

Sommaire

Remerciements	i
Sommaire	iii
Liste des abréviations / acronymes.....	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Liste des cartes	xi
Introduction	1
PARTIE I. GENERALITES	2
Chapitre I. LA GEOMORPHOLOGIE COTIERE	2
Chapitre II. LA TELEDETECTION ET SIG	10
Chapitre III. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'IDENTIFICATION ET SUIVIE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE.....	26
PARTIE II. ANALYSE CINEMATIQUE DU LITTORAL DE MORONDAVA	73
Chapitre I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	73
Chapitre II. PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES	86
Chapitre III. INDICATEURS SELECTIONNES POUR LE REFERENCEMENT DU TRAIT DE CÔTE	89
Chapitre IV. TRAITEMENT DE DONNEES	91
Chapitre V. PRESENTATIONS DES RESULTATS ET DISCUSSIONS	94
PARTIE III. PROPOSITION DE STRATEGIE DE GESTION INTEGREE DU TRAIT DE COTE VERS LA RELOCALISATION DES ACTIVITES ET DES BIENS	122
CHAPITRE I-PRINCIPES COMMUNS	122
CHAPITRE II-RECOMMANDATIONS STRATEGIQUES	123
CHAPITRE III-PROGRAMMES D'ACTIONS	124
Conclusion générale	128

Bibliographie	130
Liens internet.....	134
Annexe	135

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES 

Liste des abréviations / acronymes

ACP	: Analyse Composant Principal
AML	: ArcInfoMacro Language
ACP	: Analyse Composant Principal
ASAP	: Automated Shoreline Analysis Program
BD	: Base de Données
BIRD	: Banque internationale pour la reconstruction et le développement
CCD	: Color Channel Divergence
CEG	: Collège Enseignement Général
CU	: Commune Urbaine
DAO	: Dessin Assisté par Ordinateur
DGPS	: Differential Global Positioning System
DSAS	: Digital Shoreline Analysis System
DSMS	: Digital Shoreline Mapping System
EOS-Terra	: Earth Observing System Terra
EPF	: Etablissements publics fonciers
EPP	: Ecole Primaire Public
ESPA	: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
ETM	: Enhance Thematic Mapper
ETM+	: Enhance Thematic Mapper Plus
FTM	: Foiben'ny Taosarintanin'i Madagasikara
GIZC	: Gestion Intégré de la Zone Côtière
INSAT	: Institut National de Statistique
IOGA	: Institut observation Géophysique d'Antananarivo
ISODATA	: Iterative Self-Organizing Data Analysis Techniques
JIRAMA	: Jiro sy Rano Malagasy
MSS	: Multispectral Scanner
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
OGAS	: Orthogonal Grid Address System
OGMS	: Orthogonal Grid Mapping System
PAPI	: Programmes d'Actions de Prévention des Inondations

PLU	: Plan local d'urbanisme
PPR	: Plan de prévention des risques
PSR	: Plan Submersions Rapides
RN	: Route National
RSO	: Radar à synthèse d'ouverture
SAR	: Synthetic Aperture Radar
ERS	: European Remote-Sensing Satellite
SAVI	: Soil Adjusted Vegetation Index
SCOT	: Schéma de cohérence territoriale
SEAS-OI	: Surveillance de l'Environnement Assistée par Satellites dans l'Océan Indien
SGBD	: Système de Gestion de Base de Données
SHOM	: Service hydrographique et océanographique de la marine
SIG	: Système d'Information Géographique
SIRANALA	: Siramamy d'Analaina
SPOT	: Système Probatoire d'Observation de la Terre ou Satellite Pour l'Observation de la Terre
SUCOMA	: Sucrerie Complant de Madagascar
TM	: Thematic Mapper
TM+	: Thematic Mapper Plus
UE	: Union Européenne
USA	: United State of America
Z.C.I.T	: Zone de Convergence Intertropicale

Liste des figures

Figure 1.	Mouvement des particules dans les vagues, d'après Derrau, 1974, modifié.....	3
Figure 2.	Réfraction des vagues sur un fond marin irrégulier, d'après Bloom, 1998, modifié	4
Figure 3.	Passage progressif entre les vagues à longueur d'onde constante (vagues d'oscillation) et vagues déferlantes (vagues de transition)	4
Figure 4.	Courant de débris	5
Figure 5.	Orbite des particules dans l'onde de marée, d'après Derrau, 1974.....	6
Figure 6.	Les stages de formation des plates-formes d'abrasion.....	8
Figure 7.	Plages à courbure en forme de demi-cœur	9
Figure 8.	Les différentes étapes de la télédétection	10
Figure 9.	Détection passive.....	12
Figure 10.	Détection active.....	13
Figure 11.	Le spectre électromagnétique.....	14
Figure 12.	Satellite l'orbite et sa fauchée (Source : mrn.gouv.qc.ca)	16
Figure 13.	Spectral réflectance (http://en.wikipedia.org/wiki/Reflectivity)	19
Figure 14.	Les composants d'un SIG (Source: http://www.techniques-ingénieur.fr)	22
Figure 15.	Fonctionnalité d'un SIG	23
Figure 16.	Profil schématique d'une côte sableuse et terminologie anglo-saxonne équivalente d'après SHEPARD (1973) In BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR (2002).	27
Figure 17.	Littoraux dunaires	28
Figure 18.	Littoraux à falaises / Plages adossés	29
Figure 19.	Littoraux artificialisés	30
Figure 20.	Plages	31
Figure 21.	Représentation schématique de la limite de végétation dunaire et pérenne (Source : BOAK et TURNER, 2005 ; modifié).....	32
Figure 22.	Limites d'humectation et ligne instantanée de rivage	34

Figure 23. Disposition schématique de quelques datums utilisés comme référence sur un profil de plage.....	37
Figure 24. Aspect de la ligne d'intensité lumineuse maximum sur une image vidéographique moyennée d'après PLANT et HOLMAN (1997).....	38
Figure 25. 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)	39
Figure 26. Représentation schématique de la limite de pénétration d'over Wash dans une île barrière (HAYDEN et al., 1979b; modifié).....	40
Figure 27. 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)	47
Figure 28. 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).....	47
Figure 29. 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)..	50
Figure 30. Extraction de la ligne d'intensité lumineuse maximum par le modèle SLIM d'après PLANT et al., (2007).....	53
Figure 31. Détection de la ligne de rivage par le modèle CCD (Color Channel Divergence) d'après PLANT et al. (2007).....	54
Figure 32. 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).....	56
Figure 33. Extraction de la position de la ligne des pleines moyennes par une régression linéaire	56
Figure 34. 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)	57
Figure 35. Les pieux bétons supportant la balise nord étaient mis à nu par l'érosion du littoral et les crues. Photo en 1996	80

Figure 36.	La balise de l'épi nord en 1991	81
Figure 37.	Le somptueux épi s'incline devant la reine mer.....	81
Figure 38.	Le bâtiment principal de l'hôpital en 2000	82
Figure 39.	Exemples des clichés des photos aériennes négatives, Source : F.T.M.....	86
Figure 40.	Ortho photo Morondava et ses environs, Source : F.T.M.....	87
Figure 41.	Extrait d'une image satellitaire (Spot 5) sur Morondava	88
Figure 42.	Aperçu de la ligne instantanée de rivage, Limite de la zone de saturation d'eau, Lignes de pleines mers, pied de dune.....	89
Figure 43.	Mosaïque des clichés sous Raster Stitch.....	92
Figure 44.	Proposition de légende pour le trait de côte représenté à plusieurs dates (Faye et al. ; 2012)	94
Figure 45.	Traits des côtes, transects et Baseline dans ArcGIS.....	99
Figure 46.	Buffer du trait de côte en 2030.....	119
Figure 47.	Zone menacée par l'érosion en 2030.....	121

Liste des tableaux

Tableau I.	Les longueurs d'ondes les plus utilisées en télédétection sont indiquées sur le tableau suivant.....	14
Tableau II.	Les longueurs d'ondes visibles à l'œil nues.....	15
Tableau III.	Exemples de lignes de référence relevées dans la littérature (Bibliographie non exhaustive)	41
Tableau IV.	Synthèse bibliographique non exhaustive des méthodes d'extraction semi-automatiques de lignes de référence.....	59
Tableau V.	Température moyenne mensuelle/station - Morondava (Période 1961/1990) ...	76
Tableau VI.	Pluviométrie moyenne mensuelle/Station Morondava: Période 1961 - 1990....	77
Tableau VII.	Volumes de dépôts et d'érosion 1973 - 2001	106
Tableau VIII.	Volumes de dépôts et d'érosion 2001 - 2006	109
Tableau IX.	Volumes de dépôts et d'érosion 2006 - 2008	112
Tableau X.	Calcul de coordonnées des points de polygonale de base	116
Tableau XI.	Taille du phénomène en 2030	121

Liste des cartes

Carte 1.	Localisation de la zone d'étude	74
Carte 2.	Evolution du trait de côte entre 1992-2003	95
Carte 3.	Evolution du trait de côte entre 2003-2013	96
Carte 4.	Evolution du trait de côte entre 1992 - 2013	97
Carte 5.	Evolution du trait de côte entre 1992-2003-2013.....	98
Carte 7.	Cinématique du trait de côte 1992 – 2003 – 2013 avec transects	100
Carte 8.	Evolution du trait de côte entre 1992-2003	102
Carte 9.	Evolution du trait de côte entre 2003-2013	103
Carte 10.	Evolution du trait de côte entre 1992-2013	104
Carte 11.	Evolution du trait de côte 1992-2003 - 2013.....	105
Carte 12.	Evolution du fonds marins entre 1973 – 2001	107
Carte 13.	Evolution des isobathes 0 et +3 entre 1973 et 2001	108
Carte 14.	Evolution du fonds marin entre 2001 - 2006.....	110
Carte 15.	Evolution des isobathes 0 et +3 entre 2001 - 2006	111
Carte 16.	Evolution du fonds marin entre 2006 - 2008.....	113
Carte 17.	Evolution des isobathes 0 et +3 entre 2006 et 2008	114
Carte 18.	Trait de côte levé sur terrain et par Spot 5 année 2013	117
Carte 19.	Position du trait de côte en 2030	120

Introduction

Dans le cadre de gestion intégrée de zone côtière (GIZC) à Madagascar et s'appuyant sur les travaux de la Commission sur l'Environnement Côtier de l'Union Géographique Internationale, BIRD,1985 (Banque internationale pour la reconstruction et le développement) estimait que le processus de recul du trait de côte affectait à l'époque plus de 70 % des plages de la planète.

Avec l'élévation actuelle et future du niveau de la mer, ces problèmes d'érosion devraient s'aggraver surtout sur les côtes sableuses déjà en recul comme le cas du Morondava qui a détruit beaucoup nombres des infrastructures tant que public et privé (Habitation et route) comme ailleurs dans d'autres régions côtières de la grande île ou dans le monde.

L'importance socio-économique et écologique de la zone côtière 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, nous avons choisi ce thème qui s'intitule : «**CARTOGRAPHIE DU TRAIT DE CÔTE ET SES IMPLICATIONS POUR LA GESTION DE LA ZONE COTIERE.**»

L'objectif est de cartographier les traits de côte pour mettre en évidence et de mesurer l'ampleur du phénomène d'érosion et d'accumulation en fin de mieux gérer.

L'évaluation des variations spatio-temporelles de la position du trait de côte 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. Stratégie globale succincte.

Ce mémoire s'organise en trois parties.

La première partie, consacrée aux généralités sur la géomorphologie côtière, sur la télédétection et SIG. Une synthèse bibliographique sur l'identification et suivi de l'évolution du trait de côte qui 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.

La seconde partie traite l'analyse cinématique du littoral de Morondava. Elle est structurée par une présentation de la zone d'étude et des données, suivie par les sélections des indicateurs pour le référencement du trait de côte. Ensuite, les traitements des données, présentation des résultats, discussion et enfin, élaboration de simulation du trait de côte de 2030.

La troisième dernière partie est vouée sur la proposition des stratégies de gestion de la zone côtière.

PARTIE I. GENERALITES

Chapitre I. LA GEOMORPHOLOGIE COTIERE

I. EROSION LITTORAL

Le contact entre l'océan et le continent ne correspond pas à une ligne fixe mais en réalité à une surface, composée de trois zones :

- L'estran : espace compris entre le niveau des plus hautes et des plus basses mers
- Une partie du littoral, au-dessus de la marée haute, directement influencée par l'action des eaux marines : falaises et espaces atteints par les embruns
- Une partie toujours immergée liée au travail sous-marin des vagues qui se brisent

De plus, la côte n'est pas fixe, elle correspond à une position momentanée de la ligne de rivage au gré des transgressions et régressions successives qui peuvent avoir laissé les traces d'une position ancienne.

II. LES AGENTS DE L'EROSION LITTORAL

II.1. Les vagues

Une vague poussée par le vent est appelée vague forcée ; on appelle houle, la succession de vagues initiées par le vent mais se propageant en dehors de l'espace où il souffle (Derrau, 1974). La taille et la période des vagues dépendent de la force du vent, de sa durée et de la dimension du plan d'eau sur lequel il souffle. Elles résultent d'un mouvement ondulatoire où chaque molécule d'eau est animée d'un mouvement orbitaire et subit un faible courant appelé courant de houle ; on a un déplacement des particules dans le sens de déplacement de la houle appelé décrochement ; en effet, le mouvement d'avancée est un peu plus ample que celui de retrait.

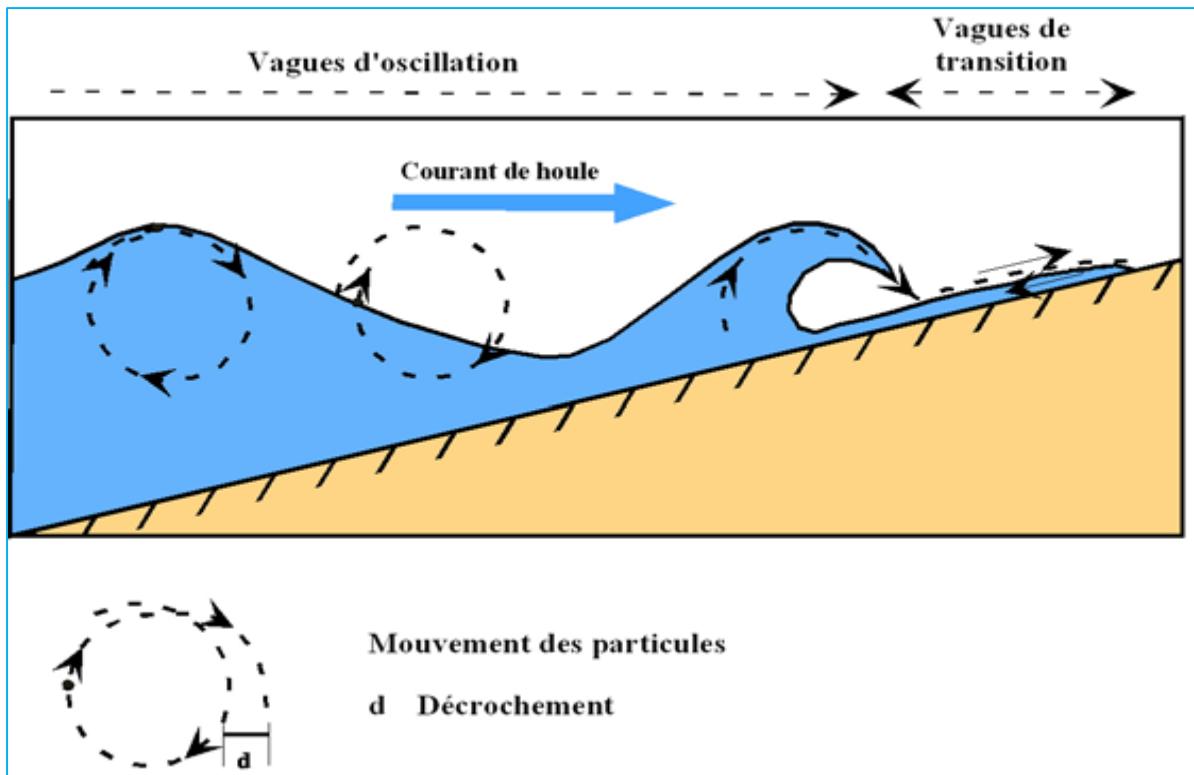


Figure 1. Mouvement des particules dans les vagues, d'après Derrau, 1974, modifié

Chaque particule effectue un mouvement orbital quasi-circulaire dont le diamètre décroît rapidement avec la profondeur, en relation avec la longueur d'onde de la vague (Bloom, 1998).

A l'approche de la côte, quand la profondeur d'eau diminue, les vagues subissent des modifications ; dès que la profondeur est inférieure à la demi-distance entre deux vagues, elles interagissent avec le fond ; elles se réfractent pour devenir presque parallèles aux isobathes et atteindre la côte perpendiculairement. Ainsi, à l'avant des caps, les vagues sont freinées, se réfractent et convergent vers celui-ci ; en revanche, à l'entrée des baies, les vagues sont moins vigoureusement freinées et divergentes.

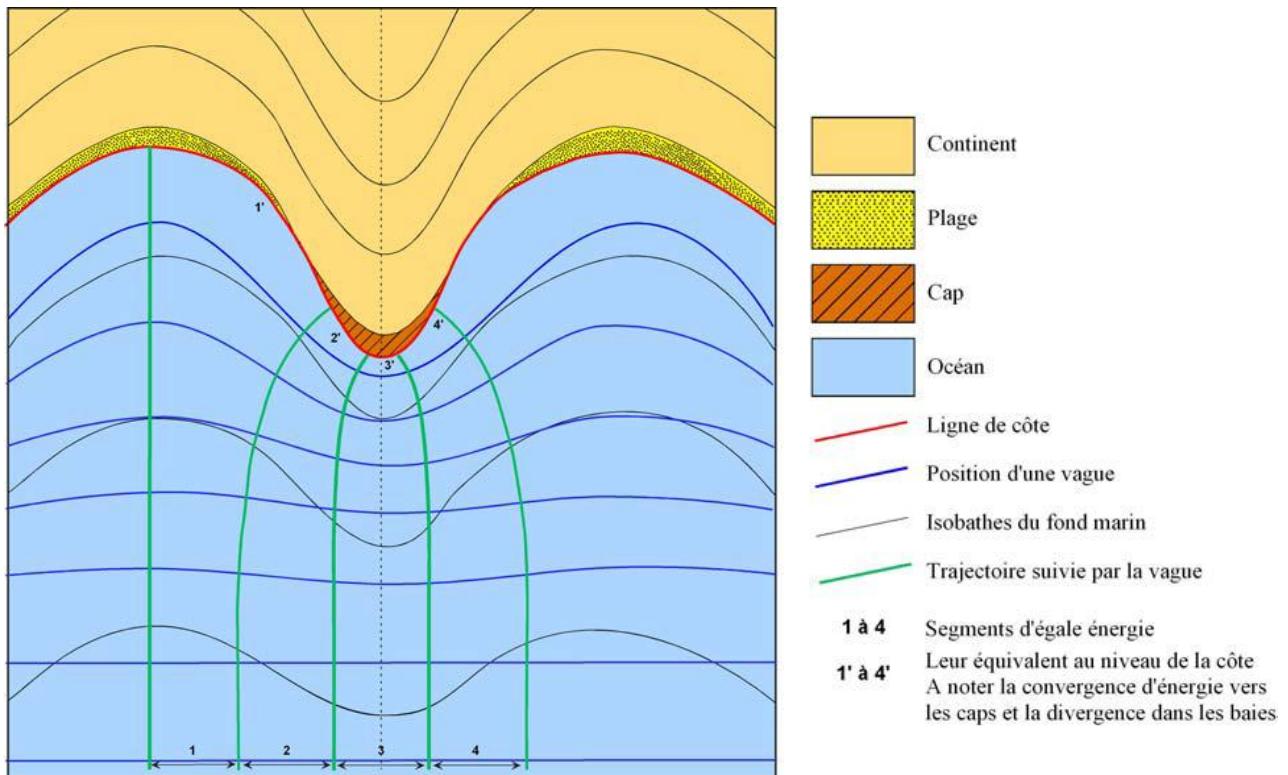


Figure 2. Réfraction des vagues sur un fond marin irrégulier, d'après Bloom, 1998, modifié

L'énergie concentrée au niveau des caps est largement supérieure à celle arrivant au niveau des baies, ceci explique pourquoi les caps sont soumis à l'érosion et pourquoi on a dépôt de sédiments dans les baies. En même temps, les vagues subissent des transformations de formes ; la base des vagues est davantage freinée que le sommet jusqu'à atteindre un décrochement trop fort du cercle de houle (la distance entre deux vagues diminue et la hauteur des vagues augmente) et les vagues déferlent.

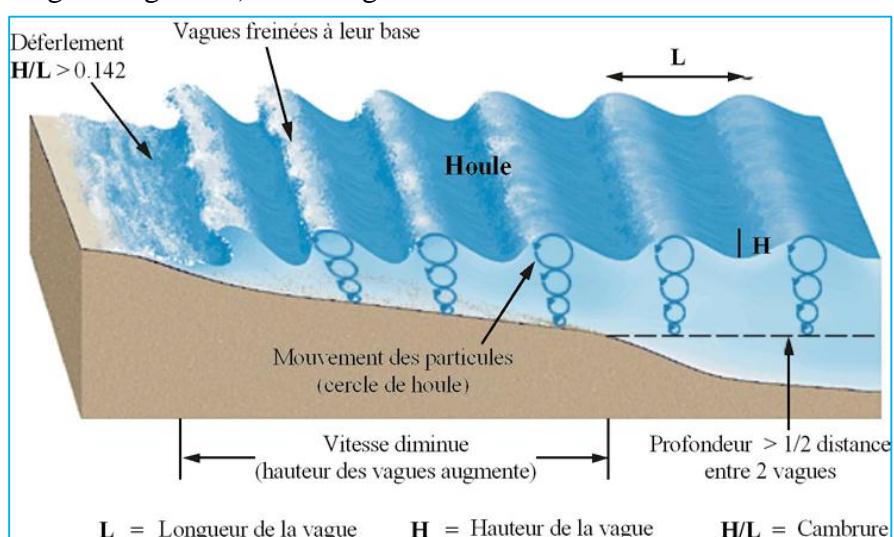


Figure 3. Passage progressif entre les vagues à longueur d'onde constante (vagues d'oscillation) et vagues déferlantes (vagues de transition)

Ces vagues déferlantes exercent une action importante de pression, par apport d'éléments solides sur le rivage, et de succion lors de leur retrait. Des vagues d'oscillation, on passe à des vagues de translation.

Enfin, l'action des vagues sur le fond avant le déferlement est mal connue mais on admet qu'elle est nulle au-dessus d'une profondeur équivalente à 5 fois la hauteur de la vague, en général, elle n'excède pas la dizaine de mètre de profondeur

II.2. Les courants

Deux types de courant influencent le modèle littoral : les courants de débris et les courants de marée.

➤ Les courants de débris

Malgré la réfraction, qui atténue l'obliquité de la houle par rapport à la côte, les vagues ne frappent pas perpendiculairement le rivage et engendrent un courant appelé courant de débris. Le retrait des vagues se faisant perpendiculairement à la côte, les débris sont poussés par chaque vague et suivent une trajectoire en zigzag dont la résultante est un transport parallèle à la côte. Comme, en un même point, toutes les vagues n'arrivent pas à la côte suivant la même direction, c'est par rapport aux plus grosses vagues que s'oriente le courant de débris (Derrau, 1974).

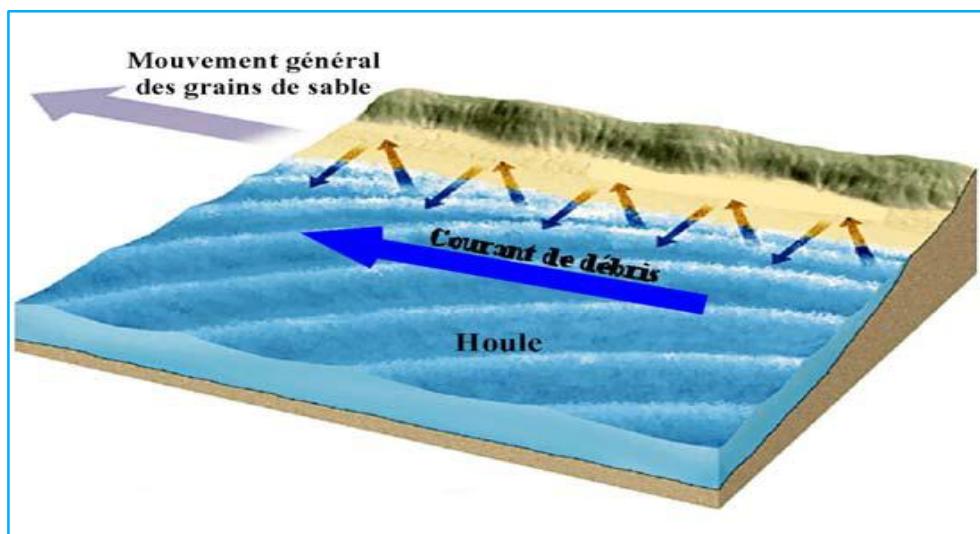


Figure 4. Courant de débris

➤ Les courants de marée

La marée est une onde qui possède aussi bien des caractères de vague oscillatoire que de vague de translation. L'orbite effectuée par chaque molécule est proche d'une ellipse de grand axe oblique (Figure 5). Les particules subissent alors non seulement une fluctuation de niveau mais aussi un déplacement dans le sens horizontal. Le courant est le plus souvent la résultante de la différence de niveau entre deux points et résulte de la gravité (Derrau, 1974). L'essentiel de l'énergie des marées est dissipé sur les plateaux continentaux.

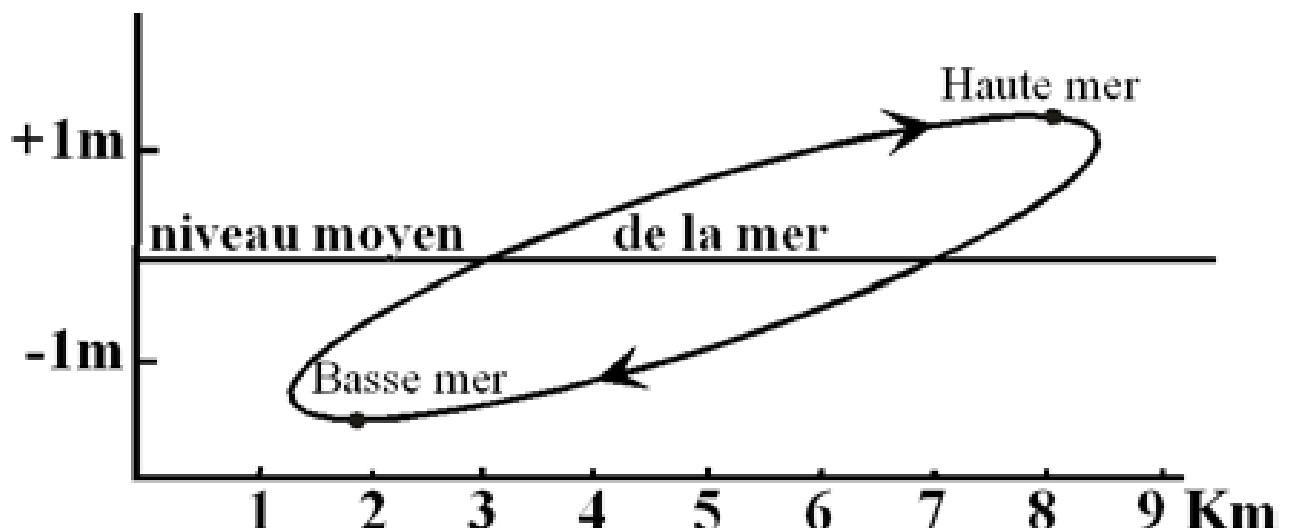


Figure 5. Orbite des particules dans l'onde de marée, d'après Derrau, 1974

II.3. Les vents

Il est à l'origine des vagues et peut élever, par grande tempête et dépression barométrique, le plan d'eau de la mer. Il peut aussi soulever le sable des plages et édifier des dunes littorales

II.4. Le ruissellement et le glissement

Les falaises en partie dénuées de végétation, en raison de la salinité de l'air, et par suite de leur forte pente ravivée par l'action des vagues, sont la proie aux ruissellements et glissements par paquets. Ceci montre que le sapement des vagues n'est pas le seul agent du modelé des falaises.

II.5. La dissolution

La dissolution des roches des falaises se fait par les embruns au-dessus du niveau de la haute mer.

II.6. Les actions biologiques

Les êtres vivants agissent directement en :

- construisant des récifs
- amortissant les vagues
- perforant les roches
- ingérant des sables
- disjoignant les roches par action mécanique dans les diaclases

III. LES FORMES DU RIVAGE : FALAISE ET PLAGE

Les deux formes se rencontrent sur une côte, selon que le résultat du travail de la mer soit une érosion (falaise) ou une accumulation (plage).

III.1. La falaise et la plate-forme rocheuse

- **La falaise** est un ressaut « non couvert de végétation, en forte pente (entre environ 15° et la verticale ou le surplomb), de hauteur variable, au contact de la terre et de la mer, et qui est dû à l'action ou à la présence marine » (A. Guilcher).

L'action des vagues, comme expliquée précédemment, entaille et détermine l'éboulement par pans des roches de la côte, fragilisées par les embruns ; le recul de la falaise ne se fait donc que s'il existe un rudiment de plage à la base pour favoriser le déferlement des vagues. Elles approfondissent l'entaille et la plate-forme côtière s'élargit ; les sédiments arrachés sont entraînés le long de la plate-forme pour former ainsi une plate-forme d'abrasion. Celle-ci s'étend vers le large jusqu'à ce que tous les débris soient érodés en sédiments fins, dissous ou hors d'atteinte du mouvement des vagues. Pour une plate-forme ayant une pente de 1°, on obtiendra, avec une limite d'action des vagues de 10 m de profondeur, une largeur de plate-forme de 500 m tout au plus ; ainsi, les plates-formes plus larges que 500 m ne peuvent pas résulter d'une abrasion marine à niveau marin constant (Bradley, 1958). L'altération des roches par les embruns semble être un processus dominant dans la formation des plates-formes d'abrasion et ainsi, celles-ci pouvant se former jusqu'à 3-4 m au-dessus du niveau de la mer (Wentworth, 1938 ; Bryan et Stephens, 1993 ; Figure 6).

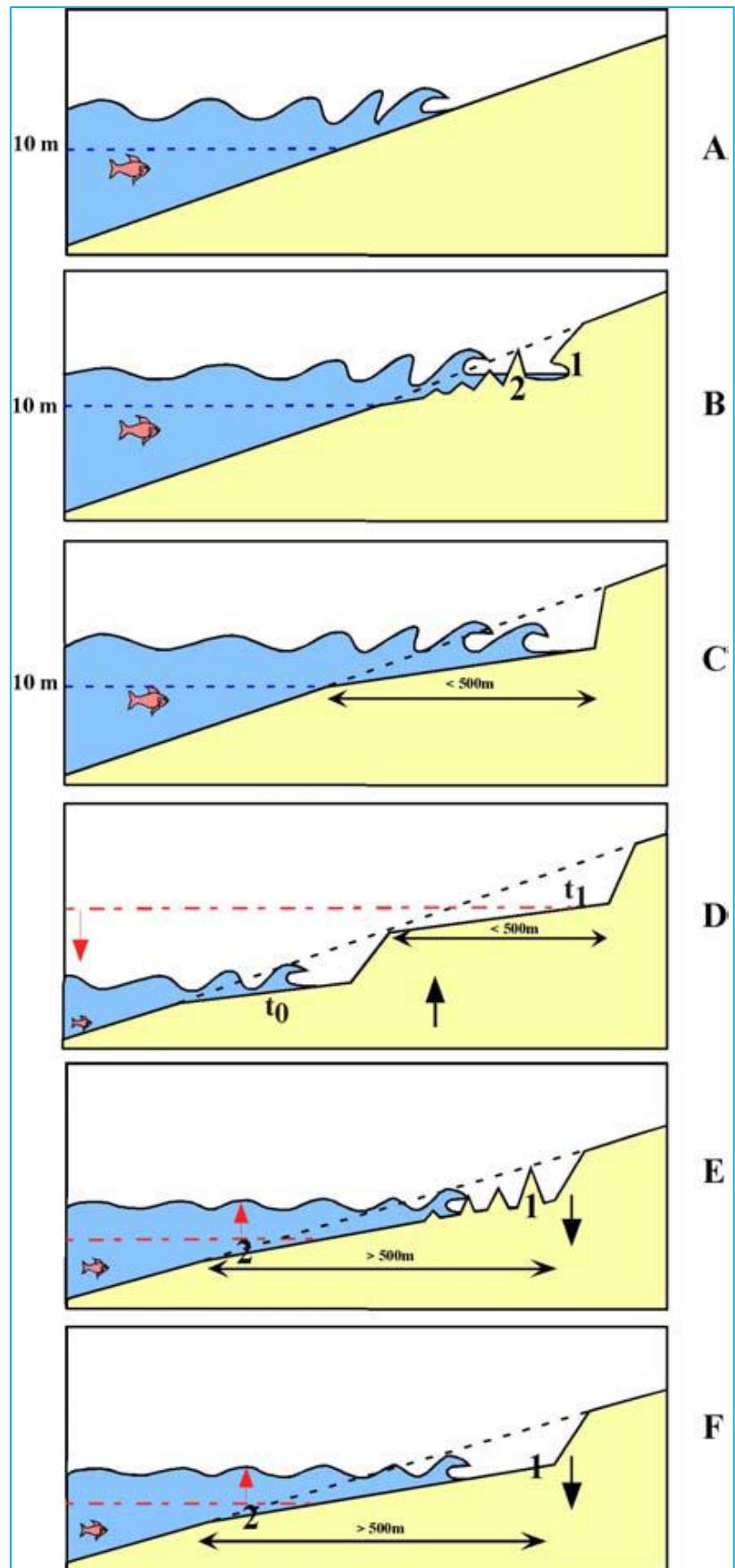
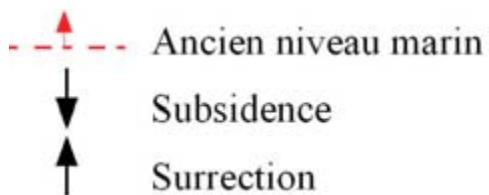


Figure 6. Les stades de formation des plates-formes d'abrasion

- A : Stade initial – Côte avant érosion par les vagues
- B : Début de formation de la plate-forme d'abrasion – 1 : entaille de la falaise – 2 : Erosion différentielle ; il reste des chicots plus durs, moins facilement érodables.
- C : Plate-forme d'abrasion ayant une pente de 1° et large au maximum de 500m
- D : Chute brutale du niveau marin ou surrection brutale du continent – Formation de deux plates-formes d'abrasion (pente de 1° - largeur maximale de 500m) à t1 et t0 ; t1 plus ancien que t0
- E et F : Haute progressive du niveau marin ou subsidence progressive du continent – Formation d'une plate-forme d'abrasion plus large que 500 m – La partie supérieure de la plate-forme (1) est plus récente que la partie inférieure (2) – E : Erosion différentielle de la plate-forme après transgression – F : Stade final



➤ Une plage, est une accumulation, de matériaux comprenant des blocs, des galets, des graviers, des sables et des éléments plus fins (Derrau, 1974). Le profil de la plage s'établit très rapidement, en équilibre avec les conditions climatiques momentanées. Le long d'une côte présentant alternativement des caps et des plages, et, avec une arrivée oblique des vagues, on observe une courbure en forme de demi-cœur des plages, le rayon de courbure de la plage étant minimum juste après chacun des caps Figure 7). Les plages apparaissent donc préférentiellement dans les zones abritées des courants principaux

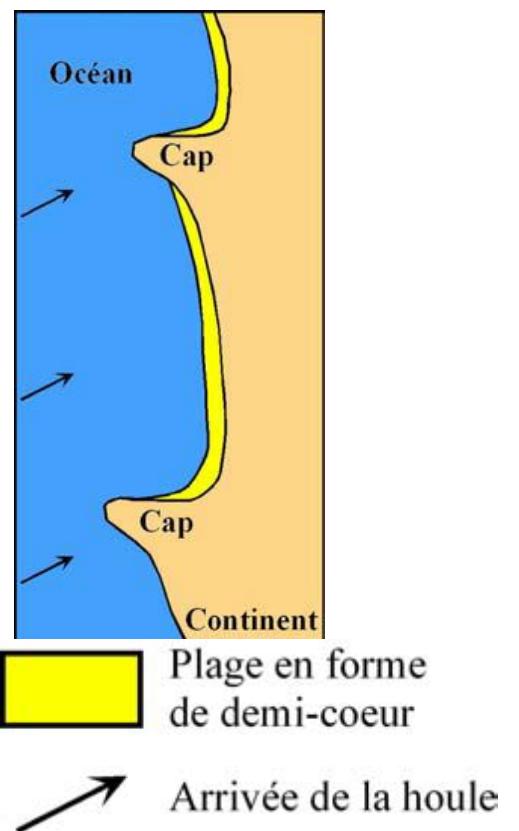


Figure 7. Plages à courbure en forme de demi-cœur

Chapitre II. LA TELEDETECTION ET SIG

II.1. PRESENTATION DE LA TELEDETECTION

II.1.1. Définition

La télédétection permet de capter et d'enregistrer l'énergie émise ou réfléchie puis de traiter, d'analyser et de mettre en application cette information. »

La télédétection est aussi « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci », (Journal Officiel de la République Française du 17-04-97).

La télédétection est aussi « la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté » (Bonn et Rochon, 1992).

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre le rayonnement incident et les cibles visées. Le processus de télédétection au moyen de systèmes imageurs comprend les sept étapes présentées ci-dessous. Cependant, la télédétection comprend également la détection de l'énergie émise et l'utilisation de capteurs non-imageurs.

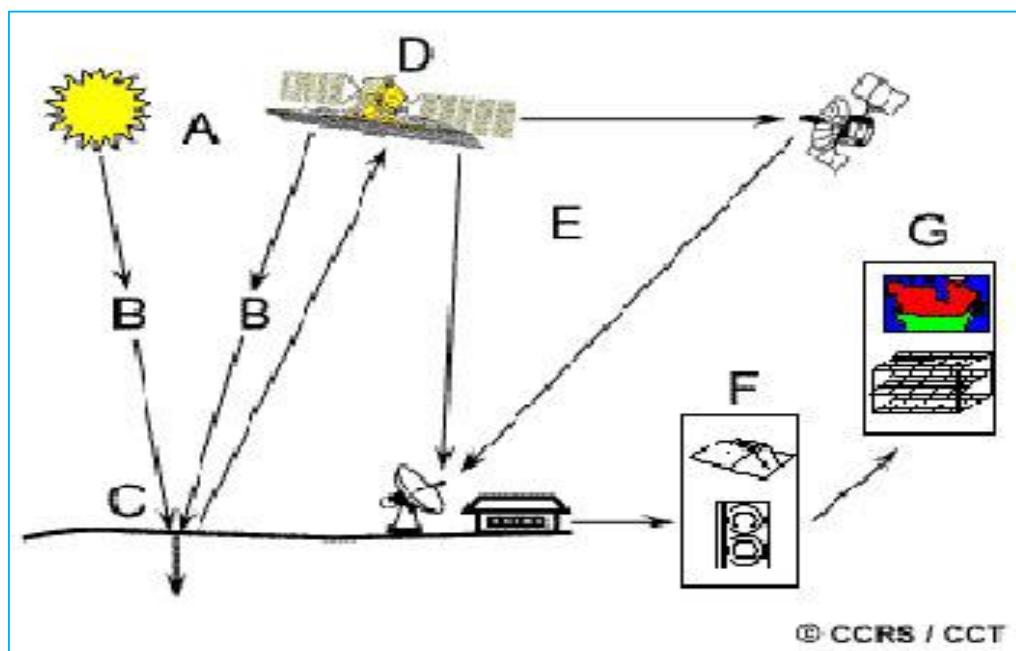


Figure 8. Les différentes étapes de la télédétection

La source d'énergie ou l'éclairement (A) – À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie qui éclaire la cible visée ou lui fournit de l'énergie électromagnétique.

Le rayonnement et l'atmosphère (B) – Lors du parcours de l'énergie entre sa source et la cible, elle entre en contact et interagit avec l'atmosphère qu'elle traverse. Une seconde interaction peut se produire lors du trajet de l'énergie entre la cible et le capteur.

L'interaction avec la cible (C) – Une fois parvenue à la cible, après avoir traversé l'atmosphère, l'énergie interagit avec la cible selon les caractéristiques du rayonnement et les propriétés de la cible.

L'enregistrement de l'énergie par le capteur (D) – L'énergie diffusée ou émise par la cible doit se rendre à un capteur (qui n'est pas en contact avec la cible) qui reçoit et enregistre le rayonnement électromagnétique.

La transmission, la réception et le traitement (E) – L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent sous forme électronique, à une station de réception où les données sont transformées en images (numériques ou photographiques).

L'interprétation et l'analyse (F) – L'image traitée est interprétée visuellement, numériquement, ou encore, électroniquement afin d'extraire l'information souhaitée au sujet de la cible.

L'application (G) – La dernière étape du processus de télédétection consiste à utiliser l'information extraite de l'imagerie pour mieux comprendre la cible, en découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

On distingue deux méthodes de télédétection :

- **La télédétection active** qui fournit sa propre source de rayonnement électromagnétique.
Son capteur muni d'un dispositif artificiel peut produire des rayonnements pour éclairer la cible.
- **La télédétection passive** qui utilise le rayonnement solaire pour éclairer les objets détectés.

Le soleil constitue une source d'énergie très pratique pour la télédétection. L'énergie du soleil est soit réfléchie, comme dans la partie visible des longueurs d'onde, ou absorbée puis retransmise, comme dans la portion infrarouge thermique des longueurs d'onde. On appelle « capteurs passifs » les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie naturellement disponible. Les capteurs passifs peuvent servir à détecter l'énergie uniquement lorsqu'elle est

disponible naturellement. L'énergie réfléchie ne peut donc être perçue que lorsque le Soleil éclaire la Terre. L'énergie réfléchie dégagée par le Soleil n'est pas disponible pendant la nuit. Par contre, pourvu qu'elle soit suffisante, l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être enregistrée le jour ou la nuit.

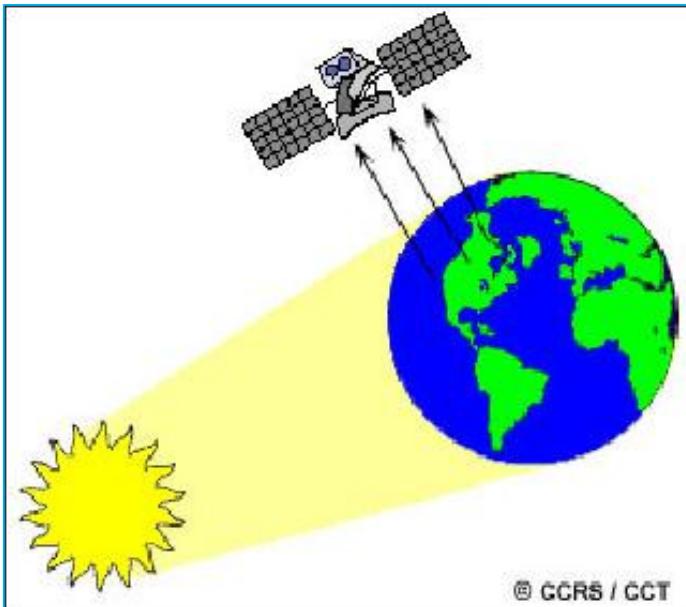


Figure 9. Détection passive

Les capteurs actifs sont ceux qui produisent leur propre énergie pour éclairer la cible. Le capteur émet un rayonnement dirigé vers la cible observée, puis il capte et mesure le rayonnement réfléchi par la cible. Il offre donc l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Les capteurs actifs sont utilisés pour examiner les longueurs d'onde qui ne sont pas produites par le soleil, par exemple les hyperfréquences, ou pour mieux contrôler la façon dont une cible est éclairée. Ils doivent cependant produire une quantité considérable d'énergie pour bien éclairer une cible. Le fluoro mètre laser et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.

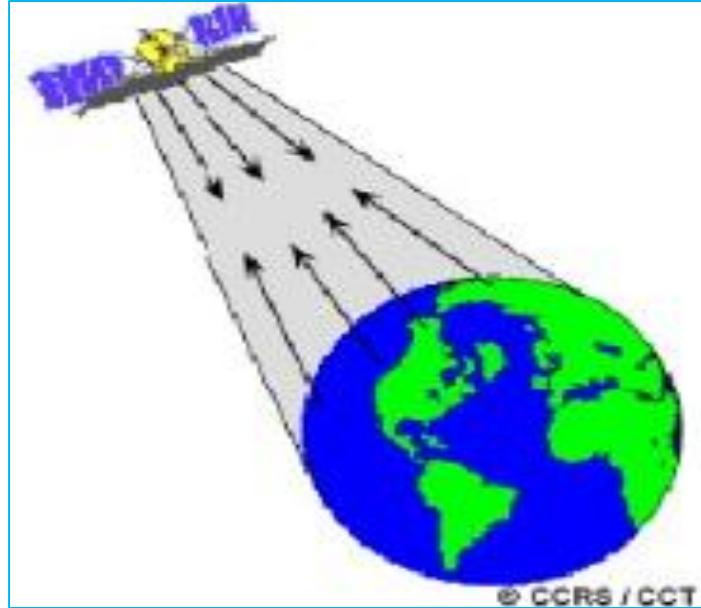


Figure 10. Détection active

II.1.2. Principes physiques de la télédétection

Le captage d'énergie d'un rayonnement électromagnétique

La télédétection a pour principe de capter l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par une cible, l'enregistrer, le traiter et l'analyser. Le rayonnement électromagnétique se définit comme un spectre continu allant des rayons cosmiques (10-13 nm) aux ondes radioélectriques (1013 nm). L'œil humain ne peut voir qu'une plage limitée du spectre.

Les satellites, en revanche, peuvent enregistrer le visible, l'infrarouge, ainsi qu'une large plage d'autres longueurs d'ondes.

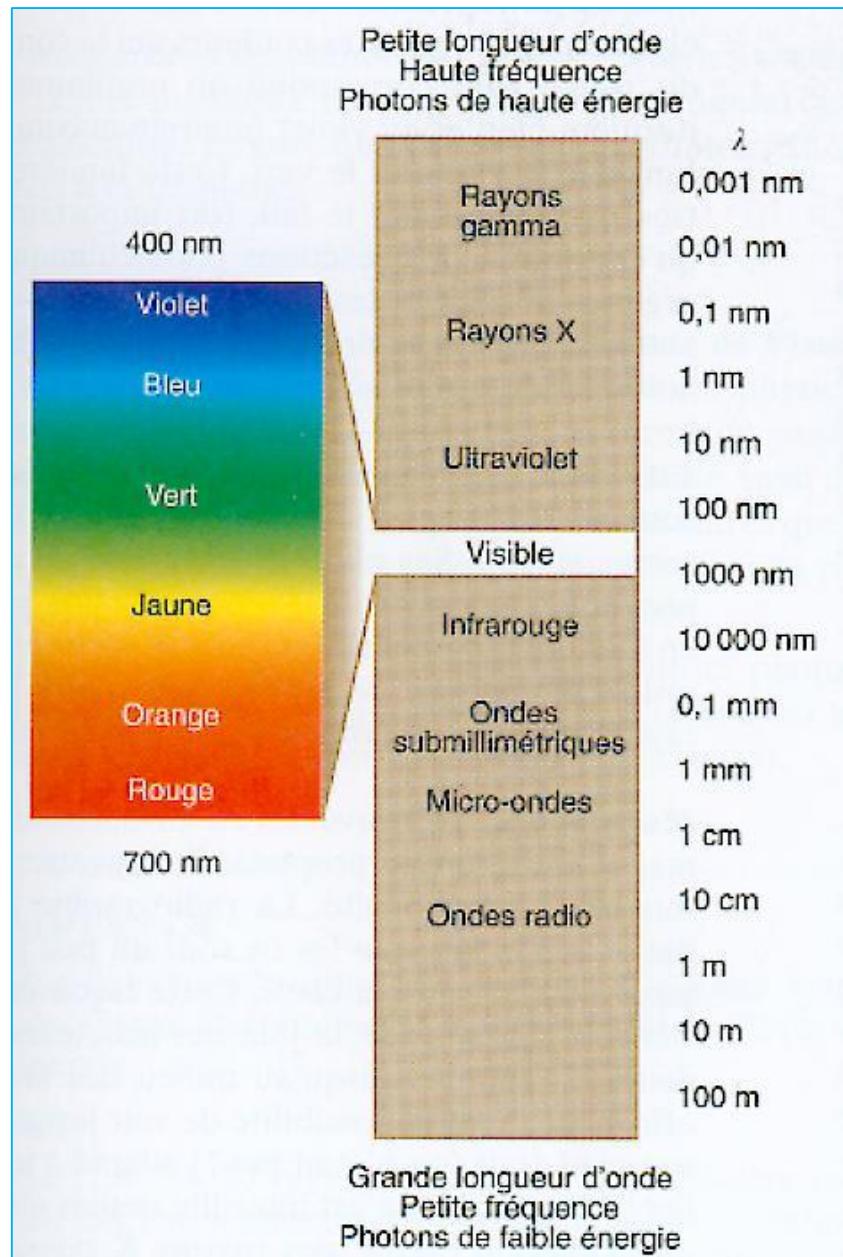


Figure 11. Le spectre électromagnétique

Tableau I. Les longueurs d'ondes les plus utilisées en télédétection sont indiquées sur le tableau suivant

Bandes	Fenêtres
Visible	400 à 700 nm
Proche infrarouge	700 à 1100 nm
Infrarouge moyen	Vers 3000 et 5000 nm
Infrarouge lointain	8500 et 13000 nm

Les concepts de lumière et de vision sont tellement liés entre eux dans l'usage courant que l'idée de "lumière invisible" semble à première vue contradictoire. Pourtant, la découverte que la lumière est un phénomène physique plus vaste que ce que l'œil humain peut détecter constitue une des étapes les plus importantes de l'histoire de l'astronomie. La lumière visible n'est qu'une petite partie de ce qu'on appelle aujourd'hui le spectre électromagnétique.

Pour comprendre cette notion, faisons un petit saut en arrière. Tout d'abord, il faut connaître la nature de la lumière. Pour Newton elle était une particule mais Thomas Young démontra par de multiples expériences au début du XIXe siècle que la lumière réagissait comme une onde et calcula ainsi sa longueur d'onde qui est d'environ 500nm, rendant compte de ce fait de tous les phénomènes connus à l'époque. Cette théorie fut remise en cause au tournant du XXe siècle, lorsque de nouvelles expériences montrèrent que, dans certaines situations, la lumière se comportait bel et bien comme un faisceau de particules.

Aujourd'hui, l'explication de la nature de la lumière relève d'une théorie (mécanique quantique) pour laquelle elle est à la fois une onde et une particule ; c'est pourquoi on parle de la dualité onde-particule.

Une fois que l'on eut réalisé que la lumière possédait une longueur d'onde, on se rendit compte que c'est justement celle-ci qui en détermine la couleur.

Tableau II. Les longueurs d'ondes visibles à l'œil nues

Couleur	Longueur d'onde (en nm)
Rouge	700
Orange	650
Jaune	600
Vert	550
Bleu	500
Violet	450

L'œil humain n'est sensible à la lumière que dans l'intervalle de longueurs d'onde compris entre 400 nm et 700nm. Mais existe-t-il des longueurs d'onde plus grandes ou plus petites ? Cette question laisse entrevoir la possibilité de l'existence de lumière invisible, possibilité vérifiée grâce aux travaux de James Clerk Maxwell en 1865.

II.1.3. Les satellites de télédétection

Un satellite de télédétection est un satellite artificiel dont l'objectif principal est l'observation vers le bas, c'est-à-dire vers l'astre autour duquel il orbite (le plus souvent la Terre) à des fins civiles. Pour les utilisations militaires, on parle de satellite espion.

La télédétection par satellite est principalement utilisée en météorologie (atmosphère), climatologie (atmosphère, terres émergées, océans) et en cartographie.

Les longueurs d'ondes et les résolutions spatiales sont variables. Cette approche permet de suivre de manière régulière et continue l'évolution de la végétation, de la couverture neigeuse, des aérosols en suspension dans l'atmosphère, de certaines pollutions et sert de base à une nouvelle.

II.1.3.1. Caractéristiques d'un satellite : l'orbite et sa fauchée

La trajectoire effectuée par un satellite autour de la Terre est appelée orbite. L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission. Deux types d'orbites sont couramment utilisés : l'orbite héliosynchrone et l'orbite géostationnaire. Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur "observe" une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de couloir-couvert ou fauchée. Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et plusieurs centaines ou même plusieurs milliers de kilomètres.



Figure 12. Satellite l'orbite et sa fauchée (Source : mrn.gouv.qc.ca)

II.1.3.2. Les capteurs utilisés

Les capteurs sont des dispositifs permettant d'enregistrer, de transmettre, de coder et de renvoyer la lumière émise ou réfléchie par des objets observés sur la surface de la terre. Chaque capteur est caractérisé par sa résolution spectrale, c'est-à-dire, la possibilité pour le détecteur de fournir les nuances de couleurs ou des niveaux de gris sur image de télédétection et sa résolution spatiale, c'est-à-dire, le pouvoir du capteur de déterminer l'élément le plus petit possible a sol (pixel) qui puisse être détecté. Les capteurs spécialisés dans la réception de longueurs d'ondes réfléchies ou émises par des objets cibles sont tous désignés par le terme de capteurs passifs. Le principal inconvénient de ce type de capteur est d'être inopérant si le ciel est sombre ou nuageux.

Pour pallier à cet inconvénient un autre type de capteur a été mis au point : les capteurs actifs qui mesurent la quantité réfléchie d'un rayonnement qu'ils ont émis. Pour les ondes électromagnétiques du visible et de l'infrarouge proche, les capteurs utilisés sont optiques (émulsions photographiques, détecteurs multi spectraux et hyper spectraux), c'est-à-dire qu'ils reçoivent la réflexion de la lumière provenant de la surface terrestre et n'émettent aucun signal. Pour l'infrarouge thermique, des détecteurs thermiques sont utilisés. Les caractéristiques des capteurs sont :

- **Résolution Spectrale** : décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Plus, la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites.
- **Résolution Spatiale** : correspond à la surface élémentaire d'échantillonnage observée instantanément par le capteur satellitaire. Cette surface correspond au pixel (Picture élément). Cette résolution est $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ pour le satellite SPOT, $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ pour le satellite Landsat Thematic Mapper.
- **Résolution radiométrique** : elle correspond la capacité d'un système d'acquisition à distinguer entre deux niveaux d'énergie voisins.
- **Résolution temporelle** : correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite. Sans manœuvre, la résolution temporelle de LANDSAT TM est de 16 jours.

II.1.4. Les avantages et les applications

Les avantages du traitement numérique d'images se situent à plusieurs niveaux par rapport à la photo – interprétation classique :

- ✓ meilleure visualisation ;
 - ✓ souplesse d'édition ;
 - ✓ facilité de cartographier ;
 - ✓ extraction automatique de thèmes simples ;
 - ✓ estimation de surface ;
 - ✓ compression de données;

L'image satellite peut couvrir une grande zone, donc on peut photographier l'ensemble de la région à la même date et heure. De ce fait, on peut comparer par exemple les types de végétation sur une même formation. Elle nous permet de voir le changement de l'état d'une région par exemple la déforestation, la dégradation et l'érosion du sol car on peut enregistrer plusieurs images par an.

Elle permet de disposer des informations concernant un endroit où l'homme ne peut y accéder facilement.

II.1.5. La réflectance spectrale

Les caractéristiques de réflexivité des objets de surface de la terre peuvent être quantifiées en mesurant la partie reflétée de l'énergie incidente. Ces nombres sont enregistrés en pixel organisés en matrices de lignes et colonnes qui forment des images. La dimension de cette matrice combinée avec la dimension du pixel correspond à la portion de la surface de la terre vue par le capteur. Chaque pixel est composé de plusieurs mesures du REM ce qui constitue l'approche multi spectrale. L'analyse visuelle ou statistique des réflectance nous permet de discriminer des objets dont la réponse spectrale (combinaison d'intensité d'énergie réfléchie par chaque cible à la surface de la terre dans des longueurs d'ondes variées) est différente. Une courbe graphique de la réflectance d'un objet en fonction de la longueur d'onde se nomme une courbe spectrale de réflectance. La configuration de telles courbes nous donne des indications sur les caractéristiques spectrales d'un objet et influence fortement le choix des régions de longueur d'onde dans lesquelles des données de télédétection sont acquises pour une application particulière. En ce qui concerne la végétation saine, la chlorophylle absorbe l'énergie d'une longueur d'onde d'environ $0,45\mu\text{m}$ (bleu) et à $0,67\mu\text{m}$ (rouge). Dans le proche infrarouge, la végétation se caractérise par une forte réflectance. C'est pourquoi nous percevons

la végétation saine comme étant de couleur verte. La figure suivante montre la réflectance du sable, sol sec, neige fraîche et de la végétation. On représente la réflectance en ordonnée et la longueur d'onde en abscisse.

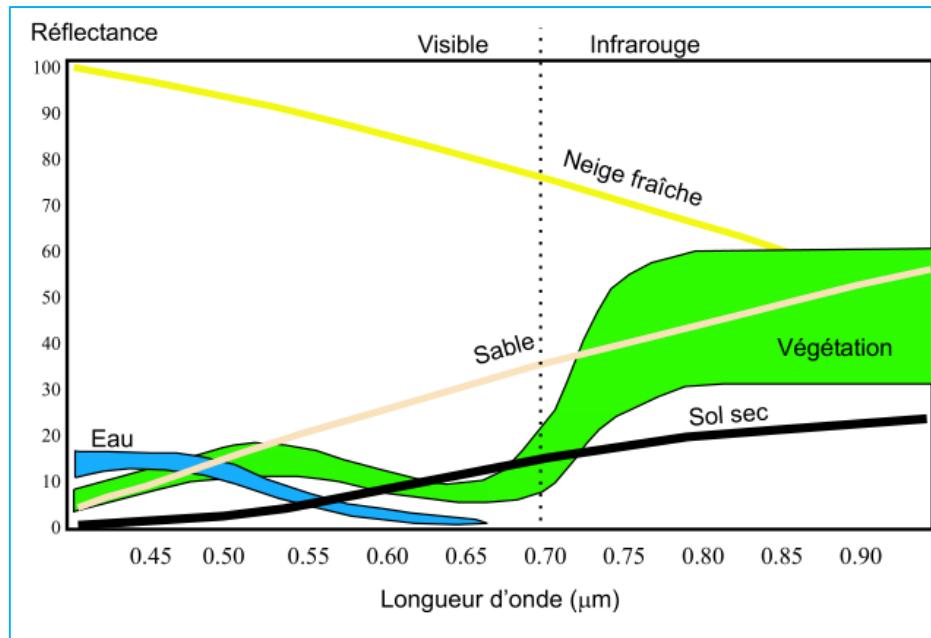
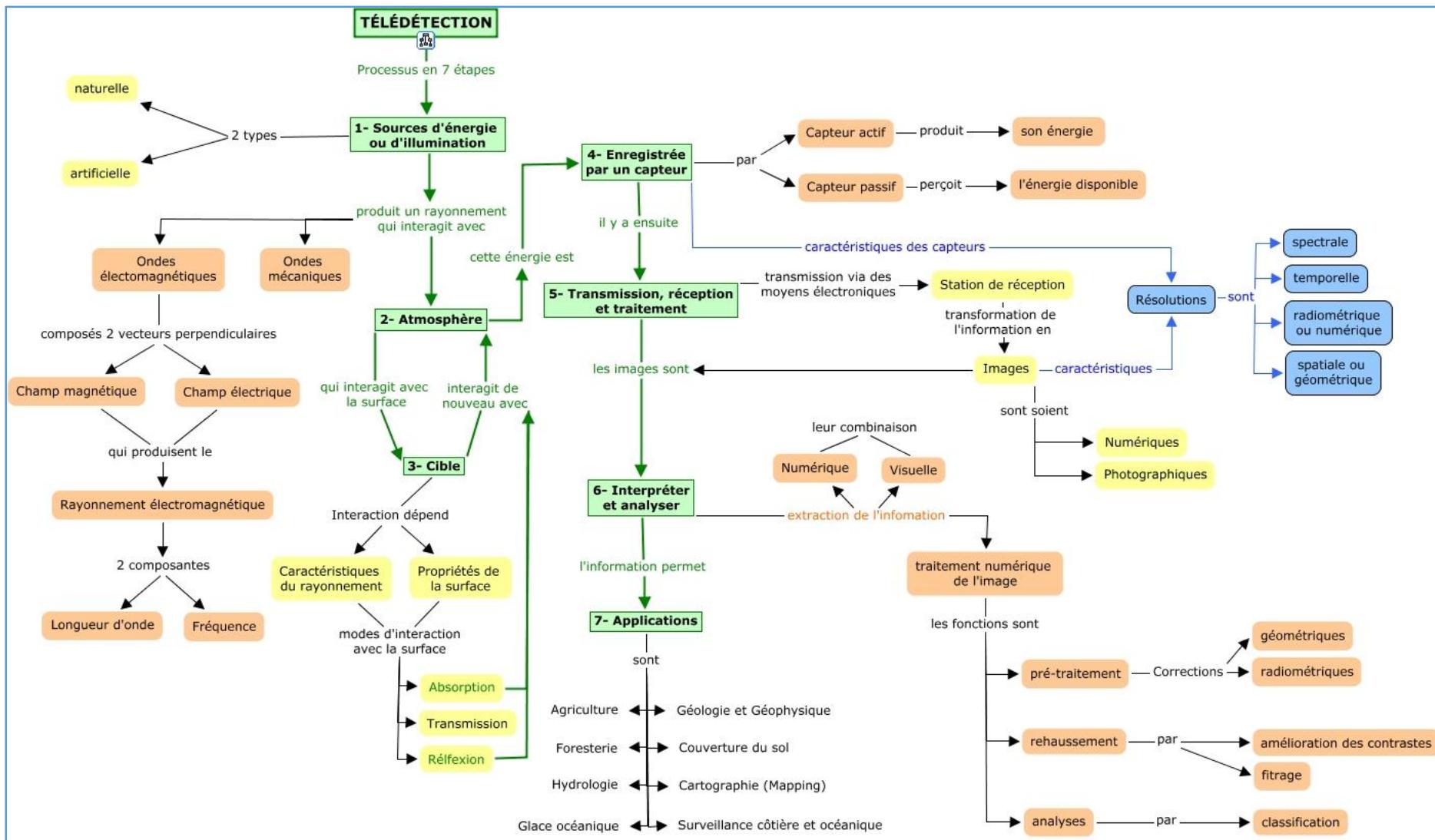


Figure 13.Spectral réflectance (<http://en.wikipedia.org/wiki/Reflectivity>)

II.1.6. Diagramme général



II.2. PRESENTATION DU SIG

II.2.1. Définition

C'est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter les informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace.

Dans son sens plus large, un SIG est un ensemble de procédure manuelle ou informatique / automatique, utilisé pour stocker, gérer et exploiter les données géographiquement référencées. Les objets gérés par le SIG sont affichés par couches d'information, chaque couche contenant des objets de même type (bâti, voirie, éclairage public, routes, végétation, hydrographie, etc.). Les objets sont traités selon trois niveaux qui forment le socle d'un SIG :

➤ Niveau géométrique

Chaque objet est défini par un point (bornes), un arc ou une ligne (routes, voies ferrées), un polygone ou une surface (communes, occupation du sol). Il est systématiquement géo référencé par des coordonnées géographiques (latitude, longitude) ou par des coordonnées planes dans un système de projection.

➤ Niveau topologique

Les relations de voisinage entre les objets constituent le niveau topologique, la topologie étant la branche des mathématiques qui étudie, dans l'espace réel, les propriétés liées au concept de voisinage. La topologie de voisinage permet à partir des arcs constituant le polygone de connaître le voisin de chaque surface et la topologie de réseau décrit la relation de connexions entre les arcs (vecteurs), les nœuds (points d'intersection) et leurs sommets (points intermédiaires).

➤ Niveau sémantique

Enfin, chaque objet contient des informations de type alphanumérique. Ces informations alphanumériques ou textuelles nécessitent un SGBD qui facilite leur gestion.

II.2.2. Composants d'un SIG

On distingue quatre composants du SIG: le matériel, le logiciel, les données et les personnels.

❖ **Le matériel :** Le SIG fonctionne actuellement sur une très large gamme d'ordinateurs connectés en réseau ou de façon autonome et avec ses périphéries (Imprimante, Table à numériser, Scanner).

- ❖ **Le logiciel** : Les logiciels SIG offrent des outils et fonctions pour stocker, analyser, visualiser et afficher toutes les informations. C'est un outil géographique de requête.
- ❖ **Les données** : Ce sont les composantes importantes du SIG, on distingue trois types de données : les données géographiques, topologiques et descriptives.
- ❖ **Les personnels** : Etudes de faisabilités (choix de matériels, données, logiciels)

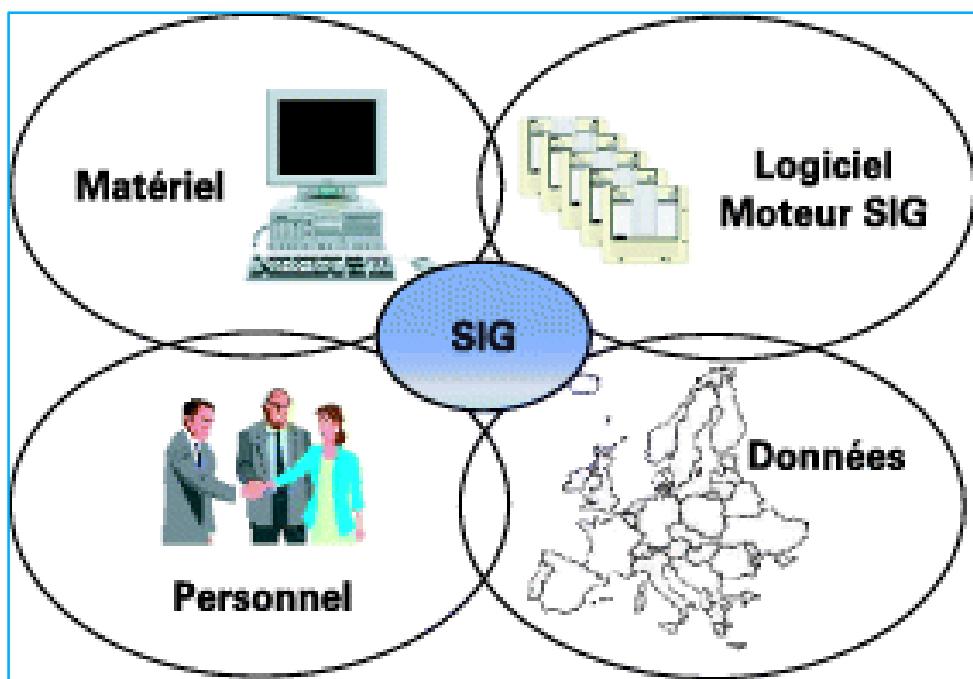


Figure 14.Les composants d'un SIG (Source: <http://www.techniques-ingénieur.fr>)

II.2.3. Fonctionnalités techniques d'un SIG

Les fonctionnalités techniques d'un SIG sont communément synthétisées selon le modèle des 5 A : l'Abstraction, l'Acquisition, l'Archivage, l'Analyse et l'Affichage.

✚ Abstraction :

Modélisation de la base de données en définissant les objets, leurs attributs et leurs relations. Les informations modélisées sont représentées en couches superposables et indépendantes.

✚ Acquisition :

Alimentation du SIG en données : il faut d'une part de géographiques et d'autre part leurs attributs et relations. Les données peuvent être :

- ✓ Des couches raster : images satellites, photographies aériennes, ...
- ✓ Des couches vecteurs : réseaux de communication, hydrographies, ...
- ✓ Des statistiques : fréquence d'occurrence, population démographique,...

✚ Archivage :

Transfert les données de l'espace de travail vers l'espace d'archivage (disque dur).

L'archivage consiste donc à stocker les informations de l'espace de travail vers l'espace de stockage. Elle permet aussi de rassembler et d'ordonner les informations par thème sur des couches afin de faciliter leur recherche.

❖ Analyse :

Réponse aux questions posées. Les couches de données sont combinées et manipulées pour créer de nouvelles couches et pour extraire des informations interprétables.

❖ Affichage :

Production des cartes de façon automatique, le constat des relations spatiales entre les objets et la visualisation des données sur l'écran de l'ordinateur. En fait, les données doivent être mises à jour, bien ordonnées et affinées, afin de faciliter l'analyse, l'affichage et l'archivage. Cet outil offre à l'utilisateur la possibilité d'accéder directement à ce qu'il veut obtenir mais non pas au moyen pour l'obtenir. On peut résumer les fonctionnalités du SIG dans le schéma suivant :

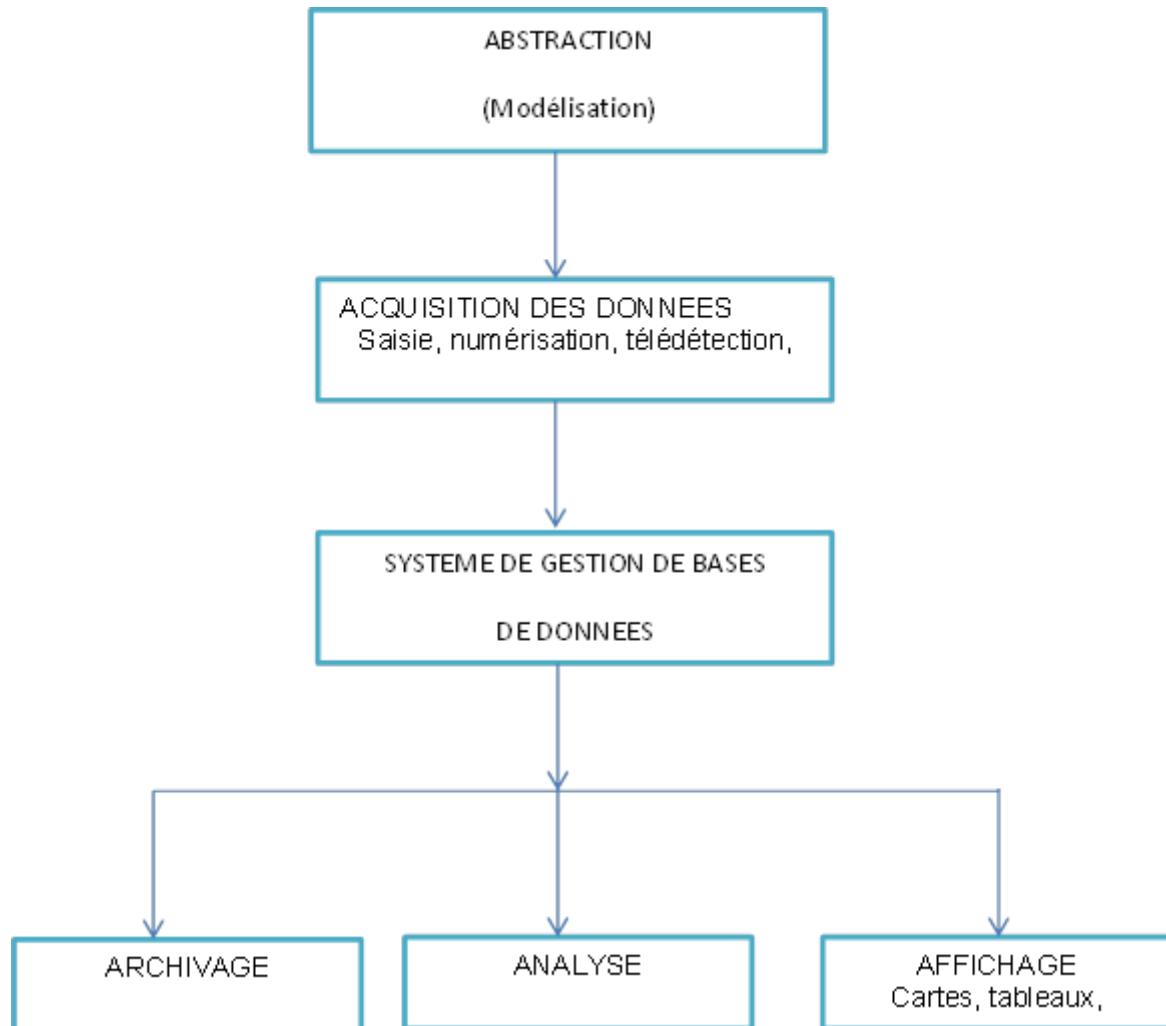


Figure 15. Fonctionnalité d'un SIG

II.2.4. Les avantages

Les bénéfices d'un SIG sont difficiles à évaluer et à quantifier. Ils dépendent étroitement de ses applications. On peut classer en sept catégories les avantages d'un SIG.

- ✓ Un SIG permet d'abaisser les coûts de production des cartes et des plans. Dans de nombreuses mairies, les cartes et plans sont établis à la main, avec des délais et des coûts de correction, de mise à jour, de dessin, etc. Le SIG permet de les établir plus rapidement et à moindre frais.
- ✓ Il permet aussi d'établir des cartes et des plans que l'on ne pouvait pas réaliser à la main. Grâce à l'informatique, il est possible de réaliser des produits nouveaux qu'il était impossible de réaliser à la main.
- ✓ Un SIG évite d'avoir à refaire plusieurs fois les mêmes leviers. Il évite que des services différents procèdent à des leviers topographiques sur la même zone et évite les pertes d'information avec le temps en accumulant l'information recueillie sur le terrain.
- ✓ Lorsque le SIG est en place, installer une nouvelle application nécessite un investissement modeste et le retour sur investissement est rapide.
- ✓ Un SIG facilite la réalisation d'étude pour tous les projets ayant une composante géographique. Il permet de multiplier les représentations visuelles et facilite ainsi la prise de décision tout en diminuant les risques d'erreurs.
- ✓ Le SIG améliore le service rendu à l'usager en permettant de lui fournir avec rapidité et fiabilité une information de qualité dont il a besoin.
- ✓ Le SIG permet des calculs utiles à la prise de décision. Cela va du calcul simple, la superposition cartographique, au calcul complexe d'analyse spatiale intégrant un grand nombre de paramètres.

D'une manière générale, le SIG présente beaucoup d'avantages qu'on ne peut pas imaginer. C'est un outil puissant permettant de visualiser, d'explorer et d'analyser des données géographiques. Son point fort est la rapidité sur la manipulation des données.

C'est ainsi qu'on peut découvrir des structures indiscernables jusqu'à mettre en évidence les relations géographiques qu'on ne soupçonne pas, acquérir une perspective nouvelle sur des choses, trouver des solutions à des problématiques spatiales diverses et obtenir des résultats utiles à l'entreprise ou à la collectivité locale.

II.2.5. Niveaux de compétences SIG

L'administrateur de données est en charge de la gestion du patrimoine de données géographiques.

- Le géomatique expérimenté est en charge de l'analyse, du traitement et de la représentation de la donnée géographique. Il est la personne ressource en matière d'utilisation de logiciels. Il maîtrise les concepts et les techniques de la géomatique, il possède les compétences en sémiologie graphique,
- L'opérateur géomatique participe à l'analyse, au traitement et à la représentation des données géographiques. Il possède une bonne pratique des techniques de la géomatique,
- L'utilisateur est un consommateur d'information géographique. Il utilise des applications clef en main qui répondent à des procédures techniques ou administratives.

Chapitre III. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'IDENTIFICATION ET LE SUIVI DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

L'analyse de la cinématique littorale requiert le choix d'un indicateur du trait de côte, le matériel et les données disponibles. Cet chapitre, axée sur l'état de l'art concernant ces différents aspects, 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, il se décline 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 mesures de sa mobilité parmi ceux qui sont proposés dans la littérature.

III.1. DEFINITIONS, DETECTION ET MOBILITE DU TRAIT DE CÔTE

Dans un article paru dans la revue Hydro International en 2001, Parker mettait en exergue toute la difficulté à localiser et 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, le terme « 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 vive-eau d'équinoxe et pouvant être matérialisée selon le type de côte par le pied de falaise ou la limite de la végétation terrestre. Ce qui correspond au terme français « 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 16). Cette définition est proche de celle de Roubertou et Bonneval (1965) qui 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, 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.

Dans ce chapitre, nous tentons 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 au zone côtière de Morondava.

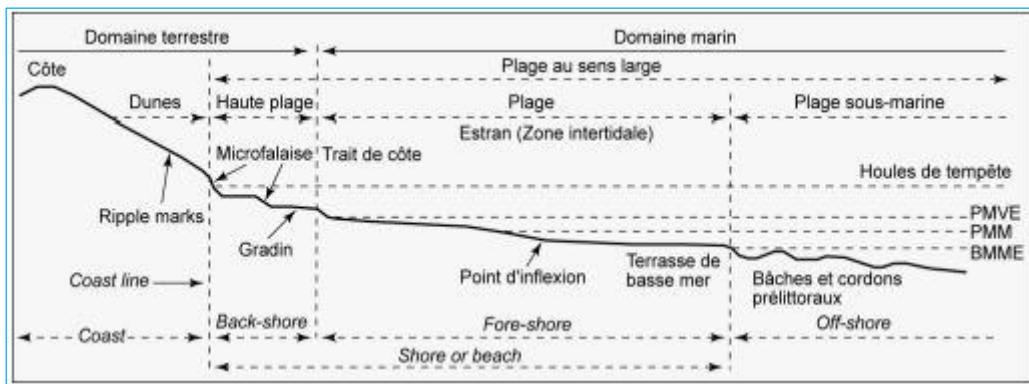


Figure 16. Profil schématique d'une côte sableuse et terminologie anglo-saxonne équivalente d'après Shepard (1973) In Bonnot-Courtois et Levasseur (2002)

III.1.1. 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).

III.1.1.1. Les lignes de référence géomorphologiques

Ces entités linéaires font référence à des ruptures de pente situées dans la zone supratidale, intertidale ou subtidale (Figure 17).

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 17).

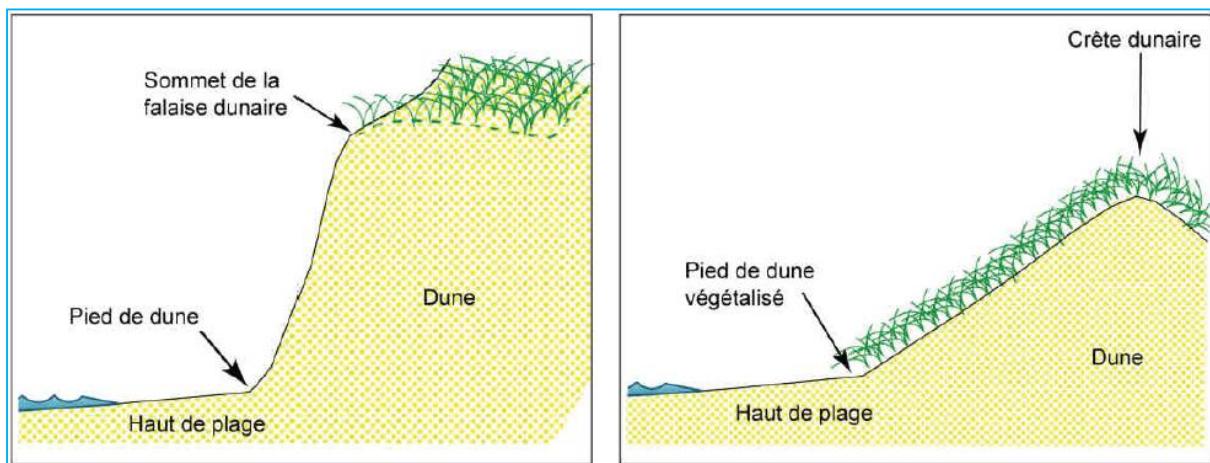


Figure 17. Littoraux dunaires

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 ; Mc Bride *et al.*, 1995 ; Bonnot-Courtois et Levasseur, 2002 ;

2003) ou à une limite de végétation lorsque le front dunaire est végétalisé (Gaillet 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 c'est-à-dire de manière très irrégulier, 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 18).

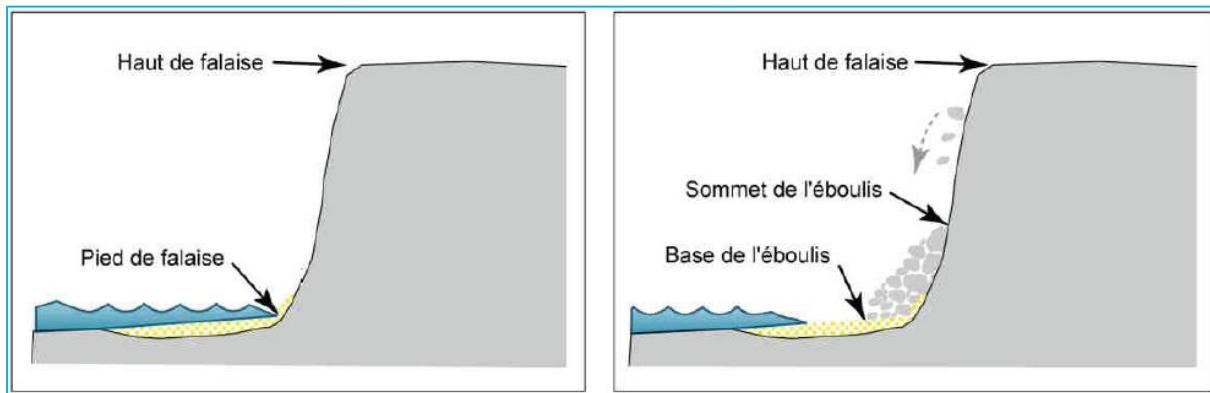


Figure 18. Littoraux à falaises / Plages adossés

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 ; Bonnotcourtois 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 19), 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).

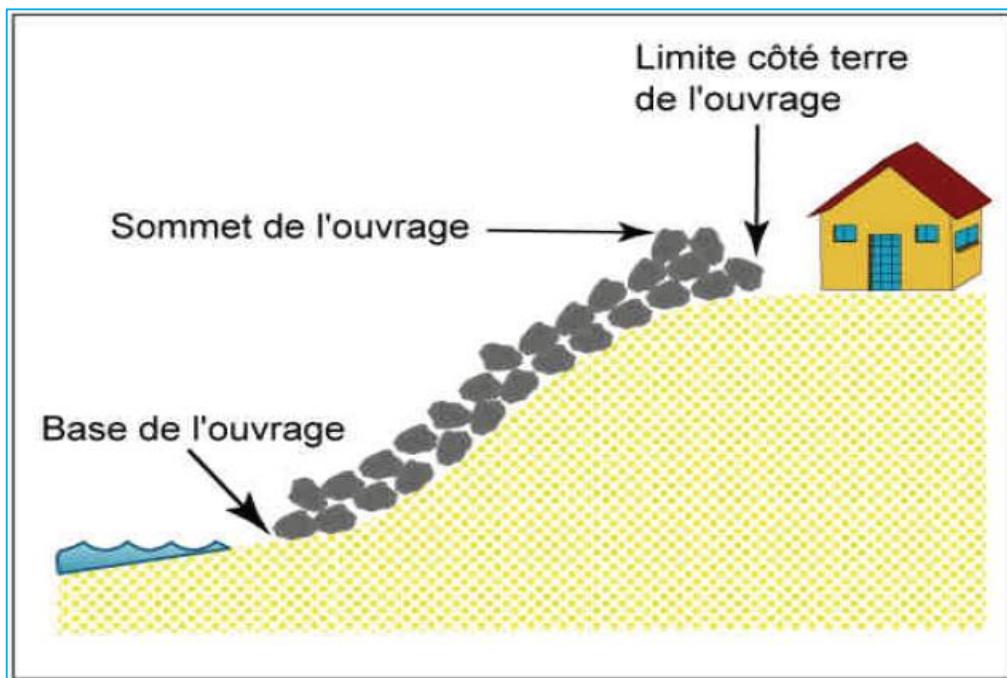


Figure 19.Littoraux artificialisés

Au niveau de la plage aérienne, la crête de berme marque la position approximative des pleines mers ordinaires selon Kraus et Rosati (1997) (Figure 20).

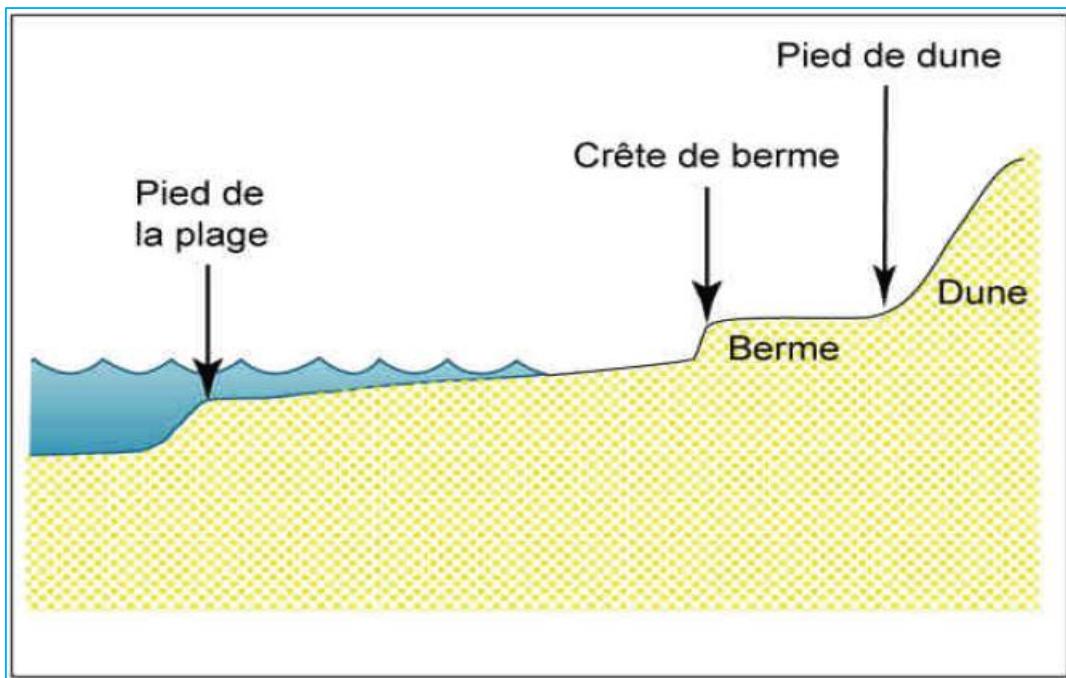


Figure 20. Plages

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 20) 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).

III.1.1.2. 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 (Mc Beth, 1956 ; BIRD, 1985 ; Morton et Paine, 1985

; Morton et Speed, 1998 ; Moore et Griggs, 2002 ; Ferreira et al., 2006) où 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 21).

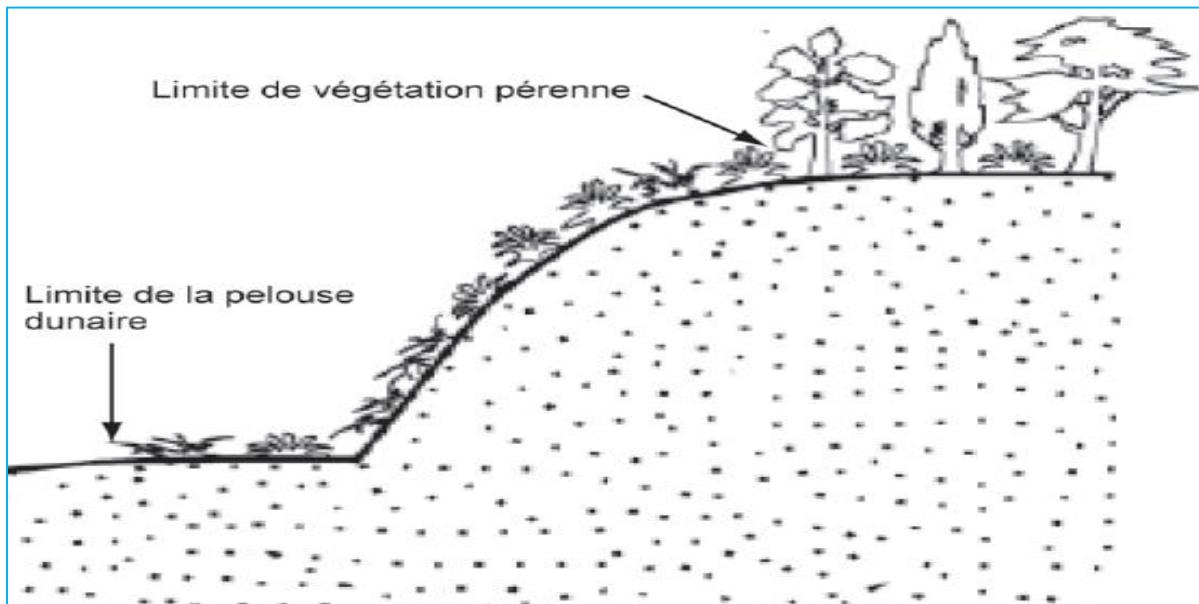


Figure 21. Représentation schématique de la limite de végétation dunaire et pérenne
(Source : Boak et Turner, 2005 ; modifié)

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 (*Ammophilaarenaria*) 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.

III.1.1.3. 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) (Figure 22).

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 méso tidaux et macro tidaux, l'amplitude de ses déplacements est considérable et peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Par contre sur les littoraux micro tidaux méditerranéens par exemple, ses variations sont de moindre importance, voire même 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 micro tidales, des différences de conditions d'acquisition (pente et météo-marine) sont susceptibles d'induire des oscillations importantes de la ligne instantanée de rivage.

Figure 22. Limites d'humectation et ligne instantanée de rivage



Source : BOAK et TURNER, 2005)

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.

- A : Ligne instantanée de rivage (Instantaneous water line)
- B : Limite de 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 tide high water level)
- E : Niveau atteint par une pleine mer antérieure (An old high tide water level)

- La limite sable mouillé / sable sec (wet / dry line, wet / dry boundary, wet sand line, wetted bound). 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 micro tidale, 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 à 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). 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).

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 ; Mc Beth, 1956 ; Nichols et Mc Laughlin, 1984 ; Byrnes et Hiland, 1994 ; 1995 ; Mc Bride 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 laissés de mers (débris, bois flotté, varech, etc.) ainsi que les ruptures de pente (microfalaise, 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.

III.1.1.4. 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 23). 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).

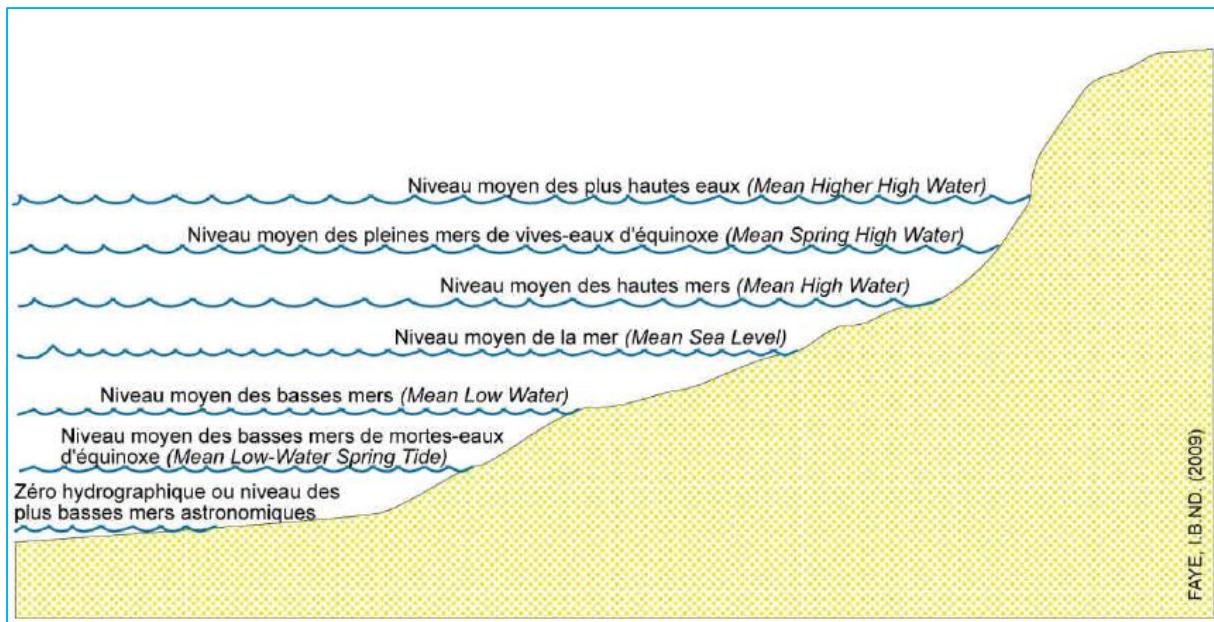


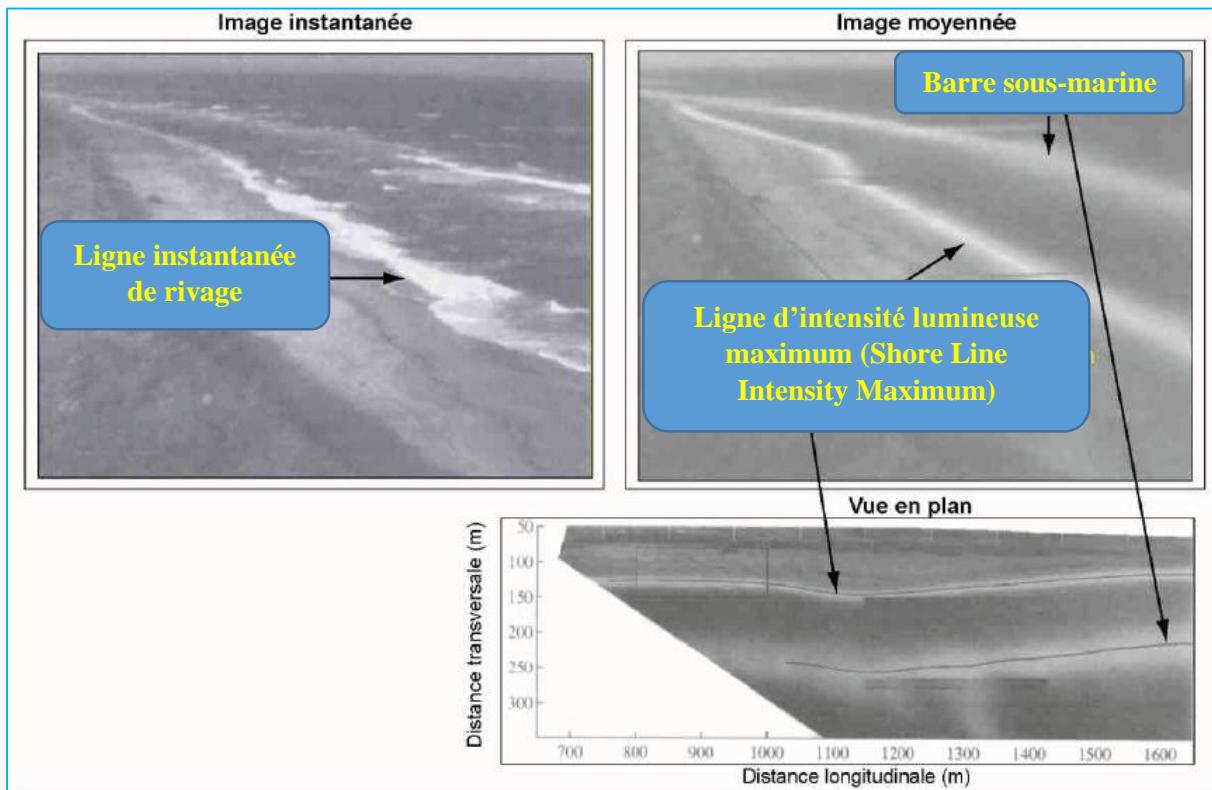
Figure 23. Disposition schématique de quelques datums utilisés comme référence sur un profil de plage.

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.

III.1.1.5. Les lignes de référence virtuelles

Boak et Turner (2005) les ont classées dans la catégorie des lignes de référence invisibles à l'œil 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) obtenue par traitement d'images vidéographiques moyennées 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.

Figure 24. 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 moyennes par 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.

III.1.1.6. L'étendue de la plage (Beach width)

Les variations de la largeur de la plage comprise entre une limite amont et une limite aval clairement définies constituent aussi un indicateur de l'évolution du rivage. La limite amont est fixée au pied de la dune ou à la limite inférieure de végétation alors que la position de la limite aval varie selon les auteurs (Figure 25) : 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.

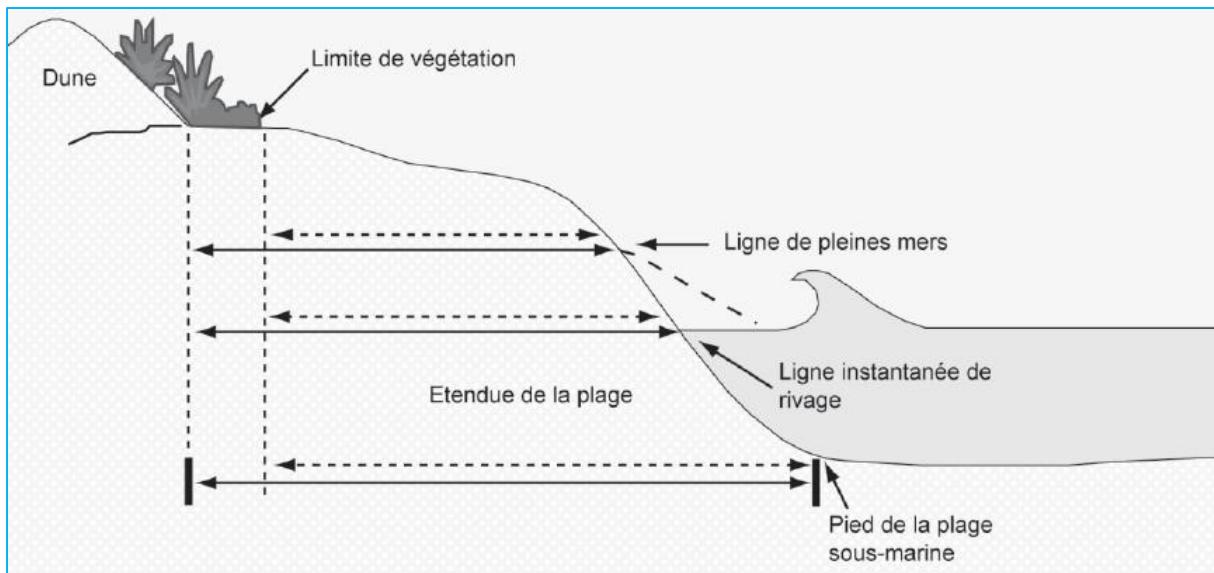


Figure 25. Etendue de la plage entre le pied de dune ou la limite de végétation et la ligne instantanée de rivage, la ligne de pleines mers ou le pied de la plage sous-marine (Source : Coyne et al., 1999 ;modifié)

III.1.1.7. 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 24) (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 Wash over 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 Mc Kenna, 1999 ; Parker, 2003).

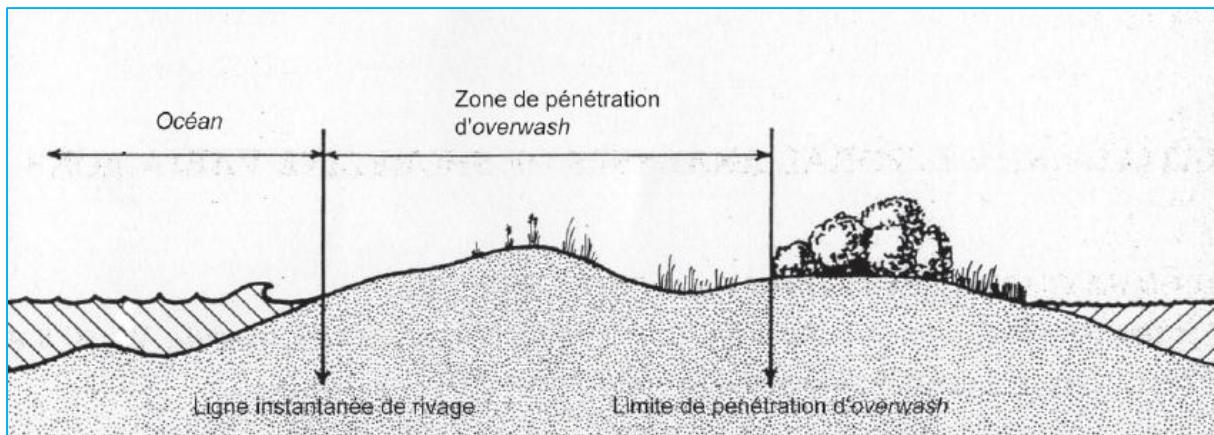


Figure 26. Représentation schématique de la limite de pénétration d'over Wash dans une île barrière (Hayden et al., 1979b; modifié)

Lorsque la tempête coïncide avec les plus hautes mers de vives-eaux, la limite de pénétration d'over Wash 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 morphosédimentaires 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 III récapitule les différentes lignes de référence utilisées dans des études de cinématique littorale.

Tableau III. 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)
		Lisière du haut de falaise unaire (Dune top edge)
		Ligne de crête dunaire (Dune crest line, crest of the dune)
	Littoraux à falaises et plages adossées	Lisière du sommet de falaise (Bluff op, cliff top, top of the cliff)

	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 Mc Kenna (1999) ; LE Berre et al., (2005)
Limites de végétation	Limite entre l'oyat (<i>Ammophilaarenaria</i>) et le chiendent des sables (<i>Agropyrum junceum</i>) dans les littoraux dunaires tempérés	Bonnot-Courtois et Levasseur (2002 ; 2003)
	Limite supérieure des algues ou des lichens marins (<i>Verrucariamaura</i>) sur les parois des falaises rocheuses	Thieler et al., (2001) ; Bonnotcourtois 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, wettedbound, 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) (Hightidewrack line)	Thieler et al., (2001) ; O'Connell (2003)
	Ligne des pleines mers moyennes, habituelles (Usual or mean high water 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	Mc Curdy (1950) ; Mc Beth (1956) ; Nichols et Mc Laughlin, 1984 ; Byrnes et Hilland (1994 ; 1995) ; Mc Bride 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 (Meanlow water line)	Reeve et Fleming (1997) ; STIVE et al. (2002)
	Ligne du niveau moyen des basses mers de mortes-eaux d'équinoxe (Meanlow water springtide 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 washoverterrace)	Morton et Paine (1985) ; Paine et Morton (1989) ; Morton et Speed (1998) ; Morton et Mc Kenna (1999) ; Parker (2003)

III.1.2. 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).

III.1.2.1. 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 végétations ont repérées par les variations de tons en niveaux de gris ou des variations de couleur (Figure 27 et 28). Ce qui nécessite des clichés présentant un bon contraste surtout pour les limites d'humectation.

Figure 27.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)



Figure 28.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 ; Mc Bride 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, CAO, 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 mètre 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 mètre 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 la première photo interprétée 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).

III.1.2.2. 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.

III.1.2.2.1. La ligne instantanée de rivage

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

a. 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.

a.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 29)

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.

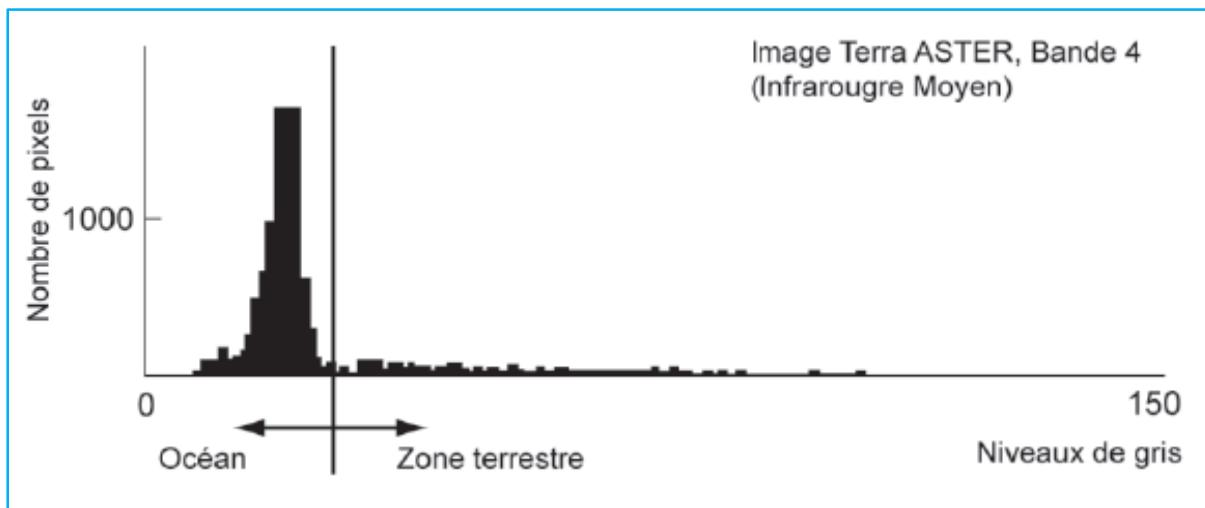


Figure 29. Histogramme d'une image infrarouge du satellite Terra ASTER concernant une plage de l'Atoll de Majuro dans les îles Marshall (Source : Yamano et al., 2006 ; modifié)

a.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 Ekerçin (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 vrai semblance (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).

a.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 (pixel) 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.

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 «graine6», 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.

a.3.1. 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 (multi résolution) 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 (taille du pixel : 25 m) 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 (taille du pixel : 12,5 m) 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 (taille du pixel : 12,5 m) 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 In SAR atteint une précision moyenne de 3,5 pixels (taille du pixel : 20 m). 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 IV).

a.3.2. 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 Networkmodel). 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 30) ou l'identification d'un point de divergence entre le rouge, le vert et le bleu (Color Channel Divergencemodel) dans la zone de déferlement (Figure 31).

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).

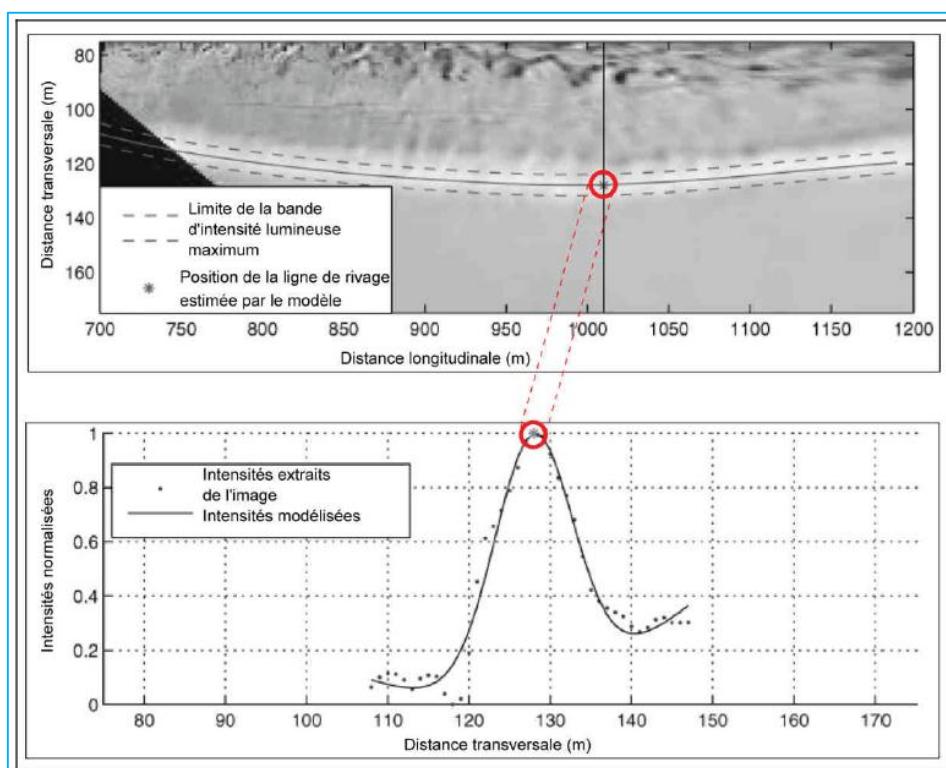


Figure 30. Extraction de la ligne d'intensité lumineuse maximum par le modèle SLIM d'après Plant et al., (2007). La ligne de rivage est extraite en ajustant un modèle d'intensité aux valeurs d'intensité extraites de l'image.

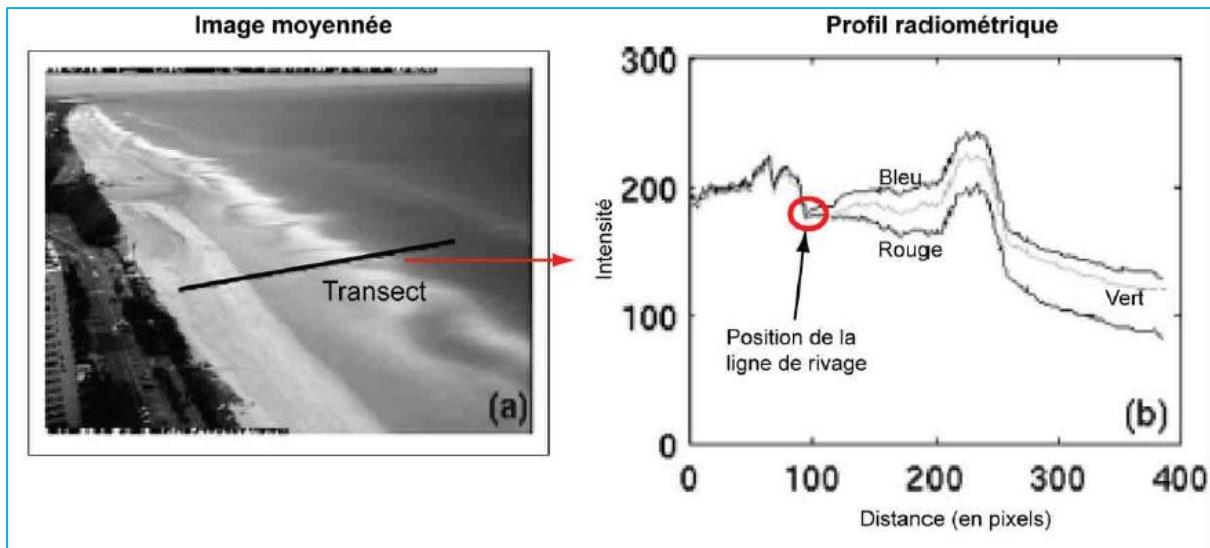


Figure 31.Détection de la ligne de rivage par le modèle CCD (Color Channel Divergence) d'après Plant et al. (2007). La ligne de rivage correspond au point de divergence entre le rouge, le vert et le bleu sur une image vidéographique en couleur.

III.1.2.2.2. 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.1.2.2.3. 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 28). Le long de chaque profil, les données altimétriques sont réduites à une altitude proche du datum ($\pm 0,5$ 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 (Figure 32). 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 $\pm 1,1$; $\pm 1,4$ m par Stockdon et al. (2002).

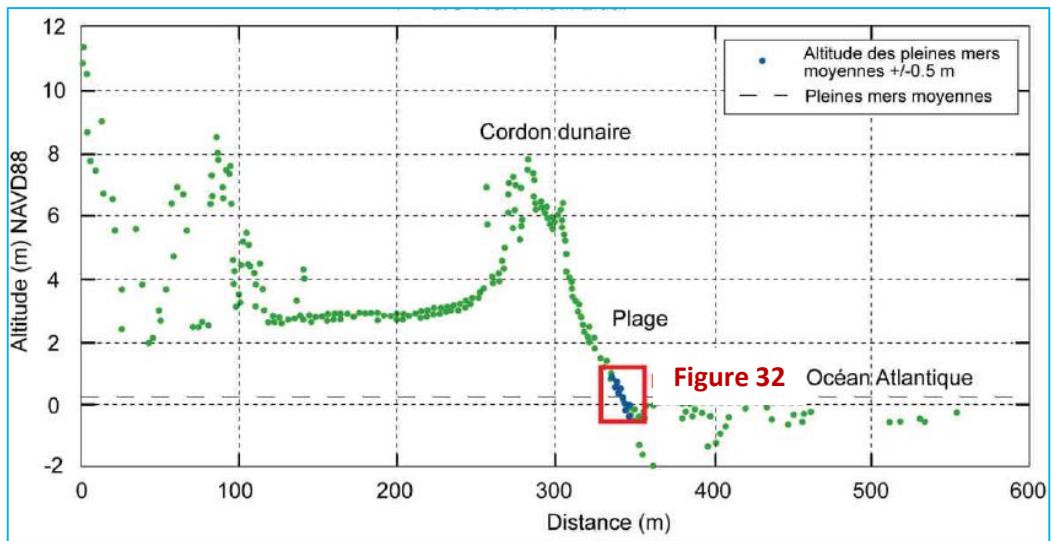


Figure 32.Extraction de la ligne des pleines mers moyennes à partir d'un profil Lidar concernant le secteur de Kitty Hawk en Caroline du Nord (Etats Unis), d'après Morton et al., (2005 ; modifié)

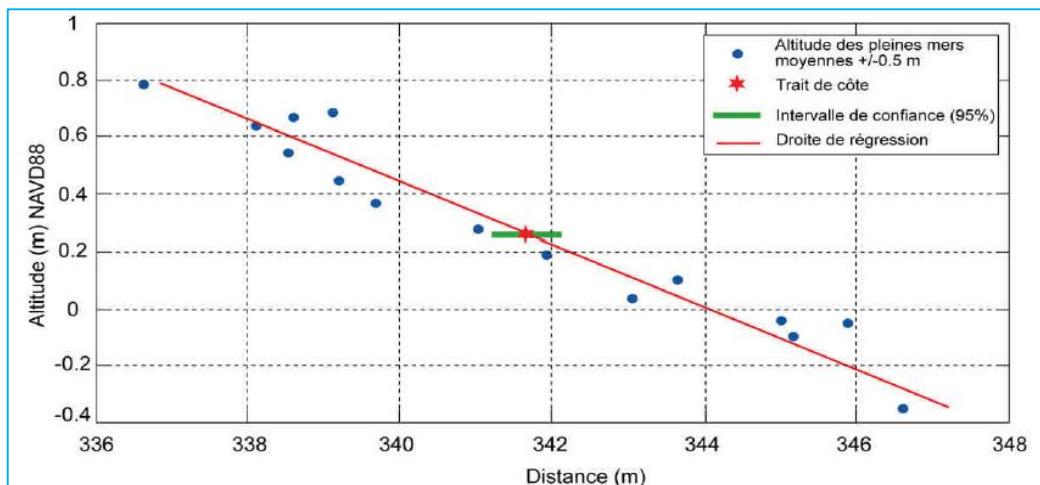


Figure 33.Extraction de la position de la ligne des pleines moyennes par une régression linéaire

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 34).

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.

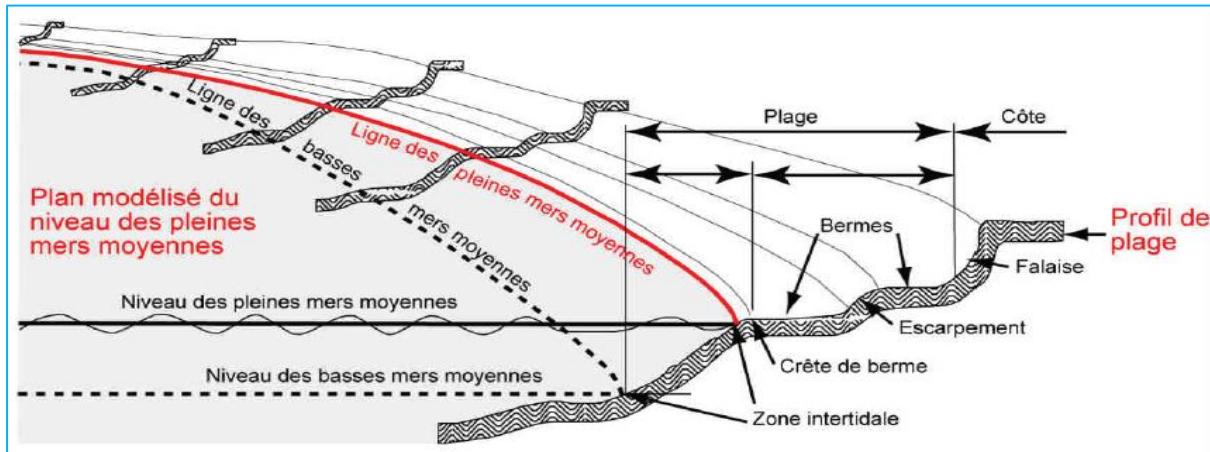


Figure 34. Intersection entre une surface représentant le datum des pleines mers moyennes et des profils de plage provenant d'un modèle numérique de terrain
(Source : Parker, 2003 ; modifié)

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 géo référencement des images et la turbidité de l'eau.

III.1.2.2.4. 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 Mc Laughlin, 1984).

III.1.2.2.5. Les contours de la plage et les lignes dérivées

La boîte 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. Ensuite, un algorithme réduit cette forme en un ensemble de courbes matérialisant la ligne médiane de la plage (ROBIN, 1990).

Tableau IV. Synthèse bibliographique non exhaustive des méthodes d'extraction semi-automatiques de lignes de référence.

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 <i>et al.</i> , (2002)
		EOS-Terra ASTER ; Landsat ETM+ ; IKONOS		18,5 m (Aster), 36 m (Landsat), 5,9 m (IKONOS) Yamano <i>et al.</i> , (2006)
		Landsat MSS	Classification non Dirigée	? Blodget <i>et al.</i> , (1991) ; FRIHY <i>et al.</i> , (1994)
		Landsat MSS, TM		? Frihy <i>et al.</i> , (1998) ; El Aey <i>et al.</i> , (1995)
		Landsat TM et ETM+		? Guariglia <i>et al.</i> , (2006)
		Landsat MSS, TM et ETM+		? Ekercin (2007)

Ligne instantanée de rivage		Landsat TM	Classification dirigée par le maximum de vraisemblance	97,4 % de pixels bien classés	Frazier et Page (2000)
		Landsat MSS, TM, ETM+		?	Chang <i>et al.</i> , (2005)
		IKONOS Multi spectrale		6,48 m	Foody <i>et al.</i> , (2003 ; 2005)
		Landsat MSS, TM		3,16 à 8,67 m	Muslim <i>et al.</i> , (2007)
		Landsat MSS	Classification dirigée par les réseaux de neurones	?	Zhu (2001)
		Landsat TM	Segmentation par croissance de régions	87,02 à 99,88 % de pixels bien classés	Wilson (1997)
		Landsat ETM+		?	Bagli et Soile (2003 ; 2004)
		IKONOS Multi spectrale	Classification souple et de super-résolution	Indice de performance 96,67 à 97,43 %	Bagli et Soile (2003 ; 2004)
		IKONOS Multi spectrale		2,25 à 3,20 m	Foody <i>et al.</i> , (2003 ; 2005)
		Quick Bird fusionnée (multi spectrale +)	Segmentation par le <i>mean shift</i>	0,97 à 2,13 m	Muslim <i>et al.</i> , (2006)
			Classification dirigée et algorithme de	?	Ruiz <i>et al.</i> , (2007)

		panchromatique)	super-résolution		
Photographies aériennes			Segmentation par la théorie de la connectivité floue (<i>Fuzzy connectivity</i>)	?	BO <i>et al.</i> , (2000)
Photographies aériennes infrarouges			Réseaux de Neurones	?	Ryan <i>et al.</i> , (1991)
Images radars (télédétection active)			Classification non Dirigée	?	Guariglia <i>et al.</i> , (2006)
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 (<i>snake</i>)	1 pixel (taille du pixel 12,5 m)	Mason et Davenport (1996)	
	SAR	Filtre de LEE et segmentation par la distribution de GIBBS	?	Zhang <i>et al.</i> , (1994)	
	ERS-1 SAR	Segmentation par les champs markoviens	?	Descombes <i>et al.</i> , (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	Descombes <i>et al.</i> , (1996)
		ERS SAR	Analyse de la texture des images et segmentation par la théorie de la connectivité floue	?	BO <i>et al.</i> , (2001)
		ERS SAR	Analyse de la texture et classification dirigée par le maximum de vraisemblance	?	Onana <i>et al.</i> , (2001)
			Décomposition en ondelettes et classification dirigée par les <i>K-Means</i>	?	
		ERS-1 et 2 SAR	Analyse de la cohérence et segmentation par la théorie de la connectivité floue (<i>Fuzzy connectivity</i>)	3,6 pixels (Taille du pixel 25 m) soit 90 m	Giordano <i>et al.</i> , (2003)
				3,5 pixels (Taille du pixel 20	Dellepiane <i>et al.</i> , (2004)

			m) soit 70 m	
	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 (<i>Pixel Intensity Clustering model</i>)	Précision centimétrique après correction des erreurs liées au <i>set up</i> et au déferlement	Aarninkhof (2003) ; Plant <i>et al.</i> , (2007)
		Réseaux de neurones (<i>Artificial Neural Network model</i>)		
		Modèle d'extraction de la valeur d'intensité maximale (<i>Shore Line Intensity Maximum model</i>)		
		Modèle d'identification du point de divergence entre le rouge, le vert et le bleu (<i>Color Channel Divergence model</i>)		

Ligne des pleines mers moyennes	Lidar	Profils en travers	±1,1 à ±1,4 m	Stockdon <i>et al.</i> , (2002) ; Morton <i>et al.</i> , (2004 ; 2005) ; Morton et Miller (2005) ; Hapke et Reid (2006) ; Farris et LIST (2007) ; Hapke <i>et al.</i> , (2007)
		Intersection du niveau des pleines mers moyennes avec des données Lidar	?	Robertson <i>et al.</i> , (2004) ; Parker (2001 ; 2003)
		Segmentation et opérateurs de morphologie mathématique	- 4,21 m à 4,51 m	Liu <i>et al.</i> , (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 <i>et al.</i> , (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 <i>et al.</i> , (2000 ; 2002)
Limite de Végétation	Images SPOT HRV	Indice de végétation SAVI (<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>)	?	Trepanier <i>et al.</i> , (2002)

Contours de la Plage	Photographies aériennes en Couleur	Classification supervisée par la boîte à outils « <i>BeachTools</i> »	?	Hoeke <i>et al.</i> , (2001)
Squelette de Plage	Photographies aériennes et images SPOT XS	Seuillage et Squelettisation	?	Robin (1990)

Sur le tableau précédent, 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.

III.2. 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.

III.2.1. 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 concerter 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 (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)) 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).

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.

III.2.2. 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.

III.2.2.1. 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 (Froide fond, 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).

III.2.2.2. 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.

III.2.2.3. Les méthodes photogrammétries

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 photogrammétries et de digitaliser la position de la ligne de référence à partir de ces deux types de documents. Les lignes ainsi cartographiées sont géo référencées, projetées dans un système de coordonnées 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 (*Soft copy 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 ortho photographies 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).

III.2.2.4. 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 satellites, levés GPS, Lidar.), 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 géo référencées, 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 (*ArcInfoMacro 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 pour comparer et 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 (Suarez 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.

III.3. 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). 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 *jackknifing*s ont 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).

III.4. CONCLUSION SUR LA SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT L'IDENTIFICATION ET SUIVIE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

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.

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 ; au cadre morphologique du littoral concerné et surtout l'objet de l'étude. Suivant le type de côte étudié, les données disponibles, les contraintes techniques et l'objet de l'étude, 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.

PARTIE II. ANALYSE CINEMATIQUE DU LITTORAL DE MORONDAVA

L'approche méthodologique mise en œuvre dans cette étude pour mesurer la mobilité du linéaire côtier du Morondava 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. Elle s'articule pour l'essentiel autour des phases suivantes :

- Présentation de la zone d'étude
- Description des données disponibles ;
- Indicateurs sélectionnés pour le référencement du trait de côte ;
- Traitement de données ;
- Présentation des résultats et discussion.

Cette dernière étape constitue un prélude à l'élaboration de simulation du trait de côte de 2030.

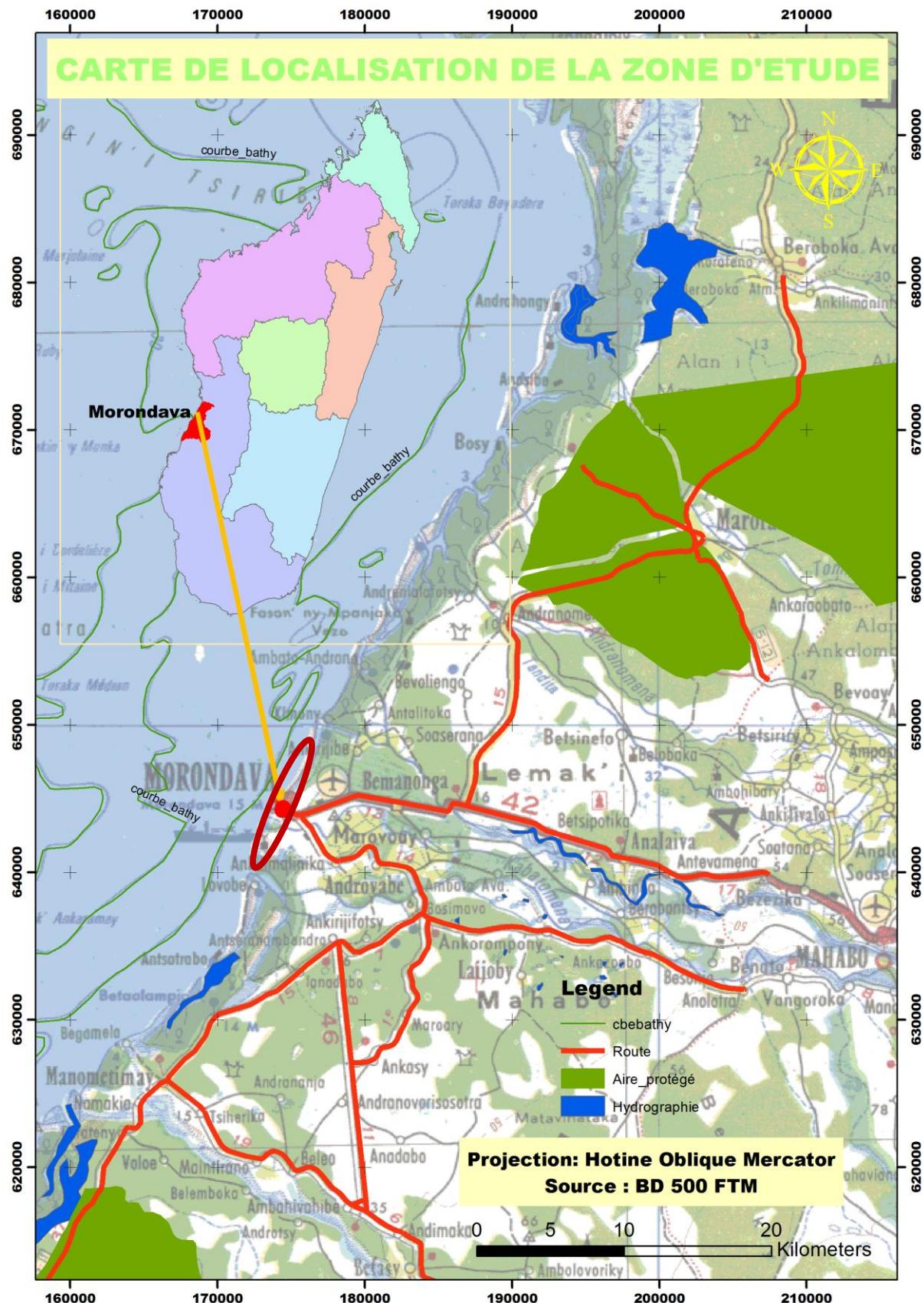
Chapitre I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Comme son intitulé l'indique la présente chapitre est conçue à donner une idée précise sur la description multiculturelle des réalités existantes de la zone d'étude. Pour ce faire, nous avons été conduits d'aborder les volets suivants : Situation géographique du zone d'étude et géologique

I. Localisation

La zone d'étude se situe sur la côte Ouest de Madagascar en particulier, la zone côtière du Morondava.

Géographiquement, la région se situe entre : Xmin= 171 0000 m Ymin= 641 0000 m
Xmax= 177 000 m Ymax= 649 000 m
Côte le Canal du Mozambique sur 350 km de long, séparé de l'Afrique de 400 km et 600 km Ouest d'Antananarivo vers la route nationale numéro 35.



Carte 1. Localisation de la zone d'étude

II. Caractéristiques milieux bio- physiques

La ville s'est développée sur un ancien delta de la rivière de Morondava, caractérisé par une topologie plate et des zones très basses par rapport au niveau delta mer, en particulier lors des grandes marées et fortes houles.

Le littoral forme à cet endroit une protubérance très fragile. Sous l'influence de facteurs naturels, probablement amplifiés par des aménagements artificiels, ce littoral tend à s'aligner sur un trait de côte régional plus ou moins rectiligne. Ceci explique l'érosion spectaculaire à laquelle la ville doit faire face.

III. Cadre géologique

Le bassin versant de Morondava d'une hauteur moyenne de 340 mètres, couvre une superficie de 4600 km². Il présente une topographie dissymétrique caractérisée :

- en amont, par un relief accidenté à pentes assez fortes ;
- en aval, par une région côtière très plate.

La rivière de Morondava à régime irrégulier a une pente moyenne de 1,8 pour mille. La côte est uniformément basse et son altitude moyenne est de 12 mètres. La seule exception, dans le secteur étudié, est formée par la falaise calcaire du Cap d'Ankarana dont la hauteur ne dépasse pas 30 mètres. Cette falaise est actuellement en voie d'érosion intense.

Le cordon dunaire littoral (Quaternaire) formé de sable beige non consolidé marque au nord de la plaine deltaïque le stationnement d'un ancien rivage (Ambalamaty) et un stade d'arrêt dans la sédimentation fluviatile récente. Les sables des grandes dunes rectilignes situées entre Kabatomena et Maharivo sont éoliens.

Une carapace sableuse « sables roux » recouvre le plateau calcaire éocène. Il existe des vallées sous-marines dont certaines sont très nettes en face du delta des cours d'eau de la Morondava. Les sables de plage sont peu calcaires à Morondava et à Betania. Derrière le cordon dunaire, les vases de mangroves sont développées au niveau de la passe du bras mort de la Morondava et au sud (vases de Bethania).

IV. Le relief

Le relief est donné par un vaste plateau de 800 à 950 m d'altitude, constitué par emboîtement de 3 surfaces d'érosion (post-Crétacé, méso-tertiaire et fini-tertiaire). Il se présente sous forme d'un vaste glacis dont la planéité est interrompue par des massifs intrusifs de granites et de gabbros (massifs d'Ambohiby 1542m, de Bevato, 1432m).

L'altération profonde des migmatites et gneiss d'âge précambrien a entraîné l'incision du glaciis, ainsi découpé en lanières et croupes, dont la largeur varie de quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Les gîtes minéraux et carrières potentiels peuvent concerner ces produits d'altération.

Les inters fleuves dominant des vallons et thalwegs, occupés par un réseau hydrographique dense, qui leur confère une forme digitée. Ce paysage ouvert est favorable aux activités agro-pastorales. Mais il est parcouru annuellement par les feux de brousse, qui déclenchent des phénomènes d'érosion, tels les arrachements aux flancs de versants, évoluant en lavaka, plus ou moins stabilisés. Ces derniers limitent les aménagements et l'extension spatiale de la ville.

V. Le climat

Le climat est caractérisé par deux saisons climatiques contrastées (avec une saison intermédiaire) et peut provoquer un risque cyclonique permanent. Le climat est de type tropical subhumide à faciès continental, caractérisé par trois saisons écologiques :

- ✓ Une saison chaude (température moyenne de 27,7°C en janvier) et pluvieuse (90 % des pluies) de 5 mois, allant de décembre à avril
- ✓ Une saison fraîche (21,5°C en juillet) et sèche de 4 mois, qui va de mai à août
- ✓ Une période intermédiaire de 3 mois, caractérisée par le retour de la chaleur en septembre, quelques petites pluies et la reprise de végétation en Octobre et novembre.

Tableau V. Température moyenne mensuelle/station - Morondava (Période 1961/1990)

Mois	Nov.	Dec.	Jan.	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Total
T°(°C)	26,6	27,4	27,7	27,6	27,4	26,2	23,7	21,8	21,5	22,2	23,7	25,8	25,1

Source : Monographie du Menabe MAEP 2003

VI. La Pluviométrie

La pluviométrie comprise entre 600 et 1 000 mm/an devient le facteur limitant des activités agricoles dans la région.

La pluviométrie annuelle est très faible (750 mm), irrégulière et assez mal répartie dans l'espace. Elle devient un facteur limitant des activités agricoles des zones côtières. La sécheresse s'accentue du Nord vers le Sud. Elle est atténuée de l'Ouest vers l'Est en raison de l'altitude.

A Morondava, pendant les quatre mois de la saison chaude et humide, les pluies tombent sous forme d'orage de courte durée et en s'éloignant de la côte vers la terre ferme, la pluviométrie augmente.

Tableau VI. Pluviométrie moyenne mensuelle/Station Morondava: Période 1961 - 1990

Mois	Nov.	Dec	Jan .	Fev.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juil .	Aout	Sep	Oct.	Total
Pluie (mm)	20,6	163	242	200	89	14,8	11,4	2,4	2,3	2,2	3,6	11,9	764

Source : Monographie du Menabe MAEP 2003

VII. Les Vents

Le vent marin chargé d'humidité afflue vers l'intérieur de la terre. Il est bloqué par le massif de Bongolava. Ainsi, s'explique l'humidité optimale moyennement persistante de l'Ouest de la région.

En Octobre-Septembre souffle un vent desséchant, qui tarit tous les fleuves et rivières réduisant ainsi le niveau des nappes phréatiques (période conseillée pour le creusement des puits).

En haute mer, il est à noter l'existence de vent périodique qui, en saison de pluie, souffle du Nord vers le Sud, agitant ainsi la mer et rend impossible le cabotage en boutre. Le fait inverse se produit en saison sèche de la sorte que la plupart du temps la mer est calme.

VIII. Les Cyclones

La région est touchée, au moins influencée par une perturbation Tropicale se formant dans le canal du Mozambique et qui pénètrent dans l'Ile entre Maintirano et Morondava.

Généralement, ces perturbations tropicales ne remplissent pas les critères d'un cyclone, ainsi elles sont alors qualifiées de dépression tropicale.

Toutefois, elles apportent des précipitations très importantes qui provoquent des inondations durables.

La pluviométrie annuelle est très faible (750 mm), irrégulière et assez mal répartie dans l'espace. Elle devient un facteur limitant des activités agricoles des zones côtières. La sécheresse s'accentue du Nord vers le Sud. Elle est atténuée de l'Ouest vers l'Est en raison de l'altitude.

Avec une probabilité supérieure à 1/2, la région est exposée à des perturbations tropicales fréquentes qui se forment dans le Canal du Mozambique et pénètrent dans l'Ile entre Maintirano

et Morondava. Ce phénomène, qui entraîne des précipitations importantes et des inondations durables, présente un risque cyclonique important.

IX. L'hydrographie et les eaux de profondeur

➤ L'Hydrologie

La région dispose d'une potentialité hydraulique énorme des eaux de surface et de profondeur. La partie Est de Morondava est riche en plans d'eaux continentales (lacs, étangs et mares). Aussi, le Morondava qui se subdivise en deux faisant ainsi la naissance de Kabatomena au niveau de Mahabo, traversent des diverses plaines en méandre pour déposer des riches alluvions au bénéfice des cultures vivrières de la région.

➤ Eaux de profondeur (Source : Délégation de Mine et de l'Energie à Morondava)

Les principales nappes sont actuellement bien connues et exploitées à savoir :

- ✓ la nappe de gré crétacé, qui, a donné de nombreuses venues d'eau artésienne, comme à Dabara
- ✓ la nappe des alluvions de Morondava, exploitée par la SUCOMA (Sucrerie Complant de Madagascar) pour l'irrigation de la canne à sucre et par la JIRAMA (Jiro sy Rano Malagasy) pour l'alimentation en eau de la ville de Morondava.
- ✓ la nappe de sable superficiel et de plages pour l'alimentation en eau en milieu rural (le littoral en particulier).

Le potentiel en eau souterraine exploitable dans la région du Menabe est en général important à l'exception de quelques zones localisées où les conditions topographiques et hydrologiques ne sont pas favorables.

Ces potentialités en eau souterraine sont utilisées non seulement pour surmonter la pénurie en eau potable mais aussi pour développer les activités agricoles et industrielles locales (SUCOMA) en particulier dans la plaine de Morondava.

Les divers types de nappe dans le bassin de Morondava sont :

- nappe d'alluvions
- nappe des sables argileux supérieurs
- nappe de sable de plage
- nappe du Quaternaire ancien
- nappe de l'Eocène
- nappe de Crétacé

La Région dispose d'une potentialité hydraulique énorme en eaux de surface et de profondeur. D'importants et nombreux plans d'eau sont localisés dans la partie Nord et Est de la Région (lacs, étangs et mares) ; aussi, des fleuves et rivières traversent des diverses plaines en méandres pour déposer des riches alluvions au bénéfice des cultures vivrières de la Région.

Le bassin versant en amont de la plaine de Morondava mesure environ 6 700 km² et il n'a qu'une seule issue Seul le bras sud de la rivière de la Morondava Kabatomena est fonctionnel. Les systèmes d'irrigation de Dabara n'aboutissent pas à une évacuation des eaux à la mer, les drains Hellot et Androvabe ne sont pas entretenus régulièrement.

Les inondations sont perpétuelles durant la saison pluvieuse et surtout lors de la période cyclonique.

X. Les eaux marines

La côte de Morondava est soumise au mouvement des marées tel que le mouvement de la marée haute le soir et la marée basse le jour. L'amplitude d'une marée moyenne est de 2,25m. Il convient aussi de noter le mouvement de la marée en période d'équinoxe aux mois de mars et du mois de septembre dont l'amplitude d'une marée moyenne est de 4,75 m. Lors de l'étal, la force de retrait de l'eau est élevée. Le courant charrie vers la mer les sédiments et différents déchets déposés le long de son circuit notamment ceux d'Andakabe et d'Ankisirasira.

Le mouvement des marées est aussi conjugué au travail constant de la houle entaillant aussi le littoral de Morondava, son amplitude varie aussi selon les saisons de 0,30 m à 2,50 m.

Cependant on distingue deux catégories de houle notamment celle de saison de pluie de régime Nord-Ouest d'une part et celle de la houle de direction Ouest suivant le courant d'eau sortant de la passe de Betania.

Durant la période des cyclones, l'amplitude de la houle atteint 4 m car le régime de Nord-Ouest coïncide avec l'arrivée de vents violents.

Les houles et les marées sont une menace permanente pour le site de Morondava. En effet le

recul de l'estran est certain devant l'embouchure respectivement au niveau du port et de la discothèque My LORD.

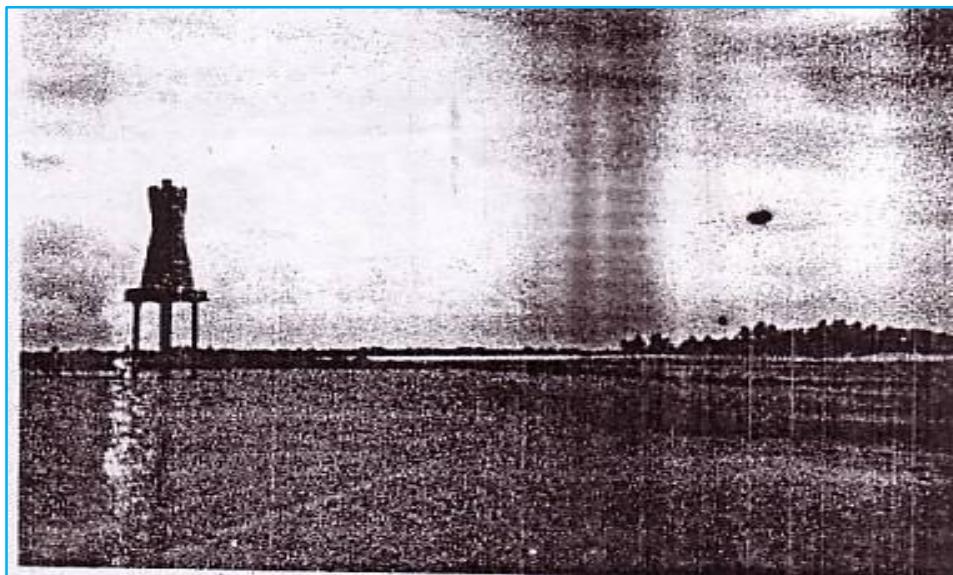
Par ailleurs, quelques bâtiments administratifs et hôtels sont détruits suite à ces mouvements de la houle. Les épis construits en 1954 et renforcés par enrochement en 1958 ainsi que les gabions faisant lien avec les épis sont cassés.

L'embouchure de la rivière Andraverava entre le Village de Betania et le musoir de presqu'île d'Anosy Kely n'a pas subi de déplacement majeur malgré son rétrécissement vers le nord, côté Anosy Kely. Ce phénomène régulier est observé lors des crues annuelles. Ceci paraît normal à la configuration naturelle de l'embouchure en forme d'entonnoir vers la mer.

Néanmoins, en 1990, deux balises ont été érigées près des épis sud et nord, par le Service des Voies Maritimes, en vue de matérialiser l'embouchure. L'une de ses balises s'était écroulée 10 ans après à cause de ce léger déplacement vers le nord.

Avec une probabilité supérieure à 1/2, la région est exposée à des perturbations tropicales fréquentes qui se forment dans le Canal du Mozambique et pénètrent dans l'Ile entre Maintirano et Morondava. Ce phénomène, qui entraîne des précipitations importantes et des inondations durables, présente un risque cyclonique important.

Figure 35.Les pieux bétons supportant la balise nord étaient mis à nu par l'érosion du littoral et les crues. Photo en 1996



Source : CU Morondava

Figure 36.La balise de l'épi nord en 1991



Source : CU Morondava

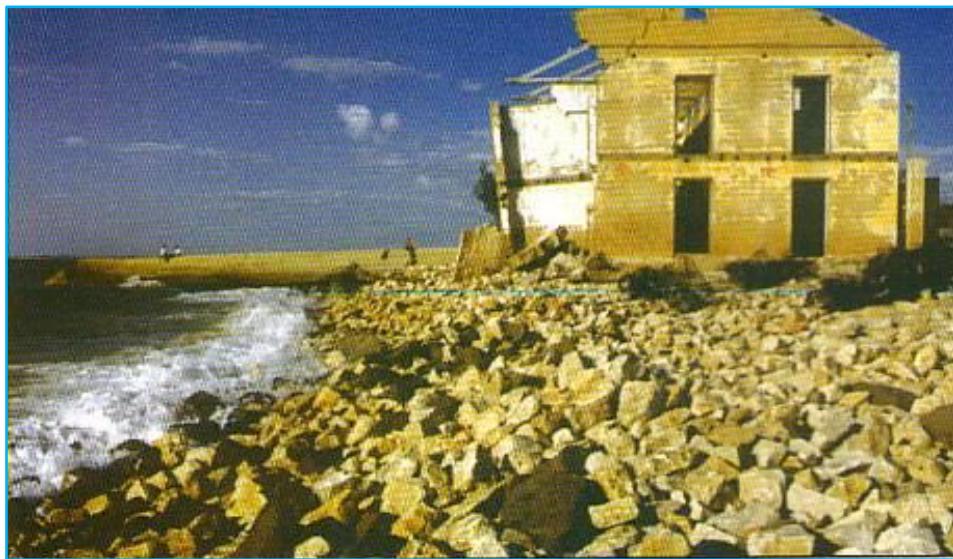
Les chantiers des complexes hôteliers du musoir d'Anosy Kely ne font que commencer en 1996. Mais deux ans après, l'érosion causée par les houles à chaque marée montante a atteint les premières installations. Cette érosion était observée sur tout le littoral d'Anosy Kely à Avaradrova.

Figure 37.Le somptueux épi s'incline devant la reine mer



Source : CU Morondava

Figure 38. Le bâtiment principal de l'hôpital en 2000



Source : CU Morondava

L'exploitation irrationnelle de la mangrove, la construction des maisons dans les zones sensibles ne font qu'accélérer l'érosion marine.

L'érosion marine, l'érosion continentale conjuguée aux actions anthropiques ont coïncidé avec le passage du cyclone provoquant une mer très agitée, source de la situation particulière de Morondava.

XI. Contexte socio-économique

La population de Morondava se situerait entre 50 000 et 80 000 habitants sur une superficie de 9 km² et aurait connu un véritable boom démographique récent, en raison d'une très forte immigration. Une explosion démographique a été constatée ces quatre dernières années. Le taux de croissance est supérieur à 17,7%. Cette population est jeune : 50% de moins de 18 ans avec une moyenne de 6 personnes par ménages.

La commune de Morondava est caractérisée par de très faibles moyens financiers.

XI.1. Urbanisme habitat et foncier

Il n'y a pas d'opération de cadastre mais on suit le régime des démarches individuels pour le bornage et l'immatriculation des parcelles (terrains d'habitation / activité privés). Les villages traditionnels ne sont pas encore titrés. La commune gère par contre, les questions d'urbanisme et permis de construire.

XI.2. Les activités économiques

Les principales activités économiques de la ville sont la pêche et le tourisme. Dans le district de Morondava l'activité industrielle est représentée par une sucrerie (production de 4 000 tonnes par an de la SIRANALA), une huilerie et savonnerie (SCIM) une unité de fabrication de confiture, 14 unités de scieries et fabrication de meubles. On peut également citer les fermes industrielles aquacoles (AQUAMEN) et il y a aussi des industries des fabrications de sel.

Les zones de pêches (traditionnel, artisanal, industriel ou sportif) s'étendent de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres au large littoral de Morondava. Les pêcheurs traditionnels pêchent dans les chenaux et plan d'eau à l'intérieur du système lagunaire contrôlé par la passe de Betania. La collecte des crabes se fait dans les mangroves et lagunes. Les activités halieutiques les plus importantes sont la pêche artisanale et industrielle de crevettes et la collecte de crabe pour l'exportation ; la région de Morondava exploite environ 19 bateaux chalutiers industriels et artisanaux appartenant à 8 sociétés différents.

Il est important d'ajouter que la ville de Morondava a englobé plusieurs villages traditionnels littoraux, et en particulier Avaradrova, Nosy Kely, Betania, où une forte proportion de la population dépend des revenus des pêches de la collecte de crabe. Ces villages de pêcheurs exploitent les crustacés et poissons en utilisant des techniques traditionnelles ; les produits sont destinés à subsistance et aux ventes journalières sur le marché local et aux hôtels. Outre les crevettes, la pêche au requin semble avoir pris un essor depuis 4 ou 5 ans. La région devient un site reconnu au niveau international pour la pêche sportive ; Deux Sociétés d'exportation de crevette et crabes vers UE (l'Union Européenne) sont installées dans l'enceinte du port et une société de commercialisation nationale se trouve sur le front de la mer.

XI.3. Le tourisme

La région de Morondava regorge de potentialités touristiques liées à la géographie et l'histoire de Menabe. La capacité d'accueil est de 150 chambres et bungalow, 14 établissements de restauration.

La région est caractérisée par un potentiel touristique peu exploité jusqu'à récemment en raison de capacités d'accueil limitées et de la difficulté d'accès de la plupart des sites. Avec sa position centrale sur le littoral et son statut de seuil agglomération urbaine. Morondava est susceptible de jouer un rôle déterminant dans le développement touristique régional surtout

avec l'ouverture du site de plage Kimony. Avec des ressources naturelles riches et variées, et une forte identité culturelle, la région offre de nombreuses activités touristiques : Parc des Tsingy de Bemaraha, rivières de la Manambolo et Tsiribihina, forêts d'Analabe et Kirindy, Lac Antsabora, allée des Baobab, plongée sous-marine, pêche sportive, plage de Bosy, chasse, nombreux sites culturels dans toute la région.

XII. Sociétés et services : bâtiments administratifs publics

La ville compte deux banques et une agence AGATHE et trois opérateurs de télécommunications, deux agences d'assurance, l'agence d'Air Madagascar et un bureau de poste.

Plusieurs bâtiment administratifs sont localisés : La région, la District, la direction du génie rural, la direction du tourisme, la direction des Travaux Publics, la Circonscription Scolaire (CISCO, la Circonscription Domaniale et Topographique, le service de Santé de District, et la maîtrise du port, dépôt d'hydrocarbure.

➤ Education

Morondava compte 15 écoles primaires publiques réparties dans tous les quartiers, mais seulement 2 CEG, 1 lycée technique complété d'établissements scolaires privés. La zone dommage 1 comprend 7 établissements scolaires dont en particulier les EPP des fonkontany Avaradrova, Morondava Centre, Nosy Kely, le lycée et le CEG de Morondava centre, plus deux écoles privées.

La zone deux comprend seulement l'EPP de Nosy Kely, 60% de la zone sont scolarisées ; ils fréquent les établissements de proximités leur lieu d'habitation ou se déplacent dans d'autres zones de la ville (établissement privé à l'Est de la ville).

➤ Centres de santé

Morondava dispose six centres de santé ou assimilés (infirmeries, dispensaires, maternité, pédiatrie) publics et privés et d'un hôpital public. On dénombre également 4 pharmacies et un dépôt de médicaments ainsi que 4 médecins privés. Trois types de maladies émergent : les infections respiratoires aiguës, le paludisme et les diarrhées, les maladies sexuellement transmissibles (Morondava zone rouge.)

➤ Approvisionnement, électricité et eau.

Morondava est ravitaillée par voie terrestre et maritime. La route assure le transport des marchandises en provenance d'Antananarivo et du port de Toamasina et d'Antsirabe, mais elle est quasiment impraticable en période de forte pluie. Le port assure principalement l'approvisionnement en carburant (80% de marchandises transités), grâce aux petits pétroliers

qui mouillent au large, le transit étant assuré par une barge. Quelques boutres à voiles qui font le cabotage depuis Toliara, et transporte des marchandises diverses et produits agricoles en petites quantité.

Morondava est alimentée en eau et électricité par JIRAMA, à l'exception du quartier Betania. On dénombre 61 bornes fontaines (soit 72 ménages ou 430 personnes par borne fontaine) et 69 lavoirs en état de fonctionnement, ainsi que 1466 abonnés pour l'eau. JIRAMA produit 2800 m³ d'eau par jour. Quant à l'électricité » les abonnés se chiffrent à 2579 et 150 éclairages sont en état de fonctionnement.

➤ **L'assainissement et les infrastructures urbaines**

Les services communaux incluent un service de voirie, chargé de la gestion des infrastructures communales (voirie, assainissement). La commune compte une rue principalement goudronnée de cinq kilomètre (prolongement urbain de la RN reliant Morondava à Antananarivo et de l'Accès à l'aéroport. Le reste du réseau urbain est constitué d'un quadrillage assez lâche de larges rues sableuses. ; La ville est desservie par la RN 35 et également desservie par un petit port de cabotage secondaire, caractérisé par la vétusté de ses installations, la difficulté de son accès et la faiblesse du trafic et dispose d'un aéroport national desservant les lignes régulières d'Air Madagascar

En absence de réseaux, les hôtels, villas et installations industrielles et commerciales sont équipées de puisards et / ou des fosses septiques, avec des rejets traités ou non, dans la nappe souterraine (puisards) ou dans les chenaux lagunaires et cours d'eau de surface. Les habitations modestes/ traditionnelles et en particulier les villages situés en bord de la mer et des chenaux, utilisent les plages et chenaux comme lieux d'aisance (pratique réprimée la plage mais continue sur les chenaux). Par ailleurs, la commune dispose d'un système de gestion des ordures très sommaires, un site de décharge.

➤ **Problèmes de l'assainissement et les infrastructures urbaines**

Avec l'érosion littorale, les inondations chromiques constituent le premier fléau auquel doit faire face la ville de Morondava. Une grande partie de l'ancienne ville, située sur des terrains très bas, est en effet irrégulièrement inondée par les crues de Morondava et/ ou les grandes marées. Malgré l'importance de l'enjeu, le réseau de drainage des eaux usées et de ruissellement/ inondation de Morondava est à peu près inexistant, avec une longueur totale 650 mètres de canaux qui ne fonctionnent plus ou peu par manque d'entretien.

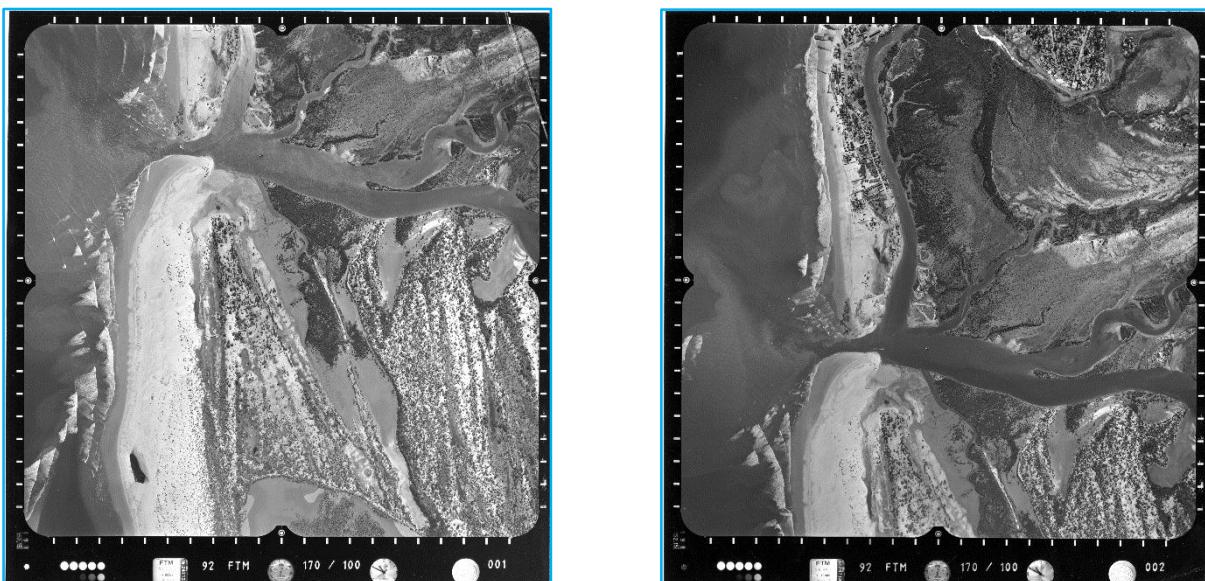
Chapitre II. PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES

Les données sont des types divers. On a utilisé pour cette étude des images satellitaires et des photos aériennes. On a essayé aussi d'exploiter des anciennes cartes marines pour les suivis d'évolutions du fond marin.

II 1. Les photos aériennes

Nous avons utilisé des clichés des photos aériennes négatives fournies par l'F.T.M. Elles sont datées de 1992 avec une échelle de prise de vue 1/10 000e couvrant notre zone d'étude.

Figure 39.Exemples des clichés des photos aériennes négatives, Source : F.T.M.

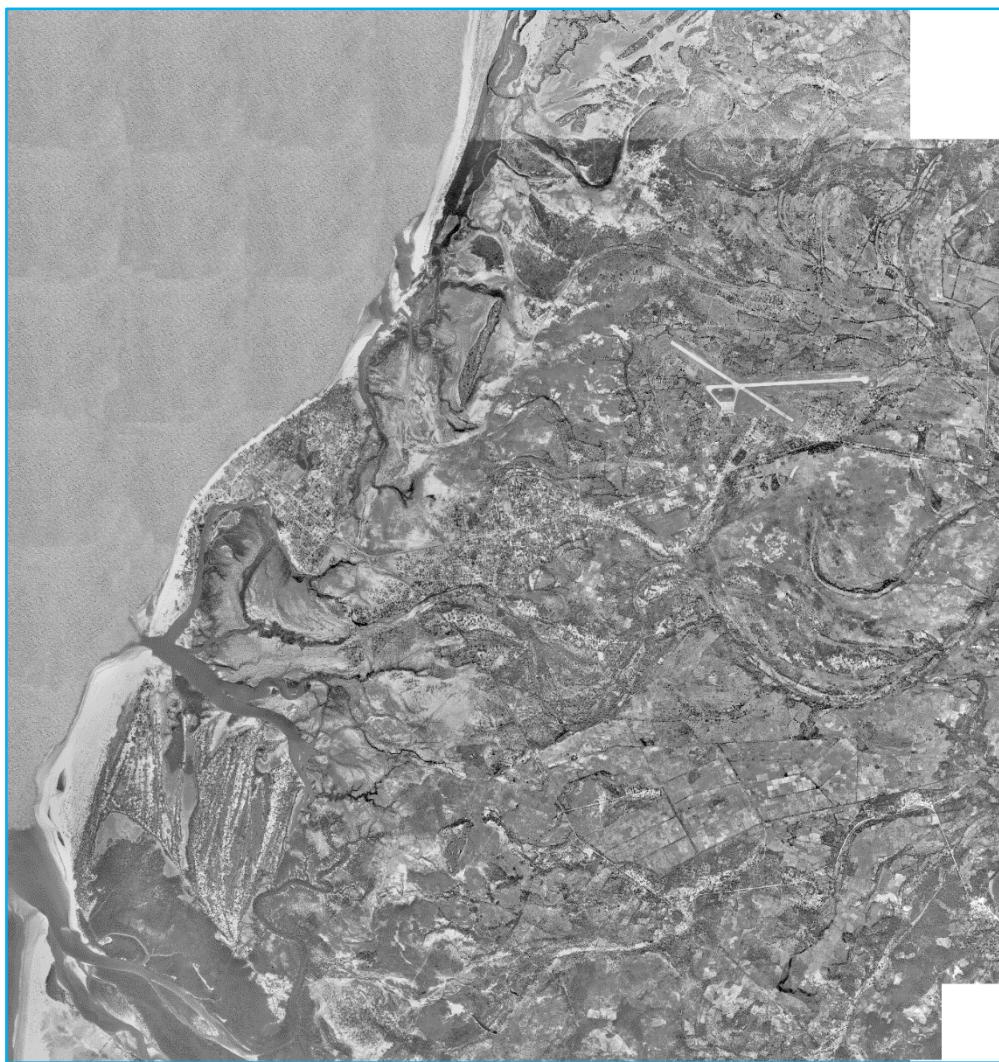


II 2. Ortho photo

Par définition un ortho photo est une image aérienne ou satellite de la surface de la Terre, rectifiées géométriquement.

Nous avons utilisé un ortho photo année 2003 fournie par l'F.T.M. à l'échelle de 1/ 11 000e.

Figure 40. Ortho photo Morondava et ses environs, Source : F.T.M.



II 3. Image satellitaire : Spot 5

Elle est fournie par SEA-OI La Réunion. Cette image est capté le 25 Mai 2013 à 07 h 02 mn 45.2s.

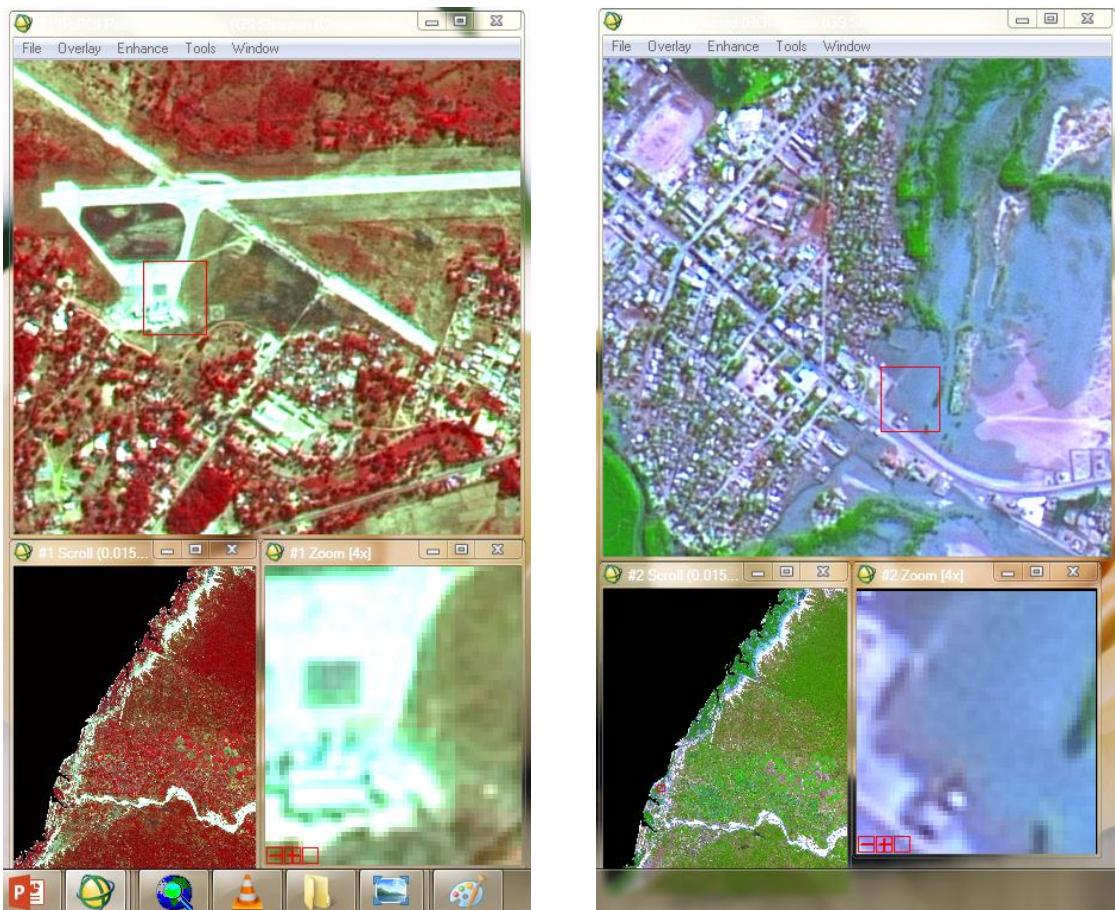


Figure 41. Extrait d'une image satellitaire (Spot 5) sur Morondava

Toutes les autres informations concernant sur cette image sont notées sur l'annexe.

II 4. Cartes anciennes

On a utilisé des cartes anciennes provenant des levés topo bathymétriques années 1973 levé par LCHF, 2001, 2006 et 2008 levé par SOGREAH pour les travaux de dragage de la passé et du chenal d'accès au port de Morondava.

Chapitre III. INDICATEURS SELECTIONNES POUR LE REFERENCLEMENT DU TRAIT DE CÔTE

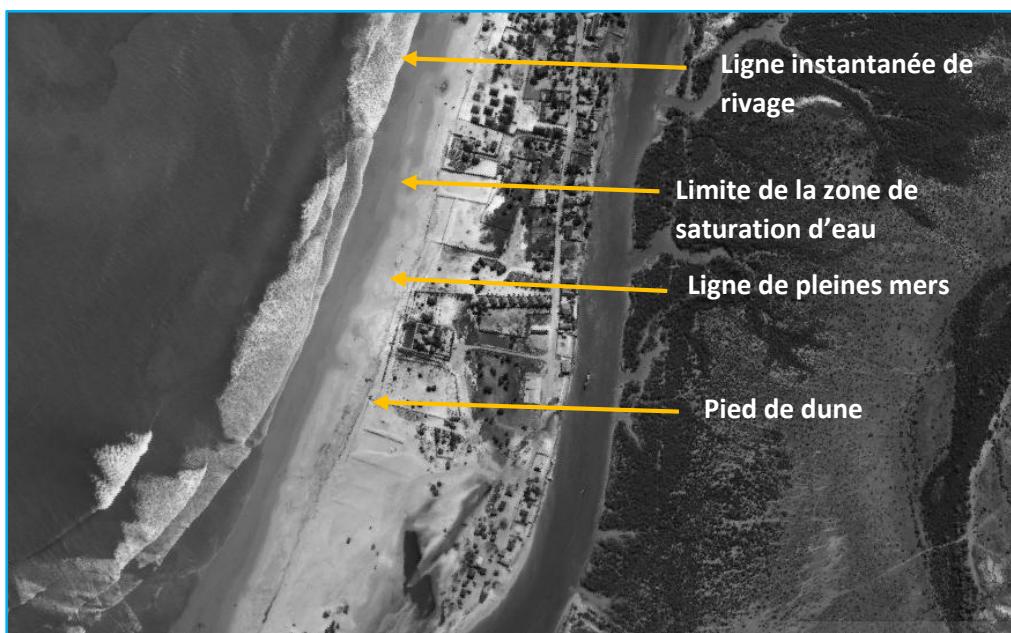
Compte tenu des nombreuses possibilités offertes par la littérature traitant des lignes de référence en géomorphologie, du secteur d'étude et des données acquises, nous avons sélectionné les indicateurs les plus adaptés à la reconstitution de la cinématique de la côte de Morondava.

III 1. Sur les images aériennes (photo aérienne négative et ortho photo)

Les observations de terrain effectuées lors de nos excursions pendant la voyage d'étude, l'échelle ainsi que la qualité des photographies aériennes nous ont permis de définir la ligne de référence la plus pertinente.

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 1992 et 2003.

Figure 42. Aperçu de la ligne instantanée de rivage, Limite de la zone de saturation d'eau, Lignes de pleines mers, pied de dune



III 2. Sur l'image satellitaire (Spot 5)

De même, sur l'image satellitaire (Spot 5), on peut voir également la ligne instantanée de rivage, limite de la zone de saturation d'eau, et le pied de dune.

Alors, en définitif, on prend comme ligne de référence du trait de côte pour cet étude le pied de dune.

Chapitre IV. TRAITEMENT DE DONNEES

Chaque donnée à un traitement spécifique avant d'extraire le trait de côte qui y figure.

IV 1. Sur les cartes anciennes

On passe toute suite au scanne de ces cartes et après on fait le calage. Après cela, on les a digitalisées et un modèle numérique du terrain avec un pas de 10 m a été créé. Ces modèles numériques du terrain ont ensuite comparés pour détecter les changements du fonds marin afin d'estimer l'évolution d'érosion du rivage et réaliser un calcul de cubature.

Les calculs de cubatures se font sur Covadis version 2007 sous le menu Covadis 3D / Cubatures par prismes entre 2MNT.

IV 2. Sur les clichés des photos aériennes négatives

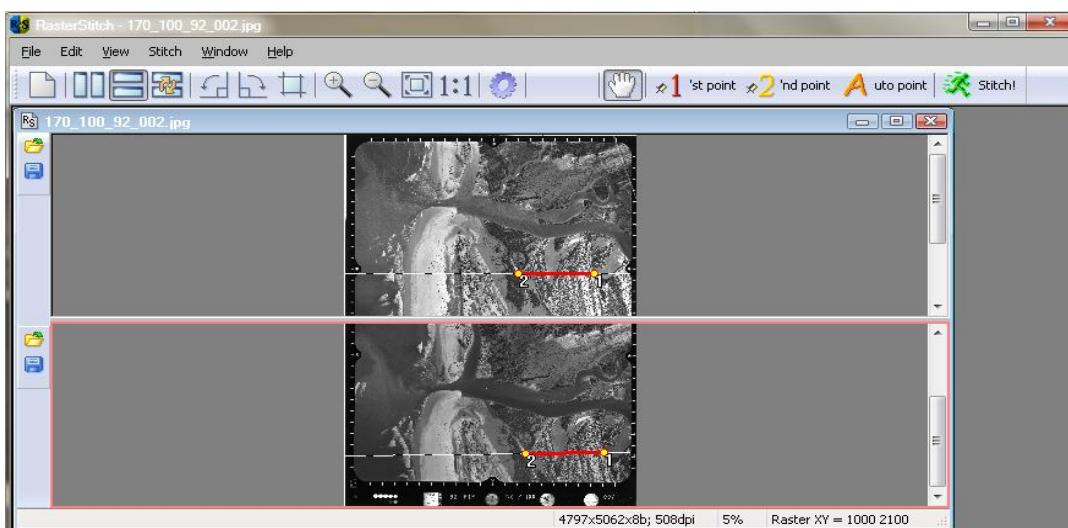
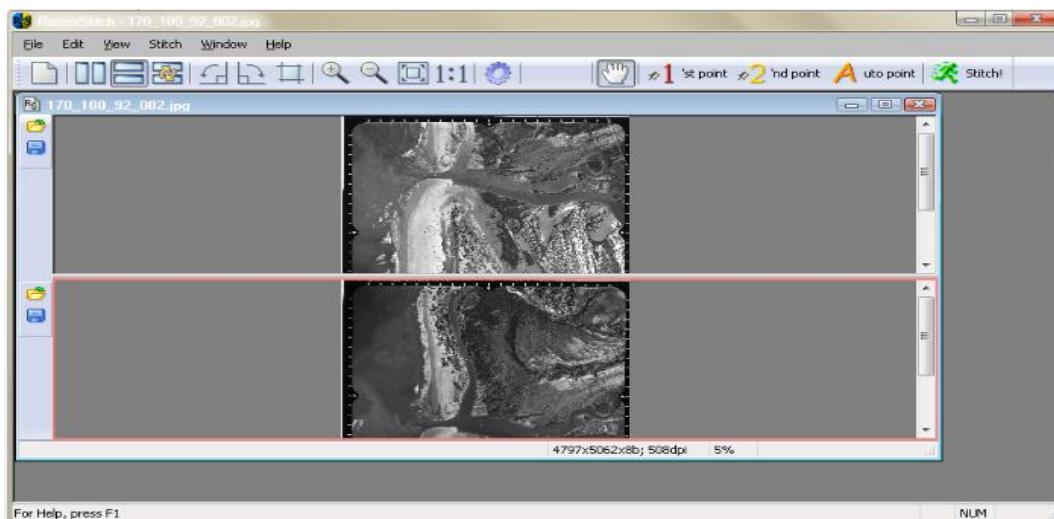
On a effectué tout d'abord le scannage des clichés avant de faire la mosaïque et après le géo référencement pour pouvoir superposer avec d'autres données.

Le scannage a été fait avec de scanner à haute résolution chef l'F.T.M.

On a utilisé un logiciel conçu spécialement pour la mosaïque à savoir le Raster stitch version 2.40. On a besoin suffisamment des recouvrements pour chaque photo des clichés à mosaïquer, si non l'opération n'est pas réalisable.



Figure 43. Mosaïque des clichés sous Raster Stitch



Après le mosaïquage des clichés, on a passé directement à la géo référencement de l'image mosaïqué sous ArcGis version 10.0. Cette étape est vraiment nécessaire pour rendre exploitable les clichés des photos mosaïquées.

L'opération suivante sera la digitalisation des traits de côte.

IV 3. Sur l'ortho photo

L'image est déjà rectifiée et géo référencée. On a effectué tout de suite l'extraction du trait de côte par digitalisation sous ArcGIS version 10.0.

IV 4. Sur l'image satellitaire (Spot 5)

Rappelons que la résolution de l'image Spot que nous avons utilisé est de 2.5m, ce qui nous permet de digitaliser le trait de côte selon l'indicateur sélectionné de notre zone d'étude qui est le pied de dune.

Mais avant tout, les traitements d'images classiques, c'est-à dire la correction radiométrique, la correction géométrique et la correction atmosphérique ont été appliquées.

Avant tout, on a fait l'amélioration de l'apparence des données avant de démarrer le traitement proprement dits. Tout abord, il y a l'équipopulation, qui est une visualisation d'un canal donné est à la fois une technique d'amélioration de contraste et une technique de comparaison des données. Ensuite, l'analyse en composantes principales (ACP). Cette technique a pour but de résumer les informations des canaux originaux dans un nombre plus réduit des nouveaux canaux. Plus précisément, on définit et on ordonne de nouveaux canaux de telle sorte que les premiers représentent le maximum d'information. Tous ces opérations se font sous ENVI 4.8 et après, l'image sera exportée vers l'ArcGIS pour pouvoir faire la digitalisation du trait de côte.

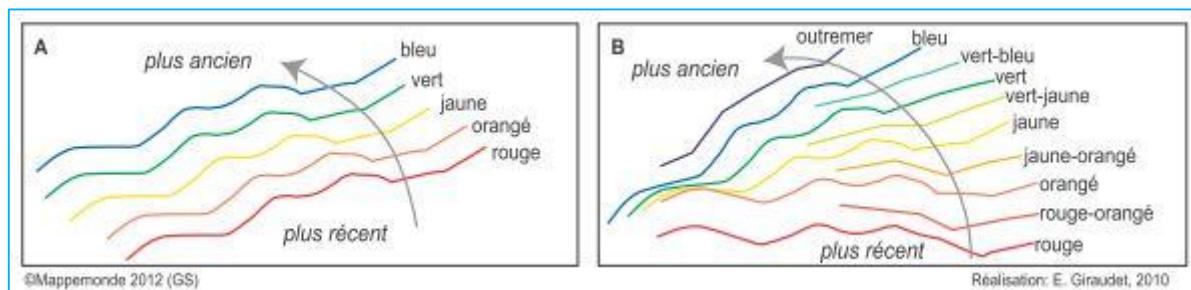
Chapitre V. PRESENTATIONS DES RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce chapitre, il s'agit de présenter comment faire le volet cartographique et les cartes cinématiques du traits de côte des différents dates.

Ensuite, nous montrerons les résultats de ces données intégrées dans un S.I.G., avec d'autres données complémentaires, qui permettront de présenter une analyse spatiale de l'évolution du trait de côte. Une discussion permettra d'apprécié les résultats obtenu.

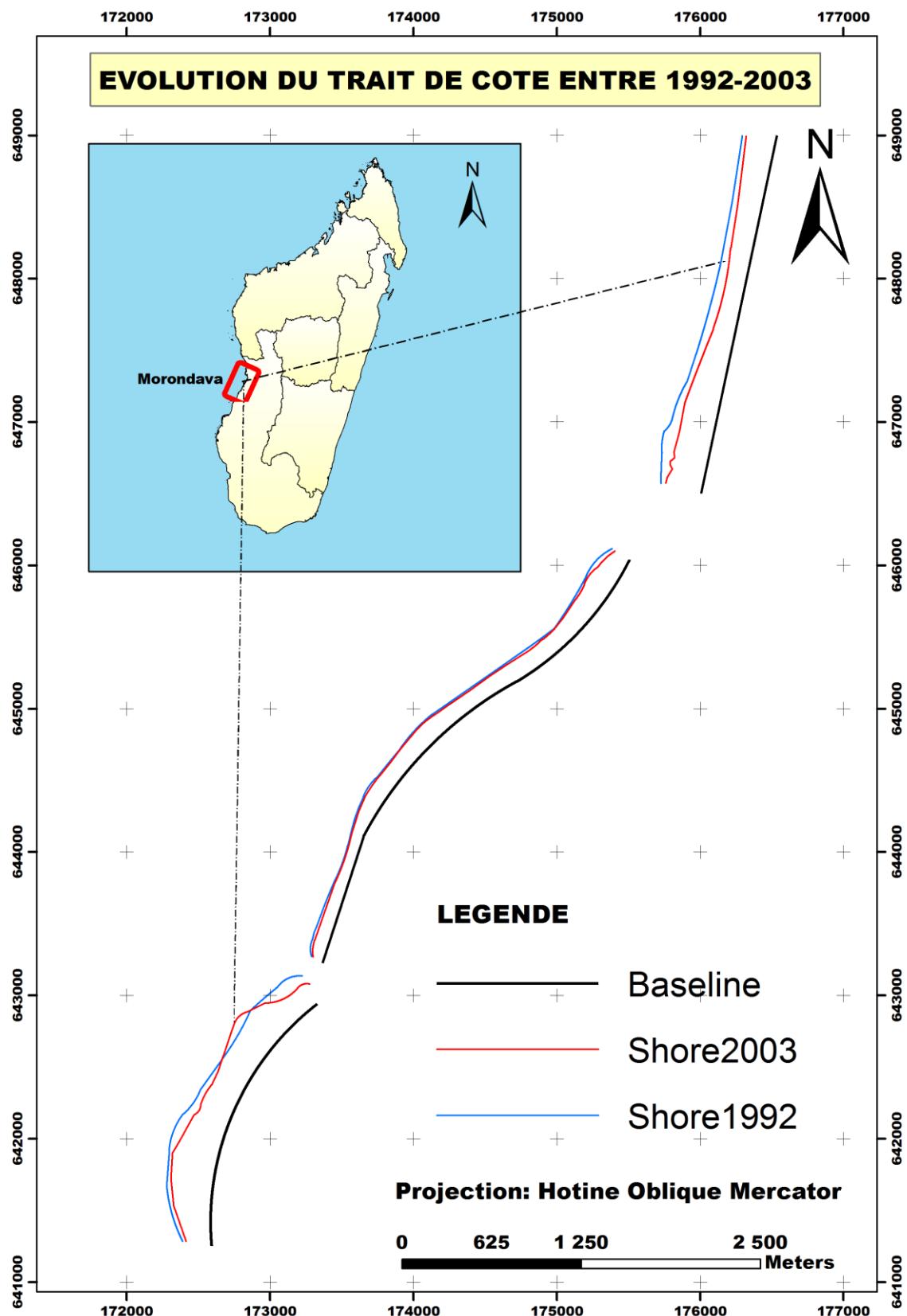
V 1. Volet cartographique

Les traits de côte sont symbolisés par l'utilisation de la variable couleur pour leur représentation cartographique. Par convention, la couleur rouge évoquera le trait de côte le plus récent.

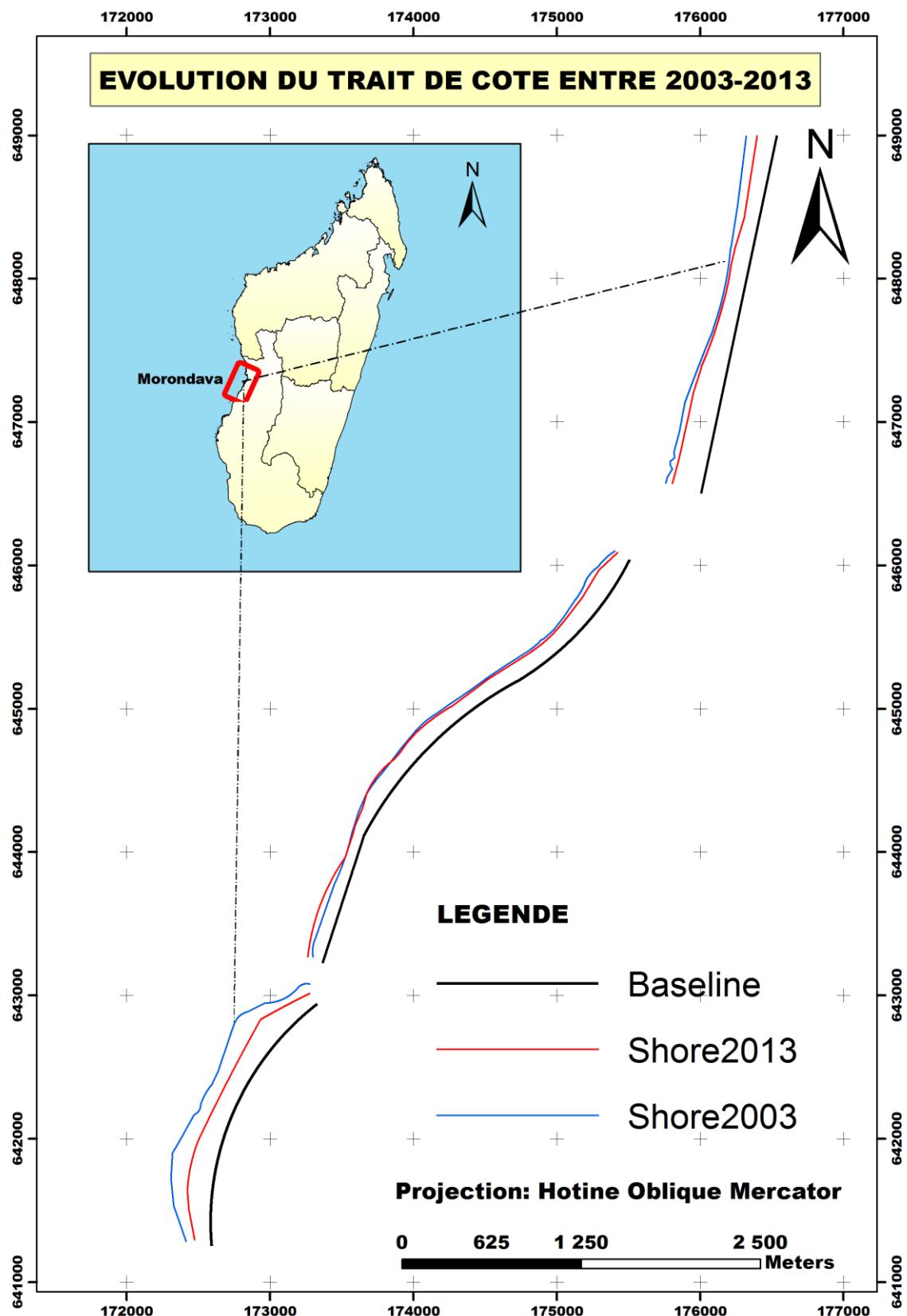


V 2. Les résultats

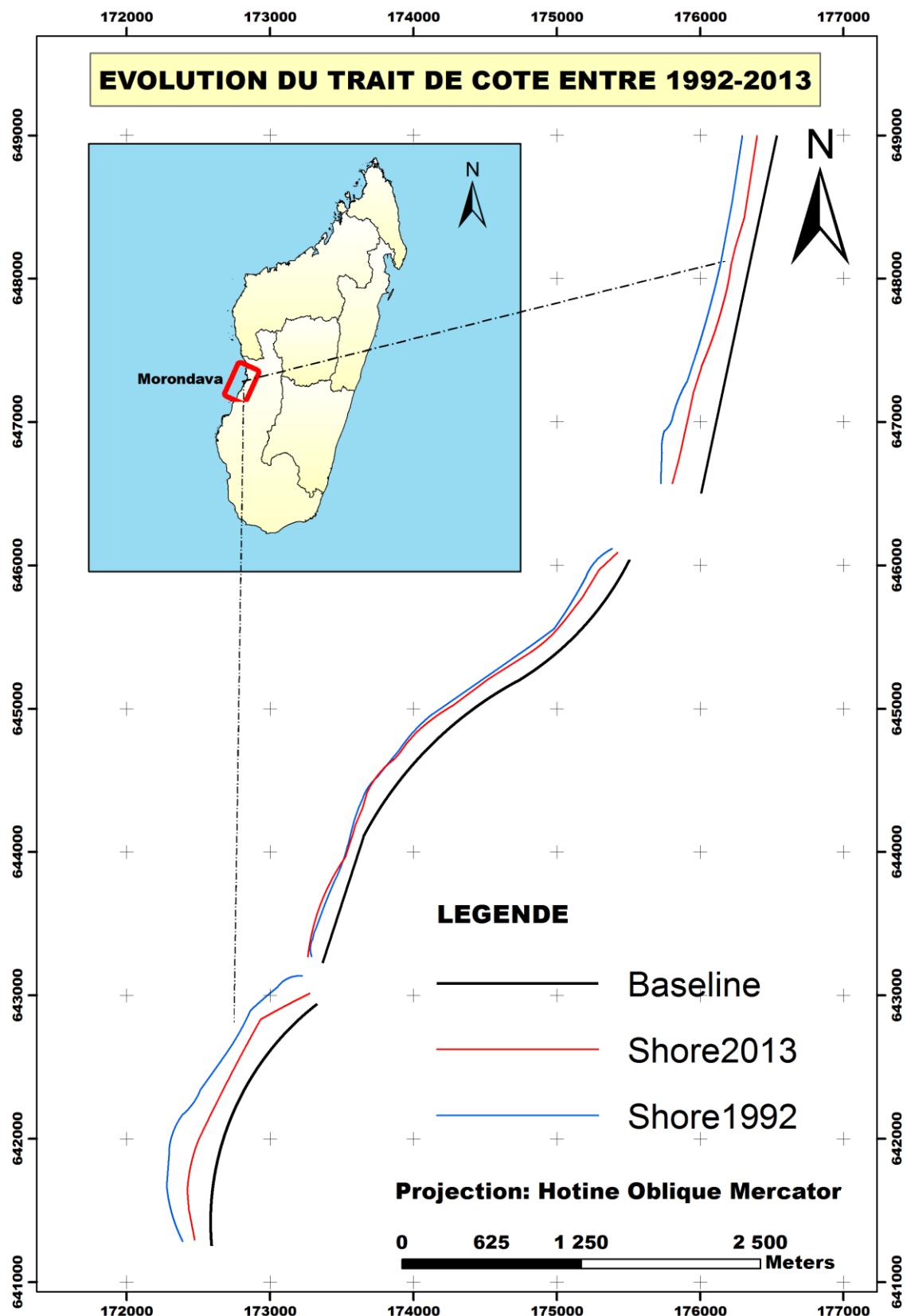
Suite à l'application de la méthodologie détaillée précédemment, avec les différentes données, les résultats de cette étude sont les suivants :

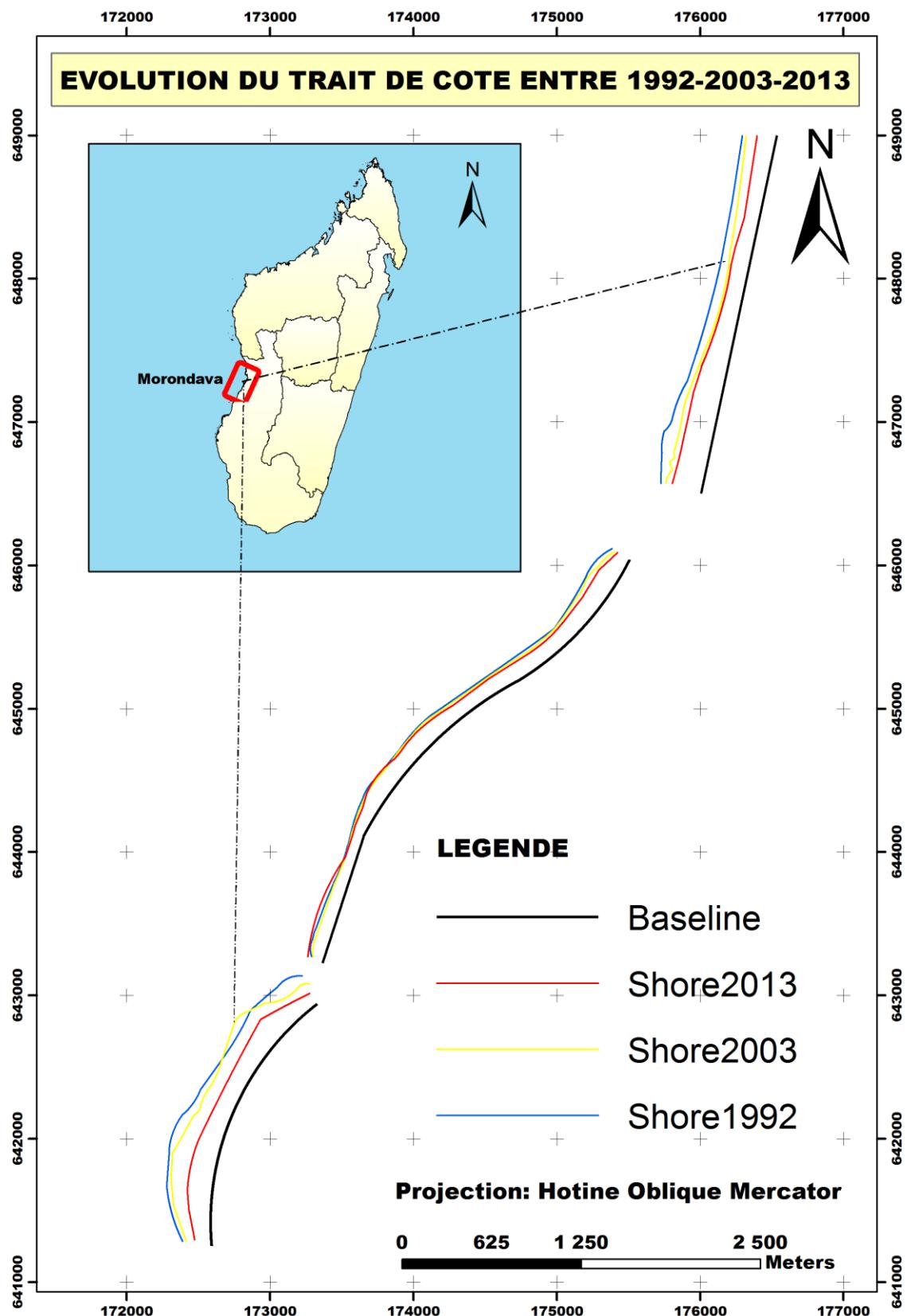


Carte 2. Evolution du trait de côte entre 1992-2003



Carte 3. Evolution du trait de côte entre 2003-2013





Carte 5. Evolution du trait de côte entre 1992-2003-2013

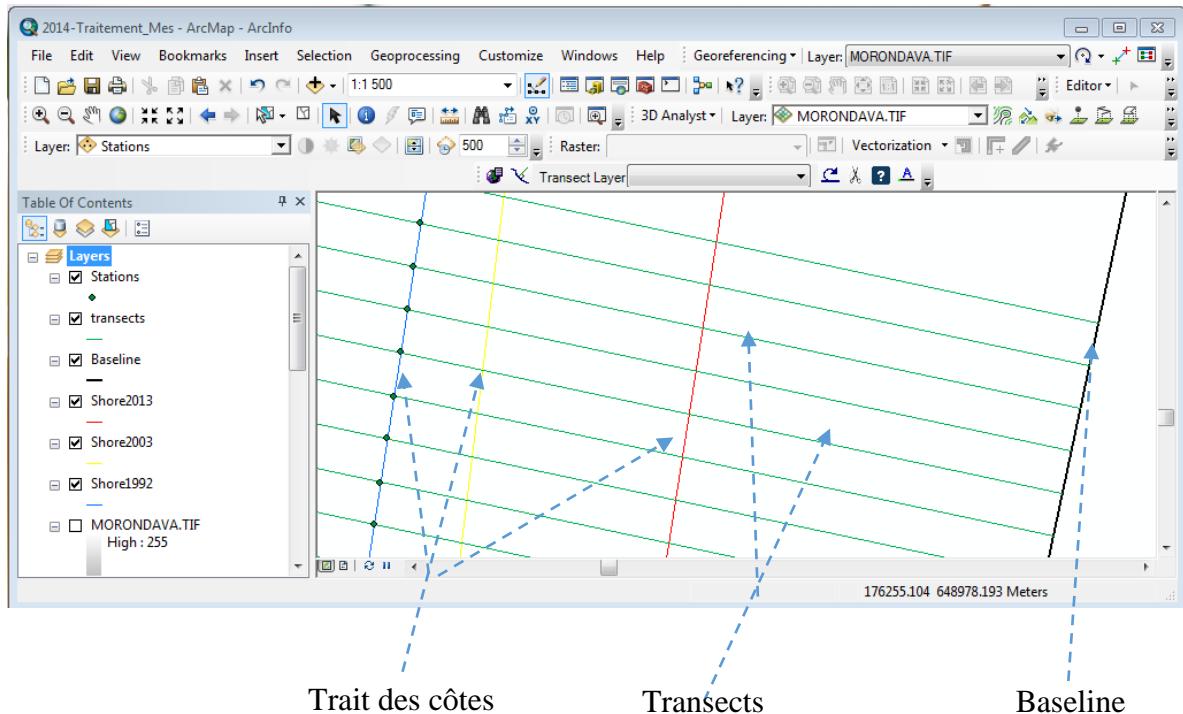
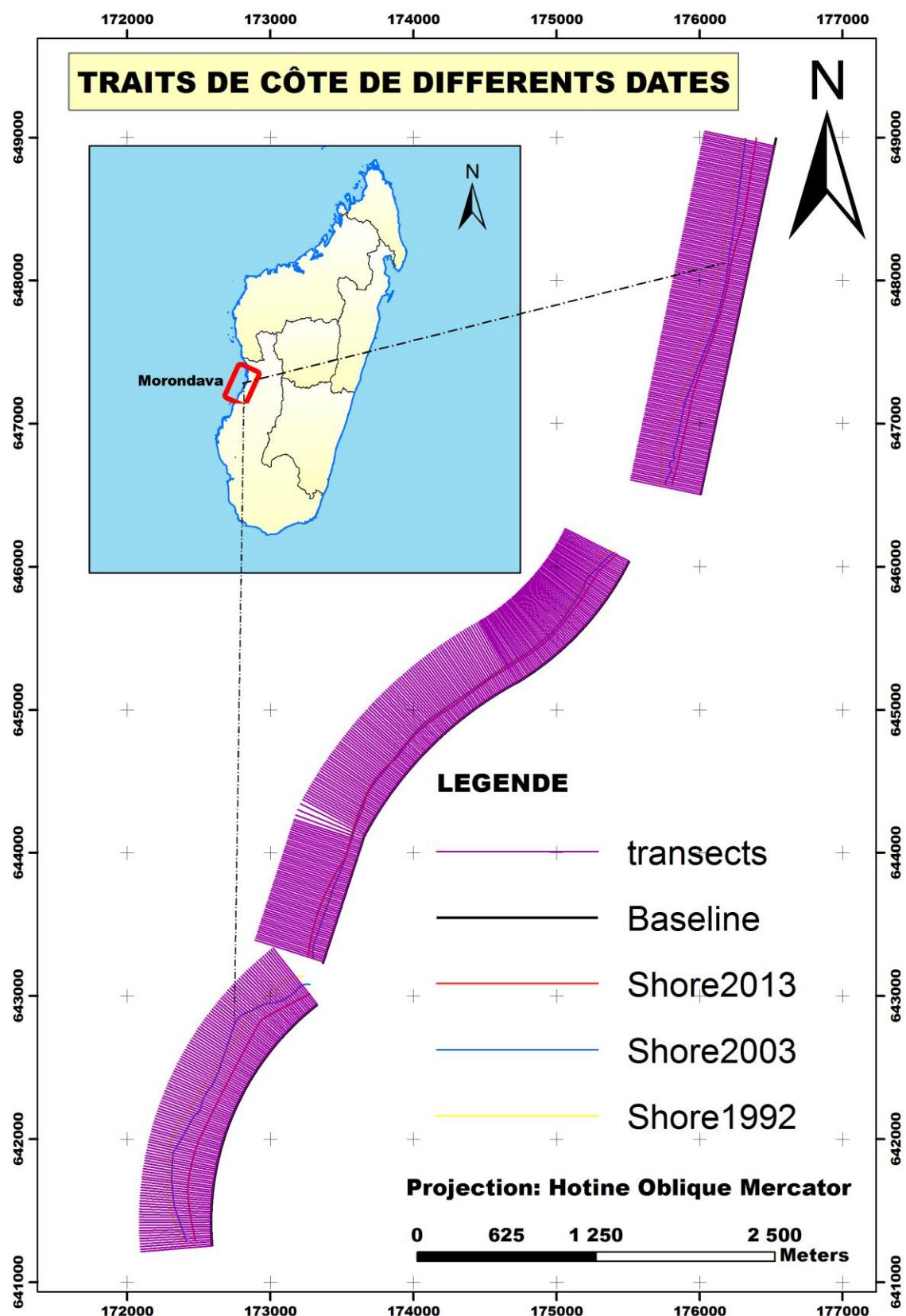


Figure 45. Traits des côtes, transects et Baseline dans ArcGIS

Pour quantifier les changements de position du trait de côte, nous préconisons l'utilisation de l'extension Digital Shoreline Analysis System (DSAS), plugin gratuit pour le programme hôte ArcView de la société ESRI. L'emploi de ce plugin nécessite de définir une ligne de référence fictive (Baseline), une longueur pour les transects ainsi qu'un pas de mesure et de disposer de traits de côte projetés dans le même système de projection.

Lorsque tous les paramètres d'entrée sont correctement, selon le pas de mesure défini, des transects perpendiculaires aux linéaires côtières, mesure les écarts entre les traits de côte et calcule les taux moyens de déplacement le long de chaque transect. Dans notre cas, l'espacement entre les transects est de 15 mètres.

On mesure ensuite les écarts entre chaque point d'intersections sur le trait de côte 1992 et les traits de côte de 2003 et 2013, directement à l'écran de l'ordinateur, à l'aide de la commande « mesure » de l'ArcGIS. Cela permettra d'établir le tableau de mesure de distance et de vitesse du phénomène.



V 3. Volet graphique et statistique

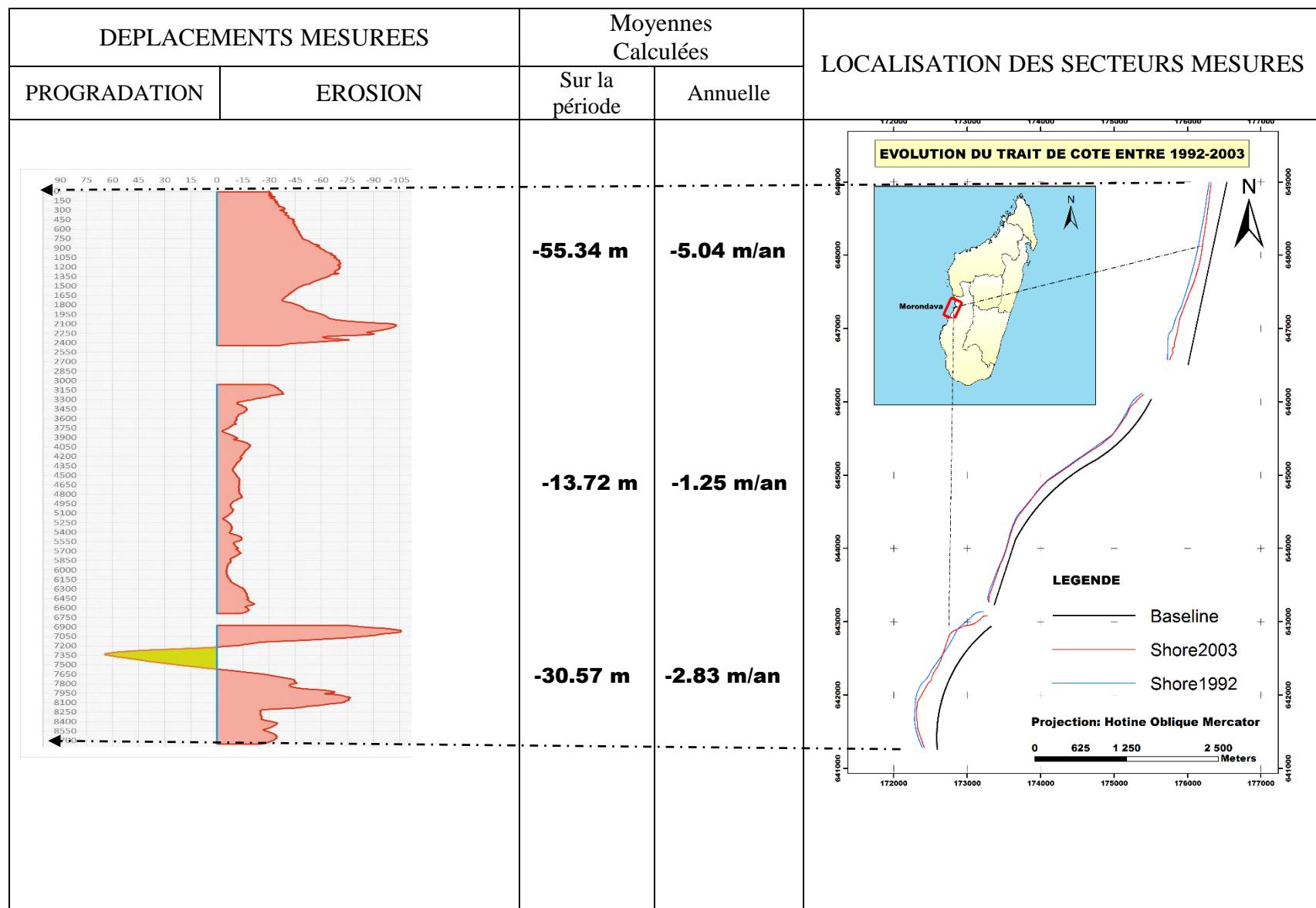
Le volet graphique et statistique comporte deux parties. La partie intitulé « déplacements mesurés » restitue visuellement, grâce à des courbes, l'avancée et le recul du trait de côte sur différents secteurs. Ces secteurs du rivage constituent l'échelle d'analyse élémentaire pour le volet graphique et statistique traduisent une ségrégation naturelle du rivage permettant de rendre compte des variations spatiales de la cinématique littorale. En effet, ils correspondent chacun à un segment de côte le long duquel les caractéristiques de la progradation et de l'érosion sont proches ou semblables en termes de vitesses et de distances. Les moyennes correspondantes restituées dans la partie intitulée « moyennes calculées » sont ainsi beaucoup plus représentatives. Les surfaces délimitées par le croisement des traits de côte avec la ligne de base (en bleu) sont respectivement les surfaces de progradation (à gauche) et les surfaces d'érosion (à droite).

En général, les couleurs chaudes, du jaune au rouge, symbolisent des états positifs tandis que les couleurs froides, du vert-jaune à l'outremer, expriment des phénomènes négatifs. Cependant, la couleur rouge peut également évoquer un risque, une interdiction, une alerte, un élément que l'on doit remarquer. Alors, il existe un lien entre la couleur rouge et la situation d'érosion ; l'érosion étant considérée comme un risque côtier important sur lequel on souhaite attirer l'attention du lecteur.

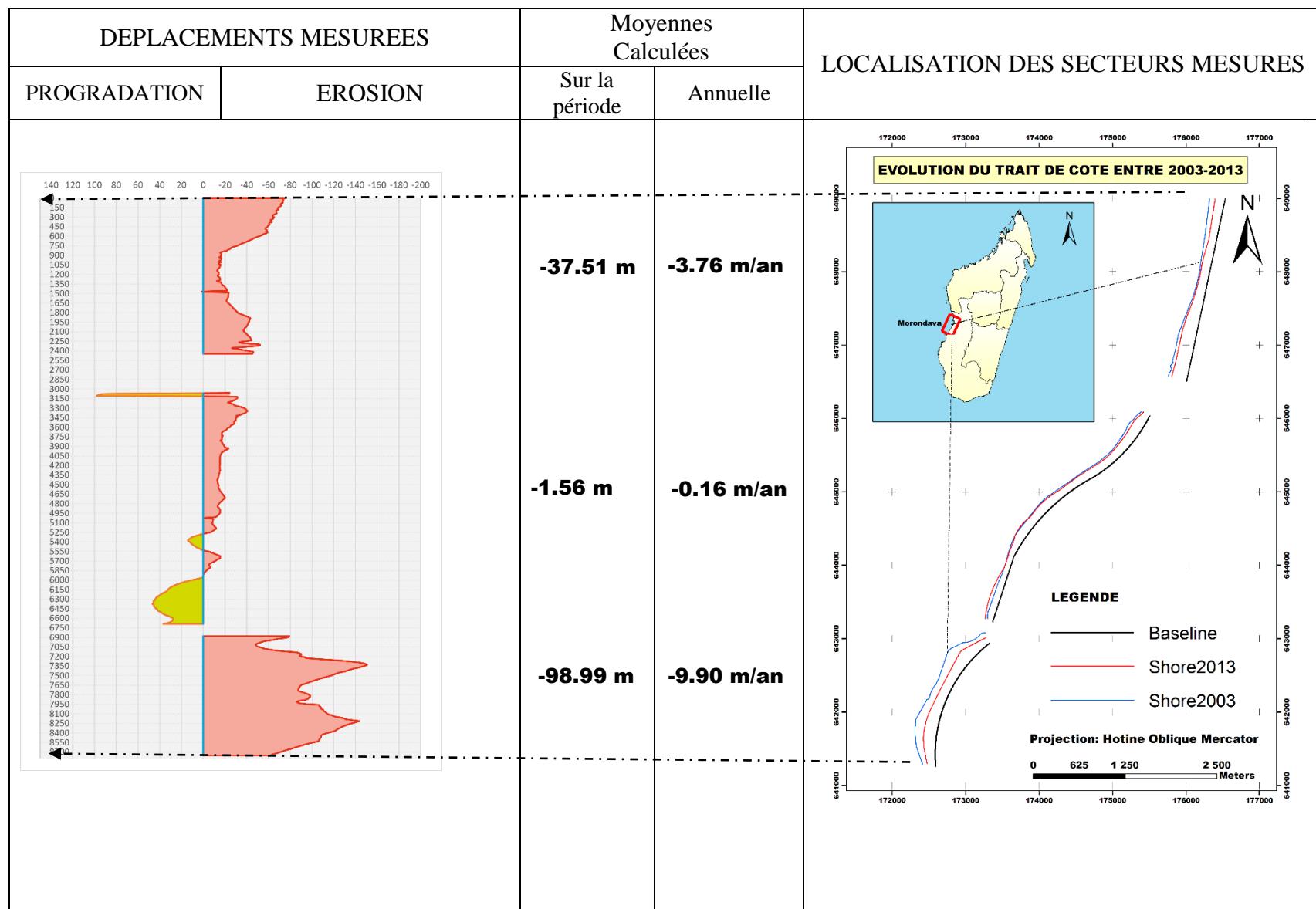
Dans la partie intitulée « moyennes calculées », figure un tableau subdivisé en deux parties :

- La colonne « moyenne sur la période » donne pour chacun des secteurs de la côte le déplacement moyen (en mètres) du trait de côte sur toute la période d'étude.
- La colonne « moyenne annuelle » indique le déplacement moyen du trait de côte calculé sur une période annuelle (en mètre /an).

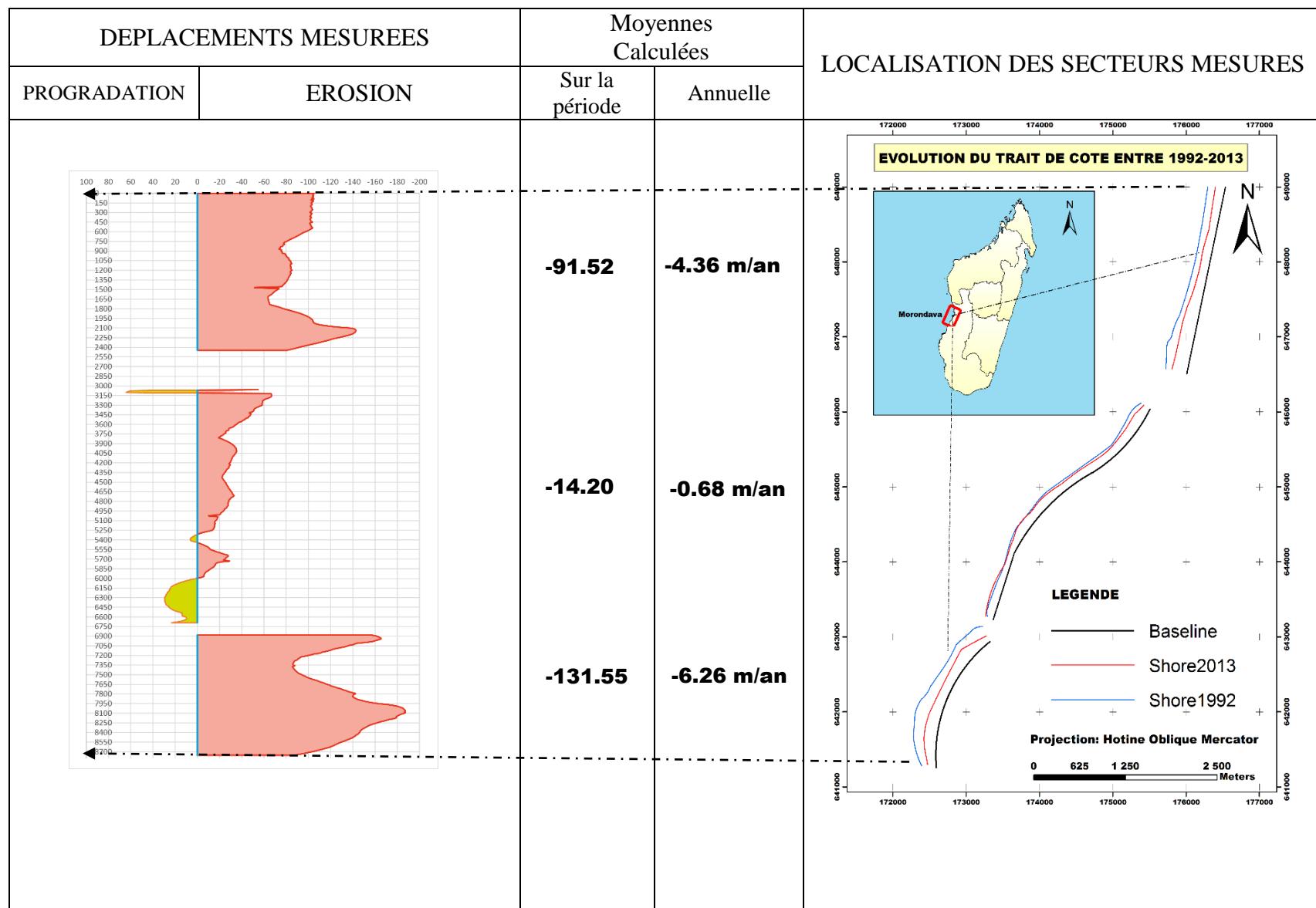
Les courbes du volet graphique, tracées dans un tableur en coordonnées cartésiennes représentent, en abscisse, le nombre de mesures ou profils réalisés, et en ordonnée, les valeurs d'évolution mesurées (entre deux traits de côte successifs).



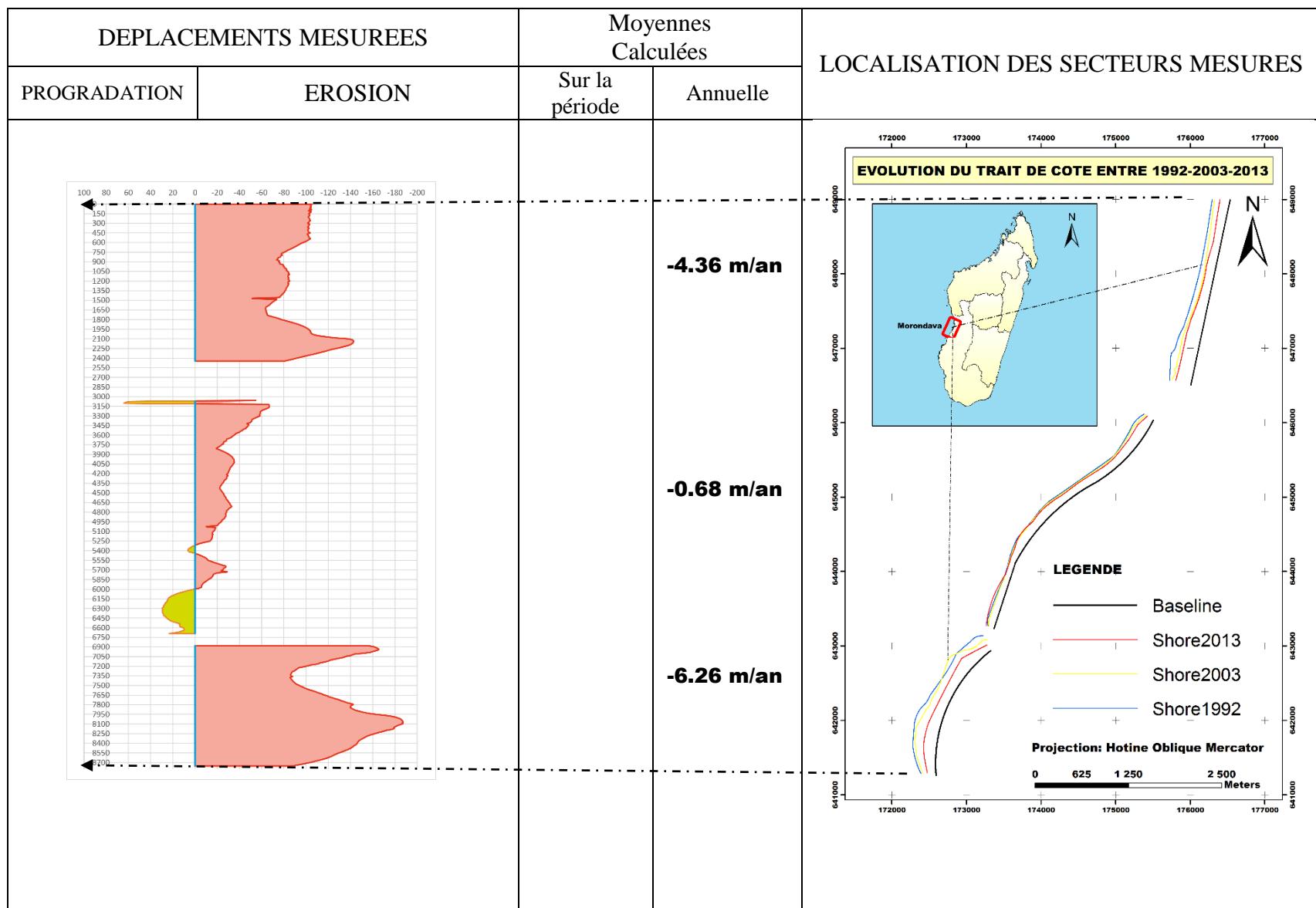
Carte 8. Evolution du trait de côte entre 1992-2003



Carte 9. Evolution du trait de côte entre 2003-2013



Carte 10. Evolution du trait de côte entre 1992-2013



Carte 11. Evolution du trait de côte 1992-2003 - 2013

Dans notre cas, même si le volet graphique est lié géographiquement à la carte du volet cartographique, cette liaison n'est pas relationnelle (au sens des bases de données). Les taux d'évolution mesurés et calculés sont des données qui ne font pas partie des tables attributaires des couches d'information de base (trait de côte).

Elles sont traitées graphiquement dans des tableurs ou dans des logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO). La carte n'est donc pas entièrement conçue dans le module de mise en page du SIG et implique une exportation des divers éléments dans un logiciel de DAO.

Les préconisations présentées ici ont pour ambition d'améliorer les diagnostics de l'évolution du trait de côte.

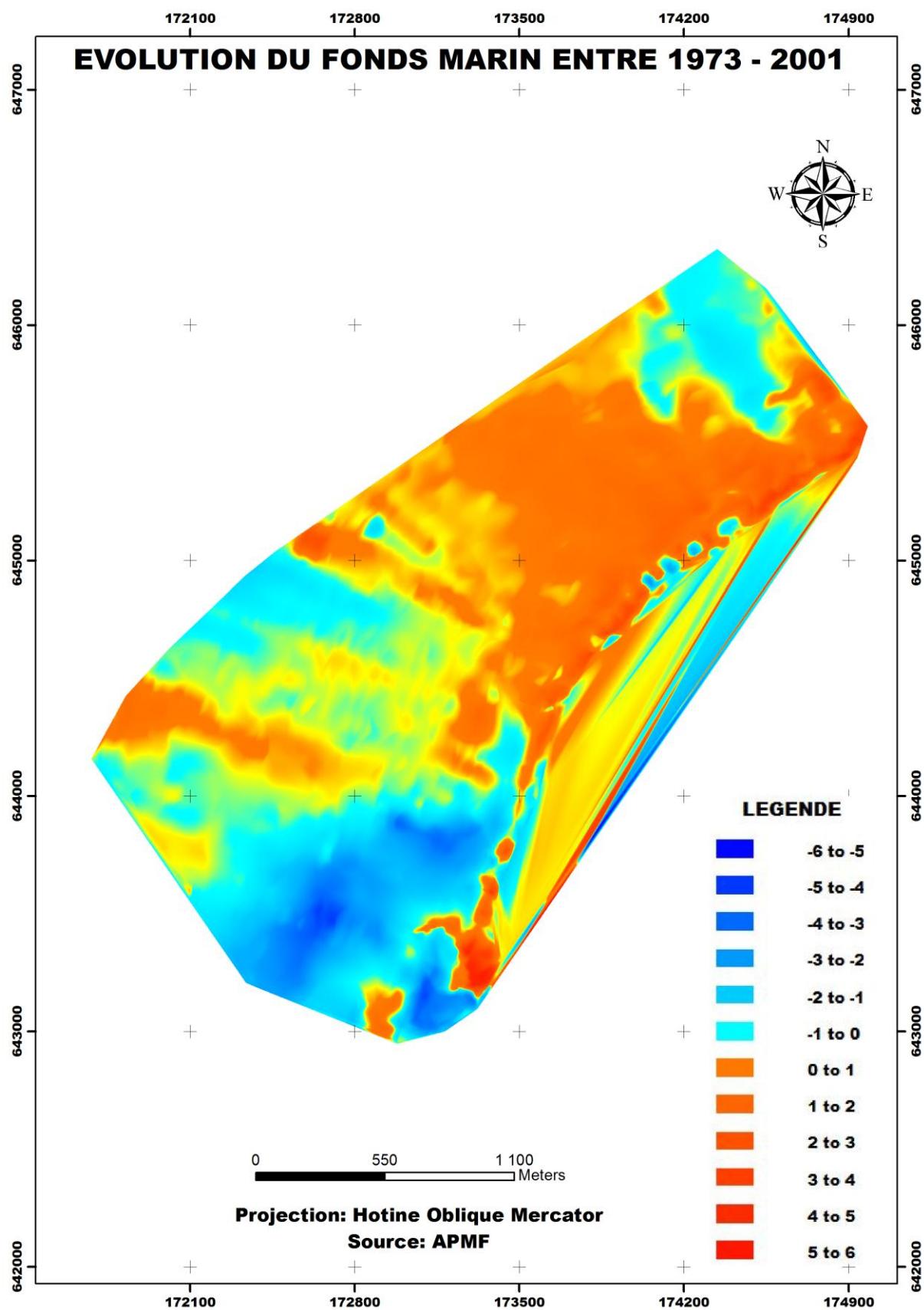
V 4. Evolutions des fonds et du littoral

V 3.1. Evolution des fonds entre 1973 et 2001

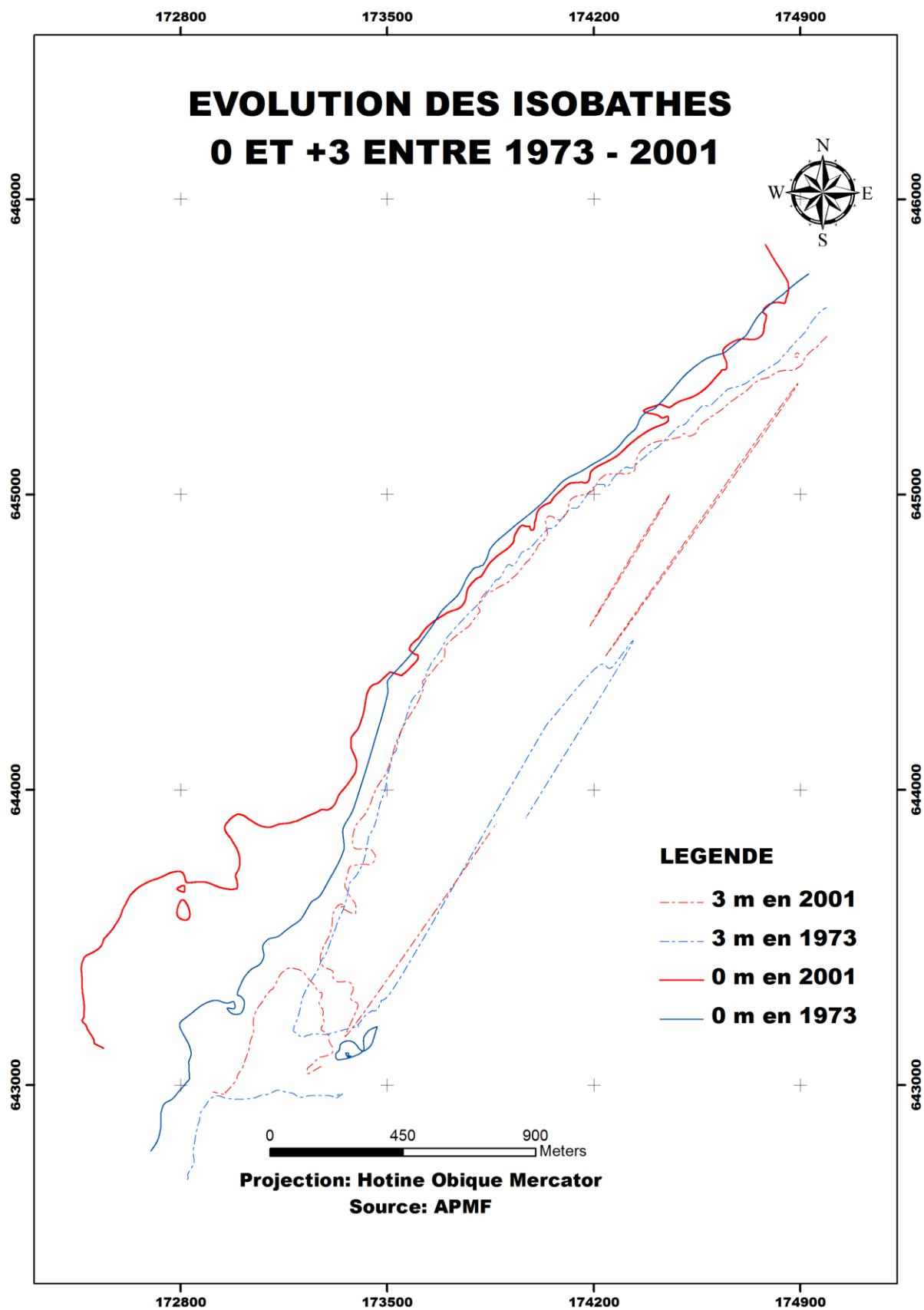
Les levés de 1973 et 2001 ont été digitalisés et deux modèles numériques de terrain avec un pas de 10 m ont été créés. Les deux modèles numériques de terrain ont ensuite été comparés pour déterminer les évolutions (Carte 12). Les positions respectives des isobathes de niveau 0 et +3 de 1973 et 2001 sont présentées sur la (carte 13).

Tableau VII. Volumes de dépôts et d'érosion 1973 - 2001

Dépôt (m ³)	Erosion (m ³)	Bilan (m ³)
276 500	-279 050	-2 550



Carte 12. Evolution du fonds marin entre 1973 – 2001



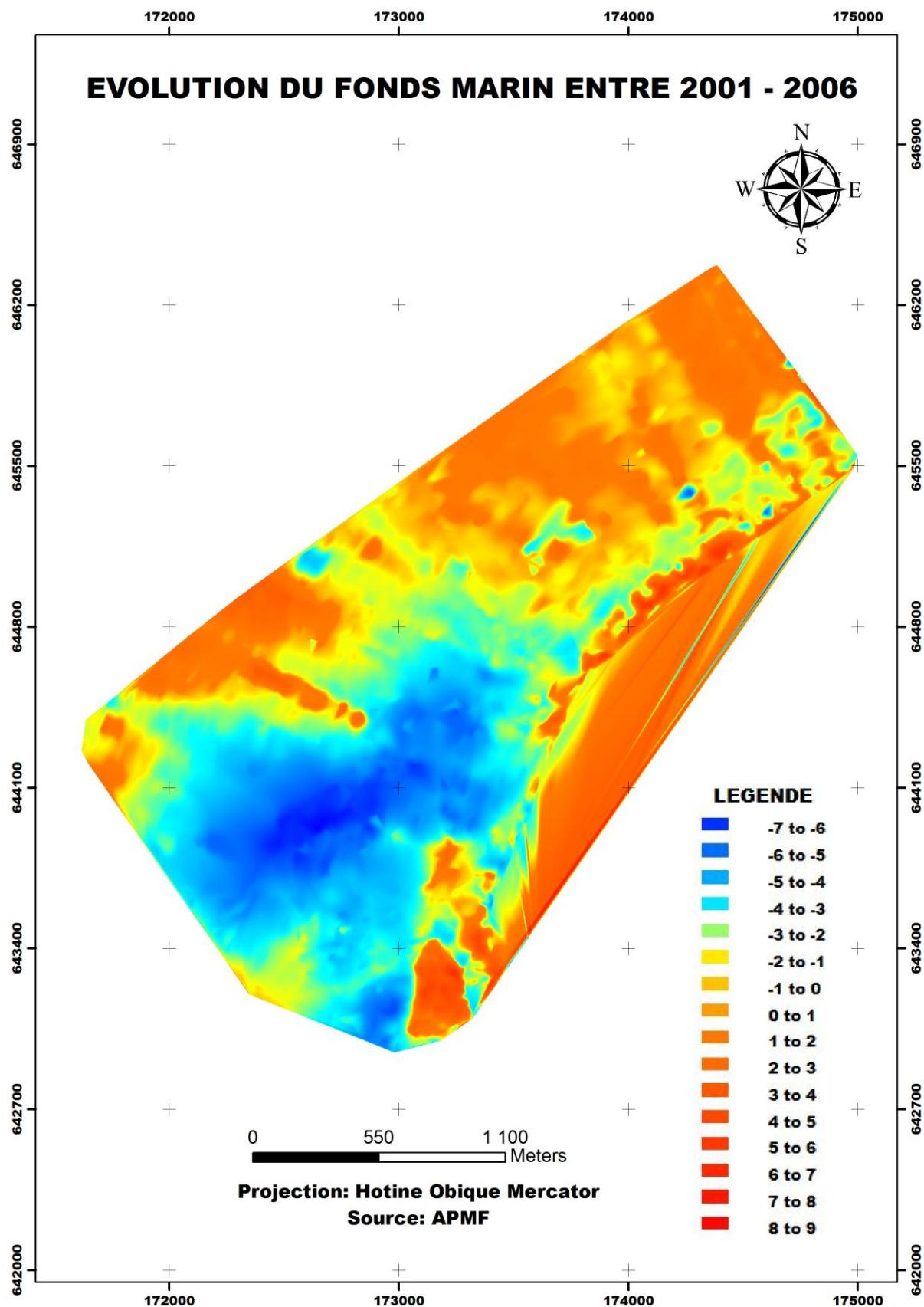
Carte 13. Evolution des isobathes 0 et +3 entre 1973 et 2001

V 3.2. Evolution du fonds marin entre 2001 - 2006

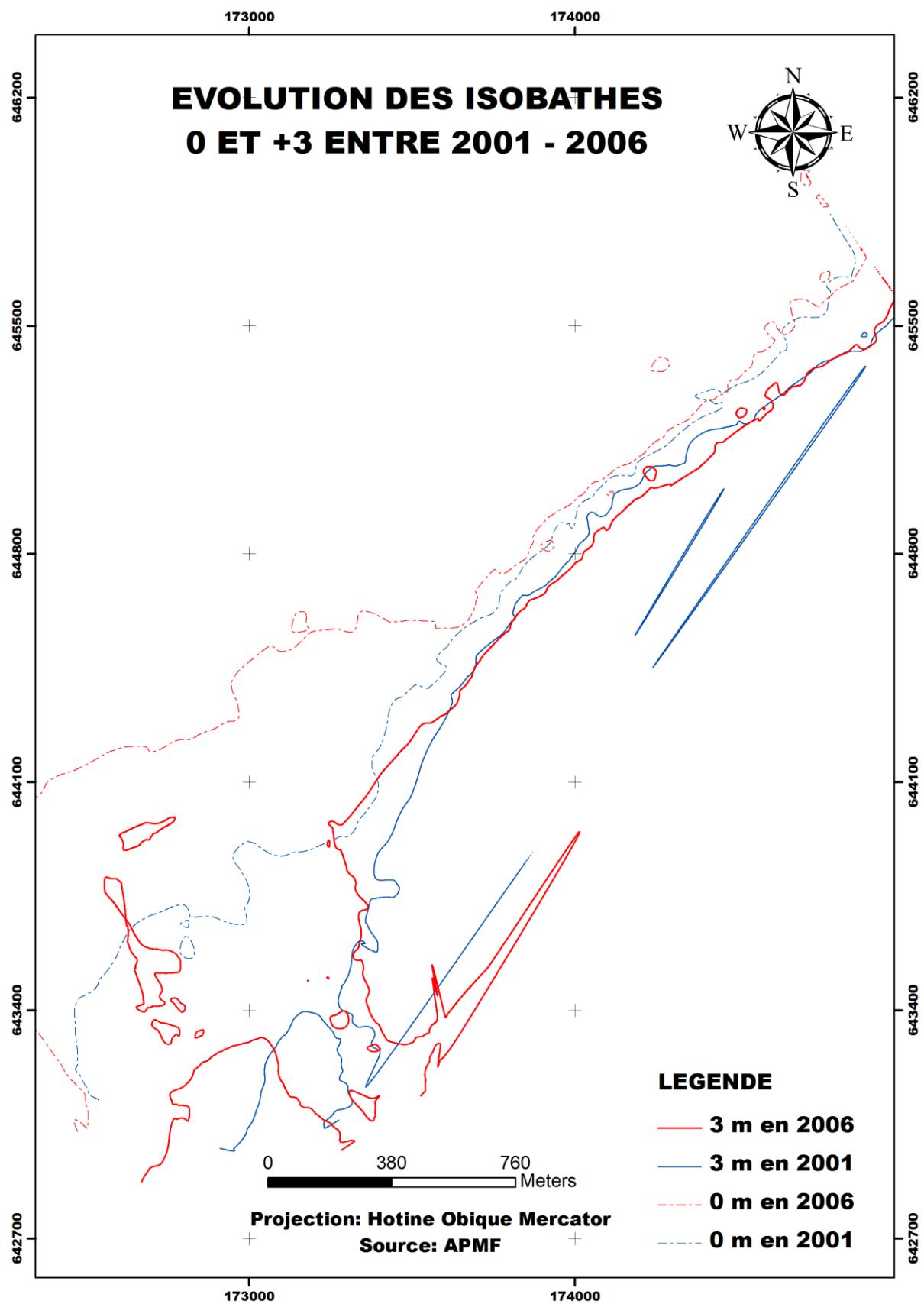
Le levé 2006 a été digitalisé et deux modèles numériques de terrain avec un pas de 10 m ont été aussi créés. Les deux modèles numériques de terrain ont ensuite été comparés pour déterminer les évolutions (Carte 14). Les positions respectives des isobathes de niveau 0 et +3 de 1973 et 2001 sont présentées sur la (carte15).

Tableau VIII. Volumes de dépôts et d'érosion 2001 - 2006

Dépôts (m ³)	Erosion (m ³)	Bilan (m ³)
251 163	-301 010	-49 847



Carte 14. Evolution du fonds marin entre 2001 - 2006



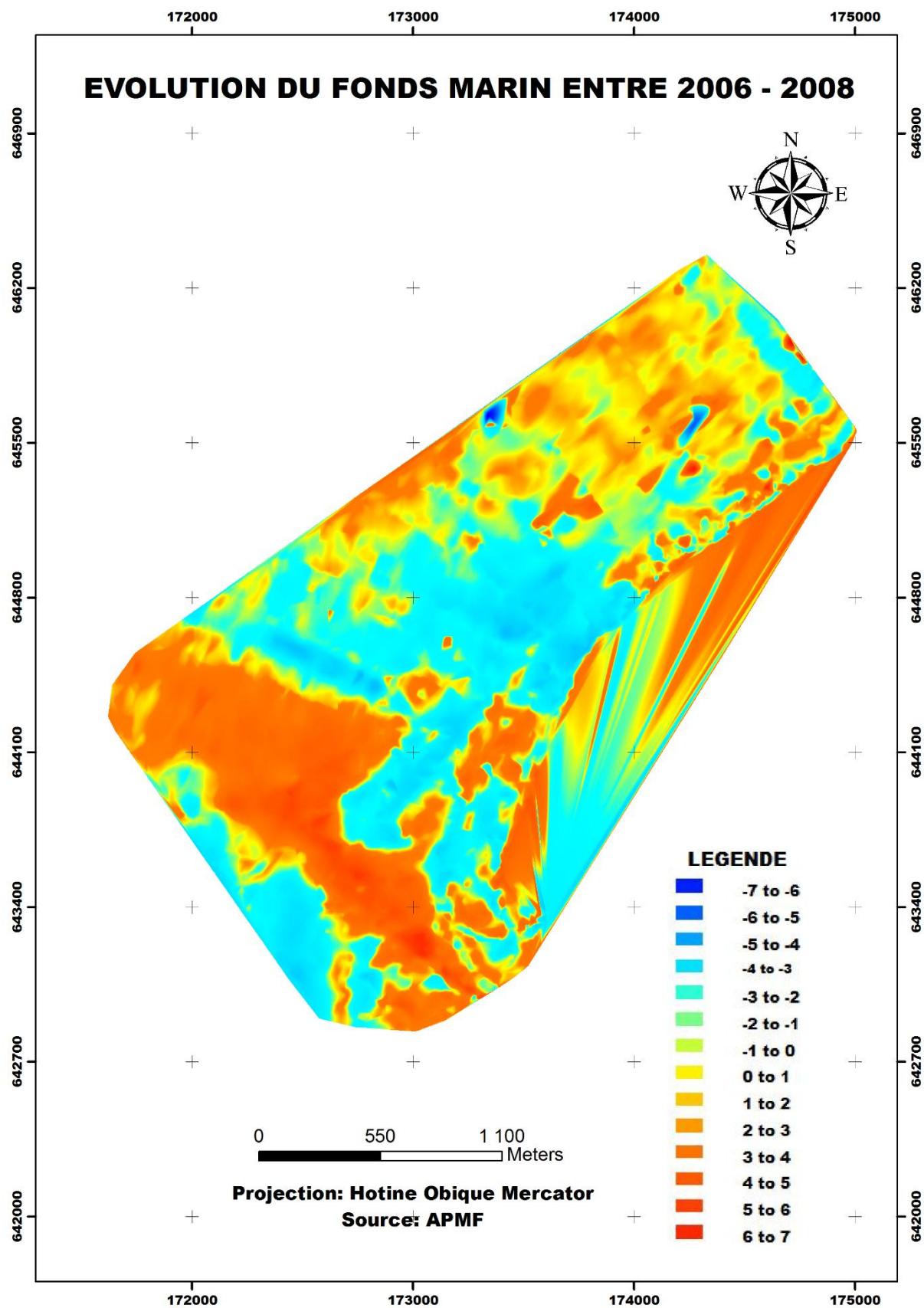
Carte 15. Evolution des isobathes 0 et +3 entre 2001 - 2006

V 3.3. Evolution du fonds marin entre 2006 - 2008

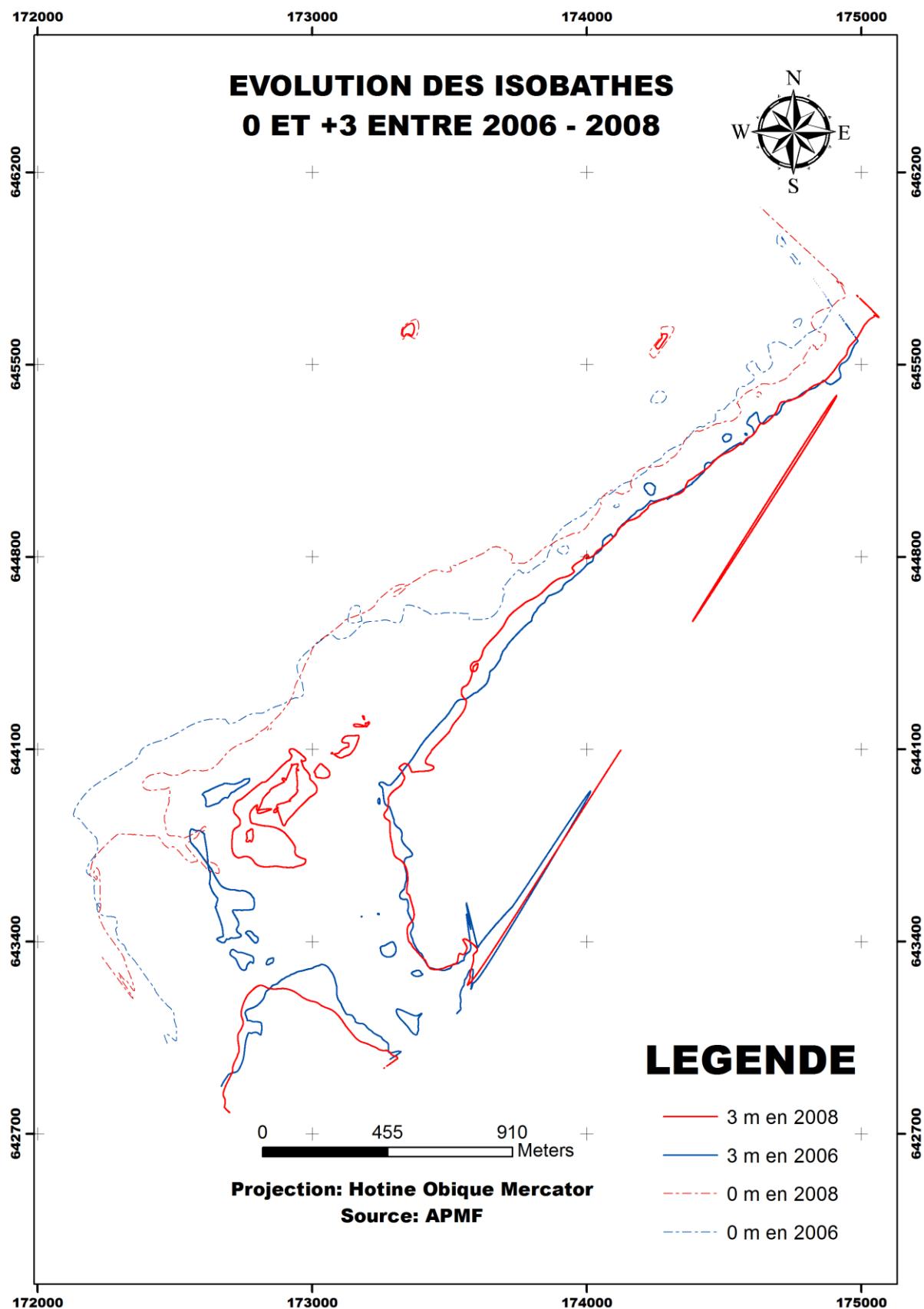
Le levé 2008 a été digitalisé et deux modèles numériques de terrain avec un pas de 10 m ont été aussi créés. Les deux modèles numériques de terrain ont ensuite été comparés pour déterminer les évolutions (Carte 16). Les positions respectives des isobathes de niveau 0 et +3 de 1973 et 2001 sont présentées sur la (carte17).

Tableau IX. Volumes de dépôts et d'érosion 2006 - 2008

Dépôts (m ³)	Erosion (m ³)	Bilan (m ³)
198 560	-202 035	-3 475



Carte 16. Evolution du fonds marin entre 2006 - 2008



Carte 17. Evolution des isobathes 0 et +3 entre 2006 et 2008

V 5. Vérité terrain

Comme le levé du terrain est l'une de source du trait de côte, on a essayé de faire un levé sur terrain pour titre de vérification.

Tous travaux topographiques doivent être précédés d'un cheminement polygonal. On a utilisé une station totale TC1100 dont son écart-type angulaire est de 20 dmgon et 2 cm d'écart sur la distance mesurée sans centrage. On a effectué le double retournement et des séquences de visées lors des tours d'horizon.

On applique la méthode de réitération associée au tour d'horizon pour rendre accidentelle l'erreur due à l'erreur de division du limbe et pour éliminer l'erreur de tourillonnement et de collimation horizontale.

Une paire de séquence est l'association de deux séquences successives avec un décalage de l'origine du limbe, le retournement de la lunette et l'inversion du sens d'observation. Cette méthode permet de minimiser certaines erreurs systématiques. Généralement, l'opérateur effectue une séquence en CG dans le sens horaire de rotation de l'appareil puis effectue un double retournement et enfin effectue la séquence en CD dans le sens trigonométrique (sens inverse horaire).

Les données observées sont : les angles horizontaux, les angles verticaux et les distances en pente.

Afin de faciliter le traitement des données, on doit calculer les moyennes des lectures d'angles et celles des distances.

On voit certains indicateurs utilisables sur le positionnement du trait de côte comme la ligne instantané du rivage, la limite de zone de saturation, la limite du sable sec / mouillé, la ligne du niveau des pleines mers, niveau des pleines mers antérieur, pied de dune, laissé de mer.

Mais la matérialisation de ces lignes de référence sur terrain reste délicate, peu aisée et incertaine. Les incertitudes sont liées à la nature de la ligne elle-même, quelques fois à son instabilité ainsi que à l'instrument utilisé.

Compte tenu la multiplicité des traits de côte en usage, il est nécessaire de trouver un ou des indicateurs plus ou moins objectifs du niveau atteint par les hautes eaux. Donc, on a pris le pied de dune comme indicateur de positionnement du trait de côte.

Cet état de lieu est suivi du lever proprement dit. L'ossature du lever est un cheminement encadré.

Tableau X. Calcul de coordonnées des points de polygonale de base

St	Point visé	α (Gon)	Dist (m)	G (Gon)	α_{comp} (Gon)	G_{Comp} (Gon)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔX_{comp} (m)	ΔY_{comp} (m)	X (m)	Y (m)
S1	Ref	189.4616	456.038	73.4091	189.4633	73.4091					174832	645348
	S2			262.8707		262.8724	-380.657	-251.139	-380.641	-251.12		
S2	S1	188.7815	389.716	62.8707	188.7832	62.8724					174445.359	645096.88
	S3			251.6523		251.6556						
S3	S2	188.9458	354.146	51.6523	188.9475	51.6556	-282.643	-268.302	-282.627	-268.283	174168.732	644828.597
	S4			240.5981		240.6031						
S4	S3	194.7807	346.628	40.5981		40.6031	-210.867	-268.425	-210.85	-284.406	173957.882	644544.191
	A			235.3788	194.7824	235.3855	-182.899	-293.21	-182.882	-293.191	173775	644251

Fermeture angulaire :

$$f_a = -68 \text{ dmgon}$$

$$T_a = 94 \text{ dmgon}$$

$f_a < T_a$, alors composable.

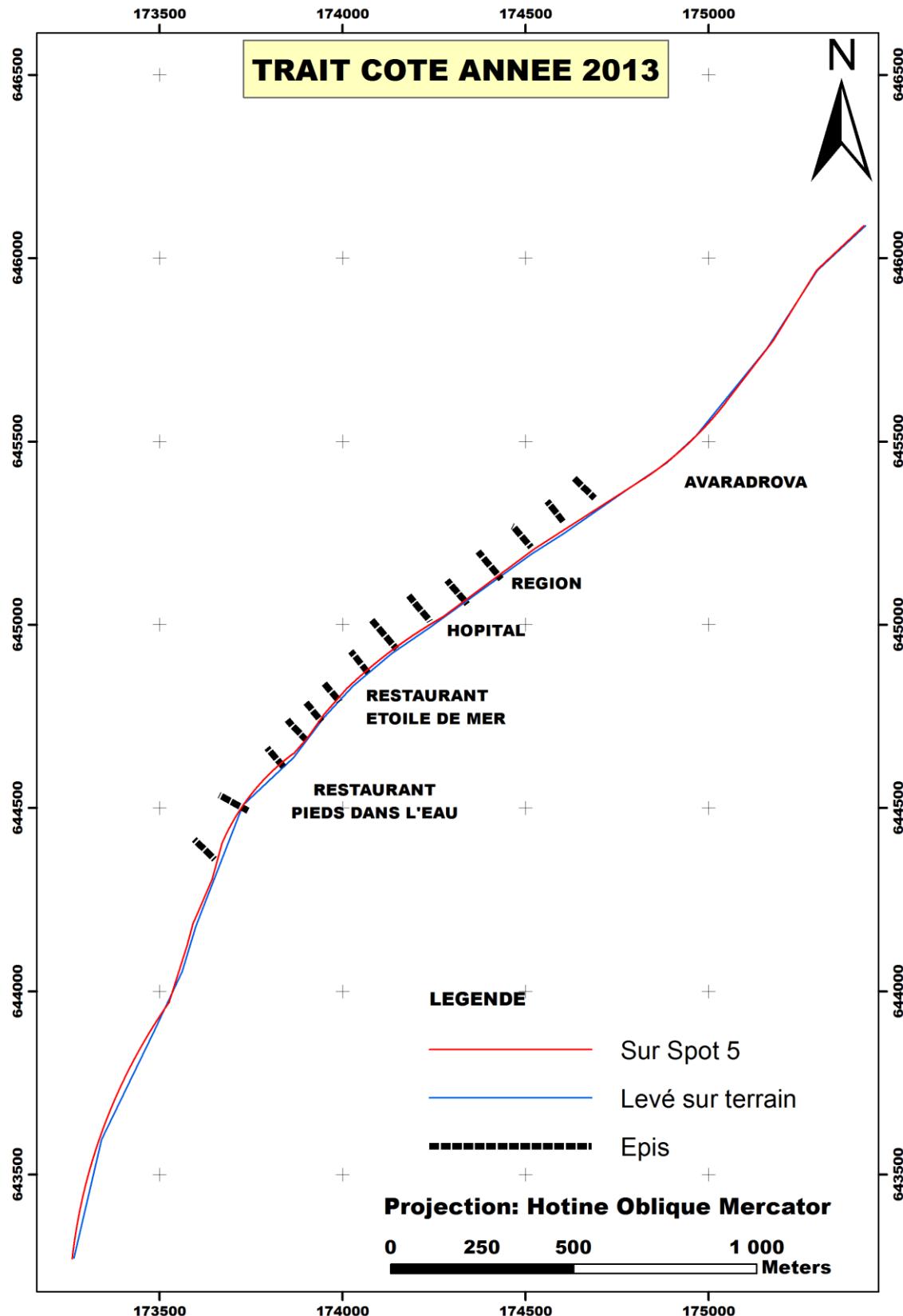
Le calcul de coordonnées des levés de détails se fait sous Covadis.

Fermeture planimétrique :

$$f_p = 10 \text{ cm}$$

$$f_p = 11 \text{ cm}$$

$F_p < T_p$, alors composable.



Carte 18. Trait de côte levé sur terrain et par Spot 5 année 2013

V 6. DISCUSSION

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, ainsi qu'à l'instrumentation utilisée, etc.

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 ; au cadre morphologique du littoral concerné et surtout l'objet de l'étude. Suivant le type de côte étudié, les données disponibles, les contraintes techniques et l'objet de l'étude, 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.

V 7. Elaboration de simulation du trait de côte de 2030

Un quatrième trait de côte s'ajoutera à la couche d'information « trait de côte ». C'est celui de 2030. Il sera obtenu par simulation, à l'aide du SIG, en se basant sur la vitesse moyenne d'évolution du trait de côte, bien qu'elle s'accélérer ou se réduire.

Dans un premier temps, il s'agira de déterminer la taille du phénomène, qui sera donnée par la formule suivante :

$$\text{Taille du phénomène en 2030 (m)} = \text{Vitesse moyenne} \times (2030-2013)$$

Cela correspond au phénomène d'érosion qui se produira entre 2013 et 2030.

A l'aide de la fonction « create buffers » du SIG, se fera la simulation du trait de côte en 2030 en prenant comme point d'origine, le trait de côte en 2013. La fonction « buffer » dessine un anneau autour du trait de côte de 2013, à une distance indiquée, distance qui sera celle de la taille du phénomène d'érosion déterminée à l'aide de la formule déterminée plus haut. Une digitalisation sera faite pour numériser la partie supérieure de l'anneau pour créer le trait de 2030.

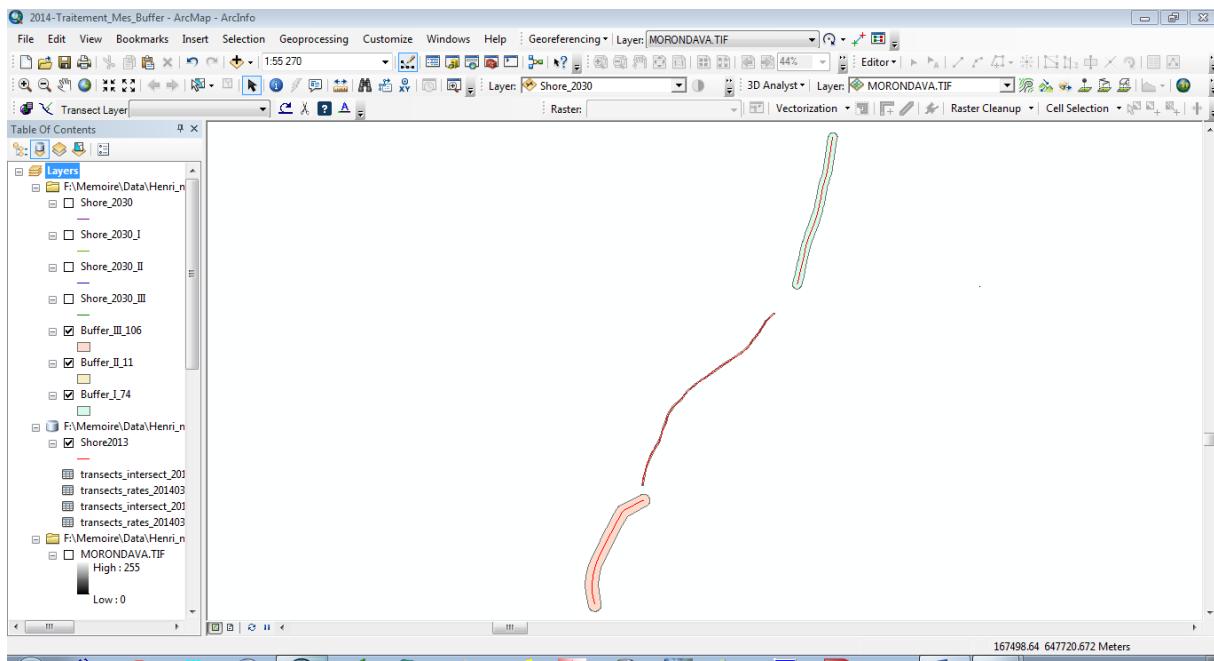
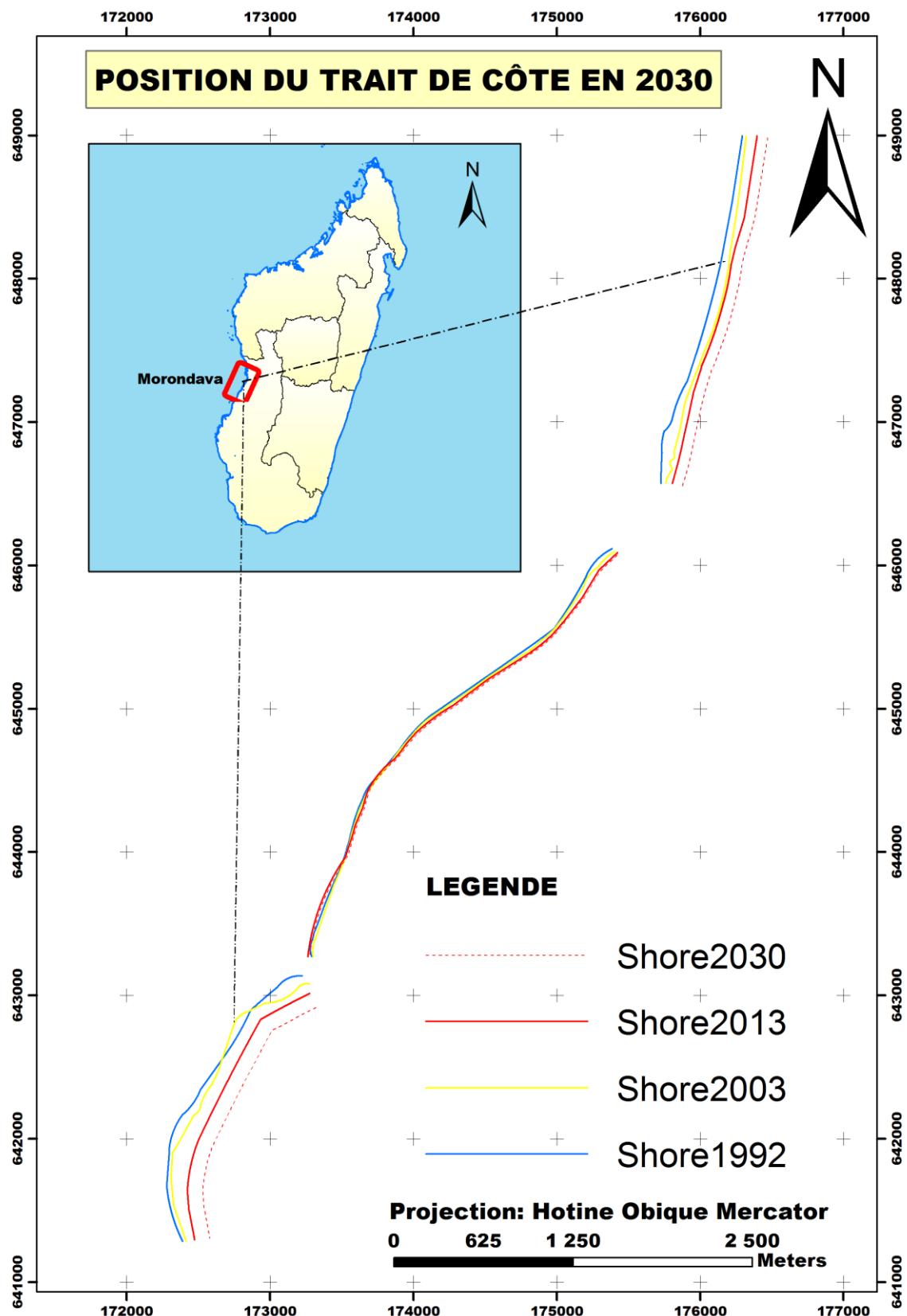


Figure 46. Buffer du trait de côte en 2030



Carte 19. Position du trait de côte en 2030

Tableau XI. Taille du phénomène en 2030

Vitesse moyenne en 2013 (m)	-4.36	-0.68	-6.26
Taille du phénomène en 2030 (m)	-74.36	-11.56	-106.42

V 8. Couplage des données de trait de côte avec celles de l'occupation du sol

Superposés à la couche d'information les différents traits de côte, les différentes informations d'occupation du sol que le réseau routier, les équipements, le bâti et la végétation, dans le SIG, permettront d'identifier clairement :

- Les zones restées stables
- Les zones menacées par l'évolution du trait de côte.

La structuration de cette base de données superposée à la première permet de faire des requêtes fondées sur les rapports de voisinages et de distances entre les objets. Grâce à la typologie des objets, il est possible de poser des questions du type quels sont les objets situés dans le voisinage de telle ou telle zone. Il permet donc la prise en compte simultané de conditions physiques (évolution du trait) et humaines (urbanisation littorale).

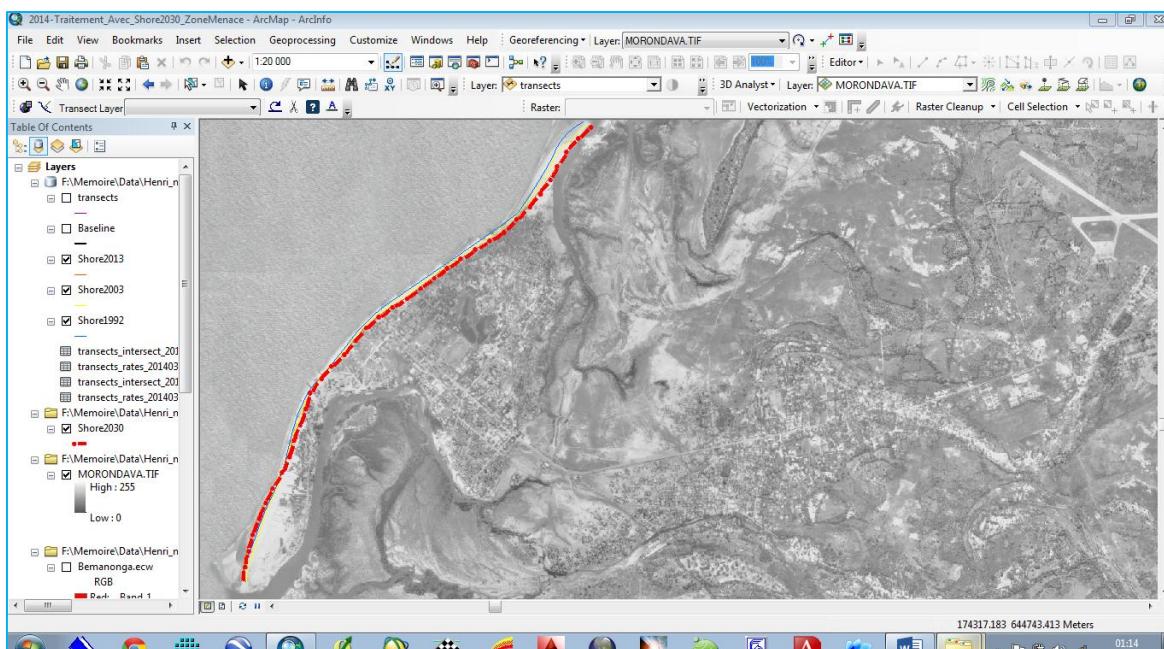


Figure 47. Zone menacée par l'érosion en 2030

PARTIE III. PROPOSITION DE STRATEGIE DE GESTION DE LA ZONE CÔTIÈRE

Pour faire face à la menace de l'érosion côtière évoquée ci-précédemment, une stratégie et méthodologie de gestion de la zone côtière et de la défense contre la mer doit être un engagement primordial par l'Etat.

CHAPITRE I- PRINCIPES COMMUNS

Le trait de côte est naturellement mobile : il ne peut pas être fixé partout.

Il est nécessaire de planifier maintenant et de préparer les acteurs à la mise en œuvre de la relocalisation à long terme des activités et des biens exposés aux risques littoraux.

L'implantation de biens et d'activités dans les secteurs où les risques littoraux (submersion marine et érosion côtière) sont forts doit être arrêtée.

La gestion de la zone côtière prend en compte les trois piliers du développement durable (économie, social, environnement) et la dimension culturelle (patrimoine littoral, paysages).

Dans la perspective du changement climatique, il est nécessaire d'anticiper l'évolution des phénomènes physiques d'érosion côtière et de submersion marine. Cela passe par une bonne connaissance des aléas et du fonctionnement des écosystèmes côtiers dans leur état actuel et une prévision de leur évolution à 10, 20 et 30 ans.

Les données de connaissance des aléas et des écosystèmes côtiers doivent être portées à la connaissance de l'ensemble des acteurs concernés.

CHAPITRE II- RECOMMANDATIONS

Articuler les échelles spatiales de diagnostic de l'aléa physique, de planification des choix d'urbanisme et des aménagements opérationnels.

Articuler les échelles temporelles de planification à 10, 20 et 30 ans en tenant compte de l'évolution des phénomènes physiques et en anticipant la relocalisation des activités et des biens comme alternative à moyen et long termes à la fixation du trait de côte, sur la base des analyses couts-bénéfices.

Développer une gestion territoriale conjointe et cohérente des risques liés à l'érosion côtière et à la submersion marine qui prévoit la désignation d'un chef de file charge de l'élaboration d'un schéma territorial et du respect de sa mise en œuvre par les acteurs en fonction de leurs compétences respectives.

Justifier les choix d'aménagement opérationnels du trait de côte par des analyses couts-bénéfices et des analyses multicritères.

N'envisager les opérations de protection artificialisant fortement le trait de côte que dans des secteurs à très forte densité ou d'intérêt stratégique national et les concevoir de façon permettre à plus long terme un déplacement des activités et des biens.

Recourir à des techniques souples de gestion du trait de côte pour les secteurs à densité moyenne (urbanisation diffuse) ou à dominante agricole.

Protéger et restaurer les écosystèmes côtiers (zones humides, cordons dunaires, mangroves, récifs coralliens) qui constituent des espaces de dissipation de l'énergie de la mer et contribuent à limiter l'impact de l'érosion côtière sur les activités et les biens.

CHAPITRE III- PROGRAMMES D'ACTIONS

Le programme d'action à vocation à être mis en œuvre conjointement par l'Etat et les collectivités territoriales décentralisées. Ils s'organisent autour de trois axes.

AXE I- DEVELOPPER L'OBSERVATION DU TRAIT DE COTE ET IDENTIFIER LES ZONES A RISQUE EROSION POUR HIERARCHISER L'ACTION PUBLIQUE

IL comprend deux actions principales.

ACTION 1- Créer un réseau d'observation et de suivi de l'évolution du trait de côte à l'échelle nationale, en s'appuyant sur les acteurs régionaux.

L'observation du suivi de l'évolution du trait de côte suppose une mise en réseau de l'ensemble des acteurs qui produisent des données, ou qui commandent ces données, afin que soient mises en cohérence les modalités de création de ces données, leur fréquence et leur interopérabilité.

SOUS ACTION 1.1- Réseau national d'observatoires du trait de côte

L'organisation d'un réseau national d'observatoires du trait de côte est une démarche nécessaire.

SOUS ACTION 1.2- Crédit des catalogues sédimentologiques

La capitalisation des données existantes permettra d'apporter un support à une vision synthétique des connaissances relatives au littoral.

Pour mettre en œuvre ces actions, plusieurs conditions doivent être réunies :

- Identification de maîtrises d'œuvre à une échelle adaptée ;
- Mise en place de modes de financement pérennes ;
- Définition et mise en œuvre des règles de partage des données et des métadonnées ;
- Développement d'outils modernes d'accès aux données ;
- Développement des données de bathymétrie et de topographie de grande résolution.

ACTION 2- Établir une cartographie nationale de l'érosion côtière et identifier les zones à risque érosion

Il n'existe pas de cartographie nationale permettant d'identifier, sur la base d'une méthodologie commune, les secteurs combinant une érosion forte et une densité des

implantations des activités et des biens. Cette cartographie néanmoins indispensable afin de hiérarchiser l'action publique.

Par ailleurs, Madagascar ne dispose pas d'indicateurs nationaux homogènes permettant de suivre l'évolution du trait de côte sur le long terme. De tels indicateurs permettraient d'identifier les territoires où l'érosion est forte et de hiérarchiser l'engagement de finances publiques en matière de travaux et d'aménagements.

A partir des données du F.T.M. et des données existantes à une échelle internationale tant que locale, une cartographie nationale de l'érosion côtière sera réalisée.

SOUS ACTION 2.1- Indicateur national d'érosion côtière

Un indicateur homogène national de qualification de l'érosion côtière, reposant sur la vitesse moyenne de l'érosion et les éléments de topographie et de bathymétrie connus et permettant de distinguer les zones d'érosion forte, d'érosion moyenne et d'érosion faible sera défini. Cet indicateur doit être saisi à l'échelle 1/10 000e, sur le littoral.

SOUS ACTION 2.2- Identification des zones à risque érosion

La combinaison avec des données en matière d'occupation des sols sera réalisée afin d'identifier les zones à risque érosion (centres urbains denses, activités industrielles et portuaires dont la proximité avec la mer est indispensable, infrastructures de transport).

La réalisation de ces deux sous-actions fera l'objet d'un diagnostic partage et d'une validation au plan local, tant au niveau des régional que des collectivités territoriales concernées.

AXE II- ÉVOLUER VERS UNE DOCTRINE DE RECOMPOSITION SPATIALE DU TERRITOIRE

Face au risque d'érosion ou de submersion marine sur les zones côtières concernées, les quatre options de gestion du trait de côte ont été reprises dans le livre « La gestion du trait de côte » (Editions Quae, 2010) :

- ❖ Suivre l'évolution naturelle là où les enjeux ne justifient pas une action ;
- ❖ Intervenir de façon limitée en accompagnant les processus naturels ;
- ❖ Organiser le repli des constructions existantes derrière une nouvelle ligne de défense naturelle ou aménagée ;
- ❖ Maintenir le trait de côte.

Dans le cadre de l'évolution de la doctrine de gestion du trait de côte, il est proposé de regrouper ces quatre options en deux options stratégiques.

OPTION STRATEGIQUE A- Maintenir le trait de côte

Cette option reste possible dans les zones à forts enjeux ou d'intérêt stratégique national, sous réserve de cohérence avec les principes et les recommandations de la présente stratégie. Il peut s'agir d'une solution provisoire, la relocalisation étant à long terme inéluctable.

OPTION STRATEGIQUE B- Préparer et mettre en œuvre la relocalisation des activités et des biens

En fonction des enjeux en place et de l'importance de l'érosion, cette option peut prendre la forme d'un suivi de l'évolution naturelle, d'une intervention limitée ou d'un repli à court terme. Dans tous les cas, il s'agit bien de gérer l'évolution naturelle du trait de côte en adaptant l'occupation du territoire à cette dynamique naturelle.

ACTION 3- Préparer la mise en œuvre de l'option relocalisation des activités et des biens

La notion de relocalisation des activités et des biens consiste à déplacer, à reculer les activités et les biens sur le territoire à une distance suffisante, afin de les mettre à l'abri des risques qu'ils peuvent encourir face à la mer, à court ou à long terme.

Ces nouvelles modalités de gestion du trait de côte ont été expérimentées dans plusieurs Etats de l'Union Européenne (Royaume-Uni, France).

Les études de cas réalisées sur ces sites ont montré l'importance de l'analyse couts-bénéfices, lorsque le cout d'une protection classique, avec des enrochements, excède largement la valeur des biens à protéger sur le long terme (sur la durée de vie des biens). Le déplacement des activités et des biens peut donc constituer une réelle opportunité budgétaire, dans une perspective de long terme.

ACTION 4- Innover en matière de génie écologique

Dans le cadre de l'élaboration de la nouvelle stratégie nationale pour la biodiversité, intégrer la biodiversité dans la sphère économique et développer les innovations pour et par la biodiversité, concernent directement les acteurs économiques impliqués dans le secteur du génie écologique au sens large.

Une nouvelle «économie verte» qui ouvre une possibilité de développement d'écotechnologies susceptibles de répondre à ces exigences. Dans cette perspective, le ministère de l'Environnement doit lancer une démarche de soutien aux filières stratégiques de l'économie verte. A ce titre, le développement de techniques innovantes en matière de gestion du trait de côte a été identifié comme un axe de travail principal.

Appel à projets génie écologique

Un appel à projets innovants dans le domaine de l'ingénierie écologique des milieux littoraux et marins doit être lancé. L'un des volets de cet appel à projets vise à soutenir des actions de génie écologique dans la bande côtière, faisant appel par exemple à des travaux de renaturation de zones tampons protégeant des secteurs habités de l'érosion côtière, à de nouveaux procédés écotechnologies permettant de stabiliser des plages ou des dunes ou d'atténuer l'effet de la houle sur le rivage.

Les projets attendus étaient des démonstrateurs de recherche visant à expérimenter une option technologique dans des conditions réelles de fonctionnement. Le choix de l'échelle du démonstrateur permet de passer du stade du laboratoire à une taille permettant de valider les technologies à l'échelle prévue pour l'industrialisation.

AXE III- PRECISER LES MODALITES D'INTERVENTION FINANCIERE

L'Etat précisera les modalités et les critères de son intervention financière.

Pour l'érosion côtière, les financements de l'Etat devront être concentrés sur les zones à érosion forte et à enjeux élevés et devront privilégier les techniques de gestion souples du trait de côte, réversibles et permettant la mise en œuvre à moyen ou long terme de la relocalisation des activités et des biens.

De plus, les modalités de financement des actions de relocalisation des activités et des biens nécessiteront d'être éclairement identifiées.

Conclusion générale

Ce mémoire a pour principal objectif de cartographier le trait de côte pour mettre en évidence, de mesurer l'ampleur du phénomène d'érosion et d'accumulation en fin de mieux gérer l'érosion côtière du littoral de Morondava, contribue à la gestion de la zone côtière.

La méthodologie utilisée est basée sur l'utilisation des images de la télédétection (photos aériennes, images satellitaires de haute résolution Spot 5), le levé topographique et l'intégration des résultats dans le SIG. Il est fondé sur un travail important de synthèses bibliographiques et méthodologiques.

Les documents cartographiques concernant le littoral de Morondava est indisponible à Madagascar. Ils sont stockés par SHOM, mais l'accès est très difficile.

En dépit de cette contrainte, nous avons pu collecter des photographies aériennes disponible à l'FTM et des images satellitaires de SEAS-OI image disponible dans le cadre son partenariat avec le CNT (Comité Nationale de Télédétection) et anciennes cartes topo bathymétriques provenant de l'Agence Portuaire Maritime et Fluviale (APMF).

Pour cet étude, la ligne de référence sélectionnée pour la suivie du trait de côte est le pied de dune dont l'analyse de la variation de la position, durant quelques années nous a permis de retracer l'évolution du trait de côte du littoral de Morondava.

Cette étude sur la cinématique du trait de côte révèle un recul moyen de -3.76 à -9.90 m/an et de perte en terre de 1737.50 m³ par ans.

Et s'accentuera avec l'élévation actuelle et future du niveau de la mer dans un contexte de la crise environnemental. Dans la zone retro littoral, on observe une forte concentration de population et/ou d'intérêts économiques. Le croisement des données de dynamique du trait de côte et celle de l'occupation du sol a permis d'identifier et de cartographier les biens menacés par l'érosion dans les prochaines années. D'où la nécessité de voir prés l'application des solutions proposés pour cette étude avec l'Etat et de collectivités territoriales décentralisés pourquoi pas avec des organismes nationaux qu'internationaux.

Les facteurs dont le recul du littoral est partie dû à l'érosion qui est d'origine naturelle et anthropique.

Le recul côtier n'est pas le seul risque côtier auquel sont exposés les habitants et leurs biens, mais il s'avère le plus menaçant.

Ainsi, nos perspectives futures sont de généraliser cette méthodologie à la zone côtière linéaire de Madagascar afin de faire une analyse sur l'ensemble du littoral à des dates identiques et de déterminer les zones les plus strictes. Intégrer des données de la pression anthropique sur la zone littorale et l'évolution du niveau de la mer au Système d'Information Géographique afin de dresser une carte de sensibilité du littoral avec des différentes zones à risques. Ces perspectives ainsi que d'autres recherches à venir sur le littoral contribueraient à la mise sur pied de stratégie pour la protection des populations contre l'érosion côtière et la gestion intégré du littoral.

Bibliographie

- 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
- Mairie Lacanau (2012) Caractérisation de l'aléa érosion dans le cadre de l'étude stratégique de gestion de la bande côtière en Aquitaine ; 2^{ème} Forum sur l'érosion du trait de côte
- BECET J.-M. (1987) L'aménagement du littoral. PUF, coll. Que sais-je ? Paris
- BONNOT-COURTOIS C., RECONNAISSANCE DE LA LIMITÉ TERRESTRE DU DOMAINE MARITIME : INTÉRÊT ET POTENTIALITÉS DES CRITÈRES MORPHO-SÉDIMENTAIRES ET BOTANIQUES. Rapport CETMEF ministère de l'Équipement
- LEVASSEUR J.-E. (2002)
- LE BERRE I., HENAFF A., « SPOT5 : un outil pertinent pour le suivi du trait de côte ? », Norois, n° 196, pp. 25-35
- DEVOGELE T., MASCRET A., WENZEL F. (2005)
- MANDELBROT B.B. (1967) "How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension." Science n°156, pp. 636-638
- ANDRIAMIHAJA, (1999) Evaluation des paramètres d'érosion par SIG en vue de proposer des schémas d'aménagement de la région d'Alaotra. Mémoire d'ingénierat (ESPA) Antananarivo
- ROBIN (M.), 2002 Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique », in Le littoral, regards, pratiques et savoirs. Baron-Yellès N. et al., Paris, Editions de l'ENS, pp. 95-115.
- FAYE (I.B.N.), 2010 Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest). Thèse de l'Ecole Doctorale des Sciences de la mer, Mention Géographie

- NEUVY G. , (1983) Eaux continentales et aménagement rural en domaine tropical malgache
Thèse Doctorat d'Etat-es Lettres.
T1 :p. 419 – 510
T2 :p. 87 – 119
- CNIG (2003) Rapport final du Groupe de travail Littoral, Conseil national de l'information géographique
- AAGAARD T., DAVIDSON-ARNOTT R., GREENWOOD B., NIELSEN J. (2004) Sediment supply from shore face 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.
- 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)
APLIN P. (2006) Techniques for GIS modeling of coastal dunes. *Geomorphology*, n°48, p. 289 – 308
On scales and dynamics in observing the environment. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n°1, p. 2123 – 2140
- 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

- AZANDOSSSESSI 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- IFEN (2006) Un quart du littoral recule du fait de l'érosion. Les 4 pages de l'IFEN, n°13

- 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
- 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
- MEDDM (2010) La gestion du trait de côte. Editions Quae
- APPL: Agence urbaine chargée de la Protection et de la Promotion du Littoral et des zones touristiques de la Wilaya d'Alger Évolution du trait de Côte de la wilaya d'Alger entre 1959 et 2011
- RAKOTONAIVO Lala Nirina (2005) Ouvrages en enrochements en protections littoral à Madagascar. Mémoire d'Ingénieur (ESPA)
- Alesheikh A.A., Ghorbanali A., Nouri N. (2007) Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Sciences and Technology* 4 (1), 61-66
- Li X., Damen M. (2010) Coastline change detection with satellite remote sensing for environmental
- Lillesand T. M., Kiefer R. W. (2000) Remote sensing and image interpretation. 4th ed., Wiley, New York, 724 p.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

Liens internet

<http://www.cetmef.equipement.gouv.fr>
<http://norois.revues.org/index378.html>
<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00472200/fr/>
www.cnig.gouv.fr/Front/littoral_11.php
www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/RAM/RAM_P1.htm
www.ign.fr/institut/87/dossiers/journees-de-la-mer.htm
<http://www.cybergeo.eu/index1679.html>
<http://www.googlescholar.com>
<http://norois.revues.org>
<http://www.revues.org>
<http://norois.revues.org/378>
<http://mappemonde.mgm.fr/num32/articles/art11404.html>
<http://nile.riverawarenesskit.org/French/NRAK/EO/html/rsbch4.html>
<http://www.techniques-ingeneur.fr>
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Le-littoral-.html>
<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/114000656/0000.pdf>
http://www.mementodumaire.net/wp-content/uploads/2012/07/Gestion_du_trait_de_cote.pdf
http://www.donnees.basse-normandie.developpement-durable.gouv.fr/pdf/MIMEL/FT3b_MIMEL.pdf
https://www.google.mg/search?q=T%C3%A9l%C3%A9tection+en+milieu+littoral+DSAS&oq=T%C3%A9l%C3%A9ction+en+milieu+littoral-DSAS&aqs=chrome..69i57.1812j0j8&sourceid=chrome&espv=210&es_sm=93&ie=UTF-8

Annexe

Annexe 1. Evaluation financière du projet

Même si ce projet est un fruit d'un bénévolat, il est nécessaire d'évaluer le montant de la prestation, dans le monde professionnel.

Il ne concerne que les charges relatives aux prix des images de la Télédétection (Spot 5, Ortho photo, Clichés des photos aériennes négatives), les coûts du traitement et les travaux topographiques, les traitements des données.

Désignation	Unité	Nombre	Montant (Ariary)
Frais	40000	2 (aller - retour)	80000
Indemnités	70000	3 jours	210000
Traitement	1200000	2 Semaines	1200000
Appareil	300000	2 jours	600000
Restauration	15000	3 jours	45000
Total travaux topographiques			2135000
Ortho photo			300000
Photo aérienne	40000	7 clichés	238000
Spot			3520000
Traitement	3700000	3 Semaines	3700000
Total			9893000

Annexe 2. Licence d'utilisation de l'image Spot 5

Astrium Services / GEO-Information Services

août 2011

LICENCE STANDARD

LICENCE D'UTILISATION NON-EXCLUSIVE DES PRODUITS SATELLITAIRES SPOT ENTRE SPOT IMAGE ET L'UTILISATEUR FINAL

Par l'accomplissement de l'un des actes suivants, l'UTILISATEUR FINAL signifie son acceptation des termes du présent Contrat de Licence d'Utilisateur Final (« la Licence ») : (a) l'acceptation totale ou partielle du devis correspondant à la fourniture du PRODUIT ; (b) l'ouverture de l'emballage du PRODUIT ; (c) le téléchargement et/ou l'installation et/ou la manipulation du PRODUIT sur tout ordinateur ; (d) le paiement de tout ou partie du PRODUIT ; (e) la mise à disposition de tout TRAVAUX DÉRIVÉS ; (f) la dégradation ou la destruction du PRODUIT ; (g) la conservation du PRODUIT pendant plus de 7 jours suivant sa réception.

ARTICLE 1 - DEFINITIONS

« TRAVAUX DÉRIVÉS » : désigne toute information ou tout produit dérivé quel qu'il soit, développé à partir du PRODUIT par l'UTILISATEUR FINAL, et qui ne contient aucune donnée image issue du PRODUIT, qui est irréversible et découpé de l'imagerie source du PRODUIT. Nonobstant ce qui précède, par exception expressa, tout Modèle Numérique d'Elévation ainsi que tout Modèle Numérique de Terrain (sous quelque forme que ce soit, par exemple une base de données) dérivé d'un PRODUIT ne sera jamais considéré comme TRAVAUX DÉRIVÉS.

« UTILISATEUR FINAL » : désigne soit la personne agissant en son nom propre, soit l'entité commerciale légitime, y compris ses éventuels bureaux et/ou succursales dans son pays de résidence, soit l'organisme public, à qui est fourni le PRODUIT et qui accepte la présente licence. Si le PRODUIT est fourni à un organisme public (agence publique, collectivité locale, ministère, ...), l'UTILISATEUR FINAL sera considéré comme étant uniquement l'entité de l'organisme public domiciliée à l'adresse à laquelle le PRODUIT est livré, sauf en cas d'accord préalable écrit de Spot Image.

« PRODUIT » : désigne le(s) produit(s) satellitaire(s) SPOT fourni(s) par Spot Image à l'UTILISATEUR FINAL.

« PVA » : désigne tout produit développé par l'UTILISATEUR FINAL contenant des données images provenant du PRODUIT et entraînant une modification substantielle du PRODUIT par des manipulations techniques et/ou l'ajout d'autres données. Nonobstant ce qui précède, par exception expressa, tout Modèle Numérique d'Elévation ainsi que tout Modèle Numérique de Terrain dérivé d'un PRODUIT sera toujours considéré comme PVA.

ARTICLE 2 - LICENCE

2.1 Usages Autorisés

Par la présente, Spot Image concède à l'UTILISATEUR FINAL une Licence limitée, non-exclusive et non transférable, lui permettant :

- (a) d'installer le PRODUIT sur autant d'ordinateurs personnels que nécessaire dans ses locaux, y compris sur un réseau informatique interne (à l'exclusion expresse du réseau Internet, excepté dans les conditions prévues par le paragraphe (g) ci-dessous) pour les Usages Autorisés tels que défini par les paragraphes (b) à (l) ci-dessous ;
- (b) de faire un maximum de dix (10) copies pour (l) l'installation du PRODUIT conformément au paragraphe (a) ci-dessus et (l) à des fins d'archivage et de secours informatique ;
- (c) d'utiliser le PRODUIT pour ses propres besoins internes ;
- (d) de changer ou modifier le PRODUIT afin de produire des PVA et/ou des TRAVAUX DÉRIVÉS ;
- (e) d'utiliser tout PVA pour ses propres besoins internes ;
- (f) de mettre à la disposition des contractants et des consultants de l'UTILISATEUR FINAL, le PRODUIT et/ou tout PVA, que ceux-ci utiliseront exclusivement pour le compte de l'UTILISATEUR FINAL, et sous réserve que lesdits contractants et consultants se soient engagés par avance et par écrit (l) à être tenus par les mêmes restrictions d'usage que l'UTILISATEUR FINAL, et (ll) à retourner le PRODUIT et le PVA à l'UTILISATEUR FINAL et à n'en conserver aucune copie, une fois les travaux du contractant ou consultant terminées ;
- (g) de mettre en ligne sur un site Internet un extrait, de 1024 x 1024 pixels maximum, du contenu d'un PRODUIT ou d'un PVA, dans un format image compatible Internet (sans les métadonnées associées), avec mention lisible du crédit suivant : "contenu des informations © CNES _____ (année de production), Distribution Astrium Services / Spot Image S.A., France, tous droits réservés" écrit en entier. La mise en ligne de cet extrait sera utilisée uniquement à des fins promotionnelles de l'activité de l'UTILISATEUR FINAL (et seulement si cette activité et/ou promotion ne porte pas sur la fourniture de services en ligne de cartographie ou de géolocalisation) ; elle ne pourra en aucun cas permettre le téléchargement de l'extrait présenté, ni être utilisée pour distribuer, vendre, céder, disposer de, louer, sous-licencier ou transférer ledit extrait. Avant toute mise en ligne, l'UTILISATEUR FINAL en informera Spot Image en précisant l'adresse URL qu'il utilise à l'adresse suivante : sales@spotimage.com ;
- (h) d'imprimer tout extrait, de 1024 x 1024 pixels maximum, du contenu d'un PRODUIT ou d'un PVA et de diffuser l'extrait imprimé à des fins promotionnelles exclusivement. Sur l'extrait imprimé, le crédit suivant devra apparaître de façon lisible : "contenu des informations © CNES _____ (année de production), Distribution Astrium Services / Spot Image S.A., France, tous droits réservés" écrit en entier ;
- (i) d'utiliser librement et de distribuer les TRAVAUX DÉRIVÉS. Nonobstant ce qui précède, l'UTILISATEUR FINAL ne sera pas autorisé à vendre, distribuer, céder, disposer de, louer, sous-licencier ou transférer, que ce soit directement ou indirectement, tout TRAVAUX DÉRIVÉS à tout tiers établi, enregistré ou domicilié sur le territoire du Canada. Avant toute

Spot Image au capital de 18 022 949 € (325 089 589 RCS Toulouse)
Siège social : 5 rue des Satellites – 31400 TOULOUSE – FRANCE
TVA FR 30 326 089 589 – APE 7112B

p. 1/2

36/45

2012-06-12

vente, distribution, cession, location ou transfert de TRAVAUX DÉRIVÉS, l'UTILISATEUR FINAL s'engage à obtenir de son client l'engagement écrit de respecter cette restriction, et à obtenir de ce dernier qu'elle soit répercutée à tous les tiers utilisateurs des TRAVAUX DÉRIVÉS.

Tout droit non expressément concédé par Spot Image au titre du présent Article 2.1 est réservé par Spot Image.

2.2 Usages Interdits

L'UTILISATEUR FINAL reconnaît et accepte que le PRODUIT est et reste la propriété de Spot Image, qu'il contient des informations qui appartiennent à Spot Image et qu'il est par conséquent fourni à l'UTILISATEUR FINAL sur une base confidentielle.

L'UTILISATEUR FINAL s'interdira et veillera à ce que tout contractant ou consultant engagé conformément aux dispositions de l'Article 2.1(i) s'intende :

- (a) toute action qui ne soit expressément autorisée par l'Article 2.1 ;
- (b) toute modification ou suppression des mentions de copyright ou de propriété figurant dans ou sur les PRODUITS.

ARTICLE 3 – DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

3.1 Les données Images satellitaires contenues dans le PRODUIT sont la propriété du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), France.

3.2 Le PRODUIT est protégé par les lois françaises et internationales sur la propriété intellectuelle et en particulier le droit d'auteur (copyright).

3.3 De plus, le PRODUIT et les données Images satellitaires qu'il contient sont protégés au titre des articles L 341-1 à 343-4 du Code français de la Propriété Intellectuelle, tel qu'amendé par la loi du 1^{er} juillet 1998 relative à la protection des bases de données, et les lois équivalentes des pays européens ayant transposé dans leur législation la Directive de l'UE n° 96/9 du 11 mars 1996 relative à la protection des bases de données.

ARTICLE 4 – GARANTIE - RESPONSABILITÉ

4.1 Spot Image garantit qu'elle possède des droits de propriété suffisants sur le PRODUIT pour le mettre à la disposition de l'UTILISATEUR FINAL conformément aux termes de la présente Licence.

4.2 Le PRODUIT est complexe ; Spot Image ne garantit pas que le PRODUIT est exempt de bugs, d'erreurs, de défauts ou d'omissions et qu'il n'utilise du PRODUIT ne comportera aucune erreur et ne sera jamais interrompu ni que toutes les non-conformités seront corrigées ou susceptibles de l'être. Elle ne garantit pas non plus que le PRODUIT répondra à toutes les exigences ou à toutes les attentes de l'UTILISATEUR FINAL ni qu'il sera adapté aux objectifs attendus par l'UTILISATEUR FINAL. Aucune garantie expresse ou implicite d'aptitude à un usage spécifique ou de commercialisabilité n'est associée à la vente ou à l'utilisation du PRODUIT. Spot Image décline toutes les garanties autres que celles expressément définies aux Articles 4.1 et 4.2.

Dans le cas où le support sur lequel Spot Image livre le PRODUIT à l'UTILISATEUR FINAL est défectueux, ainsi que démontré par l'UTILISATEUR FINAL et accepté par Spot Image, Spot Image remplacera ledit support. Toute demande de remplacement sera notifiée à Spot Image dans les sept (7) jours suivant la livraison du PRODUIT à l'UTILISATEUR FINAL.

4.3 En aucun cas Spot Image ni aucune personne ayant participé au développement et/ou à la production et/ou à la fourniture du PRODUIT, ne pourra être tenue responsable de toute réclamation, dommage ou perte occasionnés à et/ou par l'UTILISATEUR FINAL, y compris, de façon non exhaustive, tout dommage indirect ou immatériel (tel que perte de production, de revenu, de chiffre d'affaire, manque à gagner, surcoût de production ...) ou punitif résultant de l'usage ou de l'incapacité d'utiliser le PRODUIT et ne pourra être l'objet d'aucune action en justice sur ce motif.

La responsabilité totale et cumulée de Spot Image et de toute personne ayant participé au développement et/ou à la production et/ou à la fourniture du PRODUIT ne pourra en aucun cas excéder la somme payée par l'UTILISATEUR FINAL pour acquérir le PRODUIT.

ARTICLE 5 – DIVERS

5.1 Le Contrat de licence de l'UTILISATEUR FINAL est conservé pendant toute la durée de protection accordée par le droit de propriété intellectuelle français attaché au(x) PRODUIT(S). Outre toutes les autres mesures auxquelles il est habilité à recourir au titre de la Licence ou par la loi, Spot Image peut résilier immédiatement la présente Licence en notifiant par écrit l'UTILISATEUR FINAL si celui-ci enfreint l'une quelconque des clauses de la présente Licence. Dans ce cas, l'UTILISATEUR FINAL ne pourra réclamer aucun remboursement ou compensation. Dès la résiliation, l'UTILISATEUR FINAL devra retourner les PRODUITS et les PVA à Spot Image.

5.2 L'UTILISATEUR FINAL ne cédera, partiellement ou intégralement, la présente Licence sans avoir reçu l'accord préalable écrit de Spot Image.

5.3 Si l'une des clauses de la présente Licence est déclarée nulle ou non exécutoire, les autres clauses de la présente Licence resteront applicables.

5.4 Le présent contrat de Licence de l'UTILISATEUR FINAL est régi par la loi française. Tous les litiges seront soumis à la compétence des tribunaux de Toulouse, France.

Date :

Pour l'UTILISATEUR FINAL

Spot Image au capital de 18 022 949 € (325 089 589 RCS Toulouse)
Siège social : 6 rue des Satellites – 31400 TOULOUSE – FRANCE
TVA FR 30 326 089 589 – APE 7112B

p. 2/2

37/45

2012-06-12

Annexe 3. Information général concernant l'image Spot 5

Work Order : MORONDAVAXS120130525 (MORONDAVAXS120130525)
Volume : NETWORK
Scene ID : 5 163-390/5 13/05/25 07:02:45 2 J
Product Code : MORONDAVAXS120130525
Date : 2013-09-27 10:29:01



Scene Parameters

Scene ID 5 163-390/5 13/05/25 07:02:45 2 J
K-J identification 163-390
Date 2013-05-25 07:02:45.9
Instrument HRG 2
Shift Along Track 5 2960
Preprocessing level 1A
Spectral mode J
Number of spectral bands 4
Spectral band indicator HI1 HI2 HI3 HI4
Gain number 8 8 7 5
Absolute calibration gains 2.633060 3.722762 2.946294 10.490379
(1/W*m²*sr*μm)
Orientation angle 12.276422 degree
Incidence angle L12.385378 degree
Sun angles (degree) Azimut: 36.503924 Elevation: 39.964323
Number of lines 6000
Number of pixels per line 6000

Scene Center Location

Latitude S20° 16' 37"
Longitude E44° 15' 59"
Pixels number 3001
Line number 3001

Corners Location

Corner	Latitude	Longitude	Pixel n°	Line n°
1	S19° 57'8"	E44° 2'13"	1	1
2	S20° 4'22"	E44° 37'25"	6000	1
3	S20° 36'8"	E44° 30'8"	6000	6000
4	S20° 28'54"	E43° 54'48"	1	6000

Files Parameters

	Record Length	Number of Records	Offset
METADATA.DIM	4774197	1	0
STYLE.XSL	41773	1	0
IMAGERY.TIF	144002048	1	0
PREVIEW.JPG	96122	1	0
ICON.JPG	2764	1	0

Work Order : MORONDAVAXS120130525 (MORONDAVAXS120130525)
Volume : NETWORK
Scene ID : 5 163-390/5 13/05/25 07:02:45 2 J
Product Code : MORONDAVAXS120130525
Date : 2013-09-27 10:29:01

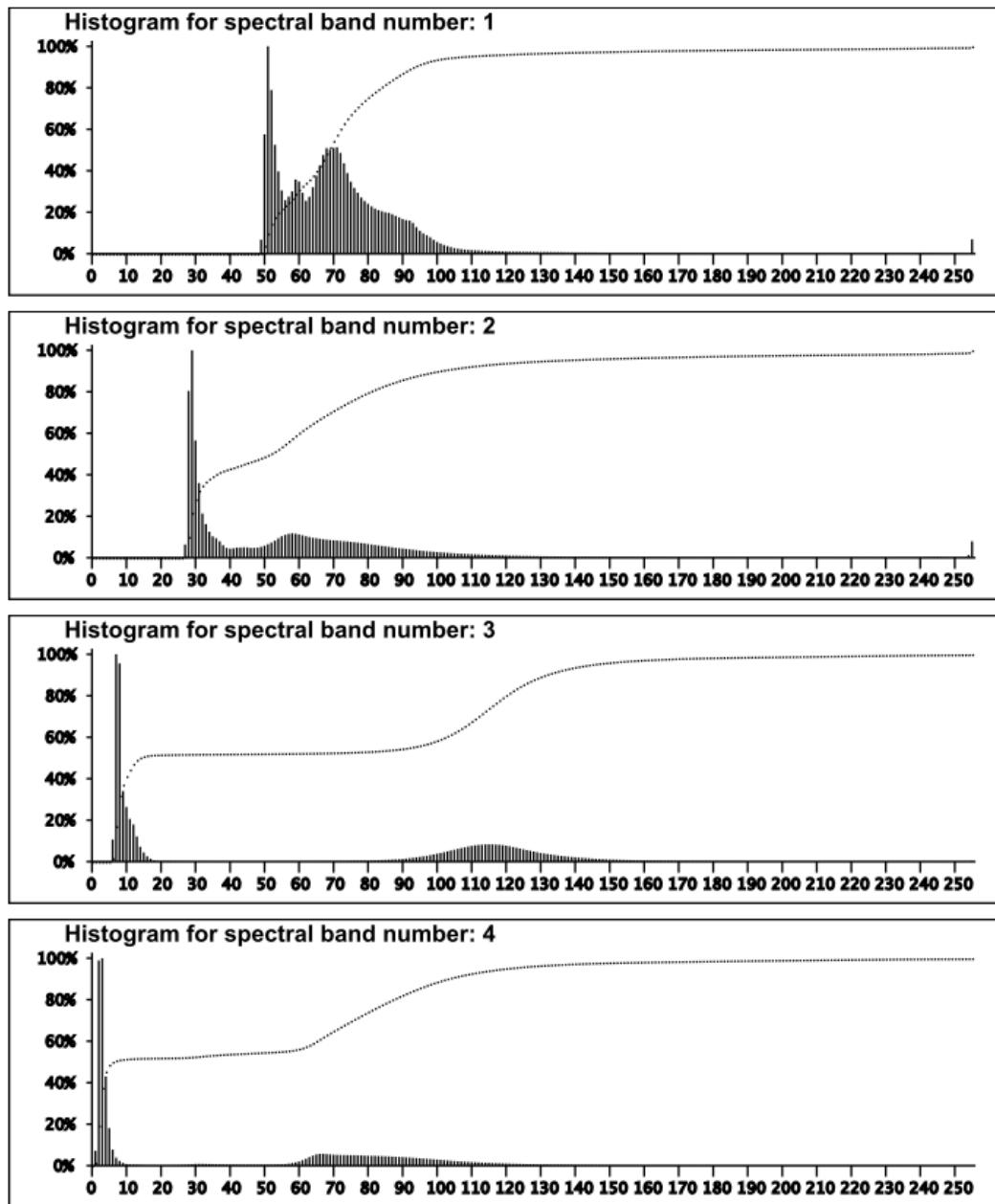


Table des matières

Remerciements	
Sommaire	iii
Liste des abréviations / acronymes.....	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	x
Liste des cartes	xi
Introduction	1
PARTIE I. GENERALITES	2
Chapitre I. LA GEOMORPHOLOGIE COTIERE	2
I. EROSION LITTORAL	2
II. LES AGENTS DE L'EROSION LITTORAL	2
II.1. Les vagues	2
II.2. Les courants	5
II.3. Les vents	6
II.4. Le ruissellement et le glissement.....	6
II.5. La dissolution	6
II.6. Les actions biologiques	7
III. LES FORMES DU RIVAGE : FALAISE ET PLAGE.....	7
III.1. La falaise et la plate-forme rocheuse.....	7
Chapitre II. LA TELEDETECTION ET SIG	10
II.1. PRESENTATION DE LA TELEDETECTION.....	10
II.1.1. Définition	10
II.1.2. Principes physiques de la télédétection	13
II.1.3. Les satellites de télédétection	16
II.1.3.1. Caractéristiques d'un satellite : l'orbite et sa fauchée	16
II.1.3.2. Les capteurs utilisés.....	17
II.1.4. Les avantages et les applications.....	18
II.1.5. La réflectance spectrale	18

II.1.6.	Diagramme général	20
II.2.	PRESENTATION DU SIG	21
II.2.1.	Définition	21
II.2.2.	Composants d'un SIG	21
II.2.3.	Fonctionnalités techniques d'un SIG	22
II.2.4.	Les avantages	24
II.2.5.	Niveaux de compétences SIG	24
	Chapitre III. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR L'IDENTIFICATION ET SUIVIE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE.....	26
III.1.	DEFINITIONS, DETECTION ET MOBILITE DU TRAIT DE CÔTE.....	26
III.1.1.	LES LIGNES DE REFERENCE UTILISEES EN GEOMORPHOLOGIE LITTORALE.....	28
III.1.1.1.	Les lignes de référence géomorphologiques	28
III.1.1.2.	Les lignes de référence botaniques	31
III.1.1.3.	Les lignes instantanées de rivage et les limites d'humectation	33
III.1.1.4.	Les datums marégraphiques	36
III.1.1.5.	Les lignes de référence virtuelles	37
III.1.1.6.	L'étendue de la plage (Beach width)	38
III.1.1.7.	Les lignes de tempête (Storm-surge penetration line, overwash penetration boundary)	39
III.1.2.	LES METHODES D'EXTRACTION DU TRAIT DE CÔTE	46
III.1.2.1.	Les méthodes manuelles d'extraction du trait de côte.....	46
III.1.2.2.	Techniques semi-automatiques d'extraction de lignes de référence	49
III.1.2.2.1.	La ligne instantanée de rivage.....	49
a.	Sur les images optiques	49
a.1.	Le seuillage	49
a.2.	Les classifications	50
a.3.	Autres exemples d'algorithmes d'extraction de la ligne instantanée de rivage sur des images de télédétection passive	51
a.3.1.	Sur les images radars	52
a.3.2.	Sur les images vidéographiques	53
III.1.2.2.2.	Extraction de lignes de référence sur le terrain.....	54
III.1.2.2.3.	La ligne du niveau moyen des pleines ou basses mers	55
III.1.2.2.4.	La limite de végétation.....	58

III.1.2.2.5. Les contours de la plage et les lignes dérivées.....	58
III.2. LES METHODES DE DETECTION DES VARIATIONS DE LA POSITION DU TRAIT DE CÔTE.....	66
III.2.1. Les approches directes	66
III.2.2. Les méthodes indirectes	67
III.2.2.1. Mesures à partir de points d'appui sur des photographies aériennes analogiques ou des cartes anciennes	67
III.2.2.2. Le système de grilles orthogonales (Orthogonal Grid Address System, OGAS; Orthogonal Grid Mapping System, OGMS).....	68
III.2.2.3. Les méthodes photogrammétries	68
III.2.2.4. Les systèmes d'information géographique (SIG)	69
III.3. METHODES STATISTIQUES DE CALCUL DE LA MOBILITE DU TRAIT DE CÔTE	70
III.4. CONCLUSION SUR LA SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE CONCERNANT L'IDENTIFICATION ET SUIVIE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE	72
PARTIE II. ANALYSE CINEMATIQUE DU LITTORAL DE MORONDAVA	73
Chapitre I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	73
I. Localisation	73
II. Caractéristiques milieux bio- physiques	75
III. Cadre géologie.....	75
IV. Le relief	75
V. Le climat.....	76
VI. La Pluviométrie	76
VII. Les Vents.....	77
VIII. Les Cyclones	77
IX. L'hydrographie et les eaux de profondeur	78
X. Les eaux marines	79
XI. Contexte socio-économique	82
XI.1. Urbanisme habitat et foncier.....	82
XI.2. Les activités économiques	83
XI.3. Le tourisme	83
XII. Sociétés et services : bâtiments administratifs publics.....	84

Chapitre II. PRESENTATION DES DONNEES UTILISEES	86
II 1. Les photos aériennes.....	86
II 2. Ortho photo.....	86
II 3. Image satellitaire : Spot 5	87
II 4. Cartes anciennes	88
Chapitre III. INDICATEURS SELECTIONNES POUR LE REFERENCEMENT DU TRAIT DE CÔTE	89
III 1. Sur les images aériennes (photo aérienne négative et ortho photo)	89
III 2. Sur l'image satellitaire (Spot 5).....	90
Chapitre IV. TRAITEMENT DE DONNEES	91
IV 1. Sur les cartes anciennes	91
IV 2. Sur les clichés des photos aériennes négatives	91
IV 3. Sur l'ortho photo.....	92
IV 4. Sur l'image satellitaire (Spot 5).....	93
Chapitre V. PRESENTATIONS DES RESULTATS ET DISCUSSIONS	94
V 1. Volet cartographique	94
V 2. Les résultats.....	94
V 3. Volet graphique et statistique	101
V 4. Evolutions des fonds et du littoral.....	106
V 3.1. Evolution des fonds entre 1973 et 2001	106
V 3.2. Evolution du fonds marin entre 2001 - 2006.....	109
V 3.3. Evolution du fonds marin entre 2006 - 2008.....	112
V 5. Vérité terrain	115
V 6. DISCUSSION	118
V 7. Elaboration de simulation du trait de côte de 2030	118
V 8. Couplage des données de trait de côte avec celles de l'occupation du sol.....	121
PARTIE III. PROPOSITION DE STRATEGIE DE GESTION DE LA ZONE CÔTIERE	122
CHAPITRE I-PRINCIPES COMMUNS	122
CHAPITRE II- RECOMMANDATIONS	123
CHAPITRE III- PROGRAMMES D'ACTIONS	124

AXE I- DEVELOPPER L'OBSERVATION DU TRAIT DE COTE ET IDENTIFIER LES ZONES A RISQUE EROSION POUR HIERARCHISER L'ACTION PUBLIQUE ...	124
ACTION 1- Créer un réseau d'observation et de suivi de l'évolution du trait de côte à l'échelle nationale, en s'appuyant sur les acteurs régionaux.....	124
SOUS ACTION 1.1- Réseau national d'observatoires du trait de côte	124
SOUS ACTION 1.2- Crédit des catalogues sédimentologiques	124
ACTION 2- Établir une cartographie nationale de l'érosion côtière et identifier les zones à risque érosion.....	124
SOUS ACTION 2.1- Indicateur national d'érosion côtière.....	125
SOUS ACTION 2.2- Identification des zones à risque érosion.....	125
AXE II- ÉVOLUER VERS UNE DOCTRINE DE RECOMPOSITION SPATIALE DU TERRITOIRE.....	125
OPTION STRATEGIQUE A-Maintenir le trait de côte	126
OPTION STRATEGIQUE B-Préparer et mettre en œuvre la relocalisation des activités et des biens	126
ACTION 3- Préparer la mise en œuvre de l'option relocalisation des activités et des biens	126
ACTION 4- Innover en matière de génie écologique	126
AXE III- PRÉCISER LES MODALITÉS D'INTERVENTION FINANCIÈRE	127
Conclusion générale	128
Bibliographie	130
Liens internet	134
Annexe	135
Table des matières	140

Nom: TIANDRAZANA

Prénom: Henri Tsimidiso

Titre : « **CARTOGRAPHIE DU TRAIT DE COTE ET SES IMPLICATIONS POUR LA GESTION DE LA ZONE COTIERE.** »

Nombre de pages : 157

Nombre de cartes : 19

Nombre de figures : 47

Nombre de tableaux : 11

RESUME

Dans cette étude, nous avons étudié l'érosion côtière du littoral de Morondava, en utilisant la Télédétection et SIG. L'objectif principal est de cartographier les traits de côte pour mettre en évidence, de mesurer l'ampleur du phénomène d'érosion et d'accumulation en fin de mieux gérer l'érosion côtière du littoral de Morondava, en proposant des stratégies de gestion de la zone côtière. Pour cela, nous avons utilisés des images de la télédétection (Spot 5; ortho photo et photo aérienne) et des cartes topo bathymétriques. La simulation du trait de côte en 2030 dans un SIG nous permet d'identifier clairement les zones reste stable et celles menacés par l'évolution du trait de côte.

Mots clefs : Erosion côtière, Télédétection, SIG, Trait de côte.

ABSTRACT

In this study, we studied the coastal erosion of the littoral of Morondava, by using the remote sensing and GIS. The principal objective is to chart the features of coast to highlight, to measure the extent of the phenomenon of erosion and accumulation at the end of better manage the coastal erosion of the littoral of Morondava, by proposing strategies of management of the coastal zone. For that, we used images of the remote sensing (Spot 5; photo and photo ortho air) and of the bathymetric charts topo. The simulation of the feature of coast in 2030 in a GIS enables us to identify the zones clearly remains stable and those threatened by the evolution of the feature of coast.

Key words: Coastal erosion, Remote Sensing, GIS, Coast line.

Rapporteurs: Professeur RAKOTONDRAOMPIANA Solofo, Enseignant Chercheur à l'ESPA

Docteur RABARIMANANA Mamy, Chef de Département de l'IGF et Enseignant Chercheur à l'ESPA

Adresse de l'auteur : Tsimahavaobe – MORONDAVA 609

Contacts : + 261 34 85 095 16 / +261 32 74 741

E-mail : henritsimidiso@gmail.com