



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEUR POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

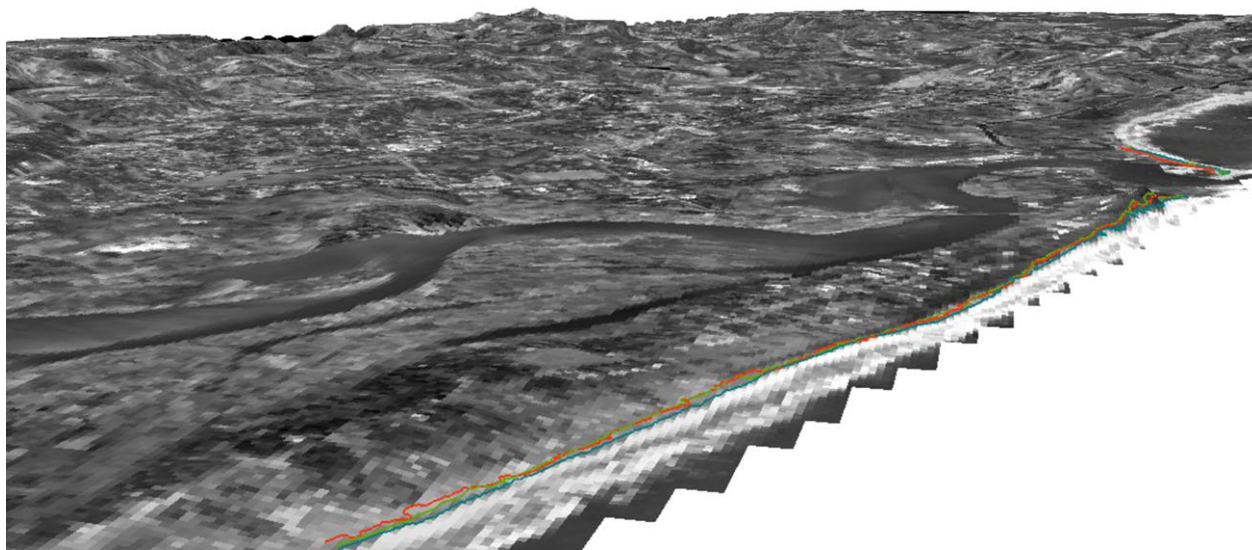
MENTION : INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET AMENAGEMENT
DU TERRITOIRE

PARCOURS : INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET FONCIER



Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur,
grade master, en Information Géographique et Foncier

MESURE DU MOUVEMENT DE TRAIT DE CÔTE DE MANAKARA PAR IMAGERIE AÉRIENNE ET SPATIALE



Présenté par : RASAMINIRAINA Nasolo
Fanomezantsoa Raitra

Encadreur pédagogique :

Pr RABARIMANANA Mamy Herisoa

Encadreur professionnel :

Mme RAHAJANIRINA Michelle



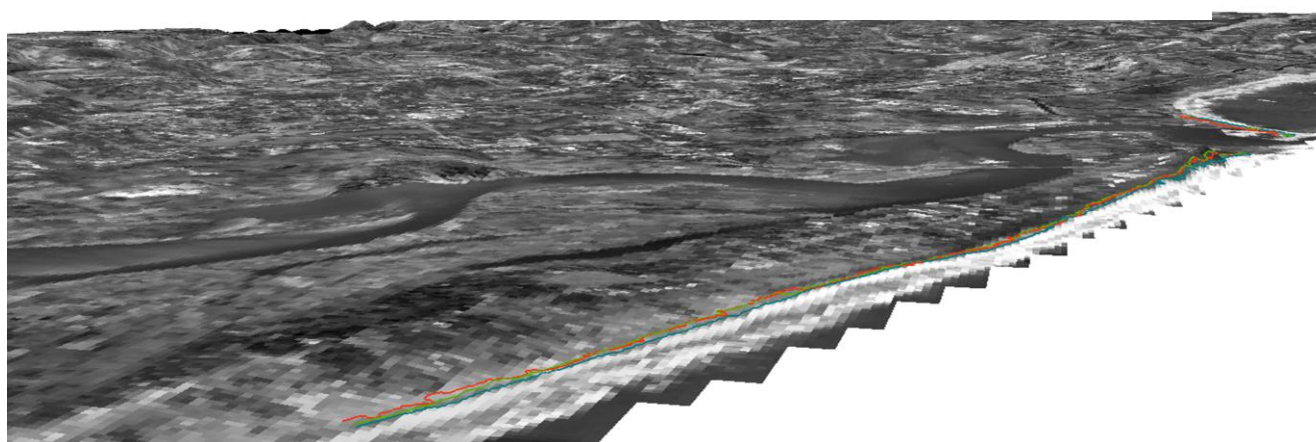
UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEUR POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO
MENTION : INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET AMENAGEMENT
DU TERRITOIRE



PARCOURS : INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET FONCIER

Mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du diplôme d'ingénieur,
grade master, en Information Géographique et Foncier

MESURE DU MOUVEMENT DE TRAIT DE CÔTE DE MANAKARA PAR IMAGERIE AÉRIENNE ET SPATIALE



Présenté par :

RASAMINIRAINA Nasolo Fanomezantsoa Raitra

Encadreur pédagogique :

Pr RABARIMANANA Mamy Herisoa

Encadreur professionnel :

Mme RAHAJANIRINA Michelle

Président de Jury :

Pr RAMANANTSIZEHENA Pascal

Examineurs :

Dr RANDRIANANDRAINAINA Noelle

Dr ANDRIAMASIMANANA Rado

Date de soutenance : 22 Septembre 2017

« **D**ieu dit : Que les eaux qui sont au-dessous du ciel se rassemblent en un seul lieu, et que le sec paraisse. Et cela fut ainsi. Dieu appela le sec terre, et IL appela l'amas des eaux mers. Dieu vit que cela était bon. »

Genèse 1 : 9-10

REMERCIEMENTS

Ce présent travail est tout d'abord conçu pour rendre gloire à Dieu, et qu'Il reçoit les plus précieuses louanges et les actions de grâces de mes lèvres.

Et c'est avec un grand plaisir que je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à :

- ❖ Monsieur **ANDRIANAHARISON Yvon Dieu Donné**, Professeur titulaire et Directeur de l'Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo pour son attention à assurer le bon fonctionnement de notre école ;
- ❖ Monsieur **RABARIMANANA Mamy Herisoa**, Professeur et Responsable de la mention Information Géographique et Aménagement du Territoire, qui ne cesse chercher le développement de notre mention, et surtout pour ses précieuses conseils pour l'accomplissement de ce travail ;
- ❖ Monsieur **RAMANANTSIZEHENA Pascal**, Professeur titulaire et Enseignant au sein de l'ESPA pour l'honneur qu'il nous a fait de présider ce jury ;
- ❖ Madame **RAHAJANIRINA Michelle**, Chef de Service Imagerie, Espace et Photogrammétrie au sein du FTM et Enseignant à l'Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo; pour ses directives, ses appuis techniques et ses encadrements tout le long de la réalisation de ce mémoire ;
- ❖ Madame **RANDRIANANDRAINA Noelle**, maître de conférences et Enseignant chercheur au sein de l'Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo qui a accepté d'examiner ce travail ;
- ❖ Monsieur **ANDRIAMASIMANANA Rado**, maître de conférence et Enseignant à l'Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo de bien vouloir examiner avec rigueur ce présent mémoire.

Je ne saurais oublier d'adresser mes gratitude à :

❖ Tous les Enseignants de la Mention Information Géographique et Aménagement
Territoire qui nous a donné le meilleur d'eux-mêmes tout au long notre formation ;

❖ Mes chers parents et à toutes ma famille pour leurs grands soutiens;

❖ Ma promotion en classe, ainsi qu'à tous les étudiants de la mention IGAT

❖ Tous mes frères et sœurs en Christ pour leur soutien et leurs prières ;

Enfin, j'adresse mon vif remerciement à tous ceux qui, de près ou loin, ont contribué
à la réalisation de ce mémoire.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	<i>i</i>
SOMMAIRE	<i>iii</i>
LISTE DES FIGURES.....	<i>iv</i>
LISTE DES FORMULES.....	<i>iv</i>
LISTE DES CARTES.....	<i>v</i>
LISTE DES TABLEAUX.....	<i>v</i>
LISTES DES ANNEXES.....	<i>v</i>
LISTE DES ABREVIATIONS.....	<i>vi</i>
INTRODUCTION	<i>1</i>
PARTIE I. GENERALITES	<i>3</i>
Chapitre I : EVOLUTION DU LITTORAL	<i>4</i>
Chapitre II : TECHNIQUES DE MESURES ET DE SUIVI DE L'EVOLUTION DES TRAITS DE CÔTE	<i>15</i>
Chapitre III : LE SIG ET LA TELEDETECTION DANS LE SUIVI DE TRAIT DE COTE	<i>28</i>
PARTIE II : ANALYSE DE LA CÔTE DE MANAKARA	<i>38</i>
Chapitre I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	<i>39</i>
Chapitre II : PRESENTATIONS DES DONNEES ET DE LA METHODOLOGIE	<i>50</i>
Chapitre III : TRAITEMENTS DES DONNEES	<i>57</i>
Chapitre IV : PRESENTATION DES DIFFERENTS RESULTATS	<i>63</i>
Chapitre V : LIMITES DES TRAVAUX.....	<i>79</i>
PARTIE III : DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	<i>80</i>
Chapitre I : ESSAI D'EXPLICATION DE L'EROSION COTIERE DE LA ZONE	<i>81</i>
Chapitre II : SIMULATIONS DU MOUVEMENT DE TRAIT DE COTE DANS LE FUTURE ET POSSIBILITES D'IMPACTS	<i>87</i>
Chapitre III : RECOMMANDATIONS AU NIVEAU NATIONAL	<i>93</i>
Chapitre IV : RECOMMANDATIONS AU NIVEAU LOCAL	<i>94</i>
Chapitre V : EVALUATION FINANCIERE DU TRAVAIL.....	<i>101</i>
CONCLUSION.....	<i>102</i>
BIBLIOGRAPHIE	<i>103</i>
ANNEXES	<i>I</i>
Table des matières	<i>VI</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Exemple de plage	4
Figure 2: Glyptogenèse	5
Figure 3: Mode de transport des sédiments en milieux aqueux	7
Figure 4: Les vagues et ses caractéristiques	9
Figure 5: Les vagues et ses caractéristiques	10
Figure 6: Rip current	11
Figure 7: Impacts des aménagements littoraux sur le littoral	13
Figure 8: GPS Différentielle	24
Figure 9: Théodolite	24
Figure 10: L'imagerie vidéo	24
Figure 11: GPS	24
Figure 12: Scanner 3D ou LIDAR terrestre	24
Figure 13: Les spectres électromagnétiques	34
Figure 14: Densité de la population de Manakara par Km ²	44
Figure 15: Gare de Manakara	46
Figure 16: Aéroport de Manakara	46
Figure 17: Wagons des trains de Manakara	46
Figure 18: Agriculture de Manakara en 2005	48
Figure 19: Schéma méthodologique du travail effectué	51
Figure 20: Etapes de traitement des données	52
Figure 21: L'indicateur de ligne de côte dans les 3 dates	56
Figure 22: Résultat Numérisation de l'orthophoto 1992	57
Figure 23: Le traitement des traits de côtes sous DSAS	60
Figure 24: Ensablement à l'embouchure du rivièrè Manakara	81
Figure 25: Elévation de vague par le tsunami de 2004	82
Figure 26: Courbe de variation de température	83
Figure 27: Température de surface marine dans le Sud de Madagascar	84
Figure 28: Variation de la précipitation de Manakara de 2000 à 2011	85
Figure 29: Epis	96
Figure 30: Digue de protection	96

LISTE DES FORMULES

Formule 1: Loi de Stockes.....	7
Formule 2: Précision planimétrique	57
Formule 3: Précision altimétrique	58
Formule 4: End Point Rate (ERP)	68
Formule 5: Déplacement du trait de côte	87

LISTE DES CARTES

<i>Carte 1 : Carte de délimitation de la commune urbaine de Manakara</i>	40
<i>Carte 2: Evolution de trait de côte entre les années 1992, 2007 et 2016</i>	62
<i>Carte 3: Evolution de trait de côte entre les années 1992 et 2016</i>	63
<i>Carte 4: Evolution de trait de côte entre les années 1992 et 2007</i>	64
<i>Carte 5: Evolution de trait de côte entre les années 2007 et 2016</i>	65
<i>Carte 6: Carte statistique de l'évolution de trait de côte de Manakara entre les années 1992 et 2016</i>	72
<i>Carte 7: Carte de volume de terres érodées ou engraisées entre 1992 et 2016</i>	74
<i>Carte 8: Carte de volume de terres érodées ou engraisées entre 1992 et 2007</i>	75
<i>Carte 9: Carte de volume de terres érodées et engraisées entre 2007 et 2016</i>	76
<i>Carte 10: Carte de simulation de trait de côte de Manakara: Zone A; Année 2025, 2050, 2100</i>	89
<i>Carte 11 : Carte de simulation de trait de côte de Manakara: Zone B; Année 2025, 2050, 2100</i>	90

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Les indicateurs des traits des cotes selon les grands types de littoraux</i>	18
<i>Tableau 2: Population globale de la commune urbaine de Manakara</i>	44
<i>Tableau 3: La production en cultures vivrières et la production en cultures de rente</i>	48
<i>Tableau 4: Tableau des résultats statistiques entre 1992 et 2016</i>	69
<i>Tableau 5: Tableau des résultats statistiques entre 1992 et 2007</i>	70
<i>Tableau 6: Tableau des résultats statistiques entre 2007 et 2016</i>	71
<i>Tableau 7: Erosion et engraissement entre 1992 et 2016</i>	72
<i>Tableau 8: Erosion et engraissement entre 1992 et 2007</i>	72
<i>Tableau 9: Erosion et engraissement entre 2007 et 2016</i>	72
<i>Tableau 10: Déplacements indépendant des dates</i>	73
<i>Tableau 11: Résultat volumétrique</i>	75
<i>Tableau 12: Caractéristiques des cyclones qui ont touchés la Région de Vatovavy Fitovinany entre le 01 janvier 1990 et le 31 mars 2000</i>	86
<i>Tableau 13: Perspectives de déplacement de trait de côte de Manakara</i>	87
<i>Tableau 14: Perspective des possibilités d'impact d'érosion côtière de Manakara</i>	90
<i>Tableau 15: Evaluation financière</i>	101

LISTES DES ANNEXES

<i>ANNEXE 1: Evolution du littoral entre 1950 et 1992 (Archive)</i>
<i>ANNEXE 2: Carte bathymétrique (Archive)</i>
<i>ANNEXE 3: Table attributaire de la ligne de base dans DSAS</i>
<i>ANNEXE 4: Table attributaire de la ligne de côte dans DSAS</i>
<i>ANNEXE 5: Point Géodésique</i>
<i>ANNEXE 6: Processus de fabrication de l'orthophotographie numérique</i>

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR : Association Française de Normalisation

AUF : Agence Francophone de la Francophonie

BRGM: Bureau de Recherche Géologiques et Minières

CASI : Compact Airborne Spectrographique Imager

CNIG: Conseil National d'Information Géographique

CREAM : Centre de Recherches, d'Etudes et d'Appui à l'Analyse Economique à Madagascar

DSAS: Digital Shoreline Analysis System

EPR: End Point Rate

ESRI: Environmental Systems Research Institute

FTM : Foibe Taosarintanin'i Madagasikara

GIEC : Groupes d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat

IFREMER: Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER

JIRAMA: Jiro sy Rano MALagasy

MIND: Mangatsiotra Initiative for Nature and Developpement

MNE: Modèle Numérique d'Elevation

MNT: Modèle Numérique de Terrain

NSM: Net Shoreline Movement

ONG : Organisation Non Gouvernementale

RN : Route National

SAR : Synthetic Aperture Radar

SCE: Shoreline Change Envelope

SHOM: Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SIG: Système d'Information Géographique

TIN : Triangular Irregular Network

INTRODUCTION

Le milieu côtier est un milieu très convoité pour leurs intérêts écologiques, touristiques et économiques. Par ailleurs, il constitue un écosystème fragile. Le milieu côtier est aujourd'hui menacé par la nature même d'une part et par les actions de l'homme d'autre part. Les aménagements du rivage ont souvent contribué à aggraver les phénomènes d'érosion et de recul de traits de côtes. Cette menace sur les littoraux va encore perdurer, voire même s'intensifier, sous le contexte du changement climatique de nos jours. En effet, la montée des eaux marines, la tendance croissant en nombre et en puissance des phénomènes extrêmes influencent beaucoup les littoraux.

En outre, les images à haute résolution spatiale sont de première importance dans les études environnementales et également pour la cartographie détaillée des milieux littoraux. Partout dans le monde, la mesure et le suivi des mouvements de trait de côte constituent un domaine de prédilection des ingénieurs et techniciens en information géographique et en aménagement du territoire.

A Madagascar, la mesure et le suivi des traits de côtes sont concentrés sur les côtes occidentales. Des études sont menées principalement à Morondava et un peu à Mahajanga. Un diagnostic national du phénomène s'avère pourtant important pour pouvoir ériger des politiques nationales pertinentes pour la protection du littoral. C'est pourquoi, ce mémoire, intitulé : « **Mesure du mouvement de trait de côte de Manakara, par imagerie aérienne et spatiale** » prend son importance.

L'objectif de ce mémoire est de mesurer l'ampleur du phénomène d'érosion du littoral afin de proposer des mesures de gestions adéquates. Et cela, en démontrant l'intérêt cartographique de l'imagerie aérienne et spatiale pour la mesure et le suivi de trait de côte. Ainsi, cet ouvrage se divise en trois grandes parties :

La première partie aborde la généralité sur l'évolution du littoral, les techniques de mesures et de suivis des traits de côtes, et enfin sur le SIG et la télédétection.

La seconde partie va être consacrée à l'analyse de la côte de Manakara. Elle sera constituée d'abord par la présentation de la zone d'étude, puis par la présentation de la méthodologie, le traitement des données, la présentation des résultats, et finalement des limites des travaux.

Dans la troisième partie seront traitées les discussions et les recommandations. Nous allons voir : un essai d'explication du phénomène, sa projection dans les années à venir, des

recommandations qui seront basées sur les mesures à prendre pour le faire face, et nous terminons par une analyse financière.

PARTIE I. GENERALITES

Chapitre I : EVOLUTION DU LITTORAL

I.1 Le littoral

Le littoral est un espace de contact entre la terre et la mer. La partie terrestre, appelée couramment côte, correspond à celle qui est soumise plus ou moins à l'action de la mer, elle est composée principalement de l'avant plage et l'estrans, de l'arrière plage et des dunes (Figure1). La partie marine (ou partie immergée) correspond au plateau continental du relief sous-marin, elle a donc une largeur variable avec une profondeur inférieure à 200 mètres.

L'évolution du littoral et la géomorphologie littorale ne peuvent se séparer. Cette dernière est une science qui étudie l'évolution du littoral. Elle est une branche de la géomorphologie qui est focalisée sur les zones influencées par les plans d'eaux comme la mer et les océans.

La zone littorale, appelée aussi zone côtière, est un espace très dynamique façonné par différents facteurs qui soient l'approvisionnement en matériaux (c'est le phénomène d'accrétion), soient la dénigrent (érosion côtière).

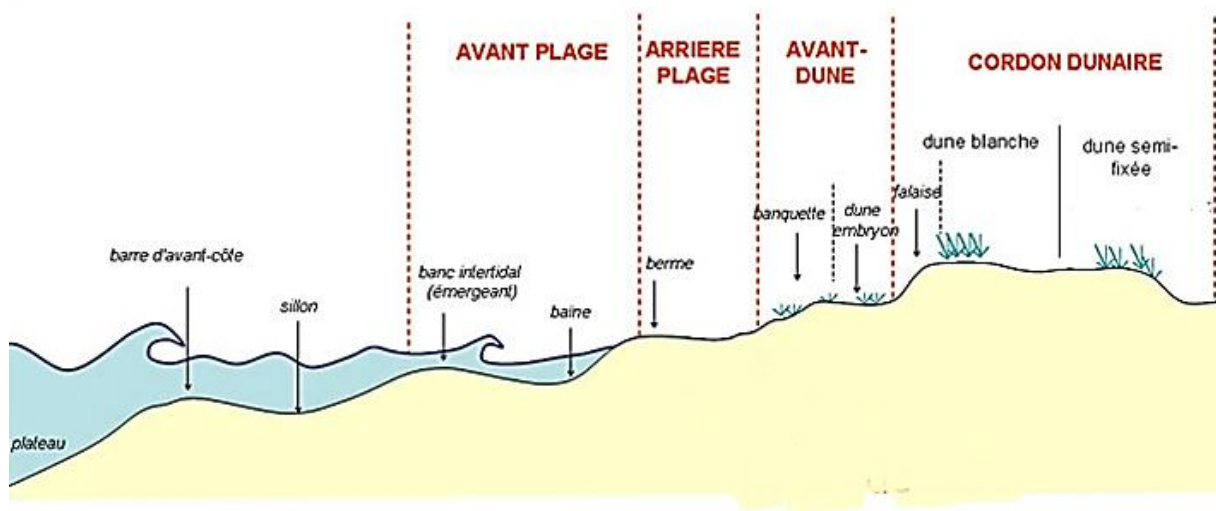


Figure 1: Exemple de plage
Source ONF (modifié)

I.2 Définition de l'érosion côtière

L'érosion est l'action des agents météoriques qui, en s'exerçant sur le relief structural, tend à le modifier et finalement à le détruire¹.

L'érosion est donc une action par lequel des agents responsables modifient un relief par ablation de ses matériaux. Il peut s'observer en plein continent où sur les côtes.

Quant à l'érosion côtière, c'est un processus naturel qui peut se définir comme l'emprise de la mer sur la terre et doit s'observer sur des périodes suffisamment longues pour éliminer les effets du climat, des tempêtes et des régimes locaux de transports sédimentaires.

Elle se manifeste lorsque la mer gagne du terrain sur la terre à cause des vents, des houles et des mouvements des marées dans un contexte de pénurie sédimentaire mais il est maintenant évident que son ampleur actuelle est influencée par notre mode de vie.

Lorsque la terre gagne du terrain par rapport à la mer, c'est l'engraissement de la côte.

I.3 Principe de l'érosion côtière

L'érosion côtière se fait en 3 étapes successives : la glyptogénèse, le transport et l'accumulation.

a. La glyptogénèse

La glyptogénèse est l'ablation des matériaux côtiers qui vont être ameublés puis transportés par les facteurs de l'érosion.

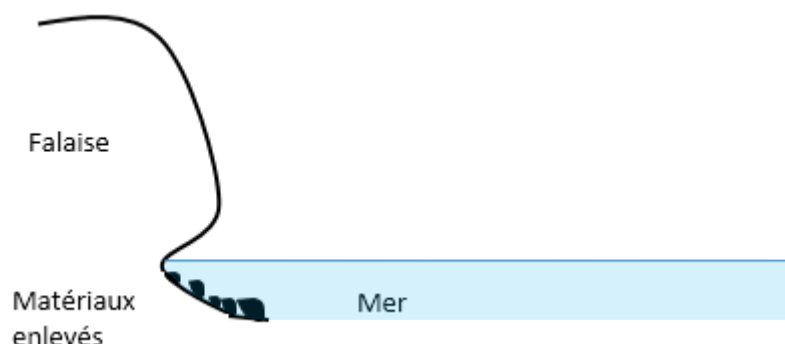


Figure 2: Glyptogénèse

¹ M. Gloried, in RABARIVONY Tovomahefa, 2001

b. Le transport

Il existe quatre types de modes de transport de ces matériaux : traction, roulement, saltation et suspension².

➤ La Traction

La traction est un glissement des matériaux sur le fond de la mer où il se produit rarement.

➤ Le roulement sur le fond

Le roulement de fond est le mode de transport le plus adapté pour les sables et les galets. Ainsi, plus les particules sont polies et émoussées, plus leur transport est rapide. Néanmoins, la nature du fond peut aider ou faire obstacle à cela.

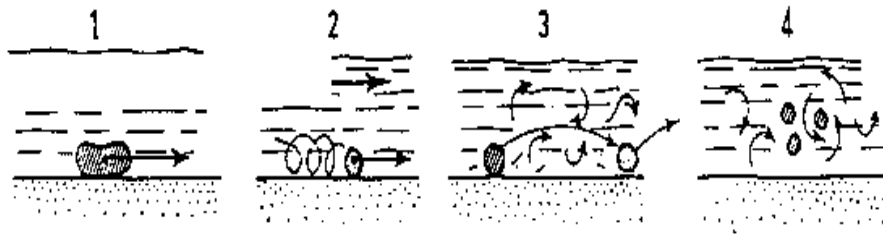
➤ La saltation

La trajectoire d'une particule est imprévisible lorsque la mer est très turbulente. En effet, les poussées de bas en haut qui s'exercent sur les particules les entraînent un moment. Par la suite, ces particules tombent de nouveau jusqu'à leur remise en flottation. Ces mouvements entraînent l'usure ou le façonnement des particules, surtout lorsqu'il s'agit des galets.

➤ La suspension

C'est le mode de transport de la plus grande partie du matériel fin. Les particules plus grosses comme les sables nécessitent une agitation des eaux de mer par un courant violent ou très turbulent. Ici, les facteurs intervenant sont, d'une part: la densité des particules et leur forme et d'autre part, la densité et la viscosité du liquide (eau de mer). La turbulence joue un rôle fondamental dans ce mode de transport.

² OTTMANN F, 1965,



Transport des sédiments en milieu aqueux.

1. Traction. — 2. Roulement. — 3. Saltation. — 4. Suspension.

*Figure 3: Mode de transport des sédiments en milieux aqueux
(D'après OTTMANN F, 1965)*

c. L'accumulation

L'accumulation des sédiments dépend des caractéristiques physiques des particules d'une part et des propriétés de la mer d'autre part.

- Les caractéristiques physiques
 - La taille des particules

La relation entre l'accumulation des sédiments et la taille des particules obéit à la loi de STOKES. Cette loi s'exprime par la formule:

$$V = C \cdot r^2$$

Formule 1: Loi de Stokes

Avec :

- V = Vitesse de chute des particules (m/s)
- r = rayon d'une sphère de même poids et de même volume que la particule (cm)
- C = constante définie par :

$$C = \frac{2g(d_s - d_l)}{9n}$$

Avec :

- g : accélération de la pesanteur (ms^2)
- d_s : densité du sédiment

- d_l : densité du liquide transporteur (eau de mer)
- n : viscosité du liquide transporteur, c'est à dire de la mer, exprimée en poises

- La densité des particules

Les particules lourdes qui sont difficiles à mettre en mouvement se déposent plus vite que les légères et s'accumulent dans les zones privilégiées. C'est pourquoi des matériaux lourds se concentrent en certains points de la plage.

- La forme des particules

La distance parcourue par les particules dépend de leur forme car plus elles sont émoussées plus il y a de possibilité qu'elles aillent plus loin.

➤ La propriété de la mer

Dans un endroit plus agité où il y a beaucoup plus de turbulence, il est difficile pour les particules de s'y accumuler. En effet, dans une mer plus claire, les particules s'accumulent plus vite que dans celle plus sombre³.

I.4 Les facteurs de l'érosion côtière

a. Les vagues

Sur le littoral, le vent pousse l'eau marine. Il y a un transfert d'énergie du vent vers l'eau marine. Il y a alors mouvement de la partie superficielle de la mer. C'est ainsi qu'une vague se forme. Lorsque cette vague se propage vers l'espace où ce vent générateur ne souffle plus, c'est ce qu'on appelle la houle⁴. Une vague est caractérisée par :

- la direction de propagation ;
- la période T : temps séparant les passages de deux crêtes successives au même point (en seconde) ;
- la longueur d'onde L : distance entre deux crêtes successives (m) ;
- la hauteur H : dénivellation entre la crête et les creux de la vague (m) ;
- la vitesse de propagation C , avec $C = 1/T$ (m/s) ;

³ Idem

⁴ DERRUAU, 1974

- la cambrure : rapport entre sa hauteur et sa longueur d'onde H/L (exprimée souvent en %)

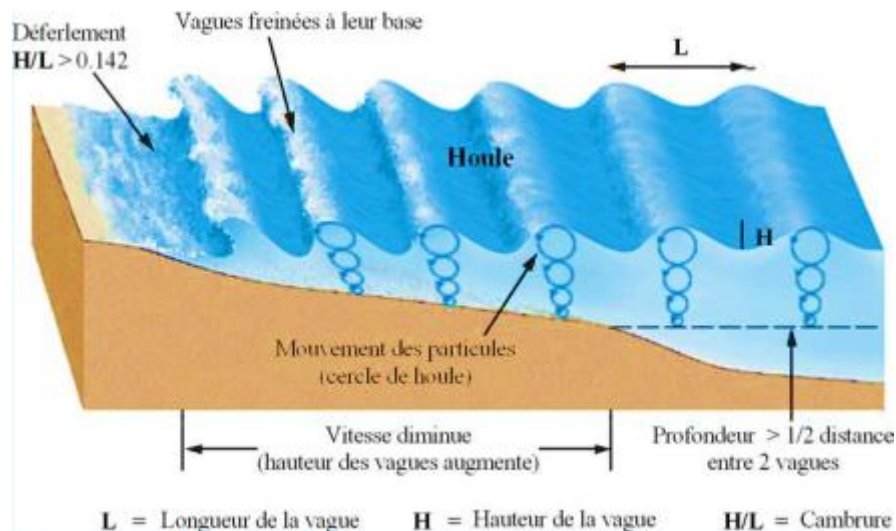


Figure 4: Les vagues et ses caractéristiques

A l'intérieur des vagues, les particules subissent des mouvements orbitaux. Leurs diamètres diminuent exponentiellement du haut vers le bas et deviennent négligeables à une distance $d = 1/2L$ (Figure 4). Lorsque les vagues s'approchent de la côte, il y a une ligne où la profondeur de l'eau est inférieure à la moitié de la longueur d'onde des vagues. Alors, les vagues y sont freinées et, selon, les vagues d'oscillation se transforment en vagues de translation⁵. A une profondeur variant entre 1,1 et 1,5 de la valeur de H (hauteur de la houle), les vagues deviennent instables et basculent car il y a excès de cambrure (lorsque $H/L > 1/7$) : c'est le déferlement. Ce dernier met en suspension une énorme quantité de sédiments.

Par ailleurs, l'irrégularité des fonds entraîne des phénomènes de divergence ou de convergence. Lorsque les vagues divergent vers les caps en y concentrant son énergie, elles entraînent une érosion. Par contre, quand elles se convergent vers les baies en y dispersant son énergie, elles entraînent une accrétion (appelée aussi engraissement) (Figure 5). Ni les baies ni les caps n'échappent à la puissance érosive des vagues. Leur action mécanique fragilise les roches et elles aspirent les particules lorsqu'elles se retirent. Puis elles bombardent les côtes

⁵ OZER A., 1994

par les particules (galets ou sables) qu'elles transportent et ouvrent des encoches au pied de la falaise. La falaise finit par se déstabiliser et on voit des bancs de falaise se décrocher.

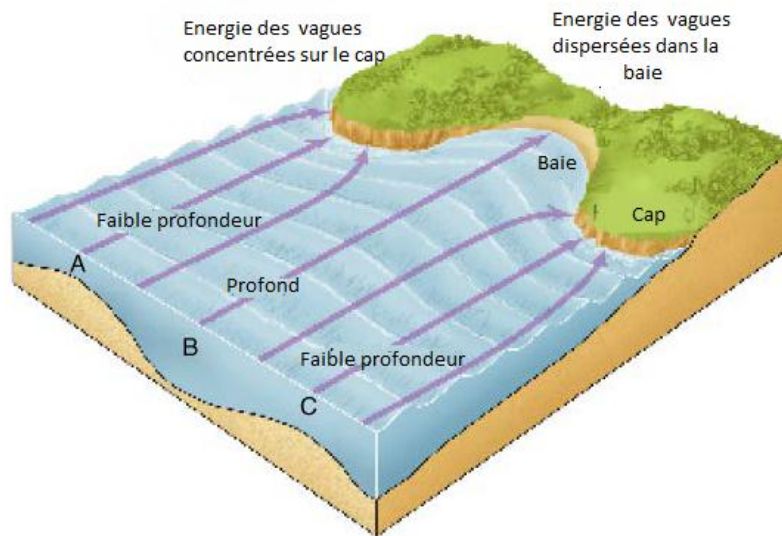


Figure 5: Les vagues et ses caractéristiques

En ce qui concerne le dérivé littoral, il s'agit d'un courant parallèle à la côte. C'est l'un des plus importants facteurs de transport de sédiments sur les côtes. Lorsque la houle est oblique par rapport au littoral, le jet de rive se fera dans la direction de la propagation et le retrait des eaux se fera par contre dans le sens de la pente de la plage.

L'efficacité de l'érosion par les vagues se manifestent surtout dans l'espace intertidal (ou estran) et s'atténue rapidement avec la profondeur. A 100 m de la côte, on ne le ressent plus.

b. Les courants

➤ Les courants de retour ou « underflow »

Ce sont des courants qui accompagnent les vagues. Ils s'écoulent sur le fond, dans la même direction que les vagues. Ils ont la puissance d'éroder le fond et de transporter les particules sur le large avec ceux qui sont mises en suspension par le déferlement.

➤ Les courants d'arrachement ou « rip current »

Ce sont des courants qui assurent en surface le retour des eaux superficielles poussées vers la côte. La topographie de la plage détermine leur localisation, là où se concentrent les eaux et les courants dans une zone étroite. Ensuite, le courant se disperse en s'incorporant dans la masse des eaux, formant un vaste chou-fleur d'eau salée chargée de sédiments vers la large.



Figure 6: Rip current

➤ Les courants des marées

Ce sont des courants puissants. En effet, ils bénéficient des écoulements des eaux douces à marée basse atteignant jusqu'à 5 m/s. Cette occasion leur permet d'éroder effectivement le fond. En outre, ils peuvent transporter un important volume de sédiments, de sable et des galets et ne laissant que de grands blocs de roches.

c. Les marées

La gravitation de la lune et du soleil entraîne des fluctuations de la mer : c'est la marée astronomique. Lorsque l'attraction de la lune et du soleil s'additionnent, la marée est plus forte que la normale : c'est la marée de vive-eau. Par contre quand ces deux attractions s'opposent, la force résultante, est plus faible : c'est la marée de morte-eau. La marée est très importante pour le façonnement des côtes par le fait qu'elle influence les autres facteurs tant physiques que biologiques.

d. Le vent

L'action des vents se manifeste, du point de vue sédimentologique, de trois manières principales⁶ :

- en engendrant des courants,
- en engendrant la houle,
- en provoquant des transports de sable

En effet, lorsque le vent souffle dans la même direction que les vagues, il démaigrit les côtes en raflant les matériaux fins comme le sable. Dans le cas contraire, il ralentit les vagues et on obtient un engraissement des plages, donc les dépôts sont plus importants.

e. Les activités biologiques

Comme les milieux côtiers sont riches en êtres vivants, l'influence de ces derniers est signifiante en termes de façonnement des côtes. En effet, les êtres vivants participent à la sédimentation, à l'amortissement des vagues, à la construction des récifs et en favorisant la diacalse des roches.

f. Les activités de l'homme

Les actions de l'homme ont aussi un impact sur l'évolution des côtes. La figure 7 montre bien cette situation.

⁶ LE LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE, 1976

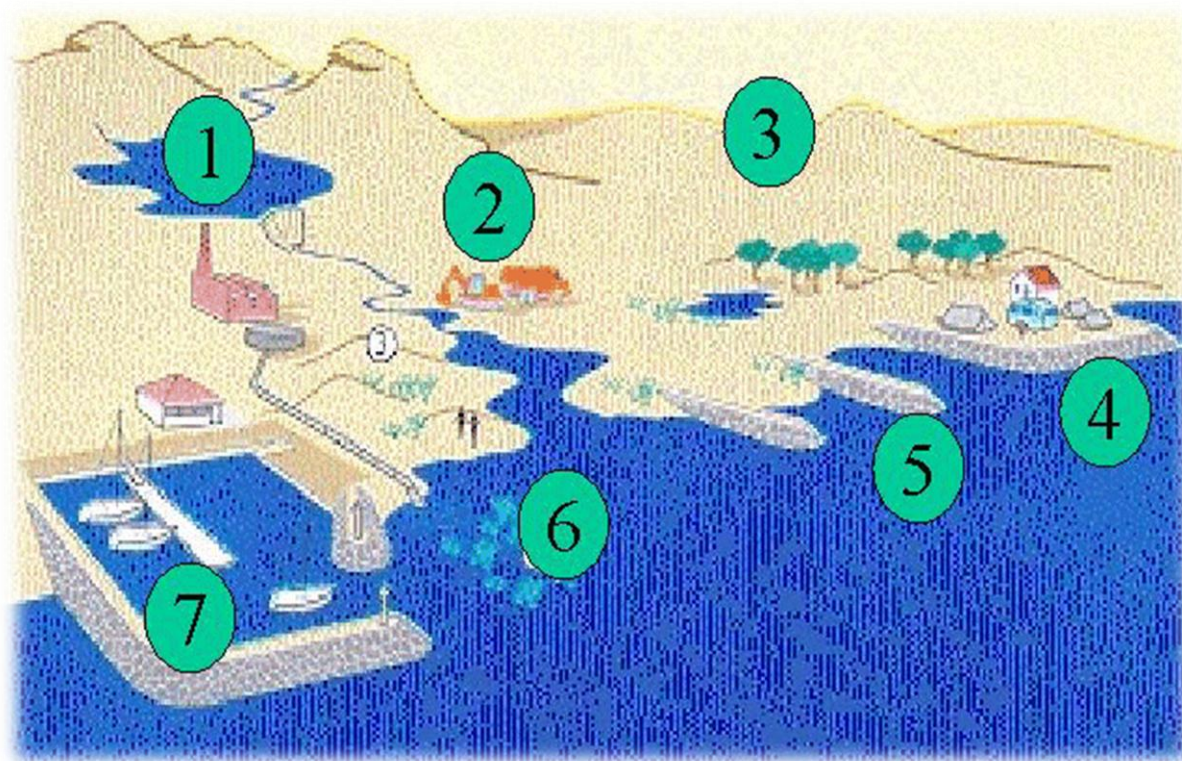


Figure 7: Impacts des aménagements littoraux sur le littoral

Par exemple:

1 Les barrages de retenue, que l'on retrouve un peu partout sur les fleuves, sont de formidables pièges à sédiments.

2 L'extraction des matériaux à l'embouchure des fleuves, à partir des plages ou avant-plages et surtout des dunes, constitue un facteur de déséquilibre. Sablières et gravières exploitées dans le lit des fleuves participent au déficit sédimentaire des plages puisque les matériaux enlevés ou piégés ne parviennent plus au rivage.

3 L'arasement des dunes bordières déstabilise les plages. Cela, pour diverses raisons tel le besoin d'aménagement du tourisme balnéaire. Or les dunes participent activement à l'équilibre des plages parce qu'elles constituent une réserve de sable, et ont un rôle protecteur lorsque se déferlent les vagues de tempête.

4

Les aménagements de front de mer (routes littorales, boulevards front de mer, parkings, promenades, postes de secours...) ont des effets néfastes lorsqu'ils sont implantés trop près du rivage. Les parois verticales des ouvrages, lorsqu'elles sont attaquées par les houles de tempêtes, renforcent la turbulence des digues provoquent l'enlèvement de sable à leurs pieds, abaissent le profil de plage, ce qui a pour résultat une avancée de la mer.

6

La régression des posidonies sous l'action de la pollution entraîne des déséquilibres sédimentaires.

5 7

Les grands travaux portuaires ou les ouvrages de protection, implantés sur une côte affectée par un transit littoral prédominant, perturbent l'équilibre des transports sédimentaires. En bloquant les matériaux sur la face "alimentée" des ouvrages, ils provoquent une érosion sous la face "sous-alimentée".

Chapitre II : TECHNIQUES DE MESURES ET DE SUIVI DE L'EVOLUTION DES TRAITS DE CÔTE

Ce chapitre s'inspire en grande partie du Rapport Final de synthèse de référence des techniques de suivi de trait de côte du BRGM en 2012.

II.1 Le trait de cote

Le concept de trait de côte avec les techniques de levé qui y sont afférents peuvent avoir des nuances d'un auteur à un autre ou d'un organisme à un autre. Nous nous arrangeons du côté du BRGM pour ce travail. Ainsi cette partie se base essentiellement de ce document, qui est professionnellement fiable.

a. Définition de trait côte et problématique

Le trait de côte est la limite géographique entre le domaine marin et le domaine continental. Toutefois, ce terme présente une ambiguïté du fait qu'il en existe plusieurs critères d'identification (géomorphologie, marée, végétation, etc.) créant ainsi de nombreuses controverses. Pour J.-P. Pinot (1998), la définition du trait de côte est la « Ligne qui marque la limite jusqu'à laquelle peuvent parvenir les eaux marines ». Le trait de côte proprement dit est la limite la plus extrême que puissent atteindre les eaux marines, c'est-à-dire l'extrémité du jet de rive lors des fortes tempêtes survenant aux plus hautes mers de vives eaux. [...]. Le trait de côte n'est pas constamment visible sur le terrain par une discontinuité dans la topographie ou dans la couverture végétale». Roubertou et Bonneval (1965) définissent le trait de côte comme 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». Et pour Baulig (1956) le trait de côte est la «limite entre la côte et le rivage, (limite qui) se déplace avec l'état de la mer et avec la marée». Ces définitions, proches les unes des autres, décrivent le trait de côte comme la limite maximale atteinte par la mer sur la côte.

Cependant, ce type de définition est peu opérationnel dans un objectif de délimitation homogène du trait de côte. C'est dans un esprit de synthèse et de pratique que le groupe de

travail « Littoral » du CNIG définit le trait de côte géomorphologique comme « lieu de discontinuité morphologique caractéristique de la limite probable atteinte par la mer sur la côte. Exemples : talus d'érosion, pied de dune, limite de végétation de la plage, laisse des pleines mers de vives eaux exceptionnelles, bermes de tempête... Cette limite morphologique présentant un intérêt pour le suivi de l'évolution physique des côtes. »

Ainsi, nous joignons cette dernière définition pour le seul fait que notre travail a plus besoin d'une définition « fonctionnelle » que « théorique ». La détermination de trait de côte utilisée nous paraît alors cruciale. Et cela requiert la connaissance des différents types d'indicateurs de traits de côtes.

b. Les différents types d'indicateurs de traits de côtes

Le choix des indicateurs dépend avant tout des types de côtes à lever. Boak et Turner (2005) ont répertorié 45 indicateurs de traits de côtes, définis depuis les années 1950 et utilisés dans les études et les littératures scientifiques. Certaines s'appuient sur des éléments géomorphologiques, ou sur des végétations ou bien encore de débris (laisses des mers), ou enfin sur une ligne de déferlement (indicateurs hydrodynamiques instantanés ou non). Le tableau suivant montre la correspondance entre les types de milieux et les différents types d'indicateurs qui sont groupés en :

- indicateurs géomorphologiques
- indicateurs botaniques
- indicateurs hydrodynamiques
- indicateurs altimétriques

Milieu	Indicateurs de traits de côtes fréquemment utilisés	Classes/Types
Tous types de plages et dunes (côtes sableuses, galets, plage corallienne...)	Ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	Altimétrie
	Ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	Altimétrie
	Ligne de débris (trace de tempête passée)	Hydrodynamique
	Résurgence d'eau sur la plage	Hydrodynamique
	Laisse de mer	Hydrodynamique
	Limite sable mouillé/sec	Hydrodynamique
	Limite de jet de rive	Hydrodynamique (instantanée ou non)
	Ligne d'eau instantanée	Hydrodynamique (instantanée)
	Première barre d'avant côte	Géomorphologique
	Berme	Géomorphologique
	Talus de collision	Géomorphologique
	Pied de dune	Géomorphologique
	Crête de dune	Géomorphologique
	Abrupt	Géomorphologique
	Limite de végétation pionnière	Botanique
	Limite côté mer de végétation pérenne dunaire	Botanique
Côte à falaise rocheuse	Ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	Altimétrie
	Ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	Altimétrie
	Ligne de débris (trace de tempête passée)	Hydrodynamique
	Résurgence d'eau sur la plage	Hydrodynamique
	Laisse de mer	Hydrodynamique
	Limite sable mouillé/sec	Hydrodynamique
	Encoche basale	Géomorphologique
	Pied de falaise	Géomorphologique

	Sommet de falaise	Géomorphologique
	Rupture de pente topographique	Géomorphologique
	Limite supérieure du cône d'éboulis	Géomorphologique
	Limite inférieure de végétation terrestre	Botanique
	Partie supérieure de la ceinture grise à cyanobactéries	Botanique
	Limite supérieure du lichen marin noir	Botanique
Marais maritime	Laisser de mer	Hydrodynamique
	Ligne de débris (Trace de tempête passée)	Hydrodynamique
	Limite supérieure de schorre	Géomorphologique et botanique
	Limite supérieure de la slikke	Géomorphologique et botanique
Marais à mangrove	Limite de front de mangrove	Géomorphologique et botanique
	Limite d'arrière-mangrove	Géomorphologique et botanique
Côte artificialisée	Limite côté mer de l'aménagement	Géomorphologique
	Limité côté terre de l'aménagement	Géomorphologique
	Sommet de l'ouvrage	Géomorphologique

Tableau 1: Les indicateurs des traits des cotes selon les grands types de littoraux

II.2 Les outils de levés de traits de côtes

Cette sous partie présente les principaux outils de levé de trait de côte qui peuvent être préconisés pour mettre en œuvre un levé ou un suivi de trait de côte. Les outils de levés sont classés par catégorie d'instruments mis en œuvre in situ ou à distance. On signale que pour un projet de suivi de trait de côte, les travaux reposent sur l'acquisition des caractéristiques de quatre types d'objets :

- Objet « ligne » : c'est le trait de côte proprement dit ou son indicateur
- Objet « transect » : c'est la mesure de l'altimétrie le long de radiale(s) perpendiculaire(s) au trait de côte (profils traverses).

- Objet « polygone » : c'est un polygone délimitant une zone d'intérêt sur le terrain.
- Objet « surface 3D » : c'est la restitution de la topographie littorale en 3D à partir de Modèle (s) Numérique(s) de Terrain(s)

Pour ce faire, les outils de levés sont classés en 3 catégories :

- Les levés terrestres
- Les levés aériens et imageries satellites
- Les autres types de levés

Chaque catégorie est récapitulée dans chacune des tableaux suivants :

- Les levés terrestres

Outils de levé	Types de côtes	Données obtenues	Fréquence de suivi	Précision et résolution	coût	Principaux Avantages	Principaux inconvénients
Repères de terrain	Tous types de plages, côtes rocheuses	Profils, traits de côtes, MNT	Annuels	centimétrique	faible	Coût faible, utiles pour d'autres types de levés	Fragiles à la dégradation, suivi régulier
GPS	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Trait de côte	mensuels	Métriques	faible	Coût faible, mis en œuvre facile	La précision 3 à 5 m dans les situations courantes
GPS Différentielle	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Profils, traits de côtes, MNT	Journaliers, mensuels, annuels	Centimétrique	Fort (achat)	Précision, rapidité de mesures	Coût fort à l'achat, possibilité de problème de signal satellite et de radio
Théodolite	Tous types de plages, côtes rocheuses	Profils, traits de côtes	Journaliers, mensuels, annuels	Centimétrique	moyen	Grande précision	Utilisation réservée aux techniciens spécialisés
Le scanner 3D ou Lidar terrestre	Tous types de plages, côtes rocheuses	MNT	Mensuels, annuels	Centimétrique	Fort	Précision, image 3D à très haute résolution, données qualitative et quantitative	Œuvre et traitement de données lourdes, utilisation limitée (pas de couvert végétal falaises, estran large, etc...)
Les suivis photographiques au sol	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Trait de côte	Journaliers, mensuels, annuels		faible	Coût, bon suivi	Méthode de suivi rigoureux (même emplacement, focal, cadrage,...) ; manque de données qualitatives
L'imagerie vidéo	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Profils, traits de côtes, MNT	Journaliers	décimétrique	fort	Bon suivi, bonne précision en 2D, partages des données	Coût fort, requiert de la spécialité, faible couverture, faible précision en z, fragilité du système

Tableau 2: Différents types de levé terrestre

- **Les levés aériens et imageries satellites :**

- **Télédétection aéroportée**

Outils de levé	Types de côtes	Données obtenues	Fréquence de suivi	Précision et résolution	coût	Principaux Avantages	Principaux inconvénients
Photographies aériennes verticales	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Trait de côte, MNT	annuels	Métrique	Fort mais pouvant être faible (photo accessible sur catalogue)	Résolution (20 cm à 50 cm environ) et bonne suivi sur longue période	Coût variable (catalogue ou sur demande), mise en œuvre lourde
Photographies aériennes obliques	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Trait de côte	annuels		moyen	Information précise sur le contenu, aperçu qualitatif	Couverture spatiale faible, mis en œuvre lourde (location avion,..)
Laser aéroporté ou Lidar topo-bathymétrique	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	MNT	annuels	Décimétrique	Fort	Résolution, cartographie 3D complète	Difficulté en cas de mauvaises conditions météorologiques et en cas d'eau turbide
Image hyperspectrale ou image CASI	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Trait de côte	annuels	Métrique	Fort	Résolution radiométrique élevé, informations spectrales détaillées	Coût, requiert une bonne compétence, résolution des pixels faible

Tableau 3: Les levés aériens et imageries satellites : télédétection aéroportée

- **Les levés aériens et imageries satellites :**

- **Télédétection Spatiale**

Outils de levé	Types de côtes	Données obtenues	Fréquence de suivi	Précision et résolution	coût	Principaux Avantages	Principaux inconvénients
Imagerie satellitale multispectrale	Tous types de plages, marais et zones humides	Trait de côte	Annuels	Métrique	faible	Coût faible, données directement exploitable, capteur infrarouge	Géoréférencement, zone d'ombre, résolution, couvert nuageux
Imagerie Pléiades	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Trait de côte	Annuels	Décimétrique	faible	Coût faible, revisite quotidienne, accès facile à la base de données d'archive et système d'acquisition	Géoréférencement, zone d'ombre, couvert nuageux
Imagerie Radar SAR (Exemple: SPOT-5, Formosat-2)	Tous types de plages, marais et zones humides	Trait de côte	Mensuels, Annuels	Métrique	moyen	Coût, excellent précision radiométrique, résolution, indépendant des conditions météorologique,	Traitements lourds

Tableau 4: Les levés aériens et imageries satellites : télédétection spatiale

- Les autres types de levés

Outils de levé	Types de côtes	Données obtenues	Fréquence de suivi	Précision et résolution	coût	Principaux Avantages	Principaux inconvénients
Echosondeurs mono-et multifaisceaux	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Profil, MNT	Mensuels, annuels	Métrique	moyen	Monofaisceau : peu de traitement Multifaisceau : exploration du fond sur une large bande, grande résolution	Coût assez élevé, mis en œuvre et traitement des données
Echosondeurs sismiques réflexions	Tous types de plages, côtes rocheuses, marais et zones humides	Profil	Mensuels, annuels	Décimétrique à métrique	fort	Diagnostics précis sur les volumes totaux constitutifs du disponible sédimentaire	Coût fort, acquisition, traitements et interprétation des données.
Le sonar à balayage latéral (Coupler à un sondeur multifaisceaux)	Tous types de plages, côtes rocheuses,		Mensuels, annuels	Décimétrique	fort	Nombreuse information de bonne qualité, cartographie d'autres objets avec précision (épaves, roches, etc.), haute résolution	Coût fort, acquisition, haut niveau d'expertise, problème de positionnement lorsque les courants sont forts, difficultés en cas de fond moins de 10m

Tableau 5: Autres types de levés

Quelques outils de levé



Figure 11: GPS

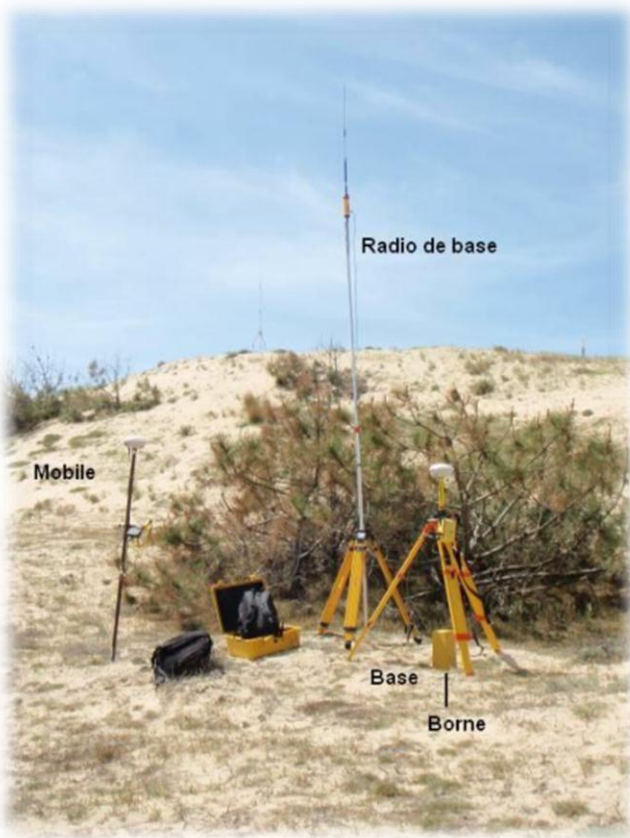


Figure 8: GPS Différentielle



Figure 9: Théodolite



Figure 12: Scanner 3D ou LIDAR terrestre



Figure 10: L'imagerie vidéo

II.3 Méthodes d'extraction et de traitement de traits de côte

a. Les techniques d'extraction

Les méthodes d'extraction de traits de côtes peuvent être manuelles ou semi-automatiques.

i. Les méthodes manuelles

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 (photographie aérienne, images, cartes, etc.) (Boak et Turner, 2005). Sur ces documents, en procédant à la photo-interprétation, les traits de côtes peuvent être obtenus par un dessin manuellement sur un papier transparent. Cette technique peut aussi être assistée par ordinateur. Toutefois, cette technique engendre des imprécisions non négligeables par différentes causes telles que la qualité des documents ainsi que la capacité de l'interprète. C'est ainsi que les techniques d'extraction automatiques ou semi-automatiques ont vu le jour.

ii. Les méthodes semi-automatiques

Ce sont des techniques qui font recours aux traitements d'images. Ces méthodes consistent principalement à extraire l'interface terre-eau (ou ligne de rivage).

b. Les techniques de traitement des données

i. Le SIG

Le système d'information géographique est la technique de référence en termes de technique de traitements des données pour le suivi des traits de côtes. De ce fait, on va beaucoup en parler dans le chapitre suivant.

ii. La technique photogrammétrique

C'est une technique développée par Leatherman (1983) (*Metric mapping*) et Thieler et Danforth (1994a ; 1994b) (*Digital Shoreline Mapping System, DSMS*). Elle consiste à corriger les déformations des photographies aériennes et la correction des cartes par le moyen

de l'informatique. Puis de digitaliser la ligne de référence qui va être géoréférencée et projetée dans un système de coordonnées géographiques avant d'être superposée.

iii. La technique de grille orthogonale

La technique de grille orthogonale est développée par Dolan *et al.* (1978a). C'est un système de cartographie qui utilise les 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 1/5000. 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 lors du 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).

II.4 Les méthodes d'évaluation statistiques

a. La méthode des points extrêmes

Cette méthode statistique consiste à prendre un point de la position la plus ancienne de la ligne de référence et un autre de la plus récente. La vitesse de déplacement du littoral est donc obtenue par la division de la distance entre ces deux points avec le nombre d'année qui s'écoule entre la prise de ces points. La limite de cette méthode se situe sur le fait qu'elle n'affiche ni les accélérations ni le ralentissement ni l'inversion de tendance dans les temps intermédiaires. Les méthodes régressives, quant à elle, peuvent répondre à ce problème.

b. Les méthodes régressives

La méthode régressive simple est une méthode qui amène à obtenir une droite de régression dont sa pente correspond au taux d'évolution. Cette droite est obtenue par le calcul des moindres carrées des mesures de distances entre toutes les positions successives de la ligne de référence. Il y aussi des méthodes de régression plus complexe comme la méthode de *Jackknife*.

Chapitre III : LE SIG ET LA TELEDETECTION DANS LE SUIVI DE TRAIT DE COTE

III.1 SIG

a. Généralités sur le SIG

i. Définition

Le SIG ou Système d'Information Géographique est un système informatique permettant à partir de diverses sources de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace⁷.

ii. Historique

La cartographie est le support naturel du SIG. De la cartographie au SIG de nos jours, les étapes suivantes sont à signaler :

- **1950 – 1970** : début de l'informatique, premières cartographies automatiques
- **1970 - 1980** : diffusion d'outils de cartographie automatique/SIG. Le lancement du premier satellite civil, Landsat 1972, a beaucoup aidé cette évolution et a permis la révision des cartes par les images satellites.
- **1980 - 1990** : marché des logiciels, applications sur PC, mise en réseau, bases de données distribuées
- **1990 – 2000** : par le WebMapping/Internet, banalisation de l'usage de l'Information Géographique (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires routiers, utilisation d'outils embarqués liés au GPS...)
- **2000 - 2012** : apparition de « logiciels libres » professionnels, portails géographiques (Google, IGN,...) outils dédiés aux pratiques coopératives, précision des référentiels inférieurs à 1m.

⁷ Société française de photogrammétrie et télédétection, 1989

iii. Composantes

Le SIG repose sur 4 composantes qui sont :

- Les matériels : ce sont les ordinateurs, les traceurs, les GPS,...
- Les utilisateurs : ce sont les personnes qui manipulent le SIG variant des simples amateurs aux spécialistes en la matière.
- Les logiciels : ils contiennent les outils et fonctions pour stocker, analyser et afficher les informations.
- Les données : ce sont les représentations d'une information sous forme conventionnelle pour faciliter son traitement et sa communication. On distingue trois types de données : les données géographiques, topologiques et descriptives.

Dans certain document, on rencontre une cinquième composante du SIG qui est la méthode.

iv. Fonctionnalités

Le SIG assure les cinq fonctions suivantes, appelées parfois « Principes de 5A » : Ils concernent :

- L'Acquisition saisie des informations géographiques sous forme numérique,
- L'Archivage gestion ou stockage de base de données,
- L'Analyse manipulation et interrogation des données géographiques,
- L'Affichage mise en forme et visualisation et
- L'Abstraction représentation du monde réel

v. Avantages

Nombreux sont les avantages que le SIG offre à ses utilisateurs. C'est pourquoi il intéresse beaucoup de domaine aujourd'hui. Les avantages cités ici ne sont donc quelques-unes parmi tant d'autres. Ce sont :

- Sa capacité de stockage des données géographiques
- Sa possibilité de superposition de plusieurs couches d'information ce qui rapproche des informations de natures différentes. Cela améliore les diverses analyses.

- Sa facilité de mettre à jour et de modifier les données en cas de besoin.
- Sa possibilité d'éditer des cartes et plans à bas prix et d'un grand nombre.
- Sa rapidité de manipulation par rapport à d'autres techniques.
- Son côté très pratique dans les prises de décision.

b. Le SIG : outil de référence de traitement de données sur le suivi de trait de côte

Le SIG est aujourd'hui l'outil le plus pratique dans le traitement des données des suivis de trait de côte. Presque tous les outils d'extraction de trait de côte requièrent un traitement ultérieur sous SIG. Il offre beaucoup de choix possibles quant aux représentations graphiques et cartographiques. Après l'extraction, les données sur les traits de côtes peuvent déjà être intégrées sous SIG afin d'évaluer leur évolution. Ainsi, des analyses diachroniques et la quantification des surfaces des plages et des dunes entre deux années y sont possibles. Les volumes des sols ou sables peuvent même être estimés. Le SIG propose suffisamment de méthodes de traitement et d'analyse dont :

- Le traitement du trait de côte issu d'un MNT

Le traitement issu d'un MNT peut se résumer en 5 étapes : l'acquisition des données, l'interpolation (qui permet d'avoir une représentation du relief du terrain en 2D ou 3D), la création du MNT, l'identification du trait de côte (par cartographie dressée à l'écran, par photo-interprétation de la combinaison d'une photographie aérienne drapée sur MNT, soit par méthode d'extraction des ruptures des pentes en calculant sur MNT) et finalement l'analyse diachronique.

- Le traitement de l'indicateur du trait de côte sous DSAS⁸

L'outil DSAS permet d'analyser l'évolution passé du littoral. Il est rapidement pris en main, facilement opérationnel et permet une grande traçabilité des différentes étapes de construction des traits de côtes futures. Cet outil permet de réaliser un calcul statistique des taux d'évolution à partir des différents traits de côte. Il s'opère sous le logiciel SIG ArcMap (ESRI).

⁸ D'après Aubier et *al*, 2011

Cet outil requiert la définition d'une longueur pour les transects et la réalisation manuelle d'une ligne de base se trouvant soit en mer soit en terre. Il produit automatiquement, selon le pas de mesure par l'utilisateur, des transects perpendiculaires aux linéaires côtiers, mesure les distances entre les traits de côte et calcule les taux moyens de déplacement le long de chaque transect. L'analyse automatique de ces derniers permet de définir des secteurs d'évolution type et d'en calculer les valeurs moyennes. Cette méthode d'extrapolation de l'évolution du trait de côte s'applique plus ou moins bien selon les secteurs et nécessite la correction d'un opérateur expert du littoral.

III.2 TELEDETECTION

a. Généralités sur la télédétection

i. Définition

La télédétection c'est "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"⁹.

« La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tous les processus qui consistent à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis et réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. »¹⁰

Bref, la télédétection est une technique aérospatiale qui utilise l'énergie électromagnétique pour obtenir de l'information de la surface de la Terre sans contact direct.

ii. Le Processus de la télédétection

Le processus de la télédétection comporte 7 étapes :

1. Source d'énergie ou d'illumination (A) - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

⁹ Société française de photogrammétrie et de télédétection, 1988

¹⁰ Centre canadien de télédétection

2. Rayonnement et atmosphère (B) - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.
3. Interaction avec la cible (C) - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.
4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.
5. Transmission, réception et traitement (E) - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).
6. Interprétation et analyse (F) - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
7. Application (G) - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

De plus, on distingue deux types de télédétection :

La télédétection passive où le radiomètre (l'instrument de mesure) embarqué sur l'avion ou le satellite capte le rayonnement réfléchi par la surface de la Terre, lorsque le Soleil illumine la Terre. Le Soleil est la source d'énergie. Il n'est donc pas possible de réaliser des observations la nuit ou quand des nuages masquent le sol sauf en percevant l'infrarouge thermique.

La télédétection active dont le capteur embarqué à bord de l'avion ou du satellite produit sa propre énergie pour illuminer la cible : il dégage un rayonnement électromagnétique qui est dirigé vers la cible. Le rayonnement réfléchi par la cible est alors perçu et mesuré par le capteur. On utilise des radars ou des lasers comme source d'énergie. Ces rayonnements passent à travers la couverture nuageuse et il est donc possible d'obtenir des images quelles que soient les conditions météorologiques et de jour comme de nuit.

iii. Le principe physique de la télédétection

La télédétection utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique pour analyser à distance la surface du sol, de l'océan ou l'atmosphère. Le rayonnement électromagnétique est une forme de propagation de l'énergie dans la nature, dont la forme qui nous est la plus familière est la lumière visible telle que la perçoit l'œil humain. Le principe de la télédétection est de capter, d'enregistrer, de traiter et d'analyser, l'énergie d'un rayonnement électromagnétique. On sert des capteurs pour prélever ces rayonnements.

Le rayonnement électromagnétique, d'origine naturelle ou artificielle, existe pour une gamme très étendue de fréquences ou de longueurs d'onde (de 10^{-9}m à 10^5m), qui constitue le **spectre électromagnétique**. Seule une partie très limitée de ce spectre, entre $0,400\text{ }\mu\text{m}$ (400 nm) et $0,7\text{ }\mu\text{m}$ (700 nm), constitue la lumière visible à laquelle est sensible l'œil humain. Les principales zones du spectre qu'on peut mesurer en télédétection :

- L'ultraviolet : qui se situe au-delà du violet de la partie violet du spectre visible. C'est la plus petite longueur d'onde utilisée en télédétection
- Le spectre visible (0,4-0,7 μm): qui est la gamme de fréquence de l'œil humain avec un rayonnement solaire maximal. Subdivisé en trois groupes: R, G, B
- L'infrarouge proche (0,7-1,1 μm): qui est appelé IR réfléchi. L'énergie solaire des corps réfléchissant. Le rayonnement dans la région de l'infrarouge réfléchi est utilisé en télédétection de la même façon que le rayonnement visible.
- L'infrarouge moyen (1,1 -8 μm): qui est un mélange de rayonnement solaire et d'émission. Il affecte de manière significative à l'atmosphère, donc il est employé pour mesurer les concentrations de vapeur d'eau, ozone, aérosols, etc.
- L'infrarouge thermique (8-14 μm): qui est le rayonnement émis par les organismes eux-mêmes. Il permet de déterminer la température d'un corps (IR thermique). Les images peuvent être disponibles à tout moment de la journée.
- Les hyperfréquences appelées aussi micro-ondes (1mm-1m): qui présentent un intérêt croissant dans la télédétection. Pour elles, les perturbations atmosphériques sont mineures. Les capteurs actifs sont généralement utilisés ici.

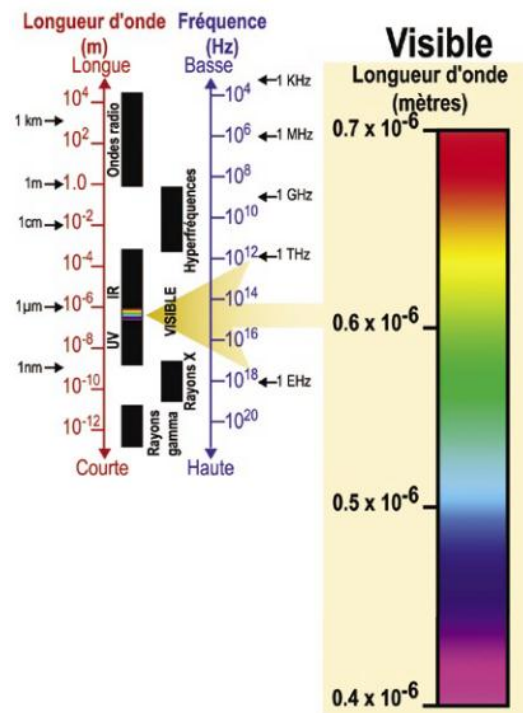


Figure 13: Les spectres électromagnétiques

iv. Les satellites et capteurs

Pour pouvoir capter ces spectres permettant d'obtenir des images, la télédétection utilise des instruments tels que les satellites et les capteurs :

- les satellites

Les satellites, en télédétection, sont des objets artificiels qui tournent autour de la terre. Ce sont des plates-formes placées en orbite pour observer la terre à des fins multiples.

Les satellites effectuent autour de la Terre une trajectoire appelée orbite. Cette dernière les permet d'avoir une couverture répétitive et continue de la surface de la Terre. Ainsi, les caractéristiques des orbites de satellites conditionnent la capacité d'observation de la Terre, sa répétitivité, et la nature même des données obtenues. C'est pourquoi le choix de type d'orbite est important en télédétection satellitaire. En effet, le choix d'une orbite est déterminé par l'altitude (la hauteur du satellite au-dessus de la surface de la Terre), l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la Terre.

Selon l'orbite, il y a les satellites « à défilement » qui ont une orbite basse (500 à 1500 km d'altitude), avec une période comprise entre 90 et 120 mn. C'est le cas de

la plupart des satellites de télédétection. L'orbite est dite quasi-polaire, elle va de Nord au Sud ou vice versa. Le plus souvent, l'inclinaison de l'orbite est choisie proche de 100 °, de façon à satisfaire aux conditions de l'héliosynchronisme, dont l'intérêt est grand en télédétection. En effet, les satellites observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Le satellite SPOT et les satellites météorologiques de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) en font partie. Quant aux satellites géostationnaires, ils sont installés sur une orbite circulaire dans le plan de l'Equateur, et de période égale à la durée d'une rotation de la Terre sur elle-même (orbite géosynchrone). L'altitude est d'environ 35 800 km. Les satellites géostationnaires sont utilisés pour les satellites de météorologie (comme Météosat) et aussi pour les satellites de télécommunication qui retransmettent d'un continent à l'autre les communications téléphoniques ou les images de télévision.

Les satellites sont aussi caractérisées par leur fauché. C'est la partie de la surface terrestre qu'elles observent lorsqu'elles sont en orbite.

- les capteurs

Le capteur est un instrument qui enregistre le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi sous forme numérique (données quantitatives susceptibles d'être calibrées pour accéder aux grandeurs physiques, luminance ou réflectance) ; c'est-à-dire un « Instrument qui recueille de l'énergie radiative provenant de la scène visée et délivre un signal électrique correspondant et mesurable » Bonn et Rochon, 1992

Le capteur est conçu pour détecter le signal radiatif émis ou réfléchi par la surface et à l'enregistrer soit sous forme analogique soit sous forme numérique. Trois grands types de capteurs peuvent être distingués et seront étudiés successivement :

- *les appareils photographiques* : ce sont les appareils spécialisés en photographie aérienne. Ils sont installés sur des navettes spatiales. La photographie aérienne est ancienne et est aussi fréquemment utilisée.
- *les radiomètres imageurs* : Ce sont des capteurs qui mesurent de façon quantitative le rayonnement. La constitution d'une image est obtenue par l'acquisition séquentielle d'informations radiométriques provenant d'une fraction de la surface du paysage observé. La répétition de l'acquisition au cours

du mouvement du vecteur (avion ou satellite) permet la constitution d'une image qui est un ensemble de mesures radiométriques organisées en lignes et colonnes.

- *les capteurs actifs* : Les capteurs actifs se composent d'un émetteur, qui est la source du rayonnement, et d'un détecteur qui mesure le rayonnement de retour de la surface observée. Le capteur actif le plus utilisé en télédétection est le radar imageur à visée latérale.

Un capteur est caractérisé par :

- Sa résolution spatiale : indique de la taille du pixel de l'image de télédétection. C'est la faible séparation entre les objets qui peut être résolue par le capteur.

-Haute résolution spatiale: 0.5 - 4 m

-Moyenne résolution spatiale 4 - 30 m

-Faible résolution spatiale 30 - 1000 m

- Sa résolution radiométrique : détecte la sensibilité d'un détecteur aux variations de l'intensité de l'énergie électromagnétique émise, réfléchie ou diffusée.
- Sa résolution spectrale : indique le nombre de bandes spectrales dans lesquelles le capteur peut capturer radiations.
- Sa résolution temporelle : précise la fréquence de révision du satellite pour un emplacement spécifique.

b. Les images satellitaires

Une image est une représentation graphique, quelle que soit la longueur d'onde ou le dispositif de télédétection qui a été utilisé pour capter et enregistrer l'énergie électromagnétique. On appelle image de télédétection toute représentation d'une scène dans un plan.

Les images de télédétection sont caractérisées par :

- la taille, définie par le nombre de ligne et de colonne

- le nombre total de pixel : le plus petit élément d'une image formant une matrice. Il est normalement carré et représente une partie de l'image.
- sa résolution : correspond à la surface élémentaire d'échantillonnage observée instantanément par le capteur satellitaire.

Ces images peuvent se présenter sous trois formes physiques :

- Sous forme binaire (1bit)
- En niveau de gris (8 bit)
- En couleur (24 bit)

Les images satellitaires sont exposées à un prétraitement avant d'être analysées. Ce prétraitement est composé de la correction radiométrique et de la correction géométrique.

La correction radiométrique est la correction de l'image à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elle puisse représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur.

La correction géométrique c'est la correction des distorsions géométriques qui sont entre autres : l'effet de perspective de l'optique du capteur, le mouvement du système de balayage, le mouvement et la stabilité de la plate-forme l'altitude, la vitesse et le comportement de la plate-forme, le relief à la surface et enfin la courbure de la Terre et sa rotation. Le but est d'avoir une représentation géométrique le plus proche de la réalité.

c. L'orthophotographie

On appelle orthophotographie ou plus communément orthophoto une image obtenue par traitement d'un cliché aérien numérique ou argentique dont la géométrie a été redressée de sorte que chaque point soit superposable à une carte plane qui lui correspond. En d'autres termes, une orthophotographie semble être prise à la verticale de tous les points qu'elle figure, ces points étant situés sur un terrain parfaitement plat¹¹. Les processus de fabrication de l'orthophoto est dans les annexes (Annexe 6).

¹¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Tsunami> dernière mise à jour le 16 Mars 2014,

PARTIE II : ANALYSE DE LA CÔTE DE MANAKARA

Chapitre I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1 Localisation

Manakara se situe sur la côte Est malgache, plus précisément dans la partie Sud-Est. En coordonnée Laborde Madagascar ses coordonnées sont:

Xmin =559626 m, Ymin =435785m ;

Xmax =566029 m, Ymax = 446633m.

La Commune Urbaine de Manakara est établie sur une frange côtière d'une superficie de 31 756 km².

Elle est délimitée :

- Au Nord par la Commune rurale d'Anosiala
- Au Sud par la Commune rurale de Mangatsiotra
- À l'Est par l'Océan Indien
- Et à l'Ouest par la Commune rurale de Tataho.

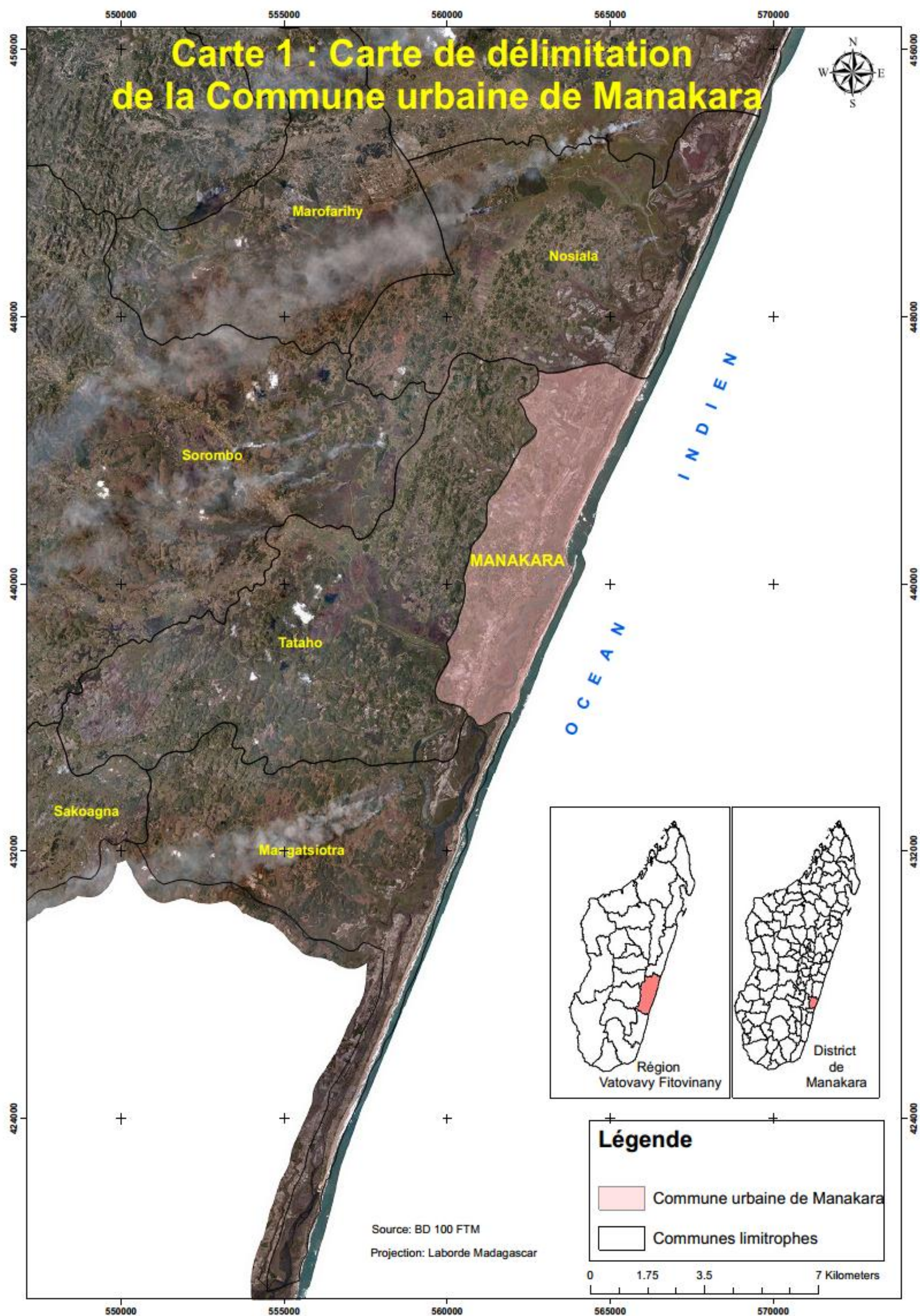
Manakara est la capitale de la région Vatovavy Fitovinany, c'est la principale ville côtière du Sud-Est de Madagascar. Elle appartient à l'ancienne province de Fianarantsoa.

La ville de Manakara est composée de deux noyaux urbains: Manakara tout court à l'Ouest et Manakara Be à l'Est. Ils sont séparés par un grand pont qui enjambe la rivière « Manakara ».

I.2 Milieux physique, océanique et biologique

a. Relief

La topographie de Manakara est généralement plate. Le point culminant de la ville se trouve au Nord-Ouest et au Sud-Ouest d'une altitude de 10 m. Entre la mer et le canal des Pangalanes longe une bande côtière rectiligne constituée de dunes variant de 1 à 5 m de largeur. Derrière cette bande de côte se trouve le « Canal des Pangalanes ». La majeure partie de la superficie de la ville est occupée par des rizières et des marécages. Par ailleurs, le Nord-Ouest de Manakara est constitué par des collines. La partie Est est constituée de cordons



littoraux longés par des dunes d'une part et d'autre part, longés par une vaste plaine alimentée par le canal des Pangalanes.

b. Géomorphologie du littoral

La géomorphologie de Manakara est de type delta intérieur composée de :

- cordons littoraux successifs (sable) qui peuvent être anciens ou récents et qui sont parallèles à la côte;
- sables blancs quartzeux lavés par la nappe, avec un horizon humifère noirâtre en surface; les sables anciens peuvent être ferrallitisés de couleur rouges¹² ;
- bas-fond marécageux argileux, alimentés ou drainés par la rivière Manakara, se sont développés derrière les cordons littoraux. Ces zones sont souvent d'anciennes zones forestières à raphia, niaoulis, pandanus et ravenalas, intensément converties en rizières avec 2 cultures annuelles¹³ ;
- rivière principale et défluent avec bourrelets de berge sablo-limono-micacées, à cultures vivrières ou fruitières¹⁴.

c. Cadre géologique

La géologie de la région de Manakara est assez simple. Elle est constituée de :

- Socle précambrien avec un système de graphite qui entraîne les formations des gneiss, migmatites, micaschistes et leptinites ;
- Roche volcanique (formation de basalte) et roche sédimentaire (alluvions et sables) ;

d. Hydrographie

Le principal cours d'eau de Manakara est le canal des Pangalanes. De plus, d'Ouest en Est, des rivières drainent la zone dont les plus importantes sont Manaïano, Analabe, Mangatsiotra et Matitana.

¹² Raunet, 1996

¹³ Raunet, 1997

¹⁴ Raunet, 1996

Des ruisseaux et quelques rivières intermittents alimentent le canal des Pangalanes, pendant la saison de pluie. Ces ruisseaux prennent leur source depuis les montagnes qui se trouvent à l'Ouest de Manakara à une altitude de 600 m. On tient à signaler l'influence du mouvement des marées et de l'intrusion marine dans les zones très proches de la mer.

e. Le milieu bioclimatique

Manakara possède un climat chaud et humide. La moyenne annuelle de la pluviométrie de Manakara est de 2462 mm, réparties dans 140 à 191 de jours. La saison fraîche connaît suffisamment d'humidité. La température moyenne annuelle est de 24°C. Les mois qui s'étalent de Mai en Septembre constitue la saison fraîche là où la température trouve son minima (15°C). Le reste constitue la saison chaude. Les mois de Décembre et Février sont les plus remarquables où la température touche son maxima (37°C).

Les mois de Décembre à Mars sont les plus exposés aux cyclones. Ce phénomène touche souvent la partie Est malgache. Manakara n'est pas très souvent frappée par les cyclones par rapport aux autres villes du Sud-Est telles que Mananjary et Nosy varika. En effet, ces localités sont situées dans le couloir cyclonique à haut risque s'étendant au Nord jusqu'à Maroantsetra. Cependant, Manakara subit souvent de fortes pluies et houles qui accompagnent les queues des cyclones faisant déborder les eaux des rivières.

f. Contexte océanique :

Manakara est ouvert à l'océan Indien. Elle se trouve sous l'influence du courant Est-malgache. C'est un courant qui longe le Sud-Est du Nord au Sud. Avec ces $41,106 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ d'intensité, ce courant Est-malgache est étroit et intense¹⁵. Au large de Manakara, ceci résulte en un courant constant portant vers le Sud Sud-Ouest à peu près toute l'année, avec des vitesses de 1 à 2 nœuds. En bordure du littoral, on observe des courants obliques liés aux houles et aux vents (orientés vers le Nord ou le Sud), généralement faibles mais s'intensifient en cas d'intempéries. Il semble que les courants dominants soient orientés vers le nord. Les eaux côtières du littoral de Manakara sont peu profondes. A une distance de 100 mètres de la côte, on rencontre des profondeurs de seulement 3,5 mètres. Le régime

¹⁵ GUYOMARD, D. et al, 2015

de marée est de type semi-diurne à faible marnage, généralement compris entre 0.3 et 0.5 m, avec un maximum de 0.8 m comme décrit les tables des marées de Toamasina.

g. Biodiversité

La commune urbaine de Manakara est dominée par des zones marécageuses souvent transformées en rizières. Des formations secondaires y dominent également. Un peu plus à l'Ouest, il existe des forêts denses qui sont limitées au corridor forestier de la falaise de l'Est. La forêt primaire a pratiquement disparue. On signale la dominance des défrichements des zones boisées à la merci des cultures de rente qui caractérisent de loin la zone.

I.3 Contextes humain et socio-économique

a. Population

La ville de Manakara compte 18 Fokontany, elle compte 36 867 habitants, la densité moyenne est de 50 hab/ha.

Limite_Fokontany	Superficie (Ha)	Population (Hab)	Densité (Hab/Ha)
Ambalakazaha atsimo	16,38	2730	167
Ambalakazaha avaratra	21,24	3285	155
Andranovato	23	1533	67
Maroalakely	28,4	1860	65
Ambodiampaly	53,5	2594	48
Andranofasika	46,87	2060	44
Tanambao ombimena	20,67	869	42
Ambalafary Gara	82,72	3075	37
Mangarivotra Ouest	94,51	2827	30
Midongikely	63,66	1860	29
Andriana	54,24	1560	29
Mangarivotra Est	74,96	2000	27
Andranodaro	43,73	971	22
Manakara Be	85,8	1774	21
Vangaindrankely	135,7	1605	12
Andranomainty	468	2460	5

Ampilao	193,2	880	5
Tanakidy	1265	2924	2

Tableau 6: Population globale de la commune urbaine de Manakara

Source: PCD 2008 de La Commune Urbaine de Manakara

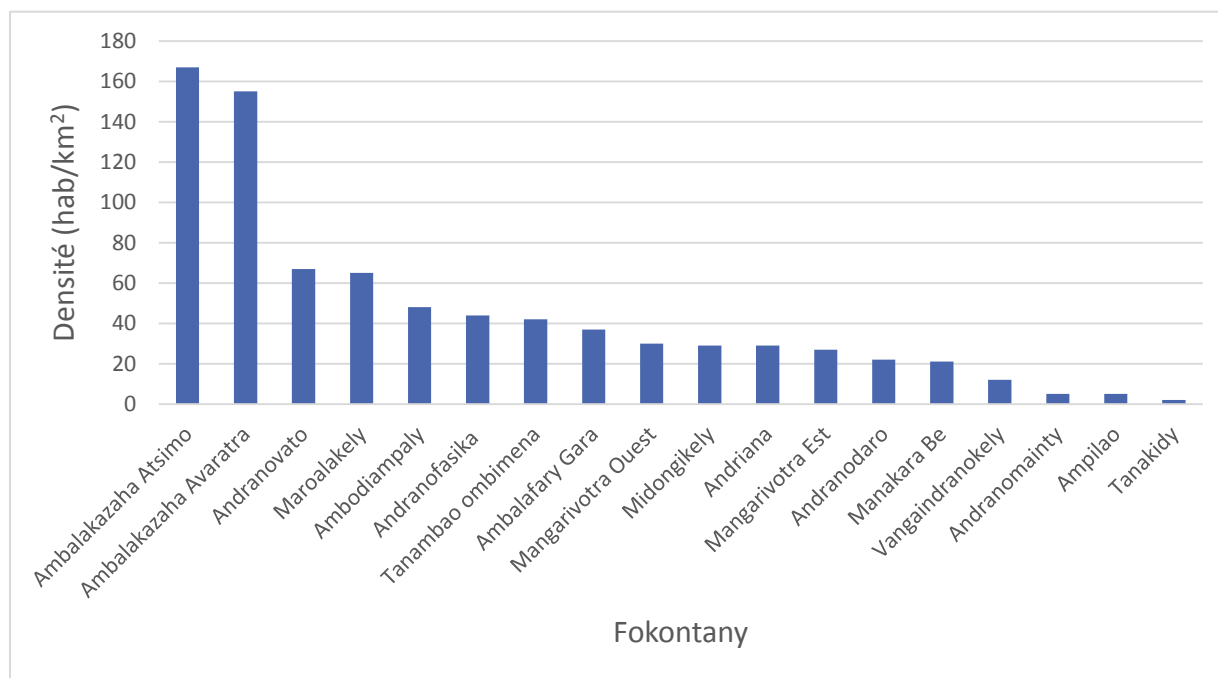


Figure 14: Densité de la population de Manakara par Km²

b. Services et Infrastructures

En tant que chef-lieu de la région Vatovavy Fitovinany, Manakara dispose de la quasi-totalité des directions et services que devraient posséder tous les chefs-lieux de région malgaches. En effet, il y a 12 directions régionales et 26 autres services déconcentrés dans la commune urbaine de Manakara. En ce qui concerne les infrastructures, les suivantes sont les plus importantes à signaler :

- L'eau et l'électricité

Seuls 10% de la population de la ville bénéficient d'un abonnement individuel d'eau et d'électricité de la JIRAMA, le principal société gestionnaire d'eau et d'électricité de la Manakara et de tout Madagascar. La JIRAMA y produit une puissance de 1 420 Kwh d'énergie électrique avec 2 654 abonnés en 2009. On compte 47 bornes fontaines

publiques dans toute la ville dont 44 sont fonctionnelles et sont réparties dans 8 Fokontany. Par ailleurs, les 10 autres Fokontany ne sont pourvus que de puits construits soient par les ménages soient par des ONG. La période sèche est marquée par la forte utilisation des puits, faute de la salinité des eaux des bornes fontaines.

Le délestage de l'électricité, un phénomène devenu ordinaire à Madagascar, sévit aussi la ville.

- Les infrastructures de transport

Les réseaux routiers :

De la capitale malgache, Manakara se rejoint par voie routière en empruntant 3 routes nationales : la RN7 puis la RN11 et enfin la RN12. La ville de Manakara est traversée par la RN12 (Irondro-Manakara-Farafangana-Vangaindrano) qui est long de 178 km et goudronnée. Elle est aussi dotée de quelques rues. La portion Irondro-Manakara-Farafangana a été réhabilitée en 2008. Les moyens de transport urbains à Manakara sont les poussepousses, les taxi-ville, et actuellement, les tuc tucs.

Le transport ferroviaire :

La ville de Manakara est aussi accessible par une voie ferrée appelée Fianarantsoa Côte Est ou FCE. Cette voie ferroviaire est en service depuis 1936 jusqu'aujourd'hui. Elle est longue de 170 km. Elle part d'une altitude de 1 100 m (Fianarantsoa) pour arriver au niveau de la mer (Port de Manakara).

Le transport maritime :

Le port de Manakara assure les exportations des produits des cultures de rentes locales et l'importation et des produits de première nécessité ou PPN. Selon le CREAM en 2013, le port a cessé de fonctionner récemment faute d'insuffisance de trafic.

Transport fluvial :

Depuis Toamasina dans l'Est malgache, en passant par Manajary, la ville de Manakara est accessible par le Canal des Pangalanes. Ce canal a été fonctionnel depuis 1901. Construit par les français, il mesurait à l'époque 600km dont 400km sont navigables aujourd'hui par de petites et moyennes embarcations (jusqu'à environ 5 tonnes).

Le transport aérien :

Manakara dispose d'un aéroport et donc d'une piste d'atterrissage. A titre d'insolite, cette piste est traversée par une voie ferrée. Cet aéroport est disposé à acquérir des avions légers. Il est géré par la compagnie malgache AIR MADAGASCAR. Cependant, le trafic est rare aujourd'hui. Le trafic aérien de la zone se fait par le moyen des aéroports de Mananjary et de Farafangana.



Figure 15: Gare de Manakara



Figure 17: Wagons des trains de Manakara



Figure 16: Aéroport de Manakara

Source : MARA Edena, 2009

- Les infrastructures de communication et d'information

Comme toutes les grandes villes malgaches, Manakara possède un poste de télécommunication qui est située à Manakara Be. Elle possède aussi le service et les infrastructures des 3 grands opérateurs téléphoniques à Madagascar, à savoir : Telma, Airtel et Orange. En outre, Manakara possède aussi des stations radio et télévisions privées. Sans oublier, la station de radio et télévision nationale.

c. Activités économiques

- Agriculture

Les activités agricoles dans la ville de Manakara sont constituées de cultures vivrières et de cultures de rente.

Les cultures vivrières

Elles concernent principalement le riz, mais aussi les cultures de manioc, de patate douce et de taro. Le riz est cultivé deux fois par an, il peut être cultivé dans les zones inondées ou sur les zones asséchées (ou sur brulis). En outre, la ville est aussi réputée par la culture fruitière dont les plus importants sont : l'orange, l'ananas, le fruit du jacquier, la mangue et la banane. Cependant la production de litchi reste inégalable car elle est convoitée par les étrangers et sont donc objets d'exportation. Les mois de Novembre et de Décembre constituent les mois de récolte.

Les cultures de rente

Les cultures de rente à Manakara sont le café, le poivre et le girofle. Elles sont consommées localement (Madagascar) mais surtout exportées en Europe. Le café est principalement celui de type *Robusta*, son prix varie de 2000 Ariary à 2400 Ariary en 2009. Les prix des autres produits sont de 3000 Ariary à 3500 Ariary pour le girofle et 6000 Ariary pour la vanille.

Types de cultures	Produits	Superficie cultivée (ha)	Tonnage annuel de la production annuelle	Rendement par hectare
Cultures vivrières	Patate douce	57	550	9,649
	Taro	48	240	5
	Manioc	63	632	10,031

Cultures de rente	Litchis	13	104	8
	Café	110	38	0,345
	Clou de girofle	10	6	0,6
	Girofle	20	5	0,25
	Poivre noire			

Tableau 7: La production en cultures vivrières et la production en cultures de rente

Source: Étude d'Impact Environnementale (PST mai 2005)

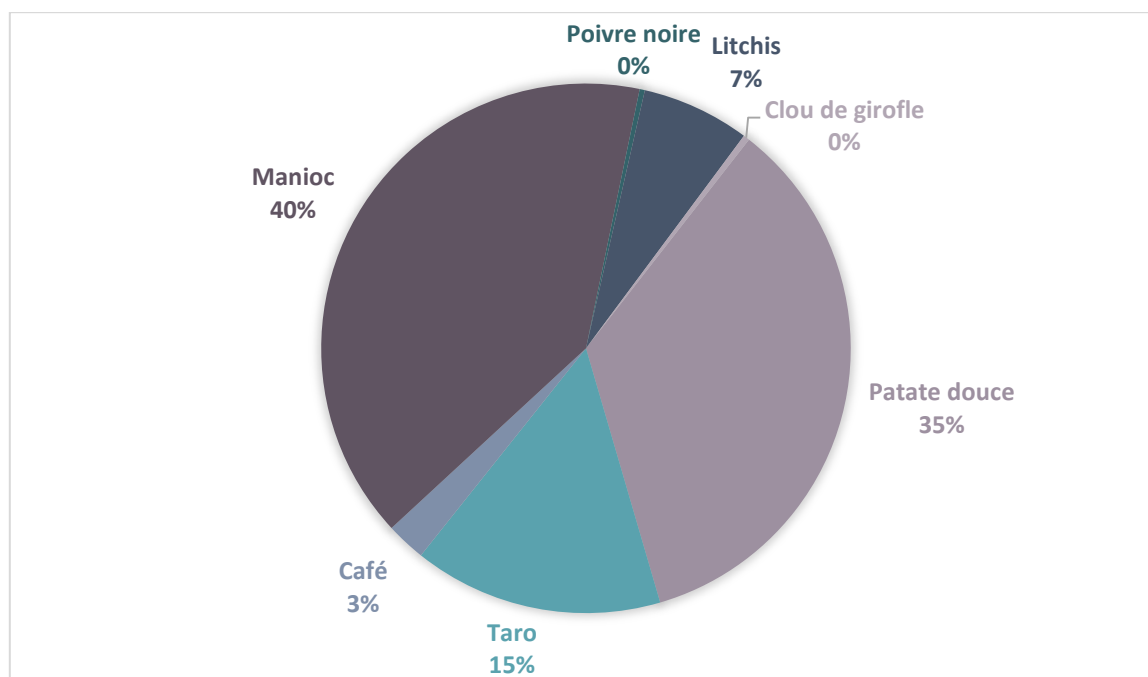


Figure 18: Agriculture de Manakara en 2005

- Elevage

Les manakarois s'intéressent essentiellement par de bœufs et des volailles en termes d'élevage. L'élevage bovin n'est pas dans un but lucratif mais pour les travaux agricoles et surtout son rôle culturel et spirituel. Ils prennent aussi un statut d'épargne pour les éleveurs. Son élevage est de type extensif. L'élevage porcin est moindre dans la ville faute de la tradition.

- Pêche

La pêche se pratique pendant toute l'année. Elle concerne surtout les poissons et les crustacés (crevettes, langoustes et crabes). La production de poissons est estimée à 80 t/an en 2009.

Tous ses produits halieutiques sont soit consommés localement soit exportés à l'île de La Réunion, en Europe ou au Japon. Ces activités sont sous le monopole de la SPM (Société de Produits de Mer).

- Artisanat et industrie

L'artisanat de la ville est focalisé sur la construction de chapeaux, de paniers, de nattes et aussi des sculptures par les descendants des Zafimaniry d'Ambositra installés à Manakara.

Malgré le fort potentiel industriel tel l'abondance de la main d'œuvre et de la matière première, la ville de Manakara est faiblement industrialisée. En effet, les activités industrielles se limitent au simple traitement des produits agricoles et halieutiques.

- Tourisme

Les activités touristiques sont assez faibles. Selon CREAM en 2009, Manakara compte 4 hôtels, dont 2 de la catégorie « Etoile » (c'est-à-dire avec un certain niveau de confort) et 2 de la catégorie « Ravinala » (c'est-à-dire à confort minimum).

Les offres touristiques de la ville sont :

- Le voyage en train, appuyé par l'évènement annuel « La Micheline de la ligne FCE »
- La promenade sur les Pangalanes
- Le tourisme balnéaire
- La balade en pousse-pousse
- La visite des lieux historiques

Chapitre II : PRESENTATIONS DES DONNEES ET DE LA METHODOLOGIE

II.1 Les données

Le trait de côte à extraire est longue de 3,148 km (en 2016). Cette opération demande la disponibilité des données suivantes :

- Une orthophoto

Année : 1992

Résolution : 0,50 m x 0,50 m

Nombre de bande : 1

Echelle : 1/10000

- Une ortho image

Année : 2007

Résolution : 0,40 m x 0,40 m

Nombre de bande : 3

- Une image Google earth

Année: 2016

Résolution : 0,60 m x 0,60 m

Nombre de bande : 3

II.2 La méthodologie

Si les techniques d'extraction de trait de côte sont nombreuses, comme on a vu dans le chapitre précédent, ici, nous choisissons d'adopter celles qui consistent à extraire le trait de côte à partir des images aériennes. La raison pour laquelle on a adopté cette technique réside sur les données et les moyens qui nous sont disponibles. Ici, pour extraire les traits de côtes, on numérise les images manuellement à partir d'ARCGIS, un logiciel SIG. Cette numérisation va être suivie de la mesure du déplacement des traits de côte sous DSAS. Ce plugin est décrit dans le chapitre précédent. C'est donc une méthode semi-automatique. Ensuite, on a créé des TIN pour obtenir les volumes de terres érodées. Mais avant de traiter ces images, des recherches bibliographiques et webographiques ont été entreprises afin de

pouvoir bien canaliser nos travaux. Le processus de méthodologique des travaux est illustré par les schémas ci-dessous. (Figure 17)

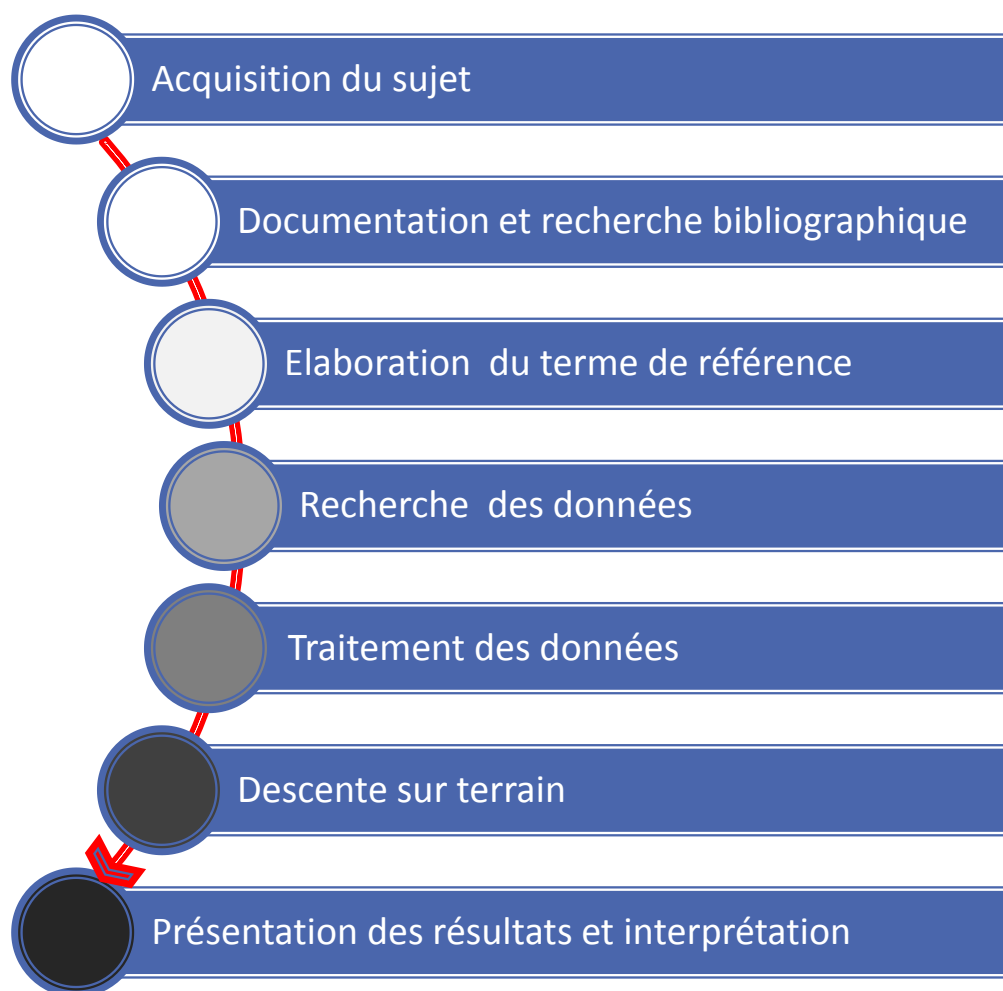
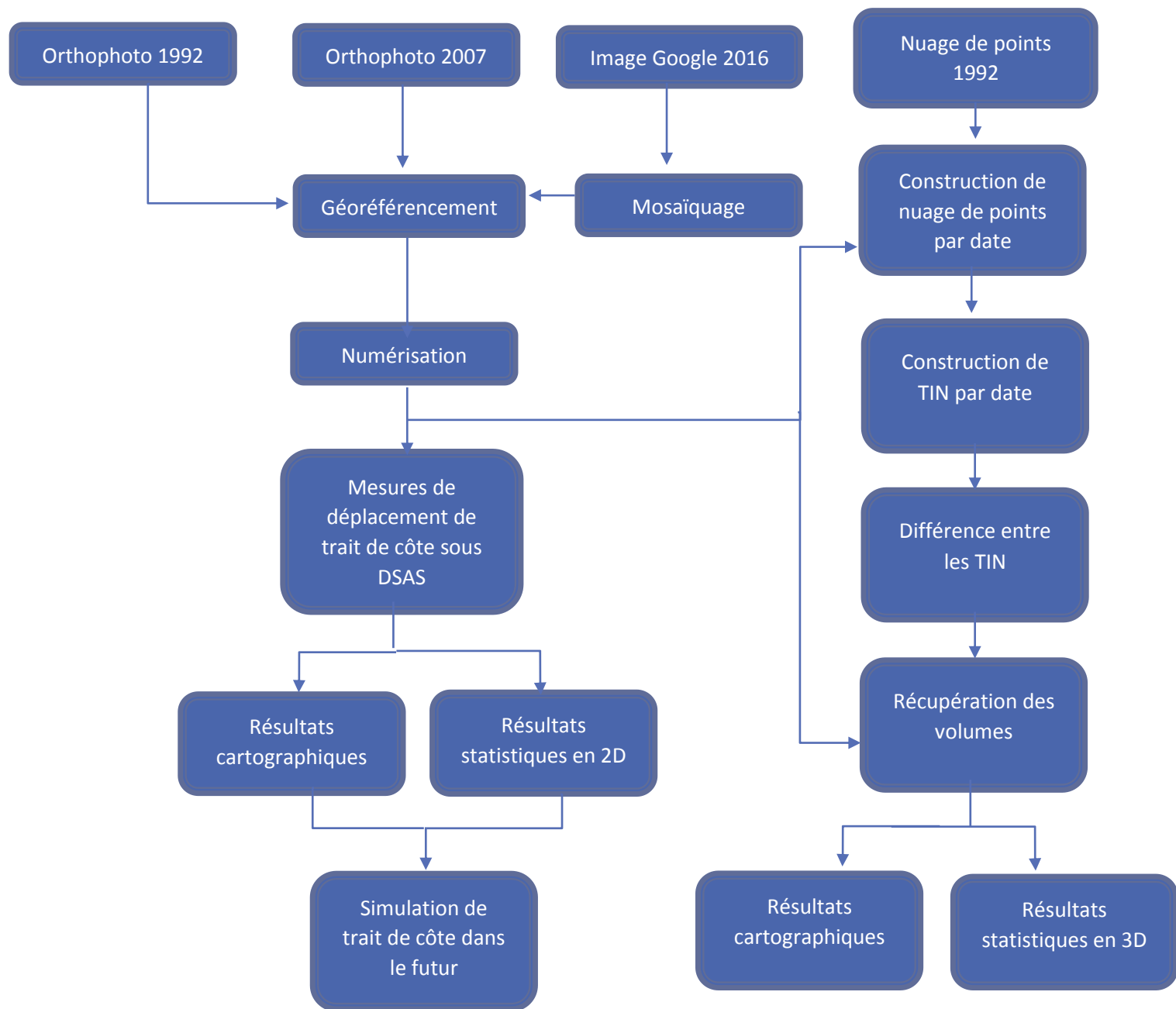


Figure 19: Schéma méthodologique du travail effectué



***Figure 20:** Etapes de traitement des données*

a. Documentation

L'association française de normalisation (AFNOR) définit la documentation comme l'ensemble des techniques permettant le traitement permanent et systématique de documents ou de données, incluant la collecte, le signalement, l'analyse, le stockage, la recherche, la diffusion de ceux-ci, pour l'information des usagers¹⁶.

Ainsi, nous avons effectué plusieurs recherches sur différents thèmes, dans divers locaux et par divers moyens :

- Des recherches bibliographiques au sein de la bibliothèque de l'IGAT et de l'AUF
- Des recherches webographiques et acquisition des images Google sur internet
- Acquisition des images et cartes au sein du FTM

b. Traitement sous SIG :

Tous les traitements de nos images se font sous ArcGis. A priori, les images empruntent la voie de la numérisation pour l'extraction des traits de côtes de chaque année. Les étapes de traitements sont illustrées par la figure ci-dessus (Figure 18).

Quelques étapes de traitements nous paraissent être utiles d'être bien décrit pour comprendre le processus traitement :

- Géoréférencement

Un géoréférencement d'une image est une méthode pour positionner une carte dans un système de référence. Le géoréférencement est indispensable pour que les images soient superposables, il est utile pour la justesse des coordonnées. Presque toutes images sont géoréférencées dans nos traitements. On a pris 8 points dans chaque image à géoréférencer et on cherche à avoir une erreur résiduelle inférieure à 0,5 m.

Projection Laborde Madagascar¹⁷ :

Nous avons utilisé le système de projection Laborde Madagascar. C'est le système de projection utilisé à Madagascar. Elle a été adoptée depuis 1925 pour l'établissement des cartes topographiques et du réseau géodésique local. Ce système de projection utilise une triple projection conforme de manière à obtenir une projection conforme cylindrique oblique à la fin. Les étapes consistent à projeter l'ellipsoïde sur une sphère, appelée « aposphère, puis à

¹⁶ RAMIARAMANANA H., 2014

¹⁷ Lova Tahina RANDRIANARISON (IGN) et Nofiaina RAZAFINDRABE (IGN), 2005

projeter la sphère sur un cylindre selon la projection Mercator Gauss-Schreiber Transverse, pour terminer avec une distorsion du plan obtenu par rotation de manière à ce que l'isomètre central soit le grand axe de Madagascar.

Les paramètres du système de référence à Madagascar sont :

- Nom du datum : Tananarive 1925
- Ellipsoïde : International 1924
- Demi-grand axe : 6 378 388,000
- Première excentricité : 0,08199188998
- Aplatissement 1/f : 297,00
- Méridien d'origine : Paris
- Unité d'angle : grade

·Pour la projection :

- Type de projection : Laborde ou la Projection Mercator Oblique.
- Longitude de l'origine de projection : 49 grades Est.
- Latitude de l'origine de projection : 21 grades Sud.
- Azimut de la ligne isomètre : 21 grades.
- Facteur d'échelle au centre de projection : 0.9995

- Mosaïquage

C'est une opération qui consiste à assembler des images contigües. Elle doit tenir compte de la géométrie et de la radiométrie des images à juxtaposer pour produire une image homogène et superposée après l'assemblage¹⁸. Dans notre cas, seule l'image Google de 2016 passe par l'opération de mosaïque.

- Numérisation

La numérisation est une technique qui permet de dessiner manuellement le contour d'un objet identifiable sur une image afin d'obtenir en donnée vecteur son contour, ou l'objet même. Ici, nous avons numérisée la limite côté mer végétation. La précision des dessins dépend de l'agilité de l'opérateur, mais elle tient compte aussi de l'échelle de numérisation. Cette échelle est de 1/100 ici.

¹⁸ RAMIARAMANANA H., 2014

- Création et traitement de TIN

Un TIN, ou réseaux triangulaires irréguliers, est une surface triangulaire représentée par des facettes définies en 3D. C'est un type de format vecteur d'un MNT. Il est obtenu par la méthode de Delaunay. Ce dernier consiste à créer des triangles les plus équilatéraux possibles. Chaque triangle est constitué de telle sorte que le cercle qui passe par ses trois sommets ne contient aucun autre point du TIN. Pour notre cas, les détails sur la création et le traitement de TIN vont être élaborés dans les sous parties « Recherche volumétrique ».

c. Descente sur terrain

On a effectué une simple descente sur terrain : histoire de voir la réalité de notre étude. On a utilisé un GPS de poche, calé à un point géodésique d'ordre 1 de la zone. Les données ne sont pas utilisées dans nos travaux à cause de sa précision. Cette descente nous a permis quand même à améliorer nos travaux en termes de compréhension du phénomène et de la pertinence des recommandations.

II.3 Le choix de ligne de référence

Pour choisir la ligne de référence dans nos travaux, il faut tenir compte d'une part des composants du littoral et leur visibilité dans chaque image, et d'autre part, il faut considérer la date et l'heure de prise de vue des images. Ici, on a une côte sableuse qui est visible sur les images et dont les dates et les heures exactes de prise de vue font défaut. Ainsi, ce qui nous convient ici est un indicateur qui est bien visible dans les images et qui dépend le moins possible des dates et heures de prise de vue. Par conséquent, on a pris la limite côté mer de la végétation. C'est donc un indicateur botanique. A priori, elle se confond ici à la limite supérieure de sable sec (indicateur hydrodynamique).



1992



2007



2016

Limites côtés mer de végétation

Figure 21: L'indicateur de ligne de côte dans les 3 dates

Chapitre III : TRAITEMENTS DES DONNEES

III.1 Sur l'orthophoto de 1992

Cette image est déjà géoréférencée, elle constitue l'image de référence. On procède, ainsi, à la numérisation de la ligne de côte en soutirant la limite inférieure des végétations. On rappelle que l'échelle de numérisation est la même pour toutes les images : 1/100



Figure 22: Résultat Numérisation de l'orthophoto 1992

Remarque

La précision de nos travaux dépend en grande partie de la précision des orthophotographies. Ces dernières sont fonction de: l'échelle de prise de vue aérienne, la qualité de prise de vue aérienne, l'échelle de l'orthophotographie, la résolution d'échantillonnage du MNT, la précision de scannage, la précision des points de calage, le logiciel de traitement, et de la vision de l'opérateur.

Le calcul de la précision planimétrique (E_p) à partir de l'échelle de cliché E_c est donné par la formule :

$$|E_p| = \frac{0.015}{E_c}$$

Formule 2: Précision planimétrique

avec E_c : Inverse de l'échelle du cliché

Celle de la précision altimétrique (E_z) se calcule à partir de la formule:

$$E_z = \frac{0.015 \times (b/h)}{E_c}$$

Formule 3: Précision altimétrique

avec

- b : base de la caméra et
- h : hauteur de prise de vue

III.2 Sur l'orthophoto de 2007

Cette image connaît un léger écart par rapport à l'orthophoto de 1992 du FTM. Elle est créée par des points d'appui obtenu par un levé sur terrain par une station total. On lui confère d'abord un calage à partir de l'image de référence (orthophoto 1992).

Ensuite, pour l'image de 2007, on procède à la numérisation de la ligne de côte.

III.3 Sur l'image Google de 2016

Les images Google sont des photos du satellite Landsat, ils sont encore des images brutes : et n'ont pas encore de projection. De plus, il nous faut deux images pour couvrir la zone.

Donc, on procède d'abord au calage des images puis on a fait une mosaïque à partir de l'outil « mosaic » de l'ArcTools Box, pour obtenir une image couvrant la totalité de la zone.

III.4 La mesure de déplacement des traits de côtes sous DSAS

DSAS est un logiciel gratuit qui fonctionne avec le logiciel ARGIS. La version de DSAS 4.3 est celle qu'on va utiliser ici. C'est la version qui va avec le logiciel ARCGIS 10.1. Son installation requiert la disponibilité de :

- Microsoft .NET Framework 3.5,
- ArcGIS Desktop 10,
- NET Support Feature pour ArcGIS
- MATLAB Component Runtime

Une fois installé, le traitement de données sur DSAS demande la création d'un système de bases de données géographiques personnelles qui sert comme lieu de stockage des résultats statistiques et aussi des programmes générés par les traitements.

Le traitement sous DSAS consiste d'abord à récolter toutes les lignes de côtes numérisées puis les rassembler dans une seule couche. Il faut vérifier que les couches de lignes de côtes ont la même projection. Cette dernière devrait avoir le mètre comme unité de mesure. Les caractéristiques de la couche résultante est à consulter dans les annexes (Voir Annexe 4). Cette couche est stockée dans le système de base de données géographique.

Ce traitement requiert aussi la définition d'une ligne de base. C'est une ligne qui servira de point de départ de toutes mesures qu'on va effectuer. Cette ligne est à dessiner manuellement selon l'allure générale de la côte à mesurer. Son emplacement devrait être entièrement soit dans la partie marine des traits de côtes soit dans la partie terrestre. Elle est stockée dans le système de base de données géographiques et projetée dans un système de coordonnées ayant le mètre comme unité. Pour voir sa table attributaire, il faut consulter les annexes (Voir Annexe 3).

Ensuite, DSAS fait la mesure des déplacements de traits côtes par le moyen des transects. Ce sont des segments de même longueur, espacés d'égale distance et qui sont perpendiculaires à la ligne de base. Leur espacement et leur longueur sont à introduire dans le paramétrage du traitement. La position et le numéro de chaque transect se fait automatiquement sur le logiciel suivant la ligne de base. Chaque transect va intersecté les lignes de côtes. Ainsi les mesures se font par le moyen de chaque intersection.

Enfin, ces éléments de base mis en place avec quelques paramétrages, on peut lancer les calculs de déplacements de traits de côtes. Les résultats s'affichent sous formes tabulaires et statistiques.

Pour notre cas, tout d'abord, on a créé une couche nommé « Shorelines ». Cette couche va comporter les 3 différents traits de côtes des 3 dates. Selon le besoin de DSAS des nouveaux attributs ont été greffés sur ses 3 lignes afin de répondre au besoin des calculs. (Voir Annexe 4).

Puis, on a créé une autre couche nommé « Baseline ». Cette couche constitue la ligne de base des mesures qu'on va effectuer.

Ensuite, quelques paramètres vont être introduits pour pouvoir obtenir les « transects » (ou section) qui vont mesurer les déplacements des traits de côtes sous les 3 dates. On a pris l'espacement de 5 m entre les transects. Chacun d'eux prend une longueur de 100m. On signale qu'on a introduit l'erreur quadratique concernant la numérisisation dans ce paramétrage. Finalement, on a fait sortir les données statistiques sous formes de base de données. Elles ont été enregistrées automatiquement dans un fichier Access.

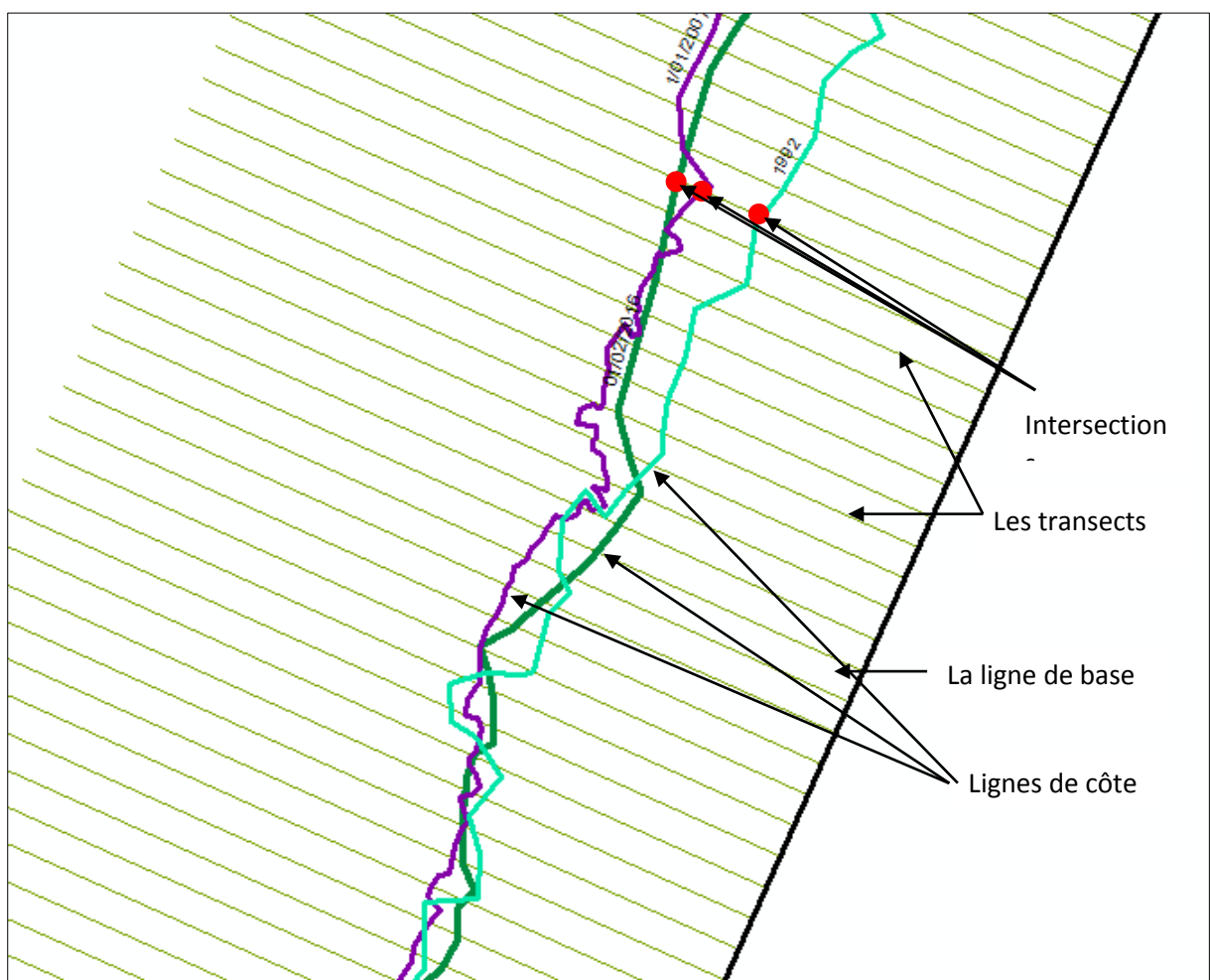


Figure 23: Le traitement des traits de côtes sous DSAS

III.5 Recherche volumétrique

Pour connaître le volume des terres érodées ou engraisées, il faut créer un TIN pour chaque date.

On fait la différence entre ces TIN. Ensuite, on a récupéré l'intersection entre la différence entre les TIN et les traits de côtes des dates correspondants. Et finalement, on a obtenu les volumes de terres érodées ou engraisées pour chaque date. Tous ces traitements sont faits sous ArcGis. Pour être plus précis, voyons les étapes suivantes:

- Etape 1 : Création de TIN

On a créé les TIN à partir d'un nuage de points. Elle vient du FTM. Cette donnée est issue d'un MNT émanant de l'orthophotographie de 1992.

Notre but ici est d'établir un MNT propre à chaque date. Pour ce faire, on a couplé le nuage de points successivement avec chaque trait de côte. Puis, on a supprimé tous les points au-delà du trait en question. Ce sont les points dans le côté mer du trait de côte. On obtient alors un nuage de point pour chaque date. Chacun d'eux va servir à la construction de TIN pour chacune des dates.

La création de TIN se fait par l'outil « create TIN » d' « ArcToolBox » d'ArGis.

- Etape 2 : La différence entre les TIN

La différence entre les TIN va nous donner des résultats volumétriques sur les terres érodées et engraisées entre les dates. Cependant, ce ne sont pas encore les résultats attendus. En effet, ce sont les volumes entre les traits de côtes qui nous intéressent. Le traitement sur la différence entre les TIN se fait par l'outil « Surface difference », encore dans « ArcToolBox ». Le résultat montre des données surfaciques et volumiques. Ce résultat affiche une donnée tabulaire des volumes érodées et engraisées de chaque couple de date.

- Etape 3 : Récupération des volumes

Pour obtenir les volumes entre les traits de côtes, entre deux dates, on a créé des *shapefile* de type polygone en numérisant les couples de traits. Puis, on va couper chaque *shapefile* « différence de TIN » par le *shapefile* « polygone » qui lui est correspondant. Cela se fait par l'outil « Clip » de ArcGis. Ainsi, on obtient les volumes de terres érodées et engraisées entre les dates.

Finalement, on groupe les volumes par « Summary Statistics » dans « Analysts tools ».

Remarque

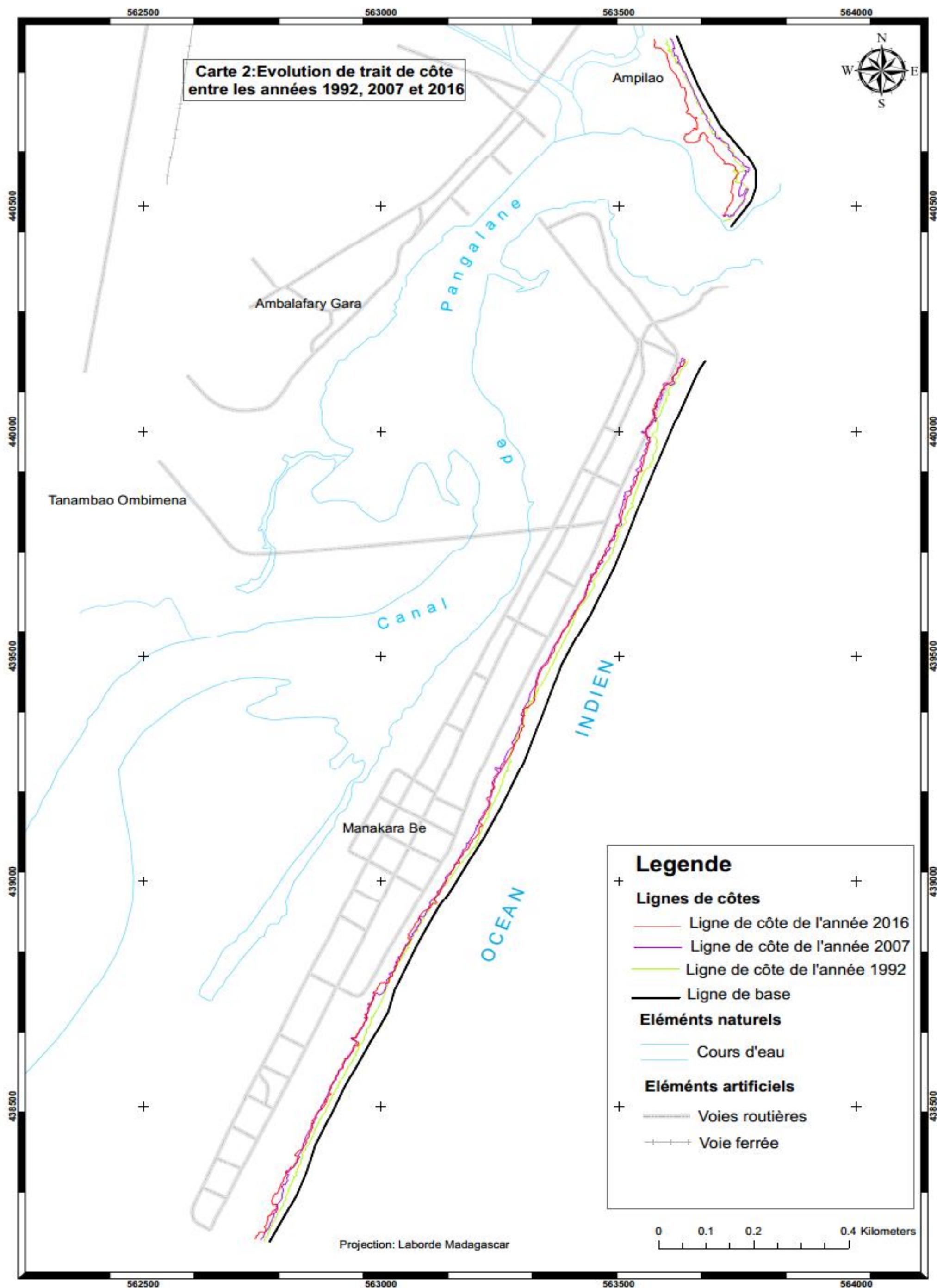
Rappelons que dans nos travaux, on a pris comme ligne de côte, la limite côté mer de végétation. Dans la réalité, les terres érodées ou engraisées ne se font pas directement sur ces végétations. Elles s'effectuent plutôt sur les indicateurs de types géomorphologiques. Mais, puisque généralement, le déplacement des végétations côtières est le résultat des mouvements des unités géomorphologiques, notre résultat est donc la transposition des érosions et des accrétions qui se passent sur ces unités.

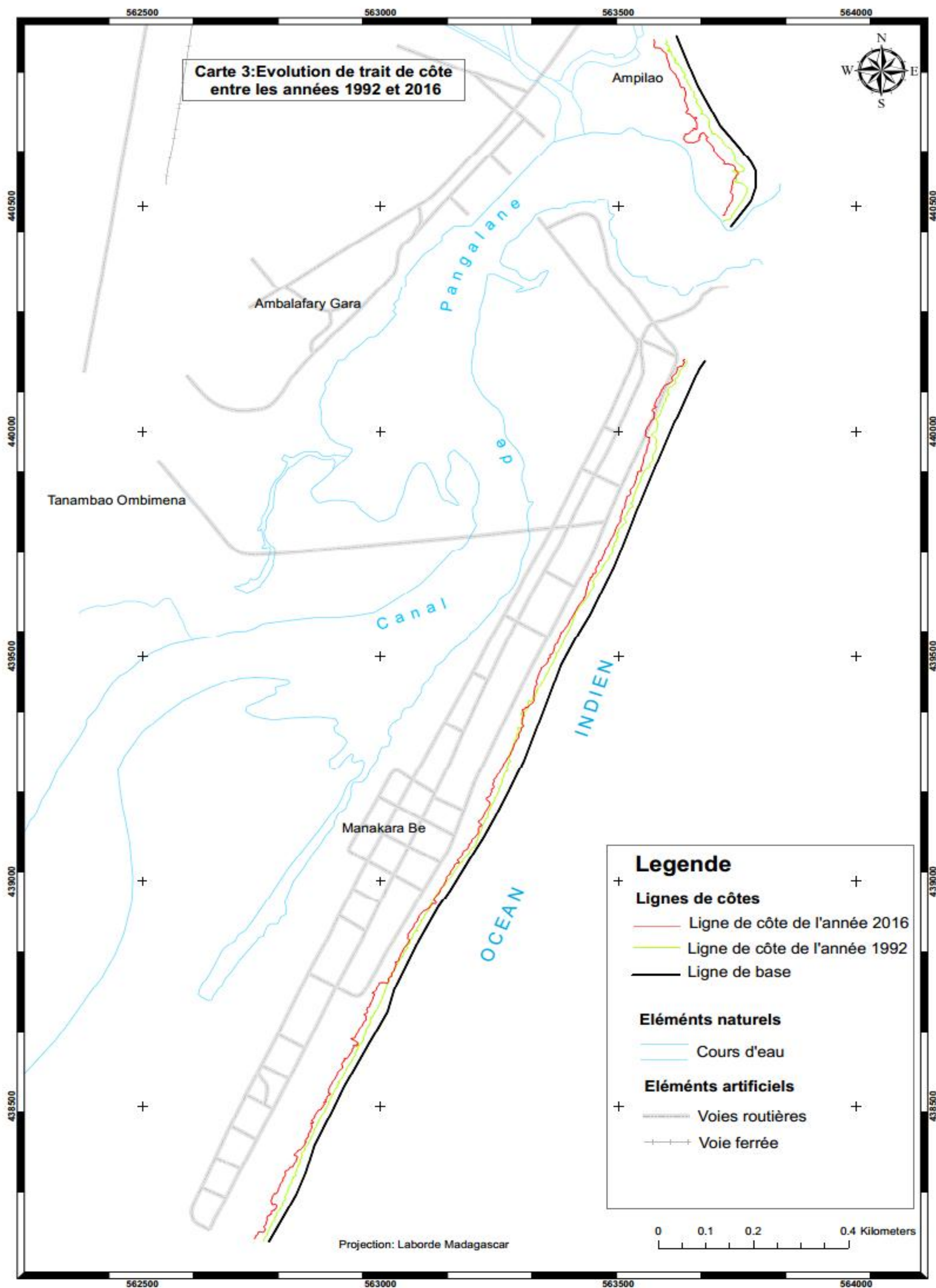
Chapitre IV : PRESENTATION DES DIFFERENTS RESULTATS

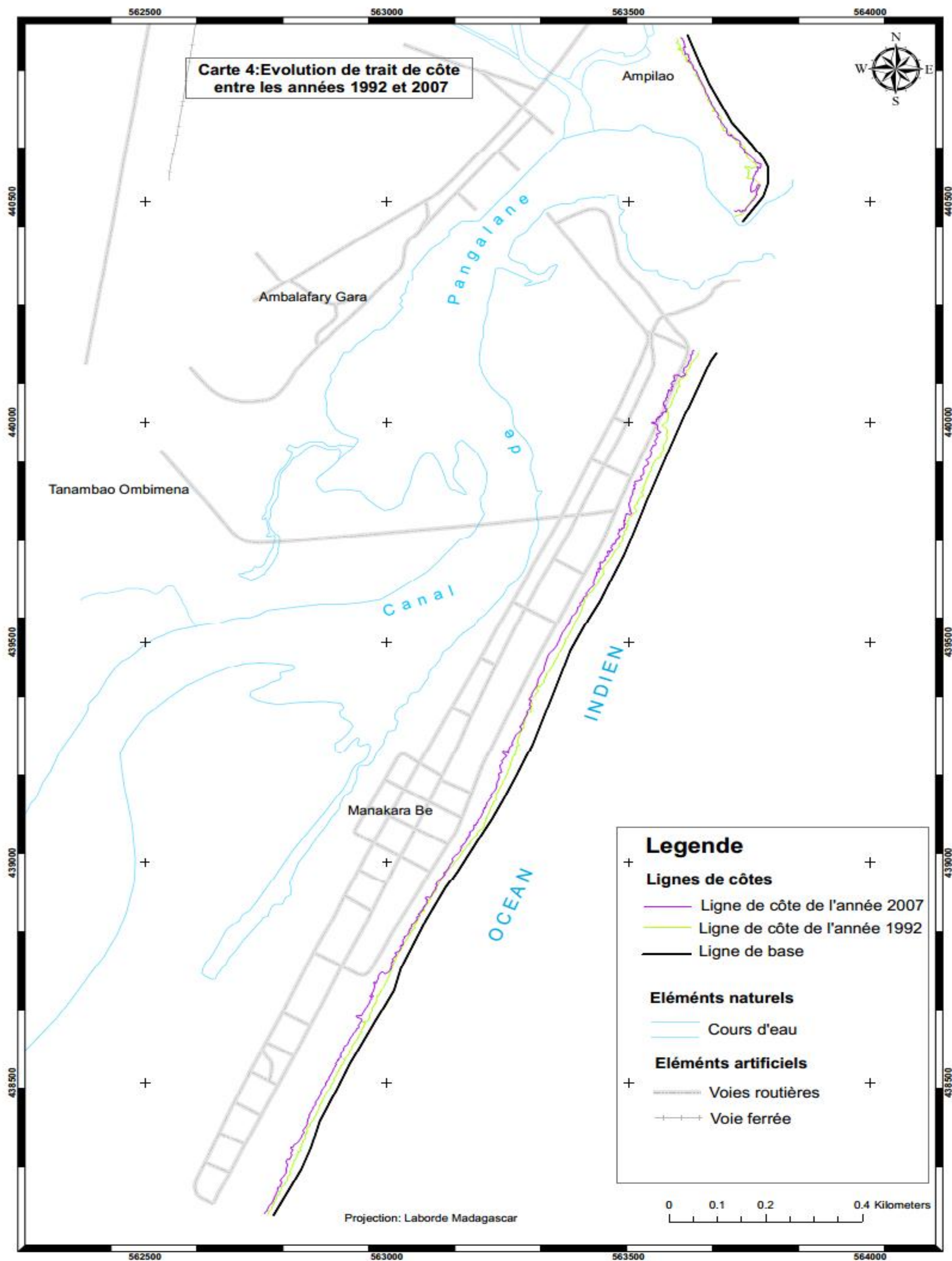
IV.1 Résultats en cartes

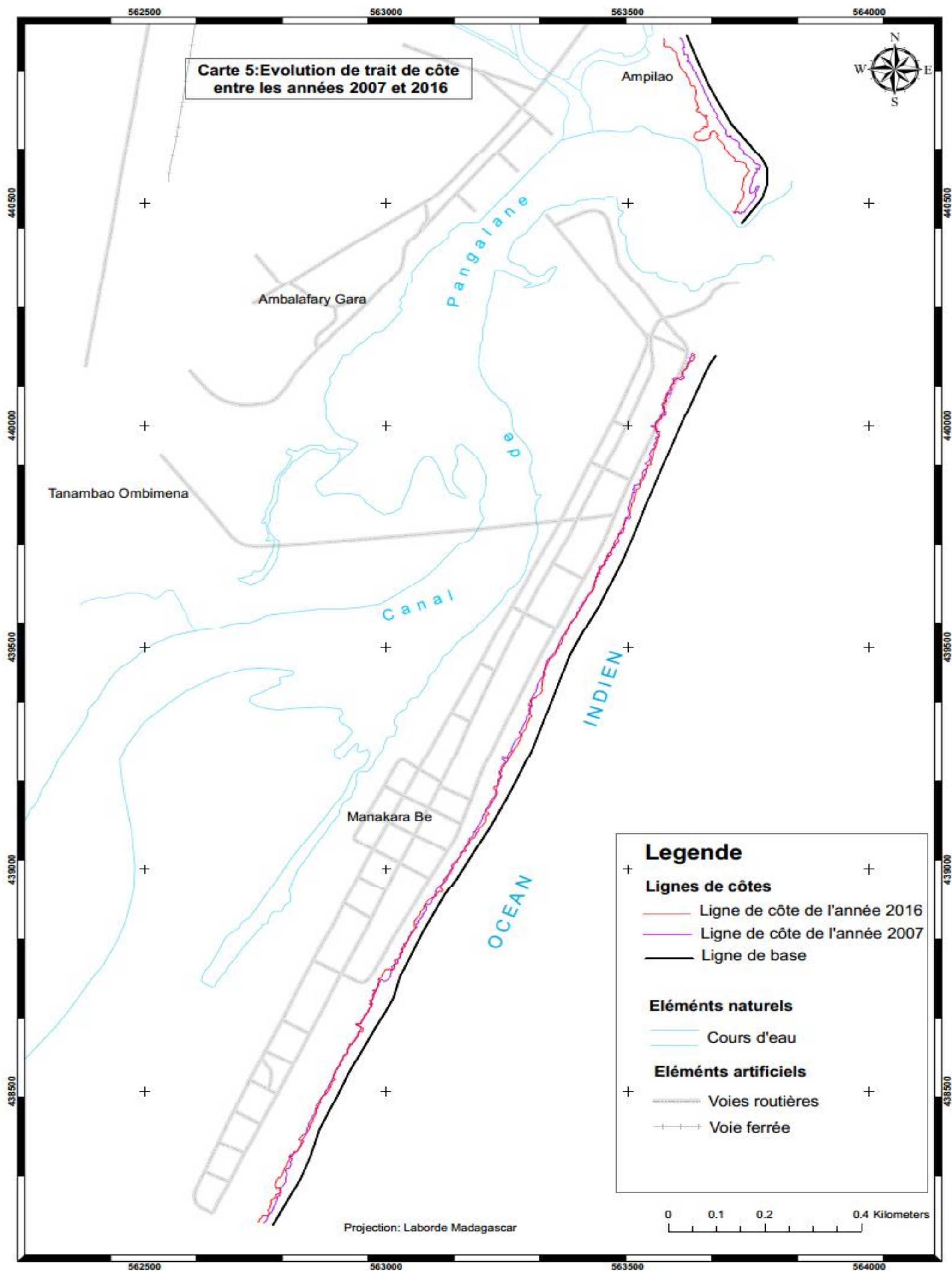
Les résultats sont présentés dans 4 cartes portant une échelle de 1/7000. Elle est imprimée dans un papier de format A3 :

- Une carte représente l'évolution entre les 3 dates (Carte 2)
- 3 autres entre les 3 dates aussi mais couplées deux à deux









IV.2 RESULTATS EN STATISTIQUES

Le plugin DSAS permet de donner plusieurs types de résultats statistiques. Cependant, nous n'allons soustraire de cela que :

- La SCE (Shoreline Change Envelope)

La SCE donne une distance mais pas un taux ni une vitesse. C'est la distance entre le trait de côte le plus lointain de celui de plus proche de la ligne de chaque transect. Elle ne tient pas compte des dates.

- La NSM (Net Shoreline Movement)

La NSM donne aussi une distance. Mais elle tient compte des dates. Elles concernent seulement deux dates. Ainsi, elle nous offre la distance entre le plus ancien et le plus récent ligne de côte pour chaque transect.

- L'EPR (End Point Rate)

L'EPR est le rapport entre la distance de la plus ancienne ligne de côte et celle de la plus récente avec le temps qui les sépare.

$$EPR = \frac{\text{Distance entre la plus ancienne et la plus récente ligne de côte}}{\text{Date de la plus ancienne ligne de côte} - \text{Date de la plus récente ligne de côte}}$$

Formule 4: End Point Rate (ERP)

Les tableaux suivants nous montrent les résultats statistiques du traitement. On tient à signaler que les graduations horizontales de la première colonne des tableaux concernent les mesures de déplacement et celles qui sont verticales sont les numéros des transects.

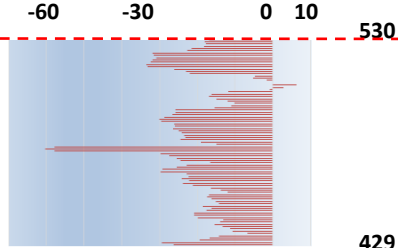
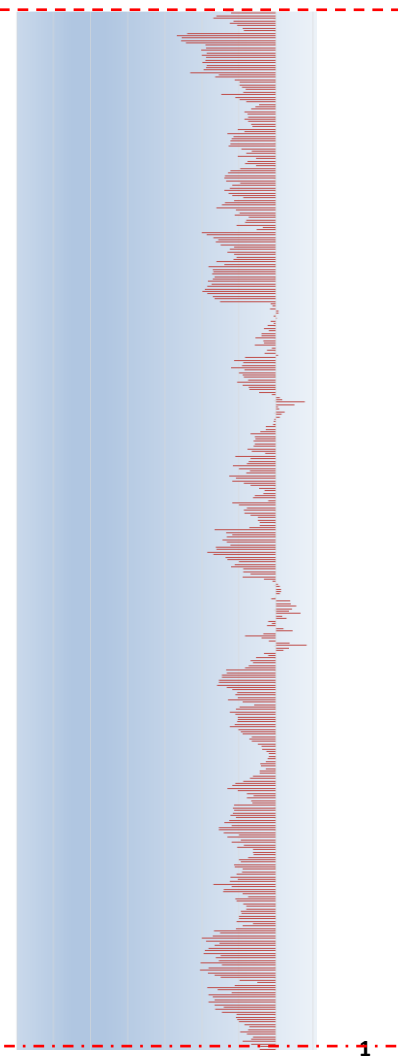
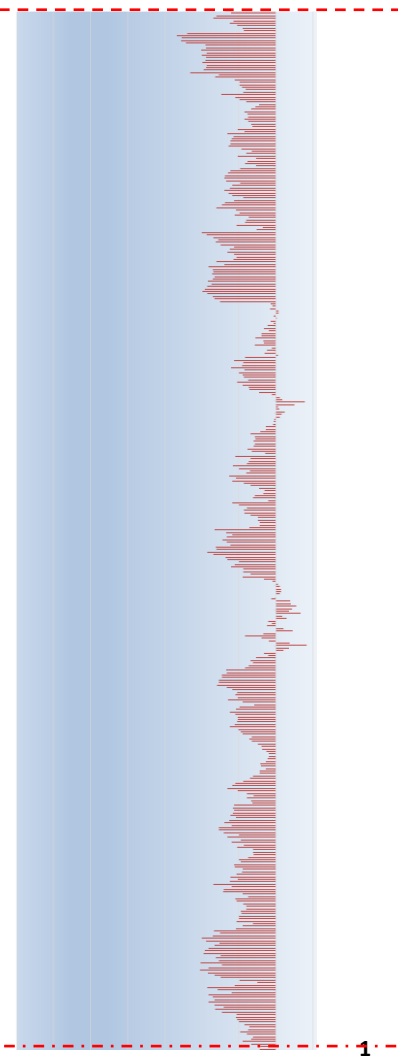
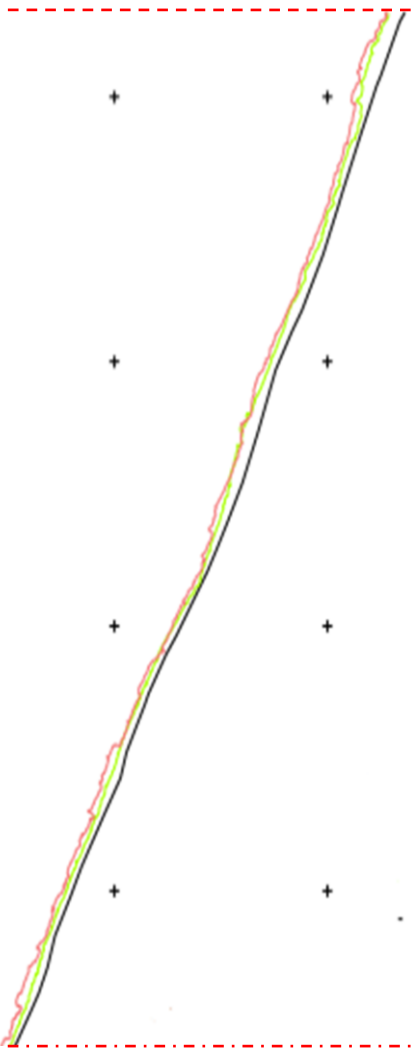
Mouvement mesuré (m)		Moyennes calculées		Traits de côtes
Erosion	Engraissement	Déplacement	Vitesse annuelle de déplacement	
		Total : -11.48477099	Total : -0.48 m/an	
			-0.86 m/an	
			-0.40 m/an	

Tableau 8: Tableau des résultats statistiques entre 1992 et 2016

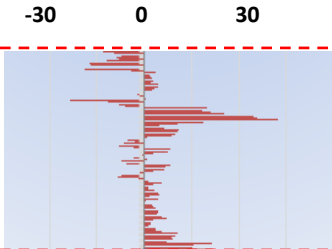
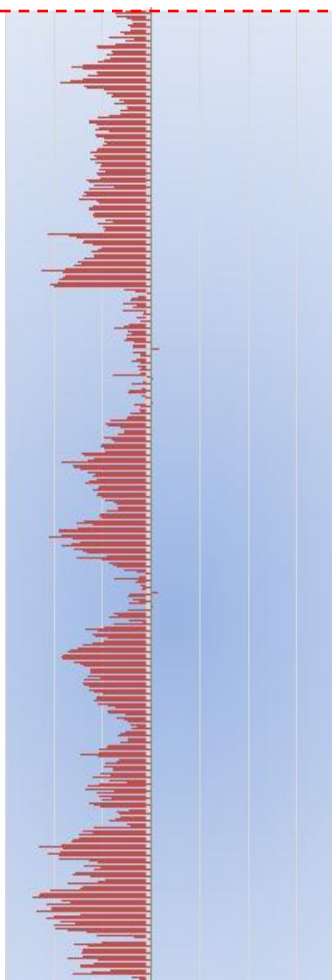
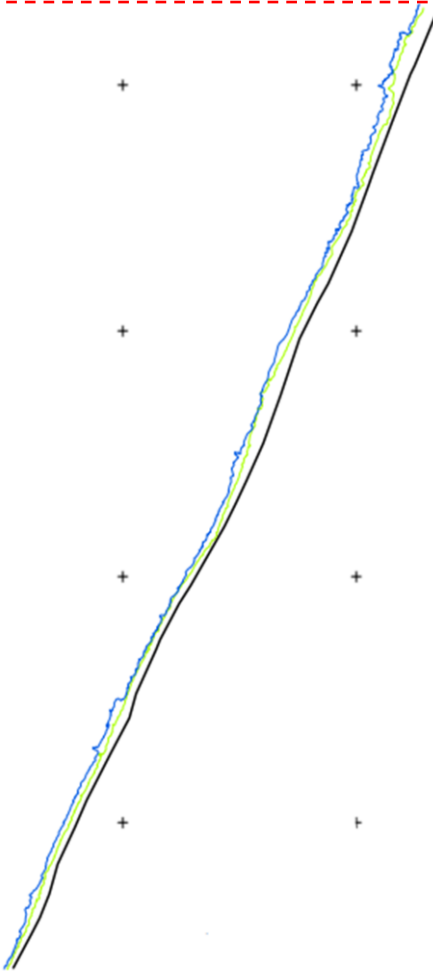
Mouvement mesuré (m)		Moyennes calculées		Traits de côtes
Erosion	Engraissement	Déplacement	Vitesse annuelle de déplacement	
		Total : - 11.4847709	Total : -0.52 m/an	
530 		9 -7.74 m 3.02 m	0.20 m/an	
429 428		-10.13 m	-0.67 m/an	
1				

Tableau 9: Tableau des résultats statistiques entre 1992 et 2007

		EROSION	ENGRAISSEMENT
Nombres de transect		487	38
DEPLACEMENTS (m)	Maximal	60.32	8.27
	Minimal	0	0.17
	Moyen	12.48	2.94
VITESSES (m/an)	Maximale	2.51	0.34
	Minimale	0	0.01
	Moyenne	0.52	0.12

Tableau 11: Erosion et engraissement entre 1992 et 2016

		EROSION	ENGRAISSEMENT
Nombres de transect		447	76
DEPLACEMENTS (m)	Maximal	24.51	28.16
	Minimal	0	0.1
	Moyen	9.91	5.05
VITESSES (m/an)	Maximale	1.63	1.63
	Minimale	0.02	0.01
	Moyenne	0.70	0.36

Tableau 12: Erosion et engraissement entre 1992 et 2007

		EROSION	ENGRAISSEMENT
Nombres de transect		255	268
DEPLACEMENTS (m)	Maximal	62.13	12.52
	Minimal	0.02	0.08
	Moyen	11.23	3.47
VITESSES (m/an)	Maximale	6.96	1.4
	Minimale	0	0.01
	Moyenne	1.26	0.39

Tableau 13: Erosion et engraissement entre 2007 et 2016

Nombres de transect		525
DEPLACEMENTS (m)	Maximal	62.13
	Minimal	0
	Moyen	14.22

Tableau 14: Déplacements indépendant des dates

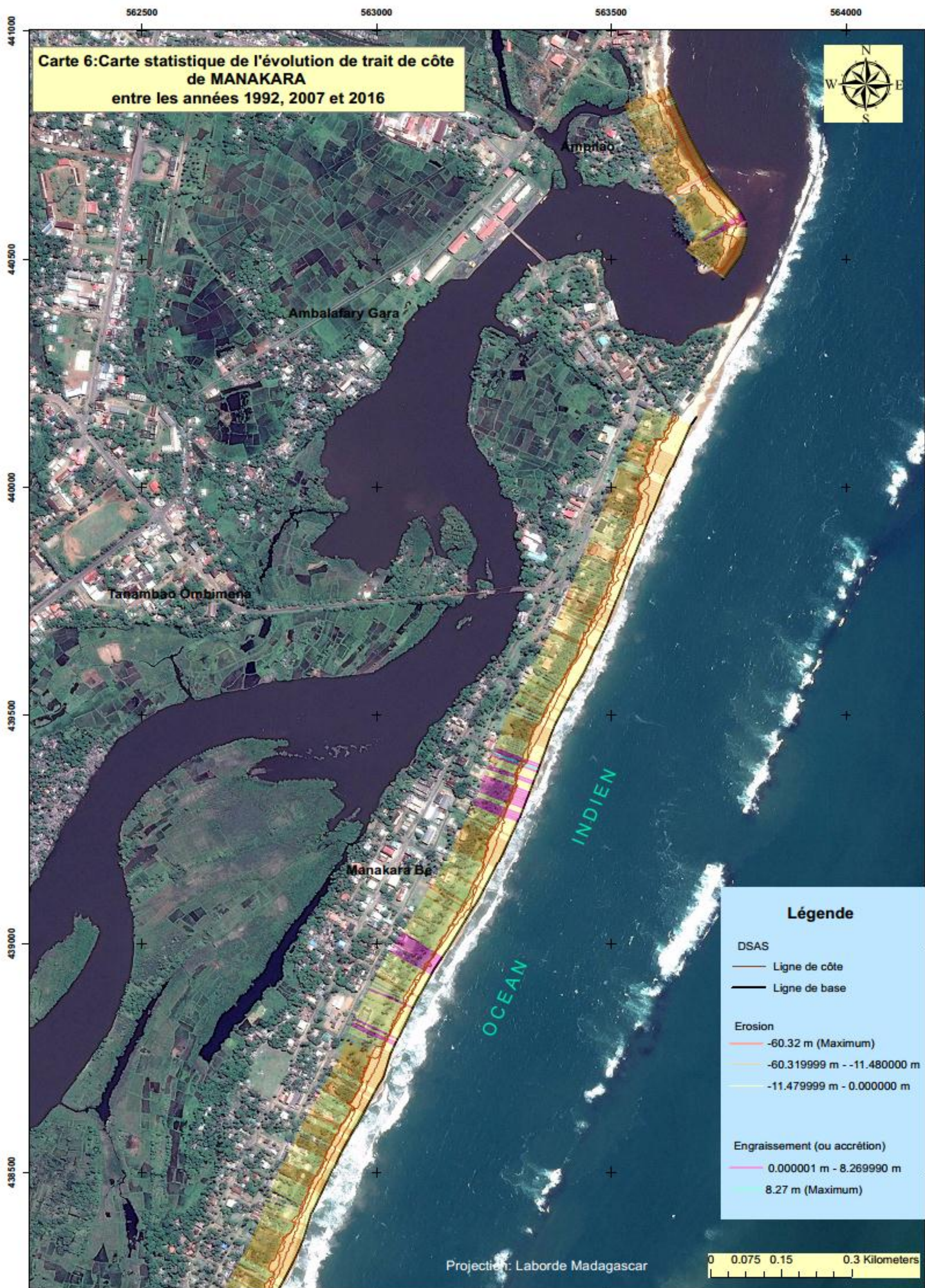
En faisant une confrontation des 3 dates, nous avons vu que le trait de côte de Manakara présente des diversités de mouvement dans le temps et dans l'espace.

Entre les différentes dates, on a pu voir que notre zone connaît un déplacement moyen de -11,48 m avec une vitesse moyenne annuelle de -0,48 m/an entre 1992 et 2016. Il y a quand même des différences entre les années. Entre 1992 et 2007, ce déplacement moyen est de -7,74 m et d'une vitesse moyenne annuelle de 0,52 m/an. Entre 2007 et 2016, le déplacement moyen atteint -3,70 m et -0.41m/an de vitesse moyenne annuelle. Le déplacement maximal se trouve entre 2007 et 2016, il est de -60.13 m pour l'érosion et 28,16 pour l'accrétion.

Le fait de séparer la ligne de côte en deux zones nous permet de comprendre les différences du mouvement dans l'espace. D'une part, on a la zone A qui est sur le côté méridional de la zone (qui largement plus longue) et d'autre part, on a la zone B du côté septentrional. La zone méridionale commence du transect numéro 1 jusqu'à celui du numéro 429, et le reste concerne l'autre zone.

Ainsi, on a constaté qu'entre le plus ancien et le plus récent des dates, la zone B présente une moyenne de déplacement assez signifiant par rapport à l'ensemble de la zone, soit -20,60 m. on tient aussi à signaler que entre 1992 et 2007, on a eu plus d'accrétion que d'érosion dans cette zone car le bilan est positif, soit une moyenne de 3.02m. De plus, l'érosion maximale se trouve dans cette zone, soit -60,13m.

Entre 2007 et 2016, on a eu un avancement de côte vers la mer que de recul dans la zone A. On a eu une moyenne de déplacement de 0,66 m. Pourtant la moyenne générale entre ces dates reste négative car ce bilan est surpassé par celui de la zone B, soit 20,60 m de moyenne de déplacement.



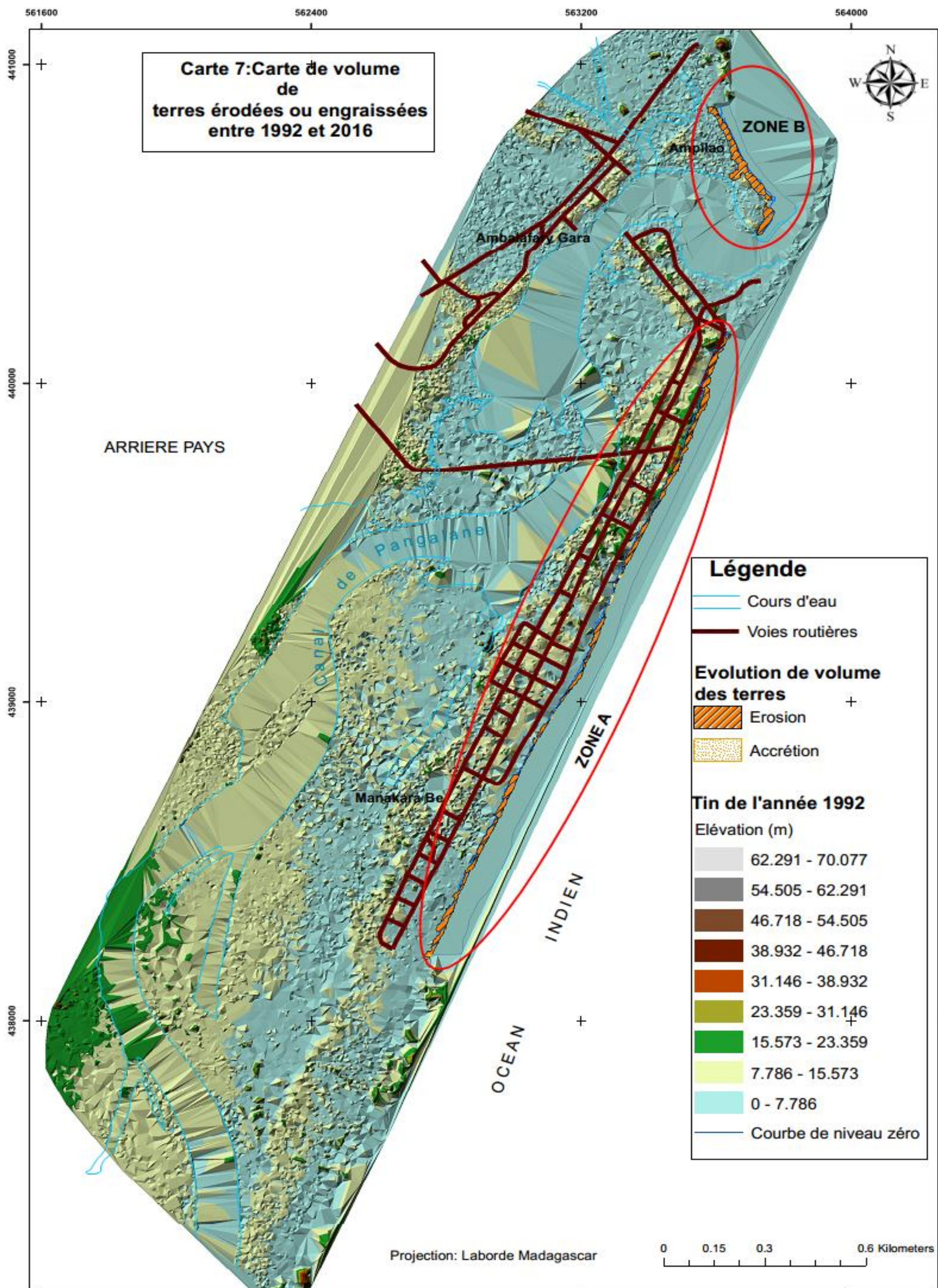
IV.3 RESULTATS VOLUMETRIQUES

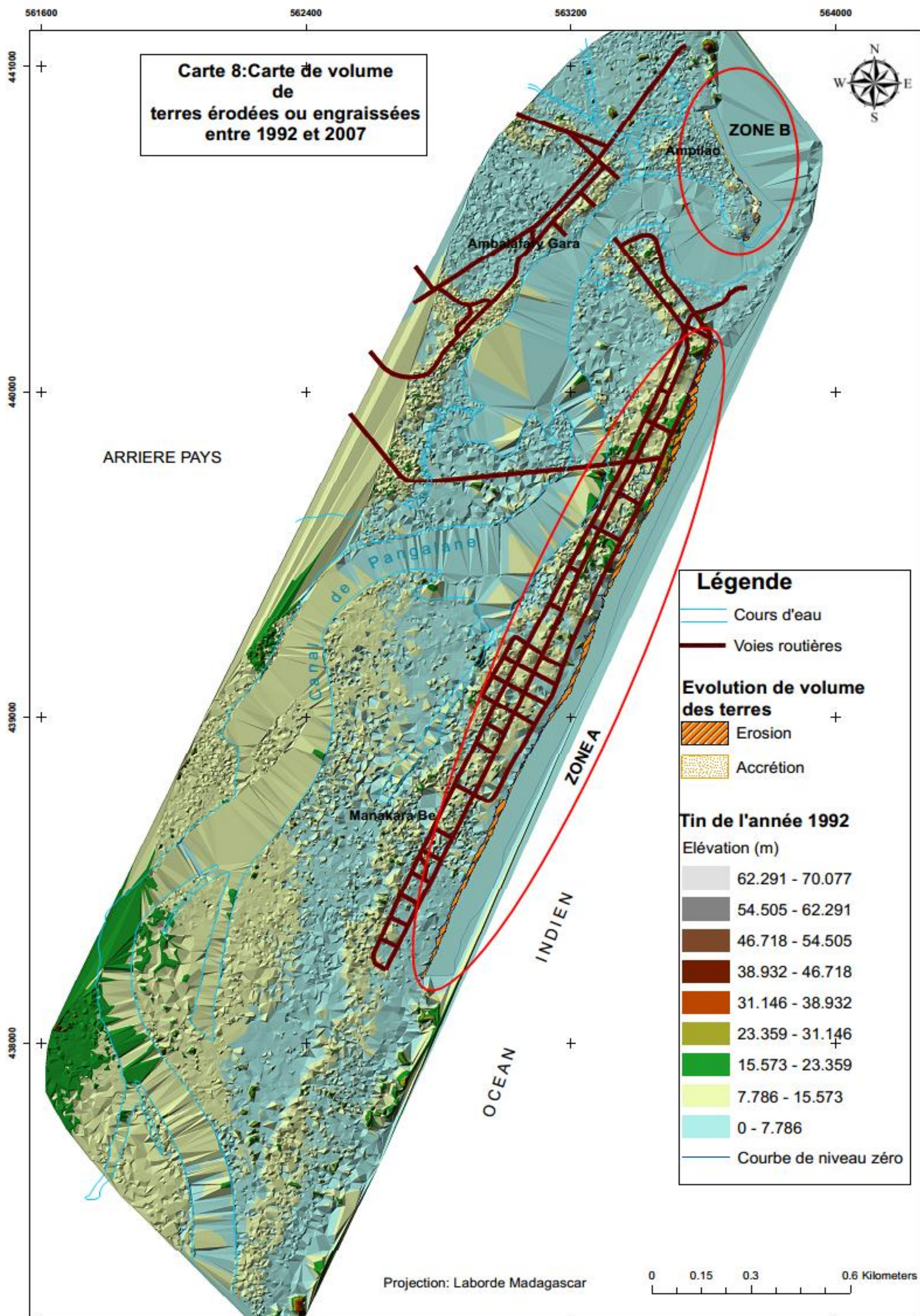
Les résultats sont présentés sous deux formes :

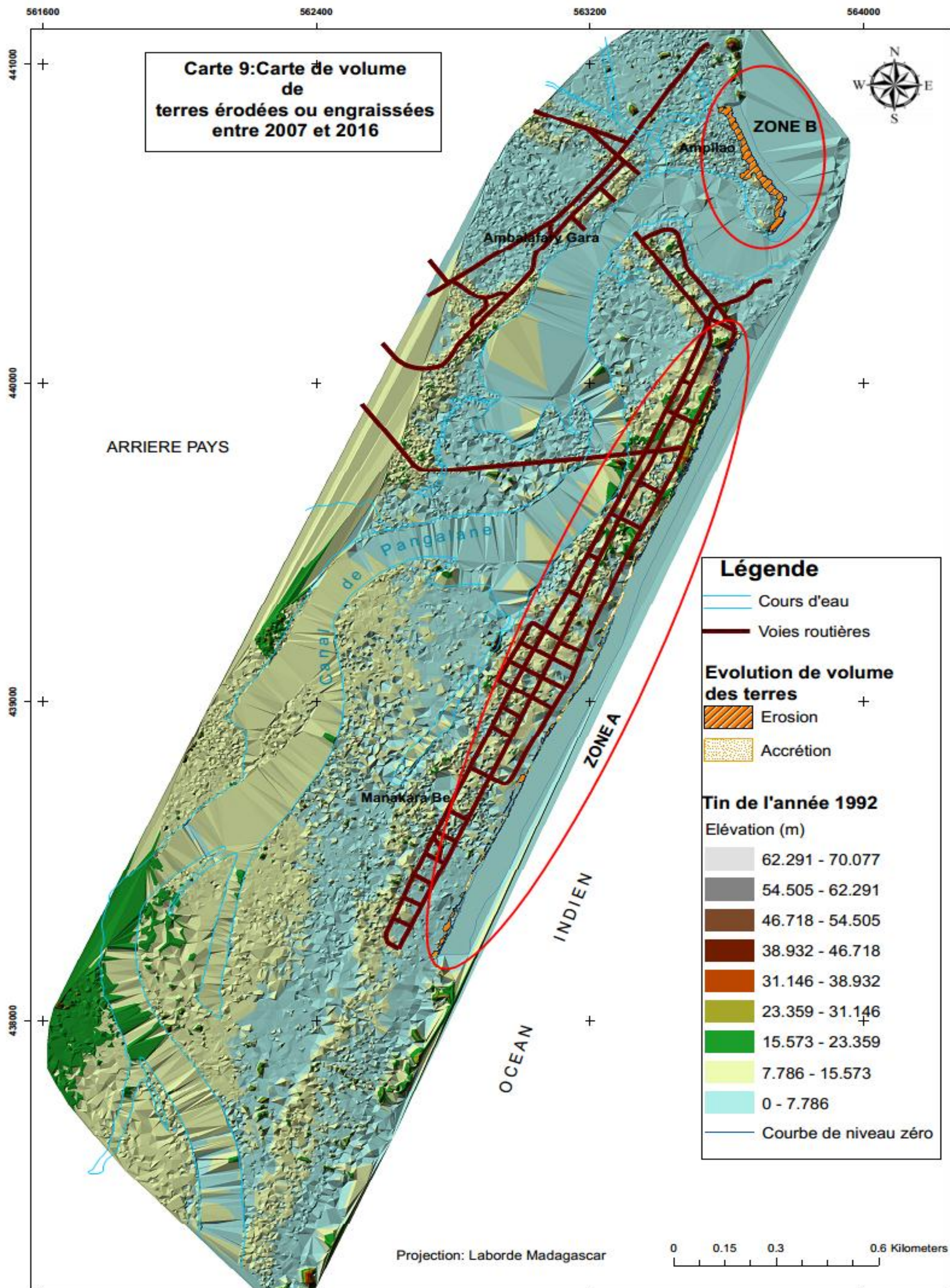
- Cartographiques (voir carte n°7, n°8, n°9) : elles représentent à la fois les TIN créés et les évolutions volumétriques sur les côtes. Elles sont représentées dans une échelle de 1/10000
- Tableaux statistiques

	Erosion (m³)	Engraisement ou Accrétion (m³)
Entre 1992 et 2016	250 323	5 962
Entre 1992 et 2007	221 141	7 420
Entre 2007 et 2016	75 147	43 448

Tableau 15: Résultat volumétrique







Chapitre V : LIMITES DES TRAVAUX

a. Le manque de carte bathymétrique

Ce qui constitue une des plus grandes limites de cet ouvrage n'est autre le manque des cartes bathymétriques. Notre documentation au FTM n'a pas abouti à l'acquisition de ces données. En effet, l'existence des cartes bathymétriques nous accorde pas mal d'avantages, entre autres :

- Elle devrait nous permettre de connaître l'évolution du fond marin. Cette évolution qui accompagne d'habitude l'évolution de traits de côtes.
- Elle devrait aussi nous servir de comparaison avec les volumes de terres érodés
- Elle devrait servir d'éléments de prise de décision pour tous aménagements en mer en termes de recommandations.

b. La difficulté d'accessibilité de données

La difficulté d'accessibilité aux données reste une fameuse limite des travaux de mémoires de fin d'études. Ce présent ouv

rage n'a pas échappé à ce fléau. Pourtant, cette situation ne nous a pas empêché de faire de notre mieux pour concevoir cet ouvrage. Mais l'accessibilité aux images satellitaires nous a handicapé beaucoup ; en effet, elles devraient nous conférer plus de choix de date et de méthode de traitement d'images.

c. L'absence de vérité terrain

Un levé topographique sur terrain a été programmé pour ce présent travail. Mais faute de moyen et aussi de l'éloignement de notre zone d'étude, cela n'a pas été possible. Une vérité terrain à partir d'un levé topographique nous permet pourtant d'obtenir plus de données afin de pouvoir faire la vérification de nos résultats.

PARTIE III : DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS

Chapitre I : ESSAI D'EXPLICATION DE L'EROSION COTIERE DE LA ZONE

I.1 Aménagement littoral

A l'embouchure du fleuve Manakara est édifée depuis 1945 une digue de protection pour la protection de l'hôtel Phaytrer. Cependant, on constate une accumulation de sédiments entre l'épi et la péninsule (Figure 24). En effet, la dérive littorale, de direction Nord-Sud, transporte les sédiments qui vont être stoppée par l'épi au lieu de continuer leur transit vers les plages dans la partie Sud. Ainsi, ces plages vont connaître un déficit en sédiments, d'où on a une érosion au lieu d'engraissement.

On signale aussi l'effet de bout à l'extrémité de l'épi. Un effet de bout c'est une augmentation de l'érosion causée par la déviation (diffraktion) des vagues aux extrémités d'une structure installée parallèlement à la côte.



Figure 24: Ensablement à l'embouchure du rivière Manakara

I.2 Le Tsunami de 2004

Un tsunami est une propagation d'onde hydraulique à la surface de l'eau, d'une importante longueur d'onde et d'une masse d'eau épaisse. A titre de rappel, un tsunami s'est produit le 26 décembre 2004. Son épiceentre se trouvait à 3.298°N; 95.779°E, d'une

profondeur de moins de 38 km, dans le Nord-Ouest de l'île de Sumatra en Indonésie. Ce tsunami est généré par un des plus grands tremblements de terre, on a enregistré 9,0 de magnitude sur l'échelle de Richter. Les vagues ont atteint les 800 km/h de vitesse en formant un mur d'eau de 10 m (certains ont parlé de 25 m). 18 pays riverains de l'océan Indien ont été touchés par ce tsunami dont Madagascar.

Les houles engendrées ont frappées la côte Est malgache depuis Fort-Dauphin, Manakara, Sambava et Vohémar. Les hauteurs des vagues observées étaient entre 2 m à 4 m, le maximum s'élève à 5,4m (Fort_Dauphin et Sambava). Ce tsunami est aussi observé à Manakara, les vagues se sont élevées à 4,2 m (Figure 25). On signale que, du fait que Manakara est classé comme zone sensible aux tsunamis, un projet d'installation d'un système d'alerte aux tsunamis y est immédiatement conçu après le tsunami de 2004.

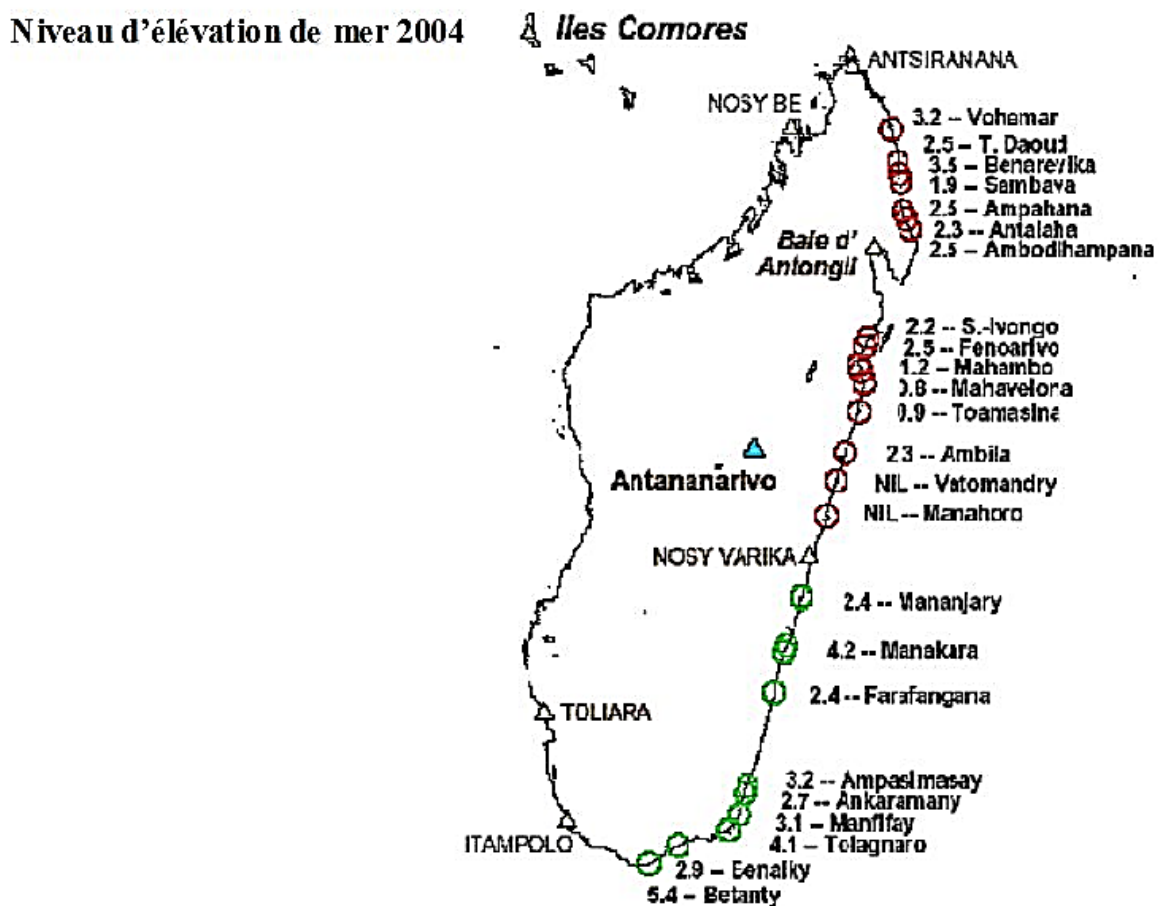


Figure 25: Elévation de vague par le tsunami de 2004

Source: IOGA, Eartquake spectra volume 22 juin 2006

I.3 Le changement climatique

Le changement climatique actuel constitue bel et bien une des majeures causes de la mobilité de traits de côtes du fait qu'il intensifie les forces des agents responsables de l'érosion côtières. Plusieurs sont les paramètres pouvant être tenues. Mais ici on va seulement prendre : l'augmentation de température atmosphérique, l'augmentation de température des océans, la variation de pluviométrie, les passages de cycloniques, la surélévation du niveau des mers.

❖ Augmentation de la température atmosphérique

Chacune des 3 dernières décennies a été successivement plus chaudes à la surface de la terre que les décennies précédentes depuis 1850. La tendance linéaire de la moyenne globale des données de températures de surface combinant les terres émergées et les océans indique un réchauffement de 0,85[0,65 à 1,06] °C¹⁹.

Manakara partage cette augmentation de température atmosphérique. Entre 2000 et 2011 on a eu une augmentation de 0,56°C. (Figure 26)



Figure 26: Courbe de variation de température

Source : Service météorologique Ampandrianomby 2012

❖ L'Augmentation de température des océans

D'une manière générale, la mer ou l'océan joue un rôle important dans la régulation de la température. La figure suivante montre la température de surface des eaux marines dans la partie sud de Madagascar.

¹⁹ GIEC, 2013

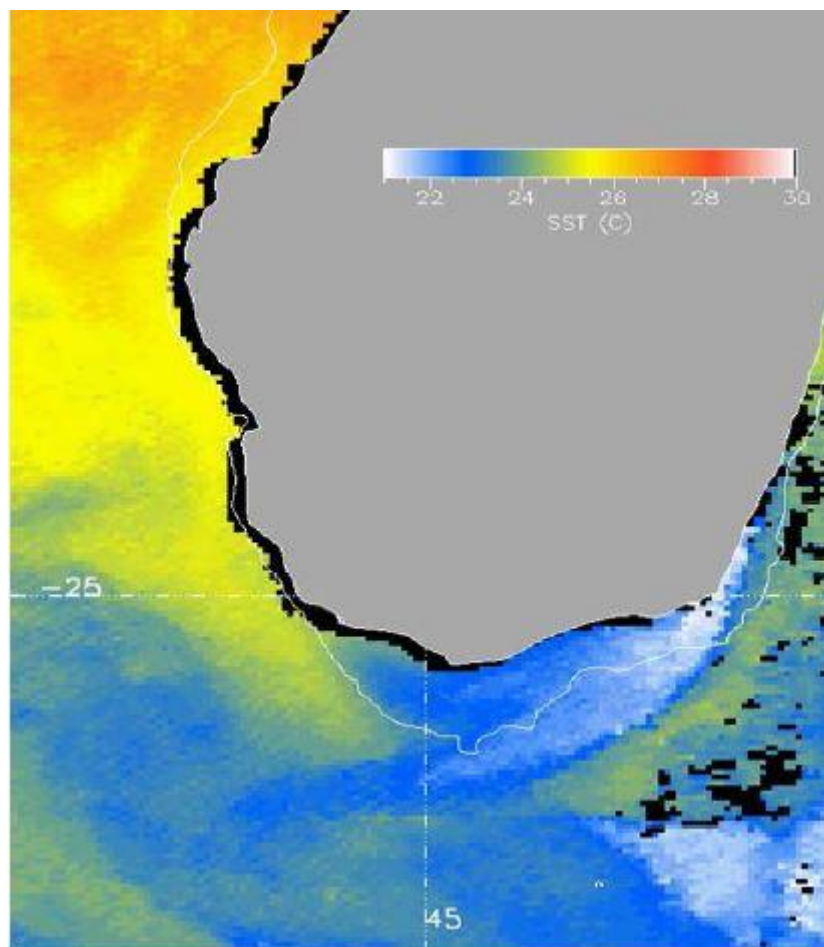


Figure 27: Température de surface marine dans le Sud de Madagascar

Source : ministère de l'environnement

Cette image montre que la partie sud de la grande île est baignée par des eaux froides (couleur bleue). Cependant, on assiste actuellement à un début d'envahissement de cette partie froide par une langue d'eau chaude (couleur jaune orangée) et cela contribue à augmenter progressivement la température des eaux en jouant un rôle de barrière thermique. L'augmentation de la température de la surface d'eau marine contribue d'une part à l'élévation du niveau de la mer qui est un des facteurs favorisant l'érosion côtière et menace d'autre part l'environnement marin. Ainsi, Il est important de suivre l'évolution de cette température de surface des eaux marines qui est en relation avec le changement climatique²⁰.

²⁰ ONG MIND, 2013

A l'échelle mondiale, le réchauffement de l'océan est plus prononcé près de la surface et les 75 premiers mètres se sont réchauffés de 0,11[0,09 à 0,13] °C par décennie sur la période 1971-2010²¹.

❖ Variation de la pluviométrie²²

La variation de la pluviométrie est très remarquable durant quelques années. D'après des enquêtes sur terrain, la plupart de la population de Manakara sait bien maîtriser la période de pluie et de la période sèche ainsi que leurs durées dix ans avant. Ces dernières années, le climat est perturbé. On assiste à une longue pluie irrégulière ou absence des pluies pendant la période de la saison humide. La figure suivante présente la variation de la pluviométrie entre 2000 et 2011.

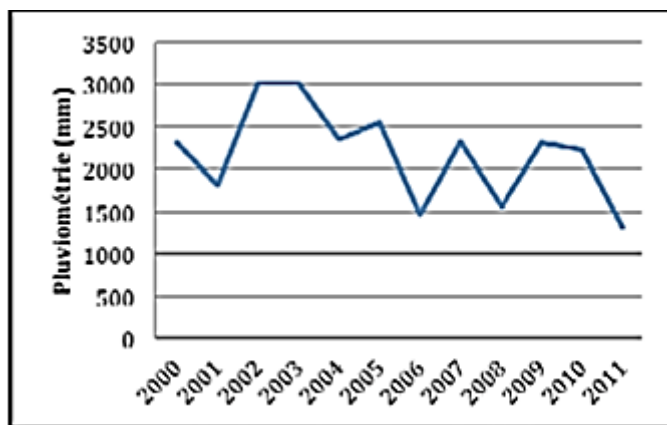


Figure 28: Variation de la précipitation de Manakara de 2000 à 2011

Source : service météorologique Ampandrianomby, 2012

La figure ci-dessus montre que les précipitations moyennes annuelles sont plus élevées en 2002 et en 2003. Elles peuvent atteindre jusqu'au 3 000mm. En 2006 et en 2011, ces précipitations moyennes annuelles sont faibles et presque inférieures à la moitié des années les plus pluvieuses (2002 et 2003) avec respectivement de 1 463,7mm et de 1 324,5mm.

²¹ GIEC, 2013

²² ONG MIND (Mangatsiotra Initiative for Nature and Développement) : Etude sur les impacts du changement climatique pour la protection des zones littorales de Manakara 2013

❖ les passages cycloniques²³ :

Le passage cyclonique : Conditionné par la position géographique, les Districts de Nosy Varika et de Mananjary se trouvent dans le «couloir cyclonique ». La Région de Vatovavy Fitovinany est touchée périodiquement par les cyclones tropicaux traversant l’Océan Indien. Le district de Manakara est rarement touché de plein fouet, mais il subit les fortes pluies accompagnant les queues de cyclones passant plus au Nord. D’après la direction de la météorologie, le changement climatique se manifeste par l’augmentation du nombre de cyclones intense de plus de 150 km/h. Ce cas est surtout ressenti à Manakara si on évalue les cyclones qui ont touché la Région entre le 01 janvier 1990 et 31 mars 2000. (Tableau 16)

Nom	Date	Pluies cumulées (mm)	Vents prétraités (Km/h)	Hauteur des vagues (m)
ALIBERA	Janvier-90	352,7	200	6
HUTELLE	Mars-93	164,1	50	2,5
IONIA	Mars-93	135,5	80	3
DAISY	Janvier-94	18,5	120	8
LITANNE	Mars-94	97,1	90	4,5
EDWIGE	Février-96	440,2	200	5
GRETELLE	Janvier-97	81,4	200	8
ELINE	Février-00	82,1	200	7,5

Tableau 16: Caractéristiques des cyclones qui ont touchés la Région de Vatovavy Fitovinany entre le 01 janvier 1990 et le 31 mars 2000

Source : Service Météorologique Ampandrianomby

❖ la surélévation du niveau des mers

Scientifiquement, 50cm d’élévation verticale du niveau marin peut produire jusqu’à 50m de recul horizontal de la ligne de rivage. Au niveau mondial, les taux du recul moyen de la ligne de rivage se situent entre 1 et 2 m par an²⁴. Entre 1901 et 2010, le niveau moyen des mers à l’échelle du globe s’est élevé de 0,19 m (de 0,17 à 0,21 m)²⁵

²³ Idem.

²⁴ BAROVA H., 2014

²⁵ GIEC, 2013

Chapitre II : SIMULATIONS DU MOUVEMENT DE TRAIT DE COTE DANS LE FUTURE ET POSSIBILITES D'IMPACTS

II.1 Création des simulations

La simulation du mouvement de trait côte de Manakara du future va être déduite par la formule :

$$\text{Déplacement du trait de côte en année donnée (m)} \\ = \text{Vitesse moyenne} \times (\text{Année donnée} - \text{année de départ})$$

Formule 5: Déplacement du trait de côte

Dans notre cas :

- On va rechercher la simulation de trait de côte en : 2025, 2050 et 2100
- La vitesse moyenne est celle qu'on a trouvée dans les résultats statistiques
- On va prendre l'année 2016 comme année de départ

Ces simulations vont être élaborées dans le cas global, d'une part ; puis, dans le cas isolé, c'est à dire selon les vitesses moyennes des deux zones qu'on a classées, d'autre part. On rappelle que le 2 zones sont : zone A (la partie méridionale) et zone B (la partie septentrionale).

Les zones atteintes par les déplacements de traits de côtes de diverses années vont être connues à l'aide de la fonction « buffer » d'ARCGIS. Cette fonction consiste à dessiner un anneau autour d'un objet (ici, le trait de côte de 2016) à partir d'une distance (ici, celle qu'on obtiendra par la formule ci-dessus).

On a alors le résultat dans le tableau suivant :

	Déplacement dans le cas général (m)	Déplacement selon les zones (m)	
	Toute la zone	Zone A	Zone B
Année 2025	-4.305916031	-3.60	-7.74
Année 2050	-15.78835878	-13.2	-28.38
Année 2100	-39.7101145	-33.2	-71.38

Tableau 17: Perspectives de déplacement de trait de côte de Manakara

II.2 Résultats cartographiques

Ils concernent les cartes 10 et 11. Pour une meilleure visualisation des résultats, on a conçu des cartes avec une échelle de 1/6000. Ainsi, une seule carte présentant toutes les simulations de l'ensemble de la zone n'est pas possible. D'où, on a partagé la zone en 2 : zone A (la partie méridionale) et la zone B (la partie septentrionale). Le format du support de la carte dépendra de la carte à représenter : A4 ou A3.

II.3 Possibilités d'impacts

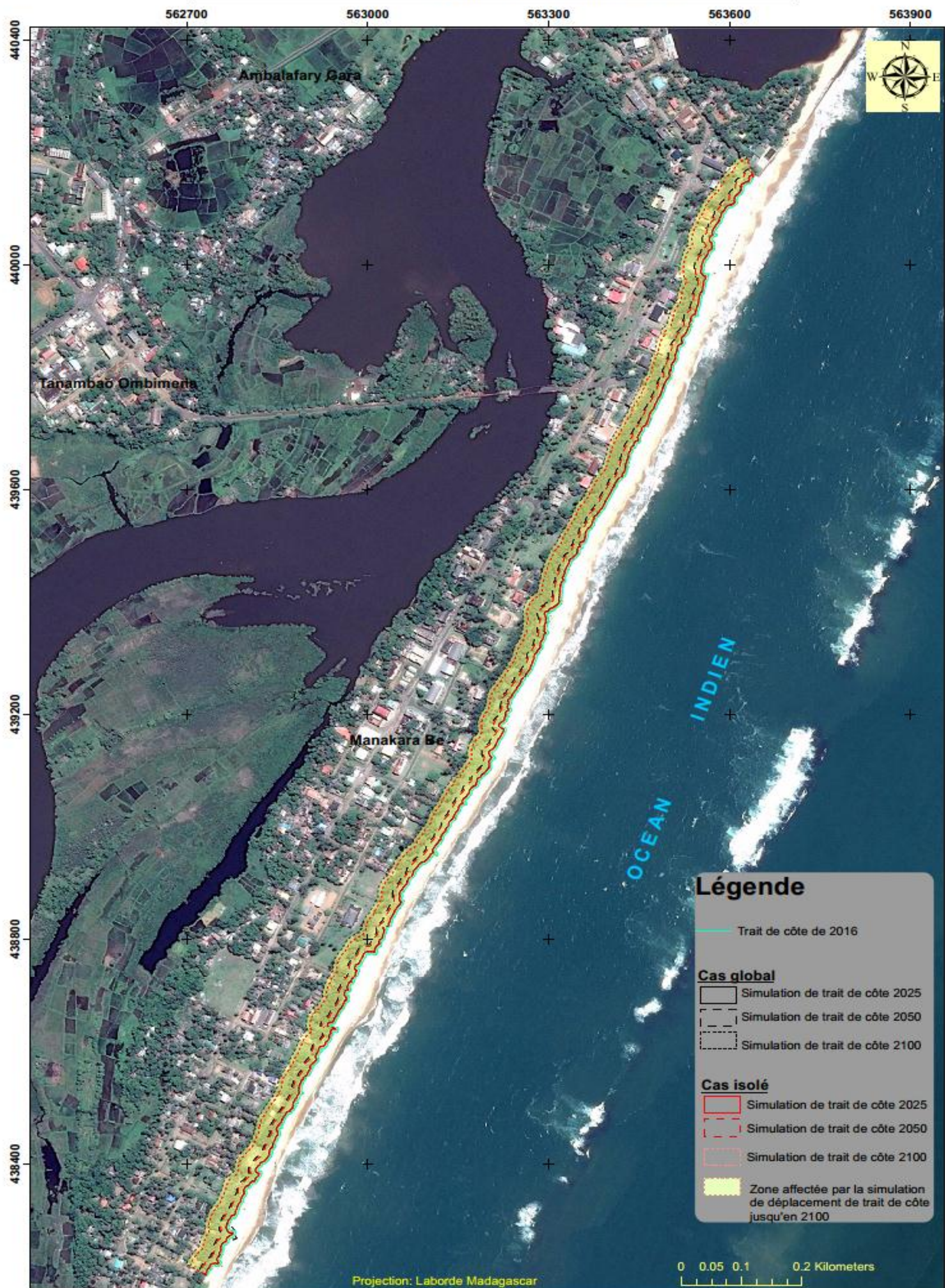
On a fait une interprétation à partir de la superposition des simulations et de l'image de 2016. La connaissance de la zone entre aussi en jeu, ce qui justifie la descente qu'on a effectué. Les possibilités d'impacts de ses simulations vont être traduites sous le tableau suivant :

	Possibilités d'impacts sur le milieu naturel		Possibilités d'impacts sur les aménagements	
	Cas global	Cas isolé	Cas global	Cas isolé
2025	-Recul de végétations littorales d'environ 4,3 m - 13192 m ² de terres érodées	-Recul de végétations littorales d'environ 3,60 m dans la zone A et 7,74 m dans la zone B -11072 m ² de terres érodées dans la zone A contre 4496 m ² dans la zone B	-Amplifie la dégradation des routes déjà érodées (zone A)	-Amplifie la dégradation des routes déjà érodées (zone A) - 4 bâtiments seront endommagés
2050	- Recul de végétations littorales d'environ 15,79 m -46396 m ² de terres érodées -Presque la totalité de la presqu'île sur l'embouchure sera envahie par les sables.	-Recul de végétations littorales d'environ 13.2 m (zone A) contre 28.38 m (zone B) - 15395 m ² de terres érodées à la zone B contre 38812 m ² à celle de A -Presque la totalité de la presqu'île sur l'embouchure sera envahie par les sables.	- La rue du bord de la mer sera de plus en plus dégrader en long et en large - 12 bâtiments sera endommagés - Des habitants trouveront la plage à un pas de leur porte	- La rue du bord de la mer sera de plus en plus dégrader en long et en large (zone A). Un peu moindre que dans le cas global - Un bâtiment sera endommagé dans la zone A contre vingtaine dans la zone B - Des habitants trouveront la plage à un pas de leur porte dans les deux zones -Une partie d'une route en terre battue deviendra en plage dans B

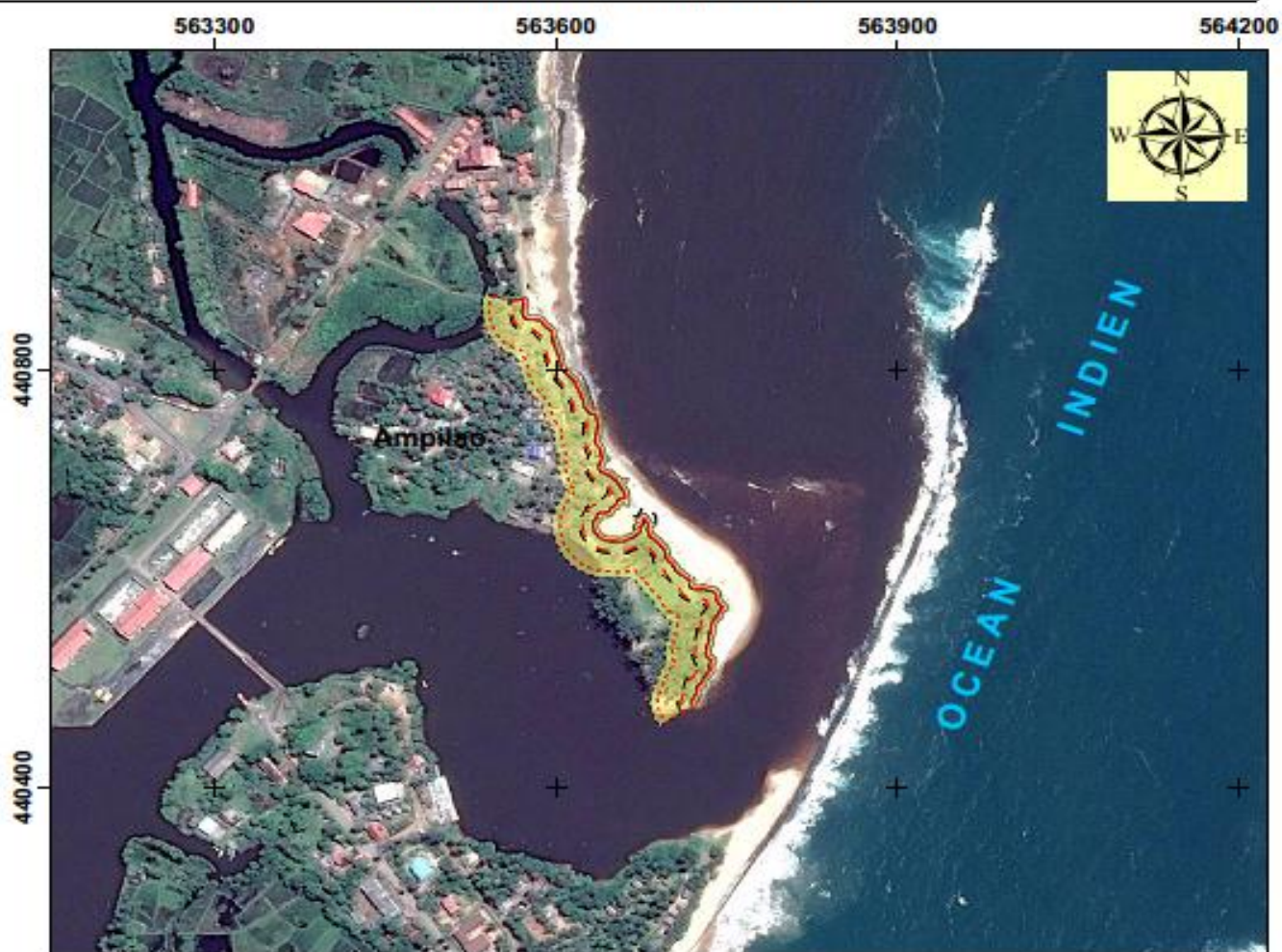
2100	-Recul de végétations littorales d'environ 39, 71 m - 112491 m² de terres seront érodées - La presqu'île sera détachée du continent, il ne reste qu'une petite tâche de végétation - Le canal des Pangalanes pourrait être rejoignit par la mer à l'extrémité Nord de notre zone.	- Recul de végétations littorales d'environ 33,2 dans la zone A contre 71,38 dans la zone B -94548 m² de terre érodées a zone A et 37421 m² à celle de B - La presqu'île ne présente plus de végétation, il est fort probable qu'elle disparaîtra -Il est sûr que le Pangalanes retrouve la mer à l'extrémité Nord de notre zone	- La rue qui borde la zone littorale disparaîtra totalement, dans la zone A -Les habitations et les bâtiments administratifs qui longent la zone A seront endommagées - Une grande partie du village dans la zone B sera endommagée avec la piste qui y est.	- La rue qui borde la zone littorale disparaîtra totalement, dans la zone A -Les habitations et les bâtiments administratifs qui longent la zone A seront endommagées mais moins grave que dans le cas global. - Le village qui est dans la zone B sera disparaît quasiment - La passe qui même vers le port sera mise en question
------	---	---	--	---

Tableau 18: Perspective des possibilités d'impact d'érosion côtière de Manakara

Carte 10: Carte de simulation de trait de côte de Manakara: zone A
Année 2025, 2050, 2100



Carte 11: Carte de simulation de trait de côte de Manakara: Zone B
Année 2025,2050, 2100



Légende

— Trait de côte de 2016

Cas global

- Simulation de trait de côte 2025
- Simulation de trait de côte 2050
- Simulation de trait de côte 2100

Cas isolé

- Simulation de trait de côte 2025
- Simulation de trait de côte 2050
- Simulation de trait de côte 2100
- Zone affectée par la simulation de déplacement de trait de côte jusqu'en 2100

0 0.075 0.15 0.3 Kilometers

Projection: Laborde Madagascar

Chapitre III : RECOMMANDATIONS AU NIVEAU NATIONAL

Les recommandations concernent plutôt la solution face au phénomène d'érosion côtière que de la technique d'extraction de traits de côtes. Nos présentes recommandations vont tourner autour de quatre (4) grandes axes :

Axe 1 : Développer les outils de diagnostics et de suivis de trait de côte au niveau national

- Développer une cartographie nationale d'érosion côtière et identifier les zones à forte érosion
- Créer un réseau d'observation et de suivi de trait de côte à l'échelle nationale

Axe 2 : Développer la stratégie 3P (Partenariat Public Privé) pour la mise en œuvre de la stratégie d'adaptation contre l'érosion côtière

- Elaborer des stratégies locales contre l'érosion marine dans les zones à forte érosion et Intégrer les enjeux liés à l'érosion marine dans les outils d'urbanisme
- Intégrer les Privés dans les stratégies et la mise œuvre des plans d'actions contre l'érosion côtière

Axe 3 : Faire évoluer la doctrine de gestion de trait de côte et défense contre la mer

- Préparer la mise en œuvre des opérations de relocalisation des activités et des biens. Des guides et des appuis devrait être mis en place par l'Etat.
- Développer des solutions innovantes en termes de gestion de trait de côte et défense contre la mer
- Etablir un plan de communication et de sensibilisation de la population aux risques

Axe 4 : Identifier et aménager les principes de financement

- Identifier les principes de financements pour la gestion de côtes et des défenses contre la mer

Chapitre IV : RECOMMANDATIONS AU NIVEAU LOCAL

Connaissant les recommandations au niveau national, il est important de concevoir celles qui sont plus locales. Elles vont se traduire à des programmes d'action plus concrets. Les techniques proposées peuvent être utilisées séparément ou bien en système complexe (c'est-à-dire on combine plusieurs techniques et d'ouvrages littoraux).

IV.1 Réensablement des plages

En tenant compte du déficit de sédiment de plages, mentionnées dans les causes de cette érosion, on propose un réensablement de ces plages.

Le réensablement consiste à apporter artificiellement du sable sur la plage. Il permet d'alimenter les courants tout en atténuant le recul des côtes. Cette méthode nécessite toutefois des réensablements périodiques afin de maintenir l'équilibre sédimentaire. Cette technique est fréquemment utilisée dans les côtes Ouest américaines.

Techniques :

La technique de distribution des sables s'opère soit en reproduisant la plage naturelle, soit en déversant le sable en marge du site, puis à restaurer et à laisser les courants le distribuer. Néanmoins une troisième technique peut être adoptée par immersion en mer des sables fins par le moyen d'une drague hydraulique autoporteuse. Les sables fins vont flotter et puis transporter par les courants et le dérive littoral qui, à leur tour, les distribueront d'une manière naturelle.

Pour notre cas, les sables peuvent être pris dans la passe du fleuve Manakara, entre la péninsule et la brise lame, par dragage. Une étude du dragage du port de Morondava montre qu'un dragage de cette passe permet d'obtenir 328 500 m³ de sédiments²⁶. D'ailleurs, un grand projet de réhabilitation du port de Manakara est en cours d'exécution. Certainement des opérations de dragage aura lieu.

Apports :

D'abord, cette technique favorise le maintien de la dynamique côtière naturelle en introduisant dans le système des sédiments similaires à ceux déjà en place. Ensuite, elle entraîne une atténuation du déficit sédimentaire global actuel au lieu de l'aggravé. Enfin, le

²⁶ ANDRIAMAMPANDRISOA H., 2012

réensablement de la plage favorise les activités récréotouristiques car il redonne l'aspect naturel du milieu.

IV.2 Conception des ouvrages anti-érosives

On tient à signaler que le littoral de Manakara présente déjà des ouvrages de protection. Il y a des épis construits en 1980 pour protéger la rive gauche de l'estuaire situant à la sortie du quai mais qui se délabrent aujourd'hui ; une digue de protection à l'entrée de l'estuaire ; avec cela s'ajoute la barrière de corail qui longe la côte et qui atténue les vagues et houles avant d'atteindre le rivage ; et enfin, des « filao » plantées au bord de la mer

Notre étude montre que cette situation n'est pas suffisante pour protéger la côte de l'érosion. Ainsi, on propose l'édification des ouvrages suivants :

❖ Un cordon d'enrochement :

Les enrochements consistent en un empilement structuré de blocs rocheux denses devant une côte en érosion. Ce type d'ouvrage peut atteindre une hauteur maximale de quelques mètres. Il a un effet immédiat de ralentissement du recul de la côte. Ils sont plus perméables, plus absorbants, plus résistants, plus facile à édifier et le cas échéant plus faciles à réparer.

Son rôle consiste à faire face aux attaques frontales des vagues et houles d'une part, et à prolonger et atténuer l'effet de bout de l'épi situé dans la passe du fleuve Manakara, d'autre part.

Il sera localisé tout le long de la côte étudiée et aura une longueur de 3km. Il sera constitué de blocs de roches soient e, roches naturelles, soient en blocs de béton artificiels comme les Core-loc

La largeur et la hauteur de cet ouvrage, ainsi que leur disposition et les caractéristiques des roches (types, masse volumique, dimension, etc), requièrent des études plus poussées en travaux publiques.

Les ouvrages de défense existants à Manakara



Figure 29: Epis



Figure 30: Digue de protection

❖ Des épis :

Les épis sont des ouvrages de défenses verticaux, généralement perpendiculaires à la côte. On rencontre aussi des épis obliques lorsque l'incidence des houles dominantes est forte²⁷. Les épis sont des pièges à sédiments. Ces derniers qui sont en transit par la dérive littorale. On signale qu'un épi crée une érosion dans la partie de l'ouvrage à l'abri de la dérive littorale, d'où la nécessité de les aménager en série.

Ils auront un double rôle : d'une part, capter les sédiments pour engraisser la plage, et d'autre part, appuyer les effets protecteurs des barrières de corail de la côte.

Ils seront situés tout le long de la côte. Son dimensionnement est conditionné par les comportements hydrodynamiques et sédimentologiques locales. En principe, la hauteur devrait dépasser la plage de 0,5m à 1m. La longueur devrait être la même pour tous les épis. L'espacement devrait varier de 1,5 à 2 fois de sa longueur. Ils épouseront une forme simple, ou en T, ou en L. Chaque type détermine la forme des sédiments piégés.

Toutefois, les épis provoqueront une érosion à l'extrémité de la série, et en plus, Ils dénigreront le paysage balnéaire de la région. La transformation de ces ouvrages en objets artistiques et touristiques peut être une solution efficace.

❖ Un brise-lame :

Les brise-lames sont des ouvrages de défenses longitudinales. Ils sont construits en avant côte et plus ou moins parallèle à la ligne de côte. Généralement, ils servent à atténuer ou à supprimer l'impact de vagues sur le rivage, à diffracter les houles par leur extrémité. Par conséquence, ils décèlent la dérive littorale et ainsi une sédimentation se forme à son abris. Les brises lames permettent de stopper les vagues et forme une sédimentation du côté du rivage. Il devra se situer à une cinquantaine de mètre du rivage. Nous tenons à signaler que dans le cas d'un système complexe, ils peuvent être très utiles en les plaçant juste après la série d'épis. A une juste distance des épis pour capter les sédiments et faisant face aux houles et vagues déviées par ces derniers.

Son dimensionnement sera conditionné par les comportements hydrodynamiques et sédimentologiques locales. Cela devrait permettre la sédimentation du côté du rivage. Soulignons que tous les dimensionnements de ce complexe devraient tenir compte du

²⁷ PASKOFF R., 1993

changement climatique à venir et de ses effets sur le littoral. Le handicap de ce type d'ouvrage c'est que son coût est élevé car c'est une construction en mer.

IV.3 Mise en place d'un service de suivi régulière de la dynamique du littoral et des ouvrages conçus

Ce qui fait défaut à la lutte contre l'érosion marine c'est qu'aucune instance n'est totalement responsable de coordonner les travaux de protection des côtes à Madagascar. La Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) touche un peu cette question. Cependant, cette organisation a du mal à s'installer et donc moins effective. Quelques ministères, comme par exemple le ministère chargé de l'Environnement ainsi que le ministère chargé des Pêches, sont directement concernés par certains impacts des travaux effectués en milieux côtiers. Ces instances sont donc en mesure d'évaluer certains aspects des travaux prévus et d'exiger des mesures d'atténuation des impacts.

Les instances municipales ne disposent non plus actuellement des connaissances et des outils pour analyser la dynamique côtière et déterminer les impacts des différents types d'ouvrages de protection. Cela nécessite alors la mise en place d'un service de suivi régulier du dynamisme du littoral. Un service qui suivra le littoral d'une manière régulière : à court terme, à moyen terme, et à long terme.

Ce service devra contenir deux unités de suivis:

❖ Les suivis scientifiques

Les suivis scientifiques auront pour objectifs de définir les états initiaux du milieu naturel, d'actualiser les données, et suivre régulièrement leur évolution.

Ainsi, ce service va:

- Suivre l'évolution du linéaire côtier et des principales unités géomorphologiques associées (hauts fonds sableux, chenaux, fosses ...). Il prendra recours aux mesures topographiques et bathymétriques, des analyses de photographies aériennes ou satellitaires
- Établir une cartographie régionale de l'érosion côtière et identifier les territoires à risque érosion
- Suivre l'évolution sédimentologique des plages (granulométries, minéraux lourds, etc.)

- suivre spécialement l'hydrodynamisme marin actuel (variation éventuelle du niveau marin, surcotes, flux énergétiques des houles à la côte et courants associés ...) dans le contexte de réchauffement climatique
- suivre le comportement du fleuve Manakara
- étudier les structures et les compositions des sols des secteurs (avant-plages, estrans, cordons dunaires et arrière-plages ...) qui sont objets des aménagements
- faire des enregistrements de paramètres au cours d'événements exceptionnels (cyclones tropicaux, tsunami,...)

Ce service devra aussi prendre compte des suivis des facteurs terrestres (la déforestation par exemple) qui sont liés plus ou moins à l'érosion du littoral.

❖ Les suivis techniques

Les suivis techniques auront pour objectifs de diriger techniquement les stratégies de protections adoptées et de les suivre une fois mis en place. Ses actions se porteront ainsi sur :

- le pilotage de tous les aménagements à entreprendre : réensablement, ouvrages,...
- l'analyse du comportement et de l'entretien des ouvrages de protection existants ou à ceux qui vont être mis en place.
- la planification des dragages sur un examen régulier de l'évolution des fonds du chenal et de la passe et sur l'utilisation des rejets dragués
- le respect de la réglementation concernant l'occupation de la frange littorale et des normes techniques en matière de construction
- la direction et le développement des techniques de suivis de traits de côtes

IV.4 Conception des actions organisationnelles et urbanistiques

Pour que la lutte contre l'érosion du littoral soit prise au sérieux, des mesures organisationnelles et urbanistiques doivent être mises en place.

Les actions organisationnelles :

Ces actions s'appuieront sur la création d'un Comité Ad Hoc réunissant le secteur public (Municipalité et Administrations) et le secteur privé (opérateurs touristiques et autres entreprises commerciales, associations...) qui aura pour rôle:

- De mener des actions sur terrain qui vont s'ajouter aux actions des services publiques.
- De prendre en mains les questions financières pour les actions à entreprendre. En effet, les actions sur la protection littorale sont généralement à la charge des services publics municipaux, régionaux ou nationaux. Mais cela présente des limites vu la pauvreté du pays. D'un autre côté, la protection du littoral est un besoin des secteurs privés car ils y trouvent leurs intérêts. Parmi eux sont tous ceux qui y ont des titres fonciers. On peut proposer, par exemple, des actions au niveau fiscal pour pouvoir percevoir des moyens financiers.
- De rechercher et de mobiliser des ressources humaines
- De sensibiliser et d'informer la population locale suite aux mesures qui seront prises.

Les actions urbanistiques :

Les actions urbanistiques consistent à concevoir un Plan Local d'Urbanisme qui intégrera les problèmes d'érosion du littoral. Ce plan devra tenir compte :

- des grands axes d'aménagements à entreprendre
- des renforcements des infrastructures urbaines existantes, surtout ceux qui borde la mer
- d'une zone tampon, verte et inconstructible, sauf à terme implantations touristiques très légères, après réhabilitation de la zone
- des enjeux environnementaux
- des enjeux touristiques et économiques
- des projections du dynamisme côtier de Manakara

Chapitre V : EVALUATION FINANCIERE DU TRAVAIL

Une évaluation financière de ce projet s'avère important. Toutefois, elle ne représente que les charges sur les images et leur traitement, la descente sur terrain et les charges sur l'aménagement de cordon rocheux.

Désignation		Prix unitaire (Ar)	Nombres	Montant (Ar)
Orthophoto		480 000	2	960 000
Traitements		50 000	14jours	700 000
Terrain	Restauration	40 000	3jours	120 000
	Frais de transport	60 000	1 personne	60 000
Point géodésique FTM		12 000	1point	12 000
Cordon rocheux (roches naturelles)		1 093 582 872	3 Km	3 280 748 616
TOTAL				3 282 600 616

Tableau 19: Evaluation financière

CONCLUSION

L'objectif central de notre étude est de mesurer le déplacement de côte de Manakara, à différentes dates, afin de proposer des mesures adéquates pour protéger le littoral de la ville.

Parmi les plusieurs types de levés de trait de côte possibles, nous avons choisi la méthodologie basée sur les traitements des images aériennes et satellites afin de démontrer leur importance. En effet, nous avons traité une orthophographie de l'année 1992, une autre de 2007 et une image google de 2016. Sur ces images, nous avons numérisé la limite de végétation comme indicateur de trait de côte. Vu le manque de données bathymétriques de la zone, nous avons créé des TIN à partir d'un nuage de point, pour avoir les variations volumétriques de la zone. Tous nos traitement se fait sur SIG avec le plugin DSAS.

Le résultat nous montre que le littorale de Manakara notre zone connaît un déplacement moyen de -11,48 m avec une vitesse moyenne de -0,48 m/an entre 1992 et 2016. Nous avons obtenu 75 147 m³ de terres érodées entre ces dates. Sur ce rythme, en 2100, la mer avancera en moyenne environ 40 m sur ce littoral. Nous avons envisagées les détails des possibilités d'impacts de cette projection.

Nos recherches nous permettent de connaître les principaux facteurs de ce recul de côte : l'aménagement littoral in situ, le tsunami de 2004 et le changement climatique actuel. Nos recommandations touchent le niveau national et le niveau local. Elles concernent la politique nationale et locale de protection côtière, les types aménagements côtiers possibles, et aussi des actions organisationnelles et urbanistiques.

Tôt ou tard, Madagascar procédera à un diagnostic national de mouvement de toutes ses côtes. De ce fait, nous arrivons à obtenir une cartographie nationale d'érosion côtière. Nous proposons ce travail comme étant une référence à ce sujet.

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

1. DERRUAU (1974), « Précis de géomorphologie », Masson et Cie1, 453p.
2. OTTMANN F. (1965), « Introduction à la géologie marine et littorale » Paris Masson, 259p.
3. PASKOFF R. (1993), « Côtes en danger », Masson, 247 p
4. ROBIN DAVIDSON-ARNOTT (2010), « Costal process and geomorphology », Presse universitaire de Cambridge, 1ère Edition, 460 p.

MEMOIRES

5. ANDRIAMAMPANDRISOA Hajaniaina Miora (2012), « Contribution à l'étude d'impact environnementale et sociale du dragage du port de Manakara », Mémoire de diplômes d'études supérieures spécialisées. 95p.
6. BAROVA HARIMANGA Mamy Franckita (2014), Gestion des zones côtières adaptée au changement climatique, 139p.
7. MARA Edena (2009), « Contribution à l'étude monographique de la ville de Manakara et de ses activités », Mémoire de maîtrise, 82p.
8. RABARIVONY Tovomahefa, (2001) : « Suivi de l'évolution du trait de côte de morondava par teledetection et S.I.G. » Mémoire d'Ingéniorat (ESPA) Antananarivo. 79p.
9. RAKOTOARIMANANA Mamitiana, (2014), « Proposition d'une carte d'évacuation en cas de tsunami dans la ville d'Ambodifototra sainte marie », Mémoire d'ingéniorat (ESPA), 106p.
10. RAKOTONAIVO Lala Nirina (2005), « Ouvrage en enrochement en protection du littoral à Madagascar », Mémoire d'ingéniorat (ESPA), 135p.
11. RAMIARAMANANA Hariniaina(2014), Analyse de l'évolution de la couverture forestière de la région Anosy,

12. TIANDRAZANA Henri Tsimidiso, (2014) Cartographie du trait de côte et ses implications sur la gestion de la zone côtière, Mémoire d'ingéniorat (ESPA), 144p.
13. ZAFINDRAVITA Imirin Gilbert, (2005), « Géologie urbaine et érosion côtière de la ville de Mahajanga par télédétection et SIG », Mémoire d'ingéniorat (ESPA). 87p .

ARTICLES

14. Bureau de Recherche Géologiques et Minières (2012), « Synthèse de référence des techniques de suivi de trait de côte du BRGM », 201p.
15. Centre canadien de télédétection, « Notion fondamentale de télédétection », 266p.
16. DAVID GUYOMAR et al. (2006) « Hydroclimat du Sud-Ouest de l'océan Indien et océanographie spatiale », 65p.
17. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR (Université du Québec à Rimouski), (2008), « Comprendre l'érosion côtière », 61p.
18. LE LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE, (1976), « Géomorphologie et hydrodynamisme du littoral entre le havre et dunkerque », Synthèse documentaire, 56 p.
19. OZER A., (1994), « Géomorphologie littorale » Géomorphologie et Géologie du Quaternaire » Université de Liège, p. 20-21

RAPPORTS

20. BRGM (2012), « Synthèse de référence des techniques de suivis de trait de côte », 201p.
21. GIEC (2013), Résumé à l'intention des décideurs, 27p.

22. ONG MIND (Mangatsiotra Initiative for Nature and Développement) (2013): « Etude sur les impacts du changement climatique pour la protection des zones littorales de Manakara »,
23. Roland TROADEC et Al., (1998), « Mission pilote d'évaluation de l'érosion côtière et des risques sur les aménagements et la ville de Morondava Madagascar », 94p.

WEBOGRAPHIE

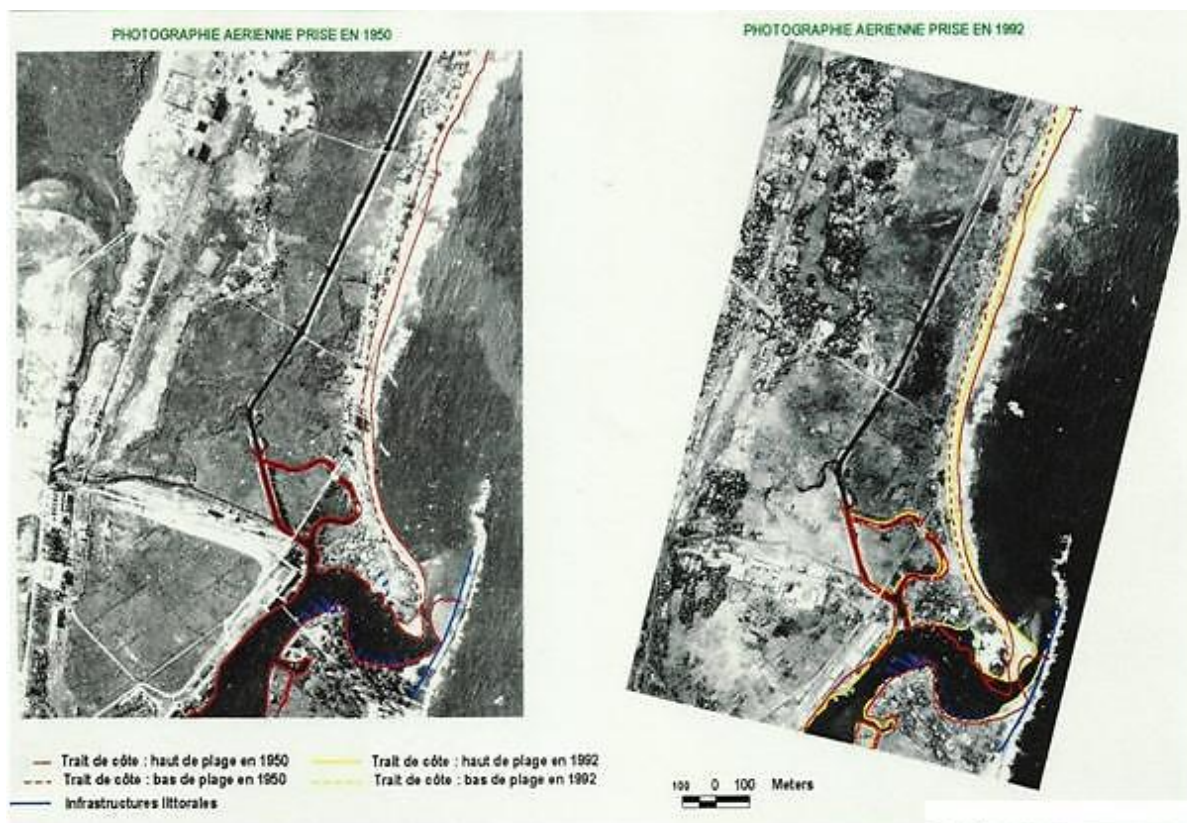
<http://www.cerema.fr/du> 18/01/2017

<http://geomorphologie.revues.org/11146> ; DOI : 10.4000/geomorphologie.11146 du 26/07/2016

<http://www.e-monsite.com> du 07/09/2016

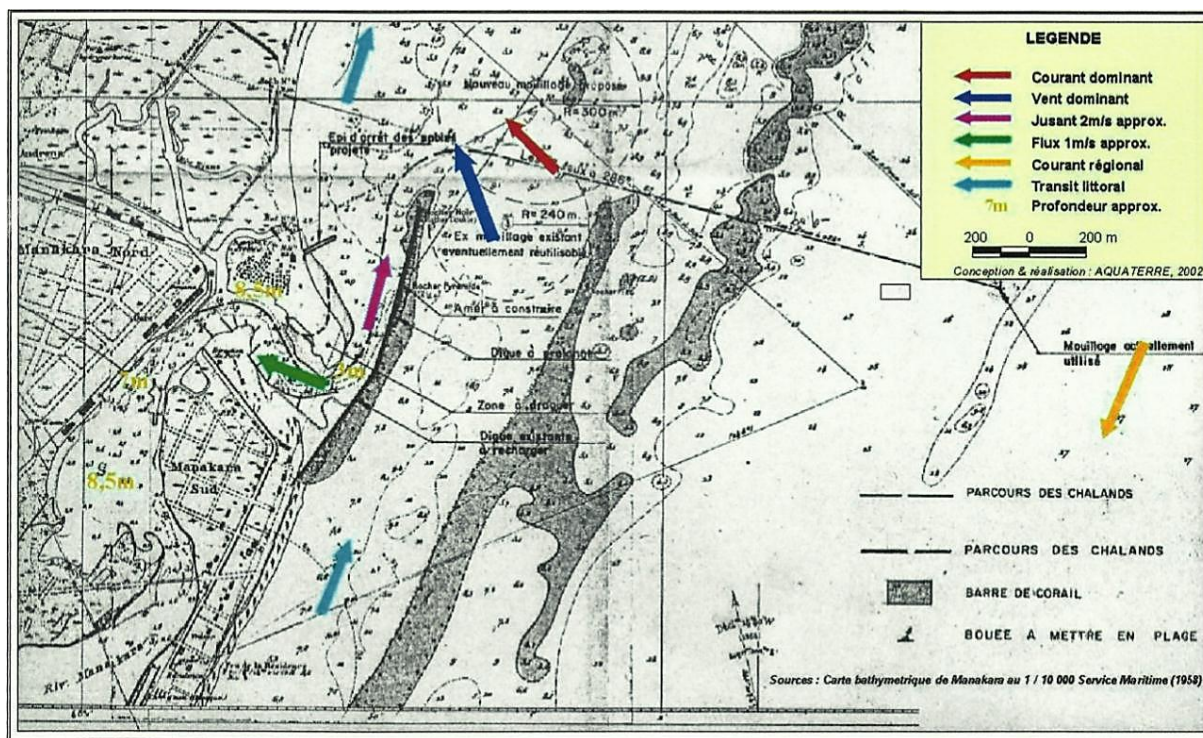
ANNEXES

Annexe 1 : Evolution du littoral entre 1950 et 1992 (Archive)



Source : Aquaterre 2002

Annexe 2 : Carte bathymétrique (Archive)



Source : Aquaterre 2002

Annexe 3 : Table attributaire de la ligne de base dans DSAS

Field name	Data type		
OBJECTID	Object ID	Auto-generated	Required
SHAPE	Geometry	Auto-generated	Required
SHAPE_Length	Double	Auto-generated	Required
ID	Long Integer	User-created	Required
Group	Long Integer	User-created	Optional
OFFShore	Short Integer	User-created	Optional
CastDir	Short Integer	User-created	Optional

Annexe 4 : Table attributaire de la ligne de côte dans DSAS

Field name	Data type	
OBJECTID	Object ID	Auto-generated
SHAPE	Geometry	Auto-generated
SHAPE_Length	Double	Auto-generated
Date_	Text	User-created
Uncertainty	Any numeric	User-created

Annexe 5: Point Géodésique



Annexe 6 : Processus de fabrication de l'orthophotographie numérique

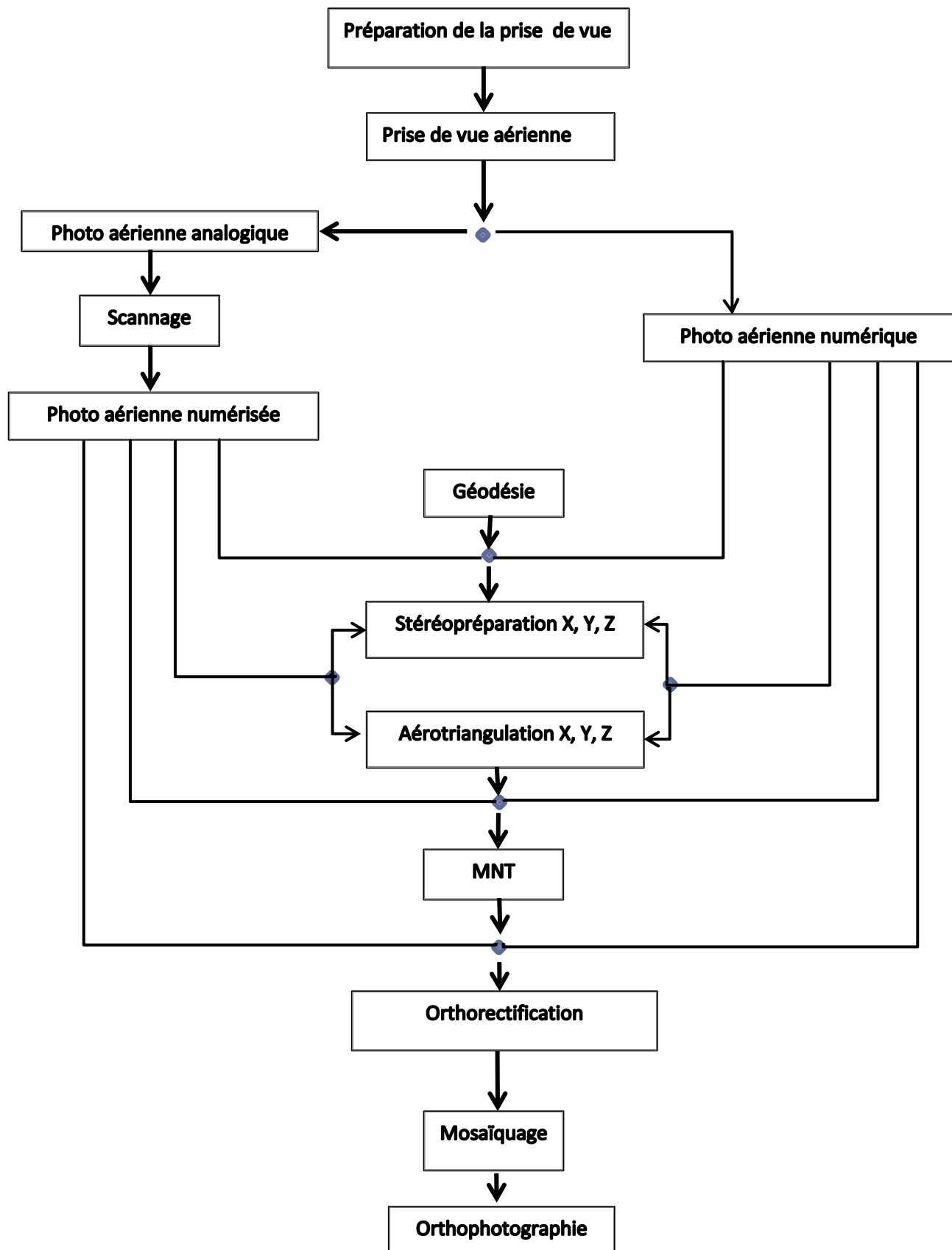


Table des matières

REMERCIEMENTS	<i>i</i>
SOMMAIRE.....	<i>iii</i>
LISTE DES FIGURES.....	<i>iv</i>
LISTE DES FORMULES.....	<i>iv</i>
LISTE DES CARTES	<i>v</i>
LISTE DES TABLEAUX.....	<i>v</i>
LISTES DES ANNEXES.....	<i>v</i>
LISTE DES ABREVIATIONS.....	<i>vi</i>
INTRODUCTION	<i>1</i>
PARTIE I. GENERALITES	<i>3</i>
Chapitre I : EVOLUTION DU LITTORAL	<i>4</i>
I.1 Le littoral	<i>4</i>
I.2 Définition de l'érosion côtière.....	<i>5</i>
I.3 Principe de l'érosion côtière.....	<i>5</i>
a. La glyptogenèse.....	<i>5</i>
b. Le transport.....	<i>6</i>
c. L'accumulation	<i>7</i>
I.4 Les facteurs de l'érosion côtière.....	<i>8</i>
a. Les vagues.....	<i>8</i>
b. Les courants	<i>10</i>
c. Les marées	<i>11</i>
d. Le vent	<i>12</i>
e. Les activités biologiques	<i>12</i>
f. Les activités de l'homme	<i>12</i>
Chapitre II : TECHNIQUES DE MESURES ET DE SUIVI DE L'EVOLUTION DES TRAITS DE CÔTE	<i>15</i>
II.1 Le trait de cote.....	<i>15</i>
a. Définition de trait côte et problématique	<i>15</i>
b. Les différents types d'indicateurs de traits de côtes	<i>16</i>
II.2 Les outils de levés de traits de côtes	<i>18</i>
II.3 Méthodes d'extraction et de traitement de traits de côte.....	<i>25</i>
a. Les techniques d'extraction	<i>25</i>
b. Les techniques de traitement des données	<i>25</i>
II.4 Les méthodes d'évaluation statistiques	<i>26</i>
a. La méthode des points extrêmes	<i>26</i>
b. Les méthodes régressives.....	<i>27</i>
Chapitre III : LE SIG ET LA TELEDETECTION DANS LE SUIVI DE TRAIT DE COTE.	<i>28</i>
III.1 SIG.....	<i>28</i>
a. Généralités sur le SIG	<i>28</i>
b. Le SIG : outil de référence de traitement de données sur le suivi de trait de côte	<i>30</i>

III.2	TELEDETECTION.....	31
a.	Généralités sur la télédétection.....	31
b.	Les images satellitaires	36
c.	L'orthophotographie	37
PARTIE II : ANALYSE DE LA CÔTE DE MANAKARA		38
Chapitre I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE		39
I.1	Localisation	39
I.2	Milieux physique, océanique et biologique.....	39
a.	Relief	39
b.	Géomorphologie du littoral	41
c.	Cadre géologique	41
d.	Hydrographie	41
e.	Le milieu bioclimatique	42
f.	Contexte océanique :	42
g.	Biodiversité	43
I.3	Contextes humain et socio-économique.....	43
a.	Population.....	43
b.	Services et Infrastructures	44
c.	Activités économiques	47
Chapitre II : PRESENTATIONS DES DONNEES ET DE LA METHODOLOGIE		50
II.1	Les données	50
II.2	La méthodologie	50
a.	Documentation	53
b.	Traitement sous SIG :	53
c.	Descente sur terrain.....	55
II.3	Le choix de ligne de référence.....	55
Chapitre III : TRAITEMENTS DES DONNEES		57
III.1	Sur l'orthophoto de 1992	57
III.2	Sur l'orthophoto de 2007	58
III.3	Sur l'image Google de 2016	58
III.4	La mesure de déplacement des traits de côtes sous DSAS	58
III.5	Recherche volumétrique.....	61
Chapitre IV : PRESENTATION DES DIFFERENTS RESULTATS		63
IV.1	Résultats en cartes	63
IV.2	RESULTATS EN STATISTIQUES.....	68
IV.3	RESULTATS VOLUMETRIQUES.....	74
Chapitre V : LIMITES DES TRAVAUX.....		79
a.	Le manque de carte bathymétrique	79
b.	La difficulté d'accessibilité de données	79
c.	L'absence de vérité terrain	79
PARTIE III : DISCUSSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		80
Chapitre I : ESSAI D'EXPLICATION DE L'EROSION COTIERE DE LA ZONE		81
I.1	Aménagement littoral	81

I.2	Le Tsunami de 2004.....	81
I.3	Le changement climatique	83
Chapitre II : SIMULATIONS DU MOUVEMENT DE TRAIT DE COTE DANS LE FUTURE ET POSSIBILITES D'IMPACTS.....		87
II.1	Création des simulations.....	87
II.2	Résultats cartographiques	88
II.3	Possibilités d'impacts.....	88
Chapitre III : RECOMMANDATIONS AU NIVEAU NATIONAL		93
Chapitre IV : RECOMMANDATIONS AU NIVEAU LOCAL		94
IV.1	Réensablement des plages.....	94
IV.2	Conception des ouvrages anti-érosives.....	95
IV.3	Mise en place d'un service de suivi régulière de la dynamique du littoral et des ouvrages conçus.....	98
IV.4	Conception des actions organisationnelles et urbanistiques	99
Chapitre V : EVALUATION FINANCIERE DU TRAVAIL.....		101
CONCLUSION.....		102
BIBLIOGRAPHIE		103
ANNEXES		I
Table des matières		VI

Auteur : RASAMINIRAINA Nasolo Fanomezantsoa Raitra

Adresse: Lot II H 10 GF Ter X Nanisana Iadiambola Antananarivo 101

Numéro Tel : 034 96 385 37

Email : malalanandriamanitra@gmail.com



Titre : « **Mesure du mouvement de trait de côte de Manakara, par imagerie aérienne et spatiale** »

Nombre de pages : 105

Nombres de figures : 30

Nombres de tableaux : 15

Nombres de Cartes : 11

Résumé

Ce travail consiste à mesurer l'ampleur du phénomène d'érosion du littoral de Manakara puis de proposer des mesures de gestions adéquates. Parmi plusieurs méthodes de suivis de traits de côtes, nous avons choisi de traiter l'imagerie aérienne et spatiale par le moyen du SIG et de son plugin DSAS. Nous avons mesuré l'évolution de traits de côtes pour les années 1992,2007 et 2016. Ainsi, nous avons obtenu une érosion de 12,5 m entre 1992 et 2016 soit 0,5 m/an. Cela correspond à un volume de terres érodées d'environ 250000 m³. Après cela, nous avons essayé d'expliquer les causes de cette érosion. Tous ces résultats nous ont permis d'établir la projection du phénomène en 2025, 2050 et 2100 d'une part, et d'autre part, de proposer des recommandations pour une gestion côtière pertinente. Ces recommandations tournent autour des actions politiques, organisationnelles, urbanistiques, scientifiques et techniques, au niveau national et local.

Mots clés : Erosion côtière, Télédétection, SIG, DSAS

Abstract

This research work consists in measuring the size of the coastal erosion phenomenon of Manakara and proposing some suitable measures of management. Among several evaluation methods of coastlines, we have chosen to treat aerial and spatial photo by GIS and its plugin DSAS. We have measured the evolution of coastlines for 1992, 2007 and 2016. Thus, we have obtained 12, 5 m of coastal erosion between 1992 and 2016. That corresponds to 250000 m³ of eroded ground. After that, we have tried to explain the causes of this erosion. All these results allow us to establish the phenomenon projection in 2025, 2050 and 2100 as well as to propose some recommendations for a relevant coastal management. These recommendations concern national and local actions in politics, organization, urbanism, scientific and engineering.

Key words: Coastal erosion, Remote sensing, SIG, DSAS

Encadreur pédagogique: Professeur RABARIMANANA Mamy Herisoa, Responsable de la Mention IGAT et Enseignant chercheur à l'ESPA

Encadreur professionnel : Mme RAHAJANIRINA Michelle, Chef de service Imagerie, Espace et Photogrammétrie au sein du FTM et Enseignant à l'ESPA