 1879
4892	1894	?	Côte occidentale d'Afrique. Mouillage de Saint-Louis ou de Guet Ndar et barre du fleuve Sénégal. La topographie provient du levé fait en 1894 par BUCHARD, lieutenant de vaisseau.
	1928	1 / 50 990	Côte ouest d'Afrique. Sénégal. Mouillage de Saint-Louis. Barre du fleuve Sénégal.

			La topographie a été corrigée d'après les photographies prises en 1927 par l'escadrille 5 B 2 de l'aviation maritime française.
4996	1896	?	Rivière Saloum, de l'embouchure à Foundiougne. Levé en 1895 par BUCHARD, lieutenant de vaisseau
4997	1896	?	Côte occidentale d'Afrique. Barre de la rivière Saloum. Levé en 1895 par BUCHARD, lieutenant de vaisseau
5058	1898	?	Côte occidentale d'Afrique. Entrée de la Casamance, mouillage de Carabane
5393	1908	?	Côte ouest d'Afrique. Baie du Lévrier, Presqu'île du Cap Blanc. Levés français et anglais
5436	1910	?	Côte occidentale d'Afrique. Entrée de la Rivière Casamance
5451	1911	1 / 5 000	Afrique. Côte Ouest. Port de Dakar
	1969	1 / 5 000	Afrique. Côte Ouest. Port de Dakar
5473	1912	1 / 20 000	Côte ouest d'Afrique. Mouillage de Dakar
5480	1912	1 / 79 000	Côte ouest d'Afrique. Baie du Lévrier. Levé en 1909 – 1910 par LEBAIL, lieutenant de vaisseau
	1942	1 / 78 800	
5491	1914	1 / 45 000	Côte ouest d'Afrique, Sénégal. Presqu'île du Cap Verd. Plan levé en 1909 – 1910 sous la direction du lieutenant de vaisseau LEBAIL
	1963		Côte ouest d'Afrique, Sénégal. Presqu'île du Cap Verd. Levé exécuté en 1909 – 1910 sous la direction du lieutenant de vaisseau LEBAIL. Cette carte a été complétée à l'est de l'île d'Yof ainsi que dans la région située au sud du Cap Manuel et à l'est du méridien des Mamelles d'après les levés exécutés de 1934 à 1937 sous les directions successives de BONNIN et DE GEFFRIER, lieutenants de vaisseau.
5751	1924	1 / 75 000	Rivière du Saloum, de l'embouchure à Foundiougne ; rivières Djomboss et Bandiala ; estuaire de la Gambie
5842	1924	1 / 20 000	Plan de Rufisque
5993	1959	1 / 17 500	Baie de Cansado-Nouadhibou (Port Etienne)
5998	1924	1 / 15 000	Rade de Dakar
	1953	1 / 15 000	Rade de Dakar
6146	1924	1 / 35 300	Afrique Ouest. Abords sud de Joal
6147	1924	1 / 35 314	Cours du Saloum de l'embouchure à Foundiougne
	1958	1 / 35 300	Cours du Saloum de l'embouchure à Foundiougne
6174	1959	1 / 100 000	Côte ouest d'Afrique de Joal à Barthurst
6297	1924	1 / 35 000	Embouchure de la Casamance
	1960	1 / 35 000	Embouchure de la Casamance
5851	1937	1 / 60 000	Afrique Occidentale Française. Abords de Saint – Louis. Mouillage de Saint-Louis. Levé exécuté en 1934 sous la direction de BONNIN, lieutenant de vaisseau
5852	1939	1 / 50 000	Afrique Occidentale Française. Sénégal. Baie de Gorée. Levé exécuté de 1935 à 1937 par la mission hydrographique d'A.O.F. sous les directions de BONNIN et DE GEFFRIER, lieutenants de vaisseau et de MILLIAU, enseigne de vaisseau. Le levé de la rade de Dakar, de la Presqu'île du Cap Vert et de ses abords immédiats a été effectué en 1909 – 1910 par LEBAIL, lieutenant de vaisseau.
	1946		Sénégal. Baie de Gorée. Levé exécuté de 1935 à 1937 par la mission hydrographique d'A.O.F. sous les directions de BONNIN et DE GEFFRIER, lieutenants de vaisseau et de MILLIAU, enseigne de vaisseau. Le levé de la rade de Dakar, de la Presqu'île du Cap Vert et de ses abords immédiats a été effectué en 1909 – 1910 par LEBAIL, lieutenant de vaisseau.
5996	1956	1 / 99 785	Côte ouest d'Afrique. De Dakar à Mbour. Levés exécutés : - en 1934 – 1937 sous les directions successives de BONNIN et DE GEFFRIER, lieutenants de vaisseau et de MILLIAU, enseigne de

			vaisseau ; - en 1948 sous la direction de BRIE, Ingénieur hydrographe par la mission hydrographique d'A.O.F.
6072	1954	1 / 35 230	Côte Ouest d'Afrique Du cap Rouge à Mbour. Levés exécutés : - en 1936 – 1937 sous les directions successives de BONNIN et DE GEFFRIER, lieutenants de vaisseau et de MILLIAU, enseigne de vaisseau ; - en 1948 sous la direction de BRIE, Ingénieur Hydrographe par la mission hydrographique d'A.O.F.
6073	1953	1 / 35 260	Côte ouest d'Afrique. De Mbour à Joal. Levés exécutés en 1948 – 1949 sous les directions successives de BRIE et MANNEVY, Ingénieurs hydrographes par la mission hydrographique d'A.O.F. Au sud de Senti, la topographie en 1910 par LE BAIL, lieutenant de vaisseau.
	1955		Côte ouest d'Afrique. De Mbour à Joal. Levés exécutés en 1948 – 1949 sous les directions successives de BRIE et MANNEVY, Ingénieurs hydrographes par la mission hydrographique d'A.O.F. Au sud de la pointe Senti, la topographie et les sondes proviennent du levé effectué en 1954 par SAUZAY, Ingénieur hydrographe.
6135	1956	1 / 35 000	Cours de la Casamance, du banc de Ouangaran à la pointe Samis
6136	1956	1 / 35 000	Cours de la Casamance de la Pointe Samis à Ziguinchor
6137	1961	1 / 101 000	Cours de la Casamance de l'embouchure à Ziguinchor
6297	1960	1 / 35 000	Embouchure de la Casamance
7570	1997	1 / 10 000	Rade et port de Dakar
7569	1998	1 / 50 000	Approches de Dakar – Baie de Gorée
7568	1998	1 / 100 000	Côtes de Mauritanie Approches de Nouakchott. Le trait de côte et la topographie proviennent de l'interprétation des données du satellite SPOT de 1995

Annexe 1-C : Cartouches

N°de la carte	Année d'édition	Echelle	Titre – Zone concernée / Origine des données cartographiées (zone côtière uniquement)
3592	1877	1 / 20 000	Mouillage de Rufisque. Levé en 1875 – 1876
1295	1890	1 / 12 000	Mouillage de Saint-Louis. Levé en 1887 par CAZALAS-GAILLON et DE REINACH DE WERTH, enseignes de vaisseau
300	1908	1 / 10 000	Dakar. Plan levé en 1875 par LE CLERC, lieutenant de vaisseau et complété en 1892 par BUCHARD, lieutenant de vaisseau
3385	1929	1 mille marin	Mouillage de Portendick (Sahara). Levé en 1835 par THOYON, lieutenant de vaisseau
		½ mille marin	Mouillage de Benu Mboro. Levé en 1867 par AUBE, Lieutenant de vaisseau
		½ mille marin	Croquis du mouillage de Cayar (Baie d'Yof). Levé en 1867 par VALLON, lieutenant de vaisseau
5847	1941 ; 1948	1 / 100 000	Cayar. Levé effectué en 1934 par BONNIN, lieutenant de vaisseau
6116	1957	1 / 100 000	Cayar. Levé effectué en 1934 par BONNIN, lieutenant de vaisseau
5851	1937	1 / 15 000	Port de Saint-Louis. Levé exécuté en 1934 sous la direction de BONNIN, lieutenant de vaisseau
6115	1957	1 / 75 000	Des mottes d'Angel à Coppolani. Levé entre 1953 – 1955
	1957	1 / 75 000	Mansour. Levé entre 1953 – 1955
	1992	1 / 40 000	A : Abords de Nouakchott. Le trait de côte est issu d'une image SPOT de 1988
		1 / 15 000	B : Port de Nouakchott – Partie nord. Le trait de côte est issu d'une image SPOT de 1988
		1 / 15 000	C : Port de Nouakchott – Partie sud. Le trait de côte est issu d'une image SPOT de 1988
7568	1998	1 / 15 000	Port de Nouakchott – Port de l'Amitié. Le trait de côte provient de l'interprétation par le SHOM des données du satellite SPOT datant de 1995

Annexe 1-D : Minutes de topographie

Les documents sont classés dans la catégorie Levés anciens, Portefeuille 35, section 2 – Division Dakar – Conakry

N°de la Minute	Année d'édition	Echelle	Titre – Zone concernée
35 – 2 – 5	1894 – 1895	?	Mouillage de Rufisque
35 – 2 – 6	1894 – 1895	?	Rivères du Saloum – Djombos – Bandiala
35 – 2 – 10	1897	?	Entrée de la Casamance
35 – 2 – 24²	1909	1 / 10 000	Mouillage de Karabane
35 – 2 – 25²	1909	1 / 10 000	Marigot de Guimbéring
35 – 2 – 45 ^{Bis}	1909 – 1910	?	Mission hydrographique de l'Afrique Occidentale. Presqu'île du Cap Verd
35 – 2 – 47	1930 – 1931	?	Mission hydrographique du Saloum 1930 – 1931. Ecriture de sonde et dessin de topographie. Entrée de la rivière et de la barre
35 – 2 – 53	1930 – 1931	1 / 25 000	Rivière du Saloum. De Lagoba aux îles du Diable. Ecriture et dessin topographique et paysages
35 – 2 – 75	1930	1 / 20 000	Port de Mbour
35 – 2 – 85^{1}	1934 – 1935	1 / 255 064	Mission hydrographique Agadir – Dakar 1934 – 1935. Minute de topographie (14°40' – 17°00' N)
35 – 2 – 85^{2}	1934 – 1935		Mission hydrographique Agadir – Dakar 1934 – 1935. Minute de

		1 / 252 165	topographie (16°50' – 19°10' N)
35 – 2 – 86[2]	1934	1 / 50 837	Mission hydrographique Agadir – Dakar 1934. dessin de topographie. Région de Saint-Louis
35 – 2 – 94[1]	1935 – 1936	1 / 10 000	Mission hydrographique Agadir – Dakar 1934 – 1936. Baie de Gorée. Dessin (de Mbao à Rufisque)
35 – 2 – 94[2]	1935 – 1936	1 / 10 000	Mission hydrographique Agadir – Dakar 1934 – 1936. Baie de Gorée. Dessin (de Rufisque à Siendou)
35 – 2 - 94[3]	1935 – 1936	1 / 10 000	Mission hydrographique Agadir – Dakar 1934 – 1936. Baie de Gorée. Dessin (de Siendou à Niangol)
35 – 2 – 94[4]	1935 – 1936	1 / 10 000	Mission hydrographique Agadir – Dakar 1934 – 1936. Baie de Gorée. Dessin (de Niangol au sud du marigot de Ndiangob au sud de Toubab Dialao)
35 – 2 – 109	1936 – 1937	1 / 20 000	Mission hydrographique Agadir – Dakar 1936 – 1937. Baie de Gorée. Dessin de topographie (de Ndayane à la Somone)
35 – 2 – 145	1944	1 / 20 000	Lac Retba
35 – A – 347	1948	1 / 25 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique 1948. Région de Mbour. Minute définitive (De Somone à Mbour)
35 – A – 348	1948	1 / 10 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique 1948. Région de Mbour. Minute définitive (De Mbour au marigot de Mballing)
35 – A – 349	1948	1 / 25 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique 1948. Région de Mbour. Minute définitive (De Mballing à la Pointe Sarène)
35 – A – 370	1949	1 / 25 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique 1949. Région de Mbour. Minute définitive
35 – C – 392	1949	1 / 25 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique 1949. Région de Sarène – Senti. Minute définitive
35 – E – 452	1950	1 / 20 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique 1950. Embouchure du Saloum. Minute définitive
35 – J – 781	1954	1 / 25 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique. Joal. Minute définitive. Février – mars 1954
35 – J – 782	1954	1 / 25 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique. Sangomar. Minute définitive. Février – mars 1954
35 – K – 901	1955	1 / 19 925	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique. Mansour nord. Février 1955. Minute définitive
35 – K – 902	1955	1 / 19 925	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique. Mansour sud. Février 1955. Minute définitive
35 – M – 1281	1958	1 / 50 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique. Casamance. Minute d'écriture et de topographie. Mois d'avril et mai 1958 (de Diogué au Cap Skirring)
35 – M – 1282	1958	1 / 50 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique. Casamance. Minute d'écriture et de topographie. Mois d'avril et mai 1958 (de la Presqu'île aux Oiseaux aux marigots aux huîtres)
35 – N – 1441	1958 ?	1 / 40 000	Mission hydrographique de la côte ouest d'Afrique. Sénégal. Casamance. De l'île aux Oiseaux à la frontière de Gambie
35 – O – 1549	1961	1 / 50 000	Mission hydrographique de l'Atlantique sud 1961. Mauritanie. Minute de topographie (de l'île Tidra au sud de Nouamghar)
35 – O – 1551	1961	?	Mission hydrographique de l'Atlantique sud 1961. Mauritanie. Minute de topographie (du Cap El Sass à l'île Kiaone)
35 – O – 1552	1961	?	Mission hydrographique de l'Atlantique sud 1961. Mauritanie. Minute de topographie (du Cap El Sass au Cap d'Arguin)
35 – Q – 1669	1961	1 / 25 000	Mission hydrographique de l'Atlantique sud. Mauritanie. (19°12'30'' et 19°20' N)
35 – Q – 1670	1961	?	Mission hydrographique de l'Atlantique sud. Mauritanie. (19°02'30'' et 19°12' N)
35 – Q – 1671	1961	?	Mission hydrographique de l'Atlantique sud. Mauritanie. (18°52'30'' à 19°02'30'' N)

Annexe 2 : Données satellitaires Landsat libre d'accès et concernant les littoraux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau

Annexe 2-A : Images satellitaires Landsat disponibles en téléchargement (www.landsat.org/ortho/index.php, www.landcover.org/data/landsat/ ou ftp://ftp.glf.umiacs.umd.edu/Landsat/)

Satellite / Capteur	Zone couverte	Date d'acquisition	Référence de la scène dans le système de grilles WRS	
			Path	Row
			WRS 1	
Landsat 1 / MSS	Presqu'île du Cap Blanc et baie du Lévrier	09–08–1972	222	45
Landsat 1 / MSS	Du Cap Blanc à Nouadhibou et de la pointe Minou au cap Sainte Anne	09–08–1972	222	46
Landsat 1 / MSS	De la Baie du Lévrier à la Presqu'île de Thila	22–02–1973	221	46
Landsat 1 / MSS	De la Presqu'île de Thila à Nouakchott	22–02–1973	221	47
Landsat 1 / MSS	De Lemcid à Nouakchott	21–02–1973	220	47
Landsat 3 / MSS	De Nouakchott au Chott Boul	26–02–1979	220	48
Landsat 3 / MSS	De Nouakchott au Chott Boul	03–09–1979	220	48
Landsat 3 / MSS	Du Chott Boul à Fass Boye	30–09–1979	220	49
Landsat 3 / MSS	De Fass Boye à Palmarin	17–12–1978	221	50
Landsat 3 / MSS	De Ngaparou au Djomboss (Estuaire du saloum)	23–11–1979	220	50
Landsat 3 / MSS	Du Djomboss au Rio Cacheu	05–11–1979	220	51
Landsat 3 / MSS	Du Rio Cacheu à l'archipel des Bijagos	26–02–1979	220	52
Landsat 3 / MSS	De l'île de Pexice au Rio Cacine	08–12–1979	219	52
			WRS 2	
Landsat 4 / TM	Nord de la Baie du Lévrier : Baie de l'Etoile et Baie de l'Archimède	14–02–1988	206	45
Landsat 5 / TM	De la Baie de l'Etoile au Cap Timiris	02–01–1987	206	46
Landsat 4 / TM	De la Baie de Tanoudert à la Presqu'île de Serenni	10–03–1988	205	46
Landsat 4 / TM	Cap Timiris : du sud de la Presqu'île de Thila aux abords de Mehejrat	01–03–1988	206	47
Landsat 4 / TM	De Jreiffe à Nouakchott	10–03–1988	205	47
Landsat 4 / TM	De Nouakchott au Chott Boul	10–03–1988	205	48
Landsat 5 / TM	Du Chott Boul à Mboro-sur-mer	11–01–1987	205	49
Landsat 4 / TM	De Fass Boye au Djomboss (Estuaire du Saloum)	10–03–1988	205	50
Landsat 5 / TM	Presqu'île du Cap Vert	18–06–1984	206	50
Landsat 5 / TM	Du Djomboss (Estuaire du Saloum) au Rio Cacheu	09–02–1986	205	51
Landsat 4 / TM	Du Rio Cacheu au Rio Cacine	30–11–1988	204	52
Landsat 7 / ETM +	Nord de la baie du Lévrier : Baie de l'Etoile et Baie de l'Archimède	15–12–2000	206	45
Landsat 7 / ETM +	De la Baie du Lévrier au Cap Timiris	18–12–2001	206	46
Landsat 7 / ETM +	Cap Timiris : du sud de la Presqu'île de Thila aux abords de Mehejrat	06–04–2001	206	47

Landsat 7 / ETM +	De la Baie de Tanoudert à la Presqu'île de Serenni	30–05–2000	205	46
Landsat 7 / ETM +	De Jreiffe à Nouakchott	09–01–2001	205	47
Landsat 7 / ETM +	De Nouakchott au Chott Boul	21–08–2001	205	48
Landsat 7 / ETM +	Du Chott Boul à Mboro-sur-mer	04–11–1999	205	49
Landsat 7 / ETM +	De Fass Boye au Djomboss (Estuaire du Saloum)	04–11–1999	205	50
Landsat 7 / ETM +	Presqu'île du Cap Vert	11–11–1999	206	50
Landsat 7 / ETM +	Du Djomboss (Estuaire du Saloum) au Rio Cacheu	06–11–2000	205	51
Landsat 7 / ETM +	De l'embouchure du Rio Cacheu au Rio Cacine	04–12–2001	204	52

Annexe 2-B : Caractéristiques radiométriques et résolutions spatiales des capteurs Landsat

Satellite	**Résolution spectrale** (µm)	**Canal**	**Résolution spatiale** (m)
Landsat 1 – 3	**MSS** Bande 4 : 0,50 – 0,60 Bande 5 : 0,60 – 0,70 Bande 6 : 0,70 – 0,80 Bande 7 : 0,80 – 1,10	Vert Rouge Proche infrarouge Proche infrarouge	79 79 79 79
Landsat 4 – 5	**TM** Bande 1 : 0,45 – 0,52 Bande 2 : 0,52 – 0,60 Bande 3 : 0,63 – 0,69 Bande 4 : 0,76 – 0,90 Bande 5 : 1,55 – 1,75 Bande 6 : 10,4 – 12,5 Bande 7 : 2,08 – 2,35	Bleu Vert Rouge Proche infrarouge Moyen infrarouge Infrarouge thermique Moyen infrarouge	30 30 30 30 30 120 30
Landsat 7	**ETM+** Bande 1 : 0,450 – 0,515 Bande 2 : 0,525 – 0,605 Bande 3 : 0,630 – 0,690 Bande 4 : 0,760 – 0,900 Bande 5 : 1,55 – 1,750 Bande 6 : 10,40 – 12,5 Bande 7 : 2,080 – 2,35	Bleu Vert Rouge Proche infrarouge Moyen infrarouge Infrarouge thermique Moyen infrarouge	30 30 30 30 30 60 30
	Bande 8 : 0,52 – 0,92	Panchromatique	15

Source : Landsat technical guide, Global Land Cover Facility, http://glcf.umiacs.umd.edu/data/guide/technical/techguide_landsat.pdf, modifié

Annexe 3 : Inventaire des missions photographiques couvrant la côte ouest-africaine de la Mauritanie à la Guinée-Bissau

Annexe 3-A : Missions photographiques exécutées par l'aviation maritime française et disponibles aux archives de l'EPSHOM de Brest

Les photographies aériennes sont archivées pour la plupart selon un système de lots numérotés qui facilite leur identification ; mais nous en avons trouvé quelques unes qui n'étaient pas encore répertoriées par le service des archives. Certaines missions existent aussi sous forme d'album (mission photographique Agadir-Dakar, mission CACCIA, mission de février 1936, etc.). Même si l'échelle n'est pas toujours indiquée, les photographies offrent une vue très détaillée des sites, ce qui laisse supposer qu'elles ont été prises à grande échelle du 1/5000 au 1/20 000.

Date	Echelle	Références	Numéro du lot	Zone concernée
Littoral sénégalo-mauritanien				
Février – mars 1927	Variable, en moyenne 11600e	Mission photographique Agadir – Dakar	1927 01 1927 02 1927 03	Du Cap Blanc (Mauritanie) au Saloum (frontière sénégalo-gambienne)
Littoral mauritanien				
19–05 / 13–06–1935	?	Mission escadrille 3.E.3	1935 03	Golfe d'Arguin du Cap Sainte-Anne au Cap Timiris
03–10–52	1 / 10 000	216 / 5 HI	1952 11	Du Cap Timiris à la Presqu'île de Serenni
10–10–1952	?	Mission U / 049	?	De Tiwilit à la Baie d'Achéma
22–10–1952	?	Mission U / 048	?	De la Baie de Tanit à la Baie d'Achéma
17–05–1956	?	?	1956 01	Nouadhibou
20–02–1957	1 / 10 000	Mission N°145	1957 08	Cap Sainte-Anne à la Presqu'île de Serenni
03–10–57	1 / 10 000	?	1957 02	Région du Cap Timiris : du sud de Nouamghar à la Presqu'île de Serenni
16–12–1958	1 / 10 000	Mission N°390	1958 04	Nouadhibou
22–06–1970	1 / 20 000	?		
22–06–1970	1 / 20 000	?	1970 15 1970 16	De Baie de Saint-Jean au cap Iwik (Banc d'Arguin)
15–03–88	1 / 7 100 1 / 5 000	N-027-R-88/DKR/ATL/XK	1988 01	Port et WHARF de Nouakchott
Littoral sénégalais				
Février – mars 1927	?	Mission CACCIA	?	Estuaire du Saloum : de la pointe de Sangomar au Bandiala
Février 1936	1 / 9 000	?	1936 08	De Mbao à Saly Portudal
02–01–52	1 / 10 000	Mission U. 002/23	1952 13	Dakar : Baie de Hann
28–01–1952	1 / 8 000	Mission U. 013	1952 14	Port de Saint-Louis
11–09–1952	?	Mission U. 042	?	Dakar : Baie de Hann
				Du sud de Saint–Louis à

26–05–53	1 / 5 000	Mission U. 020	1953 10	Gandiole
02–12–1953	?	Mission U. 057	1953 09	De la Pointe Senti à la Pointe de Sangomar
06–01–1955	?	?	1955 14	Dakar : Baie de Hann
19–01–1955	?	Mission N°158	1955 14	Port de Dakar
25–02–1955	?	Mission N°162	1955 14	Dakar : Baie de Hann
13–04–1955	?	Mission N°166	1955 14	Dakar : Baie de Hann
27–01–56	?	?	?	Côte de Palmarin Diakhanor à Djinack (frontière sénégalo-gambienne)
02–04–1958	1 / 10 000	Mission N°284	1958 07	Du Cap Roxo à l'île aux Oiseaux
1986	?	06 NR 86 DKR/ALT VI 04/11	?	Port de Saint-Louis
24–06–1959	1 / 2 500	?	?	Presqu'île aux Oiseaux
Littoral Gambien				
18–09–1986	1 / 5 000	BE 71 EMIA/2M/BORD/DR	1986 24	Bara point et port de Banjul
30–09–1986	1 / 5 000	84 EMIA/2/M/BORD/DR	1986 55	Port de Banjul et environs

En plus de ces 28 missions, les archives de l'EPSHOM disposent également de missions de l'IGN concernant la partie orientale de la Baie du Lévrier en Mauritanie :

- de la pointe des Autruches à la pointe des coquilles (date 1955, référence de la mission 1955 NF-28-II, numéro de lot 1954 17) ;
- de la Presqu'île de Serenni au cap Timiris (date 1954, référence de la mission AOF 1954, numéro de lot 1955 25).

Annexe 3-B : Missions de photographies aériennes disponibles à la D.T.G.C. de Dakar et concernant les sites présélectionnés sur la Langue de Barbarie, la Grande Côte, la Petite Côte ainsi que le littoral gambien de Banjul à Saniang Point

Année	Références de la mission	Auteurs	Echelle	Zone concernée
1954	A.O.F. 1954	IGN	1 / 50 000	Tout le territoire sénégalais
1978	78.ND28 – XIII – XV		1 / 60 000	
	78.NE – 28 II – III		1 / 60 000	
1979	79 – ND – 28 XX – XXII		1 / 60 000	
1989	CT.SGN.JICA.MAR89	JICA	1 / 60 000	Le littoral sénégalais entre 16 et 17°W
1980	OMVS SENG1	OMVS – *Teledyne Geotronics*	1 / 50000	Toute la Langue de Barbarie
			1 / 20 000	
			1/ 10 000	
1964	AO 637/250	IGN	1 / 25 000	Ville de Saint-Louis
1995	1995 SEN 097/100		1 / 10 000	Zone de Saint-Louis
2005	2005 – SEN183 – C – 10000		1 / 10 000	Ville de Saint-Louis
1976	76 – SEN 26/150		1 / 15 000	Région de Dakar jusqu'à Yène-sur-mer
1980	80.SEN – 66		1 / 20 000	
1997	1997 – SEN – 129		1 / 20 000	Région de Dakar jusqu'à Yène-Tode
1966	66.AO – 751		1 / 6 000	Ville de Mbour
1971	71.AO – 942		1 / 5 000	
1972	72.SEN – 05		1 / 10 000	

1997	1997. SEN – 142		1 / 20 000	De Sali au sud de Nianing
1982	OMVG	OMVG – *Mark Hurd Aerial Surveys, Inc.*	1 / 50 000	Littoral gambien de Djinack à Saniang Point

Annexe 3-C : Missions de photographies aériennes concernant le littoral de Nouakchott et disponibles auprès de la photothèque nationale de l'IGN à Saint-Mandé.

Année	Références de la mission	Echelle
1954	A.O.F. 1954 – 087	1 / 50 000
	A.O.F. 1954 – 092	
	A.O.F. 1954 – 096	
1963 – 64	A.O. 1963-1964	1 / 12 500
1980	80 – MAU – 4 – 215	1 / 21 500
	80 – MAU – 4 – 125	1 / 12 500
1984	84 – MAU – 11 – 100	1 / 10 000
1991	1991 – MAU – 12 – 150	1 / 15 000

Annexe 4 : Estimation détaillée des marges d'erreur utilisées pour l'analyse régionale et locale

Annexe 4-A : La Langue de Barbarie

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude	Estimation de l'erreur (m)
1979 – 1987	Ligne instantanée de rivage	Taille du pixel MSS, TM	±136
		Variations de la position de la ligne instantanée de rivage générées par les différences de hauteur d'eau	±11,82
		Total (Marge d'erreur)	**±147,82**
1987 – 1999	Ligne instantanée de rivage	Taille des pixels TM et ETM+	±114
		Variations de la position de la ligne instantanée de rivage générées par les différences de hauteur d'eau	±3,15
		Total (Marge d'erreur)	**±117,15**
1979 – 1999	Ligne instantanée de rivage	Taille du pixel MSS, TM et MSS	±193
		Variations de la position de la ligne instantanée de rivage générées par les différences de hauteur d'eau	±14,97
		Total général (Marge d'erreur globale)	**±207,97**

Annexe 4-B : Pointe de la flèche de Joal et îles sableuses au large de Joal

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude	Estimation de l'erreur (m)
1978 – 1988	Limite de végétation	Taille du pixel MSS, TM	**±136**
1988 – 1999	Limite de végétation	Taille des pixels TM et ETM+	**±114**
1978 – 1999	Limite de végétation	Taille du pixel MSS, TM et MSS	**±193**

Annexe 4-C : Flèches et systèmes estuariens du Saloum au Rio Cacheu

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude	Estimation de l'erreur (m)
1979 – 1986	Limite de végétation	Taille du pixel MSS et recalage de l'image p220/r51	±136
		Taille du pixel TM	±57
		Total (Marge d'erreur)	**±193**
1986 – 2000	Limite de végétation	Taille des pixels TM et ETM+	**±114**
1979 – 2000	Limite de végétation	Taille des pixels TM et ETM+	±114
		Taille du pixel MSS et recalage de l'image p220/r51	±136
		Total général (Marge d'erreur globale)	**±250**

Annexe 4-D : Flèches et systèmes estuariens du sud du Rio Cacheu au Rio Cacine

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude	Estimation de l'erreur (m)
1979 – 1988	Limite de végétation	Taille du pixel MSS et recalage de l'image p219/r52	±136
		Taille du pixel TM	±57
		Total (Marge d'erreur)	**±193**
1988 – 2001	Limite de végétation	Taille des pixels TM et ETM+	**±114**
1979 – 2001	Limite de végétation	Taille du pixel MSS et recalage de l'image	±136
		Taille des pixels TM et ETM+	±114
		Total général (Marge d'erreur globale)	**±250**

Annexe 4-E : Les cartes utilisées sur la Langue de Barbarie

Numéro de la carte	Année d'édition et de levé	Site concerné	Ligne de référence	Source d'incertitude	Estimation de l'erreur (m)
4892	1895, levée en 1894	Saint–Louis	*«Laisse de haute mer»*	Epaisseur du trait	±12,74
				Géoréférencement des couches	±0,39
	1928, mise à jour en 1927			Epaisseur du trait	12,74
				Géoréférencement des couches	±1,04
				Total (Marge d'erreur)	**±26,91**
3592	1877, levée en 1875 –1876	Bargny à Yène-sur-mer	Zéro hydrographique	Epaisseur du trait	±9,97
				Géoréférencement des couches	±2,18
5852	1939, levée en 1935 – 1936			Epaisseur du trait	±12,5
				Géoréférencement des couches	±3,92
				Total (Marge d'erreur)	**±28,57**

Annexe 4-F : Nouakchott

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude		Estimation de l'erreur (m)
1927 – 1954	Pied de dune	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,8
		Numérisation du pied de dune	1927	±1,53
			1954	±3,56
		Total (Marge d'erreur)		**±10,89**
1954 – 1980	Pied de dune	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,8
		Numérisation du pied de dune	1954	±3,56
			1980	±2,63
		Total (Marge d'erreur)		**±11,99**
1927 – 1980	Pied de dune	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±2,7
		Numérisation du pied de dune	1927	±1,53
			1954	±3,56
			1980	±2,63
		Total général (Marge d'erreur globale)		**±14,42**
1927 – 1980	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,8
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1927	±2,03
			1980	±3,57
		Variations de la position de la ligne de pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes		±14
		Total (Marge d'erreur)		**±25,4**
1980 – 1991	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,8
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1980	±3,57
			1991	±2,02
		Variations de la position de la ligne de		

		pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes		±14
		Total (Marge d'erreur)		**±25,39**
1991 – 2005	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,8
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1991	±2,02
			2005	±2,21
		Variations de la position de la ligne de pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes		±14
		Total (Marge d'erreur)		**±24,03**
1927 – 2005	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±3,6
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1927	±2,03
			1980	±3,57
			1991	±2,02
			2005	±2,21
		Variations de la position de la ligne de pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes		±42
		Total général (Marge d'erreur globale)		**±59,43**

Annexe 4-G : Ndiago

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude		Estimation de l'erreur (m)
1927 – 1980	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,6
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1927	±1,94
			1980	±1,76
		Variations de la position de la ligne de pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes		±8,65
		Total général (Marge d'erreur globale)		**±17,95**

Annexe 4-H : Saint-Louis

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude		Estimation de l'erreur(m)
1927 – 1964	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,2
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1927	±1,6
			1964	±2,86
		Variations de la position de la ligne de pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes		±19,24
		Total (Marge d'erreur)		**±28,90**
1964 – 1980	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,2
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1964	±2,86
			1980	±3,57
		Variations de la position de la ligne de pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes		±9,04
		Total (Marge d'erreur)		**±20,67**

1980 – 1995	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,2
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1980	±3,57
			1995	±1,6
		Variations de la position de la ligne de pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes		±4,08
		Total (Marge d'erreur)		**±14,45**
1995 – 2005	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,6
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1995	±1,6
			2005	±1,26
		Variations de la position de la ligne de pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes		±4,08
		Total (Marge d'erreur)		**±12,54**
1927 – 2005	Ligne de pleines mers	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±3
		Numérisation de la ligne de pleines mers	1927	±1,6
			1964	±2,86
			1980	±3,57
			1995	±1,6
			2005	±1,26
		Variations de la position de la ligne de pleines mers induites par les oscillations du niveau des marées hautes	1927 – 1964	±19,24
			1964 – 1980	±9,04
			1980 – 1995	±4,08
			1995 – 2005	±4,08
		Total général (Marge d'erreur globale)		**±54,33**

Annexe 4-I : Bargny à Yène-sur-mer

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude		Estimation de l'erreur (m)
1927 – 1954	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,4
		Numérisation de la limite de végétation	1927	±1,66
			1954	±1,76
		Total (Marge d'erreur)		**±8,82**
1954 – 1976	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation (1954) et/ou des maisons (1976)	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,4
		Numérisation de la limite de végétation	1954	±1,76
			1976	±1,41
		Total (Marge d'erreur)		**±8,57**
1976 – 1997	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation et/ou des maisons (1976, 1997)	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±1,4
		Numérisation de la limite de végétation	1976	±1,41
			1997	±1,61
		Total (Marge d'erreur)		**±8,42**
1927 – 1997	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation (1927, 1954) et/ou	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±2,8
		Numérisation de la limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation (1927,	1927	±1,66
			1954	±1,76

	des maisons (1976, 1997)	1954) et/ou des maisons (1976, 1997)	1976	±1,41
			1997	±1,61
		Total général (Marge d'erreur globale)		**±13,24**

Annexe 4-J : Mbour à Pointe Sarène

Période d'étude	Ligne de référence	Source d'incertitude		Estimation de l'erreur (m)
1954 – 1978	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±2
		Numérisation de la limite de végétation	1954	±2,33
			1978	±2,68
		Total (Marge d'erreur)		**±11,01**
1978 – 1997	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation (1978) et/ou des maisons (1997)	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±2
		Numérisation de la limite de végétation (1978) et/ou des maisons (1997)	1978	±2,68
			1997	±2,05
		Total (Marge d'erreur)		**±10,73**
1954 – 1997	Limite supérieure de la plage assimilée à la limite de végétation (1954, 1978) et/ou des maisons (1997)	Récepteur GPS		±4
		Calage des images		±3
		Numérisation de la limite de végétation (1954, 1978) et/ou des maisons (1997)	1954	±2,33
			1978	±2,68
			1997	±2,05
		Total général (Marge d'erreur globale)		**±14,06**

TABLE DES MATIERES

Remerciements 5
Sommaire 7

INTRODUCTION GENERALE 9

Première partie : IDENTIFICATION ET SUIVI DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE : ETAT ACTUEL DE LA QUESTION DANS LE MONDE ET EN AFRIQUE DE L'OUEST 13

Chapitre I : DEFINITIONS, DETECTION ET MOBILITE DU TRAIT DE CÔTE 15
I – LES LIGNES DE REFERENCE UTILISEES EN GEOMORPHOLOGIE LITTORALE 16
1 – Les lignes de référence géomorphologiques 16
2 – Les lignes de référence botaniques 18
3 – Les lignes instantanées de rivage et les limites d'humectation 20
4 – Les datums marégraphiques 22
5 – Les lignes de référence virtuelles 23
6 – L'étendue de la plage (*Beach width*) 24
7 – Les lignes de tempête *(Storm-surge penetration line, overwash penetration boundary)* 25
II – LES METHODES D'EXTRACTION DU TRAIT DE CÔTE 29
1 – Les méthodes manuelles d'extraction du trait de côte 30
2 – Techniques semi-automatiques d'extraction de lignes de référence 32
2.1 – La ligne instantanée de rivage 32
2 .1 1 – … Sur les images optiques 32
2.1.1.1 – Le seuillage 32
2.1.1.2 – Les classifications 33
2.1.1.3 – Autres exemples d'algorithmes d'extraction de la ligne instantanée de rivage sur des images de télédétection passive 33
2 .1.2 – … Sur les images radars 35
2 .1.3 – … Sur les images vidéographiques 35
2.2 – La ligne du niveau moyen des pleines ou basses mers 37
2.3 – La limite de végétation 40
2.4 – Les contours de la plage et les lignes dérivées 40
3 – Extraction de lignes de référence sur le terrain 44
III – LES METHODES DE DETECTION DES VARIATIONS DE LA POSITION DU TRAIT DE CÔTE 45
1 – Les approches directes 45
2 – Les méthodes indirectes 46
2.1. – Mesures à partir de points d'appui sur des photographies aériennes analogiques ou des cartes anciennes 46
2.2 – Le système de grilles orthogonales *(Orthogonal Grid Address System, OGAS ; Orthogonal Grid Mapping System, OGMS)* 47
2.3 – Les méthodes photogrammétriques 47
2.4 – Les systèmes d'information géographique (SIG) 48
IV – METHODES STATISTIQUES DE CALCUL DE LA MOBILITE DU TRAIT DE CÔTE 49
Conclusion du chapitre I 51

Chapitre II : EVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE EN AFRIQUE DE L'OUEST : ETAT DE LA QUESTION DE LA MAURITANIE A LA GUINEE-BISSAU 52
I – LES ETUDES REGIONALES 53
II – LES ETUDES LOCALES 56

Conclusion du chapitre II 72

Conclusion de la première partie 73

Deuxième partie : CINEMATIQUE DES LITTORAUX SABLEUX D'AFRIQUE DE L'OUEST : ANALYSE REGIONALE DE LA MAURITANIE A LA GUINEE-BISSAU 75

Chapitre I : LES DONNEES DISPONIBLES, METHODES DE TRAITEMENT ET LIMITES METHODOLOGIQUES 77

I – LES DONNEES DISPONIBLES 77

1 – Les cartes marines du SHOM 77

2 – Les images satellitaires Landsat 82

II – LE TRAITEMENT DES DONNEES 85

1 – Les indicateurs sélectionnés pour le référencement du trait de côte sur les images satellitaires 85

2 – Le traitement des images satellitaires Landsat 86

2.1 – Le recalage des images MSS 86

2.2 – Le choix des canaux et l'étalonnage radiométrique des données Landsat 87

2.3 – L'extraction des lignes de référence sur l'imagerie satellitaire Landsat 89

III – LES LIMITES METHODOLOGIQUES : SOURCES D'INCERTITUDE AFFECTANT LES LIGNES DE REFERENCE ISSUES DES IMAGES SATELLITAIRES ET DES CARTES A PETITE ECHELLE 92

1 – L'imprécision due à la résolution spatiale des capteurs et au recalage des images MSS 92

2 – Les erreurs liées aux variations des niveaux instantanés de marée sur les images Landsat concernant la Langue de Barbarie 93

3 – Les incertitudes liées à la précision des documents cartographiques utilisés 95

Conclusion du Chapitre I 97

Chapitre II : LES ASPECTS MORPHOLOGIQUES DU TRAIT DE CÔTE EN AFRIQUE DE L'OUEST : DU CAP BLANC (MAURITANIE) AU RIO CACINE (GUINEE-BISSAU) 99

I – LES CÔTES ROCHEUSES A FALAISES 100

1– Les falaises taillées dans les formations sédimentaires 100

2 – Les falaises à matériaux volcaniques de la Presqu'île du Cap Vert 102

II – LES CÔTES VASEUSES 103

1 – Les côtes à sebkhas 103

2 – Les littoraux à mangrove 104

III – LES CÔTES SABLEUSES 105

1 – Les plages bordées de cordons dunaires 106

1.1 – Les plages associées à des dunes continentales ogoliennes 106

1.2 – Les plages bordées de cordons dunaires post-nouakchottiens 107

1.2.1 – Les plages associées à des cordons dunaires isolant des dépressions de type sebkhas 107

1.2.2 – Les plages associées à des cordons dunaires isolant des dépressions de type niayes 109

1.2.3 – Les plages associées à des cordons littoraux isolant des marigots côtiers 111

1.2.4 – Les plages associées à des dunes littorales semi-fixées 112

1.2.5 – Les plages associées à des cordons sableux isolant des vasières à mangrove 113

1.2.6 – Les flèches sableuses 114

2 – Les plages de poche et les plages adossées à des falaises 117

IV – SYNHESE 118
V – CHOIX ET PRESENTATION DES SITES PRESELECTIONNES POUR LE SUIVI DE LA POSITION DU TRAIT DE COTE A L'ECHELLE LOCALE 122
1 – Sites présélectionnés du Cap Timiris a la presqu'île du Cap Vert 122
1.1 – Les abords de Nouakchott (Mauritanie) 122
1.2 – La Grande Côte de Mboro-sur-mer à Fass Boye (Sénégal) 122
1.3 – La Langue de Barbarie de Ndiago à Saint-Louis (frontière sénégalo-mauritanienne) 123
2 – Les sites présélectionnés sur la Petite Côte 123
2.1 – La côte de Bargny à Yène-sur-mer (Sénégal) 123
2.2 – Le littoral de Mbour à la Pointe Sarène (Sénégal) 124
3 – Sites présélectionnés du Saloum au Rio Cacine 124
3.1 – La flèche de Banjul (Gambie) 124
3.2 – La *«Tourism Development Area»* (Gambie) 124
3.3 – Le secteur au nord de Varéla (Guinée-Bissau) 124
Conclusion du chapitre II 125

Chapitre III : CINEMATIQUE DES LITTORAUX SABLEUX DE LA MAURITANIE A LA GUINEE-BISSAU : ANALYSE REGIONALE 127
I – LES MODIFICATIONS DU TRACE DE LA LIGNE DE RIVAGE SUR LES EDITIONS DE 1874 ET DE 1929 DE LA CARTE MARINE N°3385 DU SHOM 127
II – LE SUIVI DE LA CINEMATIQUE DES FLECHES SABLEUSES PAR COMPARAISON DES IMAGES LANDSAT 127
1 – La Langue de Barbarie 129
2 – La flèche de Joal 130
3 – L'estuaire du Saloum 131
4 – Les flèches de l'embouchure de la Gambie entre Toll Point et le Cap Saint-Mary 132
5 – La flèche de Bald Cape 133
6 – La flèche de Saniang Point 133
7 – La flèche Kartrung Point 133
8 – La presqu'île aux Oiseaux et l'embouchure de la Casamance 134
9 – Les flèches et les extrémités libres des cordons littoraux du Cap Roxo à l'embouchure du Rio Cacheu 135
11 – Les cordons sableux sur la façade occidentale de l'île de Pexice 137
12 – La flèche d'Acapa et l'île d'Adonga dans l'archipel des Bijagos 137
13 – La façade maritime entre le Rio Cumbija et le Rio Cacine 138
Conclusion du chapitre III 139

Conclusion de la deuxième partie 141

Troisième partie : CINEMATIQUE DES LITTORAUX SABLEUX D'AFRIQUE DE L'OUEST : ANALYSE LOCALE A PARTIR DE SITES SELECTIONNES EN MAURITANIE ET AU SENEGAL 145

Chapitre I : LES DONNEES DISPONIBLES A L'ECHELLE LOCALE 147
I – LES CARTES MARINES DU SHOM 147
II – LES PHOTOGRAPHIES AERIENNES DU SHOM ET DE L'IGN 151
Conclusion du Chapitre I 156

Chapitre II : APPROCHE METHODOLOGIQUE MISE EN ŒUVRE POUR L'ETUDE DE LA CINEMATIQUE DU TRAIT DE CÔTE DANS LES SITES ETUDIES 157
I – LES INDICATEURS SELECTIONNES POUR LE REFERENCEMENT DU TRAIT DE CÔTE 157
1 – … Sur les documents cartographiques du SHOM 157
2 – … Sur les images aériennes 159
II – LE TRAITEMENT DES DONNEES CARTOGRAPHIQUES ET DES IMAGES AERIENNES 163
1 – Les cartes du SHOM 163
2 – Les images aériennes 164
2.1 – La rectification des images 165
2.2 – La photo-interprétation et la numérisation des lignes de référence 168
Conclusion du chapitre II 170

Chapitre III : INCERTITUDES, ESTIMATION DES ERREURS ET OUTIL DE MESURE DE LA CINEMATIQUE DU TRAIT DE CÔTE 171
I – LES SOURCES D'INCERTITUDE AFFECTANT LES LIGNES DE REFERENCE EXTRAITES DES CARTES MARINES 171
1 – Les incertitudes liées à la précision des documents cartographiques utilisés 171
2 – Les erreurs dues à la digitalisation et au géoréférencement des lignes de référence 175
II – LES SOURCES D'INCERTITUDE AFFECTANT LES LIGNES DE REFERENCE PROVENANT DES IMAGES AERIENNES 177
1 – Les erreurs liées à la collecte des amers sur le terrain 177
2 – Les erreurs liées au géoréférencement des images aériennes 179
3 – Erreurs liées à la numérisation des lignes de référence 184
4 – Erreurs liées aux oscillations du niveau de pleines mers 194
5 – Synthèse des erreurs et définition de la marge d'erreur globale 196
III – OUTIL DE MESURE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE 196
Conclusion du chapitre III 199

Chapitre IV : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET ANTHROPIQUES ACTUELLES DES SITES SELECTIONNES 202
I – LES ABORDS DE NOUAKCHOTT 202
1 – Caractéristiques physiques actuelles 202
2 – Caractéristiques anthropiques 207
II – LA LANGUE DE BARBARIE DE NDIAGO A SAINT-LOUIS 209
1 – Caractéristiques physiques actuelles 209
2 – Caractéristiques anthropiques 214
III – LE SECTEUR DE BARGNY NGOUDOU A YENE-SUR-MER 215
1 – Caractéristiques physiques actuelles 215
2 – Caractéristiques anthropiques 220
IV – LA CÔTE DE MBOUR A LA POINTE SARENE 221
1 – Caractéristiques physiques actuelles 221
2 – Caractéristiques anthropiques 225
Conclusion du Chapitre IV 227

Chapitre V : ANALYSE LOCALE DE LA CINEMATIQUE DES LITTORAUX DE NOUAKCHOTT, NDIAGO, SAINT-LOUIS, BARGNY – YENE-SUR-MER ET MBOUR – POINTE SARENE 228
I – NOUAKCHOTT 228
1 – Evolution de la position du pied de dune entre 1927, 1954 et 1980 228
2 – Evolution de la position de la ligne de pleines mers de 1927 à 2005 230
II – NDIAGO 233

III – SAINT-LOUIS 236
1 – Evolution de la position de la *«laisse de haute mer»* de 1894 à 1927 d'après la carte marine N°4892 du SHOM 236
2 – Evolution de la position de la ligne de pleines mers par photo-interprétation entre 1927, 1964, 1980, 1995 et 2005 236
IV – BARGNY NGOUDOU – YENE-SUR-MER 240
1 – Evolution de la position du zéro hydrographique de 1875-1876 à 1935-1936 d'après les cartes marines N°3592 et 5852 du SHOM 241
2 – Evolution de la position de la limite supérieure de la plage par photo-interprétation entre 1927, 1954, 1976 et 1997 241
V – MBOUR – POINTE SARENE 245
Conclusion du chapitre V 250

Conclusion de la troisième partie 254

CONCLUSION GENERALE 261

Références bibliographiques 267
Liste des figures 291
Liste des photos 293
Liste des tableaux 295
Annexes 297
Annexe 1 : Cartes marines et minutes topographiques du SHOM concernant le littoral ouest-africain de la Mauritanie à la Guinée-Bissau, données disponibles aux archives de l'EPSHOM à Brest 299
Annexe 2 : Données satellitaires Landsat libre d'accès et concernant les littoraux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau 305
Annexe 3 : Inventaire des missions photographiques couvrant la côte ouest-africaine de la Mauritanie à la Guinée-Bissau 307
Annexe 4 : Estimation détaillée des marges d'erreur utilisées pour l'analyse régionale et locale 310