

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR
D'ÉTAT EN SCIENCES DE LA MER ET GRADE MASTER 02

OPTION : Aménagement

Thème :

Etat de l'art de la quantification de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte :
comparaison entre la méthode des polygones et la méthode des transects

Présenté par :

- **BOUMESSAOUD Nour El Houda**
- **KOBZILI Hadjer**

Soutenu le 10 /11 / 2018 devant le jury suivant :

Mm. MEHDID. S	Maitre assistant A	ENSSMAL	Présidente
Mr. SOUKANE. S	Maitre de conférence A	ENSSMAL	Promoteur
Mm. MOKHBI. D	Maitre de conférence B	ENSSMAL	Co-promotrice
Mr. OTMANI. H	Maitre-assistant A	ENSSMAL	Examineur
Mr. FERNANE. L	Maitre-assistant B	ENSSMAL	Examineur

Promotion : 2018

Remerciements

Au terme de ce travail, nous remercions DIEU tout puissant de nous avoir offert l'opportunité de franchir ce stade du savoir et de nous avoir donné le courage et la patience de réaliser ce travail.

Nos sincères remerciements s'adressent tout particulièrement aux personnes qu'on a eu le grand plaisir de travailler avec pendant la période de recherche,

Notre promoteur Monsieur SOUKANE. S, et notre co-promotrice Madame MOKHBI. D, pour leurs grandes qualités humaines, pour nous avoir guidés tout au long de l'élaboration de notre travail, pour toute l'aide qu'il nous a apportés et pour leurs disponibilités, leur patience et leurs précieux conseils, leurs orientations et surtout leurs encouragements. Qu'ils trouvent dans ce travail l'expression de notre reconnaissance et nos plus chaleureux remerciements.

Nous exprimons nos sincères remerciements à Madame MEHDID. S, qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury. Nous tenons à remercier Mr. OTMANI. H, et Mr. FERNANDE .L, qui ont accepté d'évaluer, mitiger et commenter notre étude afin qu'elle puisse être un produit complet.

Nous tenons ensuite à remercier M. MEZOVAR, Khoudir maître de conférence A à l'ENSSMAL, Mm. BENGOUFA. Soumia doctorante à l'ENSSMAL, M. AOUEJ. Cherif doctorant à l'ENSSMAL, AMAROUCHE.K, doctorant à l'USTHB pour leur présence et aide

En fin, nous remercions toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin au bon accomplissement de notre travail.

Une fois encore, merci à tous.

Dédicaces

*À la mémoire de ma grande mère que le bon dieu l'accueille dans son
vaste paradis*

Je dédie cet humble travail à :

*La femme pour qui aucune dédicace ne saurait témoigner de mon
profond amour, mon immense gratitude et mon plus profond respect*

*À celle qui m'a offert la plus noble des éducations et les plus riches
principes*

Ma cher Mama

*À toutes mes amies : Samrah, Mina, Giji, Nouari, Wassila, Fayza,
souhila, T, Souhila, J, Houda, Maya, Ryma, Rachida, que je considère
comme une seconde famille.*

*Toutes les personnes qui m'ont été soutenues tout au long de mon
parcours.*

Nour el houda

Dédicace

Je dédie ce travail à ma famille : mes très chers parents, mon frère Abd Errahmane et mes sœurs Aya et Fatima, que par sa présence au quotidien, sa confiance et sa fierté malgré mes défauts.

Je tiens à rendre hommage à tous mes enseignants de l'université, du lycée et du SEM, et particulièrement ma prof de primaire BELKHAITHAR Zakia.

Sans oublier mes chers amis Djazayer et Saida, mes collègues de l'ENSSMAL, et tous ceux qui n'apparaissent pas dans mon travail mais dont leur soutien m'a bien aidée à tenir le coup et à aller jusqu'au bout !

Hadjer

Listes des figures :

Figure 1: Fonctionnement d'un DGPS en mode RTK (Source : élaboré par Manuelle Philippe et Sébastien Hervé).....	20
Figure 2: Scanner Laser Terrestre (LETORTU, 2011).....	20
Figure 3: Principe de fonctionnement du Lidar aéroporté (Costa, 2002).....	22
Figure 4: La différence entre une photographie aérienne et une ortho-photographie (JULIEN MURAZ et al, 2010).....	28
Figure 6: Transects du rivage pour le calcul de la régression linéaire.	32
Figure 7: principe de la conservation de la masse sédimentaire dans le modèle d'une ligne de changement de rivage dans l'espace 3D.	38
Figure 8: Concept du modèle de l'équation(1) basé sur le changement de rivage.....	39
Figure 9: Calcul de la récession du littoral :(a) récession du littoral à l'aide d'une estimation non linéaire par la méthode des moindres carrés; (b) probabilité de distribution gaussienne par rapport à la proportion de segments de ligne dans la distance tampon.....	40
Figure 10: Modèle de changement de rivage PX (EX) pour la plage North Bellows. Les taux (pente) sont variables en permanence dans la direction mais sont constants (linéaires) dans le temps (pas d'accélération).....	41
Figure 11: Modèle de changement de rivage PXT (EXT, comprenant l'accélération du taux en fonction du temps) pour la plage de North Bellows. Les taux (pente) varient continuellement dans le sens de la côte et dans le temps (accélération).	41
Figure 12: L'évolution du trait de côte de Kailua (m/an).....	42
Figure 16: Un exemple d'un cas d'étude pour la caractérisation de la méthode des polygones (source : Journal of Coastal Research, ALBUQUERQUE et al 2013).	48
Figure 17: construction et découpage de polygone de Thiessen. (Pierre.Bosser@ensg.eu).	50
Figure 18: Codage des segments squelettiques dans un axe médian (les lignes bleues indiquent la ligne médiane ; les lignes rouges indiquent les longueurs de ligne perdues en raison d'une érosion) (MARTYN J. SMITH et ROBERT G. CROMLEY).....	50
Figure 19: Problèmes liés à l'approche par transect (la situation A montré une partie du rivage sans transects ; la situation B montre des transects se croisant et manquant la partie la plus proche du rivage).....	51

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Tableau comparatif des méthodes d'acquisition de données et de suivi du trait de côte. .	24
Tableau 2 : Comparaison entre les différentes méthodes statistiques.....	34
Tableau 3: les avantages et les inconvénients des méthodes numériques.....	42
Tableau 4 : Tableau comparatif entre la méthode des polygones et la méthode transects.	52

Liste des acronymes :

SHOM : service hydrographique et océanographique de la Marine.

FEMA: Federal Emergency Management Agency.

SPOT : Système probatoire d'observation de la Terre.

MEEDDM : Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer.

USGS: United States Geological Survey.

RTK: Real Time Kinematic.

Liste des équations :

Equation 1 : Combinaison linéaire des fonctions propres.....	25
Equation 2 : Taux de mouvement de trait de côte.....	26
Equation 3 : L'interception	26
Equation 4 : Temps minimale	27
Equation 5 : Taux de mouvements	28
Equation 6 : L'interception	28
Equation 7 : La covariance d'échantillon	28
Equation 8 : La variance d'échantillon.....	28
Equation 9 : Equation matricielle de vecteur de colonne.....	29
Equation 10 : La matrice de pondération.....	29
Equation 11 : Conservation de la masse et des sédiments	34
Equation 12 : Les segments m sur le trait de côte du temps k et k-1.....	35
Equation 13 : Représente la translation et l'effet combinai de rotation et de l'échelle sur le segment de trait de côte.....	35
Equation 14 : polynomiale	37

Table des matières :

Remerciements

Dédicaces

LISTES DES FIGURES :	I
LISTE DES TABLEAUX :	II
LISTE DES ACRONYMES :	III
LISTE DES EQUATIONS :	IV
INTRODUCTION :	9
GENERALITES :	11
I.1.Notions de trait de côte :	11
I.2.Le choix d'un indicateur du trait de côte :	11
I.2.1.Indicateurs morphologiques :	12
I.2.2.Indicateurs liés à la végétation ou à référence botanique :	12
I.2.3.Indicateurs instantanés :	12
I.3.Les types de côte :	13
I.3.1.Bref Historique de l'évolution des différentes propositions de classification des cotes :	13
I.3.2.Typologie des côtes en rapport avec les problèmes d'aménagement du littoral :	14
I.3.2.1.Côtes Rocheuses :	14
I.3.2.2.Côtes mixtes :	14
I.3.2.3.Les côtes meubles :	14
I.3.2.4.Les côtes d'estuaires est des deltas :	15
I.3.2.5.Les côtes de lagunes et des marais maritimes :	15
I.3.2.6.Les formes côtières anthropiques :	15
I.4.Les facteurs influents la dynamique du trait de côte :	15
I.4.1.Une évolution induite par les facteurs naturels :	15
I.4.1.1.L'action des vagues :	15
I.4.1.2.Les courants littoraux :	16

I.4.1.3.L'action des vents :	16
I.4.2. facteurs anthropique :	16

**CHAPITRE II :SYNTHESE DES METHODES ET DES TECHNIQUES DE SUIVI
DU TRAIT DE COTE..... 17**

II.1.Techniques et outils d'acquisition et de traitement de données du trait de côte :	17
II.1.1.Le suivi topographique :	17
II.1.1.1.Le théodolite :	17
II.1.1.2.Simple méthode de mesure de profil de plage :	18
II.1.1.3.Le système de positionnement global (GPS) :	18
II.1.1.4.GPS Différentiel (DGPS) :	19
II.1.2.Les levés aériens et imagerie satellite :	21
II.1.2.1.La photographie aérienne :	21
II.1.2.2.LiDAR (Light Detection And Ranging) aéroporté:	22
II.1.2.3.La télédétection spatiale :	23
II.1.3.Traitement des données brutes (exemple de photographies aérienne et imageries stellites) :	27
II.1.3.1.L'ortho rectification :	27
II.1.3.2.La correction radio métrique :	28
II.1.4.Méthode d'extraction du trait de côte « la photo interprétation » :	28
II.2.Les méthodes statistiques :	29
II.2.1.Analyse par la fonction orthogonale empirique (FOE):	29
II.2.2.Taux de point extrêmes (PE) :	30
II.2.3.Le taux moyen (TM) :	30
II.2.4.Longueur de description minimale (LDM) :	31
II.2.5.Jackknifing (JK) :	31
II.2.6.Régression linéaire (LR) :	31
II.2.7.Moindres Carrés Pondérés (MCP) :	32
II.2.8.Moindre écart absolu (MEA) :	33
II.3.Les avantages et les inconvénients des méthodes statistiques :	34
II.4.Les méthodes numériques :	36
II.4.1.Les modèles d'une ligne :	36
II.4.2. Approche par la segmentation dynamique :	38
II.4.3.Approche basée sur la zone d'érosion :	39
II.4.4.Approche par tampon et l'estimation des moindres carrés non-linéaires :	39

II.4.5.La méthode polynomiale:	40
--------------------------------------	----

CHAPITRE III :COMPARAISON ENTRE METHODE DES POLYGONES ET DES TRANSECTS	43
---	-----------

III.1.La méthode des transects :	44
--	----

III.2.La méthode des polygones :	46
--	----

III.3.Les avantages et les inconvénients des deux méthodes :	51
--	----

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	56
--	-----------

BIBLIOGRAPHIE	56
----------------------------	-----------

ANNEXES



Introduction

Introduction :

Au cours des dernières décennies, l'occupation du littoral par les sociétés humaines est de plus en plus dense (DEAN, 2009), le degré d'utilisation des milieux littoraux par divers secteurs socio-économiques est devenu une préoccupation majeure en termes de préservation de milieu naturel. L'aléa de l'érosion menace les activités humaines et la sécurité des personnes. Il s'avère donc nécessaire de « comprendre la dynamique de ces zones très dynamiques et les évolutions du trait de côte pour informer et guider les gestionnaires du littoral ». (ROBINET, A., 2018).

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

L'évolution du trait de côte est un phénomène naturel engendré par la conjonction d'un certain nombre de processus dynamiques (marins, continentaux et biologiques) et dépendant des caractéristiques géomorphologiques des systèmes littoraux.

La compréhension de la cinétique côtière est primordiale dans l'aménagement du littoral car cet espace, convoité mais fragile, concentre une grande part de la population et des activités économiques.

Dans ce contexte, cette étude est faite dans l'objectif de synthétiser les méthodes utilisées afin de suivre la dynamique côtière et la quantification du taux de variation du trait de côte.

Dans un premier temps, on présente une description générale des différents concepts en rapport avec la présente étude. Ce chapitre présente un aperçu sur les différentes notions principales de ce mémoire, dont des définitions des notions de trait de côte ; les indicateurs du trait de côte ; les types de côte et les facteurs influents la dynamique du trait de côte.

Dans le second chapitre, intégrant des références récentes et anciennes, traite dans un premier temps des méthodes, des techniques et des expériences menées et mises au point pour observer et mesurer les évolutions du trait de côte, étudier et analyser les processus dynamiques sous-jacents en vue de prévoir les évolutions futures.

Introduction

Et finalement, nous avons mis l'accent sur deux approches principales : la méthode des transects et la méthode des polygones, on a fait une comparaison entre elles selon les caractères suivants :

-Les avantages et les inconvénients ; les méthodes statistiques ; les logiciels utilisés.

Ce travail est achevé par des perspectives et une conclusion générale dans laquelle nous synthétisons l'ensemble des conclusions et des recommandations.



Chapitre I :

Généralités

Généralités :

Les littoraux, des milieux naturels mobiles sont soumis aux évolutions de trois composantes naturelles : Lithosphère, hydrosphère océanique et continentale, atmosphère. (JEAN-MARIE et al, 2013). La zone littorale est sujette à de nombreux changements morphologiques qui résultent de forçages extérieurs naturels et /ou anthropiques. De ce fait, ils sont des zones très dynamiques qui nécessitent une étude approfondie et un suivi de celle-ci dans un contexte de gestion.

I.1. Notions de trait de côte :

Plusieurs définitions ont été données au trait de côte selon les auteurs et selon le type de côtes :

Le trait de côte est la ligne d'intersection de la surface topographique avec le niveau des plus hautes mers astronomiques (définition du SHOM) et par extension, la limite entre la mer et la terre (MEEDDM, 2010).

Le trait de côte peut être considéré sur une échelle de temps légèrement plus longue, comme un cycle de marée, où la position horizontale / verticale du littoral peut varier de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres (ou plus) selon la pente de la plage, l'amplitude des marées et les conditions météorologiques / vagues dominantes.

Ainsi les plans de prévention des risques littoraux (PPR, 1997), la notion de trait de côte dépend du type de côte (côte sableuse ou côte à falaise) :

Le trait de côte est la limite géographique entre le domaine marin et le domaine continental. Il est proche de celle des plus hautes eaux exceptionnelles, mais pas nécessairement superposé.

I.2. Le choix d'un indicateur du trait de côte :

La principale difficulté réside dans le choix d'un indicateur qui soit à la fois le mieux adapté au contexte morphologique (le trait de côte « représentatif »), facilement déterminé sur le terrain ou sur d'autres supports (photographies, MNT...), et aussi qui puisse être « extrait » de supports anciens afin d'élargir l'intervalle « passé-présent » .

Il existe plus d'une dizaine de lignes de référence matérialisant la position du trait de côte (ROBIN, 2002). Selon GRENIER et al. (1990), les lignes recensées les plus utilisées sont : ligne de rivage, niveau de la marée, ligne de végétation, niveau des hautes eaux, niveau moyen des hautes eaux, crête de falaise, dune, plage estran, terre/eau. Ces indicateurs peuvent

être classés en trois catégories : les indicateurs morphologiques, les indicateurs de référence botanique et les indicateurs instantanés.

I.2.1. Indicateurs morphologiques :

Les indicateurs morphologiques font référence à des ruptures de pente situées dans la zone supratidale, intertidale ou subtidale. Dans le cas des plages bordées de cordons dunaires, elles sont représentées par le pied de dune, le haut de la dune et la crête de dune. Selon Stafford et LANGFELDER (1971) cité par FAYE (2010), le pied de dune est un bon indicateur d'érosion mais il est peu apte à traduire une accrétion sur le court terme, car son érosion survient brutalement en général par à-coups, surtout lors des tempêtes alors que son accrétion est un processus lent. Dans le cas des côtes à falaises où les plages adossées à falaises, le haut de falaise et le pied de falaise sont les deux lignes de référence géomorphologiques les plus fréquemment utilisées. La ligne de référence peut-être aussi placée au « contour de la cicatrice d'arrachement » (ROBIN, 2002), au sommet de l'éboulis (PRIEST 1999) ou au pied de l'éboulis (BONNOT-COURTOIS et LEVASSEUR, 2003) dans le cas où la falaise est affectée par des mouvements de masse, tels les effondrements, les éboulements.

I.2.2. Indicateurs liés à la végétation ou à référence botanique :

Les lignes de référence botaniques, sont des limites de végétation, qui se rapportent à des indicateurs biologiques comme marqueurs de la position du trait de côte. Il faut souligner que leurs variations de position ne sont pas toujours synonymes d'érosion ou d'accrétion, car elles peuvent résulter de l'action de l'homme. A cela, s'ajoute la sensibilité de la végétation aux conditions climatiques et écologiques d'une manière générale. Comme principaux marqueurs botaniques, nous pouvons citer : la limite de la végétation pionnière, la limite de la végétation pérenne (arbres, arbustes, ...), la limite schorre¹/slikke², limite haut schorre/bas schorre.

I.2.3. Indicateurs instantanés :

Ces indicateurs peuvent être définis comme étant les manifestations de la dernière marée et/ou comme la limite terre/eau au moment de la prise de vue. Il s'agit : - d'une laisse de haute mer, laissée par la dernière marée ; - de la limite supérieure du sable mouillé ; - de la limite eau/sable. On fait souvent référence aux données marégraphiques pour ces types d'indicateurs. En effet, les données marégraphiques sont des courbes de niveau résultant de l'intersection entre le profil de plage et un niveau de marée conventionnel. Le plus souvent,

¹La slikke est la partie inférieure de l'estran, ses sédiments constitutifs sont fins. Elle est pauvre en végétation.

²Le schorre correspond aux niveaux les plus élevés des marais salés, Il apparaît sous la forme d'un [tapis de végétation](#) basse et dense

c'est un niveau moyen déterminé à partir de statistiques de la marée (zéro hydrographique, niveau moyen des basses mers, niveau moyen des plus hautes eaux, etc.).

I.3. Les types de côte :

Le littoral est un espace dont les formes, les caractéristiques géologiques et l'évolution sont variées. On s'appuie sur des différents critères et méthodologies de classement les scientifiques en établis plusieurs typologies côtières (LARID, 1992) :

I.3.1. Bref Historique de l'évolution des différentes propositions de classification des cotes :

Selon l'approche ancienne, qui est descriptive et qui se base sur la topographie et les reliefs. On aboutit à une division élémentaire du milieu côtier en faisant la distinction entre les zones rocheuses au relief plus ou moins élevé par rapport au niveau de la mer, les zones plates constituée généralement des cotes de sable et les zones d'embouchures.

Plus tard, des approches, plus analytiques que la précédente, ont été proposées, elles se basent sur les critères morphogéniques (lithologie, sédimentologie, facteurs climatiques, prolongement des reliefs et de la partie terrestre sous la partie immergée).

En 1899 GULLIVER distinguait entre deux catégories des cotes : Les formes initiales provenant essentiellement des phénomènes structuraux (Tectonique, nature des roches, Glaciation ...) et les formes séquentielles qui résultent des précédentes dans des zones de dépoulement des actions marines comme l'érosion ; l'accumulation,...

D. JOHNSON 1919 distingue les cotes d'émersion qui sont les zones gagnées par la terre sur la mer (plage, deltas) .et les cotes de submersion que la mer a envahi au détriment de la terre (Fjords, rias).

D'autre propositions (SHEPPARD, 1992) accorde un rôle important à l'érosion côtière dont les produit se déposent sur la zone côtière et ennoyés ensuite par la mer. Ce sont les cotes primaires (les plaines alluviales, les deltas, les estuaires, les cotes de sables...) et les cotes secondaires qui sont le résultat de l'action prépondérante de la mer sur le continent (Falaise, flèche, tombolo, coraux et algues calcaires)

F. OTTMAN, 1962 s'inspire de l'ancienne division entre côte rocheuses et côtes basses, mais il enrichit sa proposition en intégrant l'idée de sa continuité entre la partie terrestre et la partie

marine. Ce principe consiste à considérer la relation morphologique entre le continent et la plateforme continentale, ce que nous indique un éventail de cas :

- plateau continental quasi absent : ou côte de faille où le profile terrestre se prolonge jusqu'au grands fonds.
- côte à falaise : rupture de pente juste au contact de la mer, formation d'une plateforme d'abrasion qui s'allonge plus ou moins sur le plateau continental.
- côte à falaise dite plongeante : la rupture de la pente se fait en profondeur.
- côte rocheuse à pente douce ; le profile terrestre se prolonge en mer jusqu'aux confins de la plateforme continentale (les petits escarpements : îles, écueils).
- Côte basse : prolongement de la plateforme continentale et de la plaine littorale qui font partie d'une seule structure (estuaires, deltas, cotes de sables, marais et lagunes littorales).

I.3.2. Typologie des côtes en rapport avec les problèmes d'aménagement du littoral :

En rapport avec la dynamique naturelle actuelle et en fonction de l'occupation humaine des sites, il convient de faire une typologie des cotes adaptées aux problèmes de leurs aménagements. Nous allons classer les cotes en fonction de leur morphologie et la dynamique sédimentaire (LARID, 1992) :

I.3.2.1. Côtes Rocheuses :

Constituer d'escarpements littoraux et de falaises marines dont la nature géologique est variable. Les paysages des côtes rocheuses sont extrêmement variés. Ils dépendent de la géologie, des conditions bioclimatiques et des agents hydrodynamiques.

I.3.2.2. Côtes mixtes :

Ce sont des sites rocheux à pente douce ; elles sont très peu élevées par rapport au niveau de la mer, ce qui permet à celle-ci de se déployer notamment par grand état d'agitation.

I.3.2.3. Les côtes meubles :

Constituées des sédiments meubles mobilisables, cette catégorie regroupe les zones d'estran comme c'est le cas des plages, des grèves et des espaces dunaires. Ces sites de transit sédimentaires de dépôts ou d'accumulations sont dynamiques par nature, ils connaissent des situations démaigrissement ou d'engraissement.

I.3.2.4. Les côtes d'estuaires est des deltas :

C'est le cas d'embouchures qui constituent des champs de transit important, de matière et d'énergie entre la terre et la mer.

I.3.2.5. Les côtes de lagunes et des marais maritimes :

Ce sont des zones côtières qui se caractérisent par des plans d'eau saumâtres, protégées contre les actions marines par des accumulations sableuses (Cordons de sables). Ces systèmes morpho-sédimentologiques littoraux connaissent naturellement une sédimentation importante et une lente évolution.

I.3.2.6. Les formes côtières anthropiques :

Ce type de cote concerne les milieux littoraux dont le degré d'artificialisation est très avancé, c'est le cas des zones où le taux d'urbanisation est très fort. Les sites de construction portuaires, les ensembles industrialo-portuaires, les grands complexes touristiques ou d'autres aménagements de plus ou moins grandes dimensions, rentrent dans cette catégorie de cote.

I.4. Les facteurs influents la dynamique du trait de côte :

L'évolution du trait de côte est régie par des phénomènes d'érosion (majorité des cas) ou d'avancée (pro gradation). L'ampleur spatiale et la rapidité de cette évolution sont fonction de la nature géologique du littoral, de paramètres tels que la hausse du niveau de la mer et de certains phénomènes météorologiques (houle, tempête). Ces derniers paramètres, qui pourraient être renforcés par le changement climatique, pourraient accentuer à l'avenir l'amplitude des modifications du trait de côte.

L'évolution de trait de cotes englobe à la fois :

I.4.1. Une évolution induite par les facteurs naturels :

La mobilité des côtes est avant tout un phénomène naturel, généré par plusieurs facteurs : les courants marins, les transports des sédiments, l'action du vent et la nature des côtes.

I.4.1.1. L'action des vagues :

Elles interviennent sur les littoraux par leur énergie mécanique qui est à la fois potentielle et cinétique, la puissance érosive des vagues peut s'exercer aussi bien sur les plages que les côtes rocheuses. Par son action mécanique, la vague va fragiliser la roche. Ensuite, lorsqu'elle se retire, elle aspire le matériel : elle va donc déloger des blocs de roche.

I.4.1.2. Les courants littoraux :

Ce sont des courants qui circulent le long des littoraux, engendrés par les vagues. Ils ont un pouvoir d'érosion important et une capacité de transport importante. Ils déplacent les matériaux en suspension et en saltation.

I.4.1.3. L'action des vents :

Les côtes sont plus ventées que l'arrière-pays. Les vents peuvent renforcer ou diminuer la dérive des littoraux. Ils peuvent aussi accroître la cambrure des vagues.

I.4.2. Facteurs anthropiques :

- La sur-fréquentation des cordons dunaires qui détruit la végétation ou empêche son développement et expose le sable à l'action du vent.
- Extraction des matériaux.
- Ouvrages côtiers qui modifient les échanges sédimentaires, etc.



Chapitre II :

Synthèse des méthodes et des techniques de suivi du trait de côte

II.1. Techniques et outils d'acquisition et de traitement de données du trait de côte :

L'établissement d'une série de levés de trait de côte représente un processus indispensable dans l'étude ainsi que le suivi de la frange côtière. Opter pour un outil ou une technique de mesure nécessite l'identification de type de côte, l'objectif qu'on veut atteindre, la disponibilité de l'équipement et du personnel, le coût des opérations et des investissements et enfin les résultats attendus de ces mesures. Par cela C. MALLET et A. MICHOT, 2012, ont classés ces techniques par catégorie d'instruments mis en œuvre, in situ, des levés terrestres ou à distance, des levés aériens et imageries satellites.

II.1.1. Le suivi topographique :

Les outils sont cités suivant un ordre chronologique.

II.1.1.1. Le théodolite :

Le théodolite est un des plus anciens instruments d'arpentage, il a été mis en évidence par l'Anglais Leonard Digges. En 1815 il a été utilisé aux États-Unis afin de faire une enquête sur la côte pour étudier l'Amérique, c'est en 1950 que les mesures de distance électroniques ont été adoptées.

Le théodolite est par définition un instrument de géodésie complété d'un instrument d'optique indispensable en topographie. C'est une lunette montée sur les deux axes vertical et horizontal. Le théodolite est placé sur un trépied, et à la verticale (la verticale est une droite parallèle à la direction de la pesanteur, donnée notamment par le fil à plomb) exacte d'un point connu en coordonnées (x, y et z). Sa base doit être parfaitement horizontale. Il sert à déterminer des directions. L'ensemble de cette phase d'utilisation se nomme « **la mise en station** » dont la visée se fait à travers la lunette par l'opérateur de visée qui pointe une mire tenue par un autre opérateur

Le théodolite peut être associé soit à un tachéomètre ou à une station totale :

- **Tachéomètre :**

Le tachéomètre est un théodolite, mesurant en plus les distances grâce à un télémètre à visée infrarouge intégré dans le tachéomètre. La mesure s'effectue à l'aide d'un prisme réflecteur, placé à la verticale du point que l'on souhaite mesurer à l'aide d'une nivelle sphérique. Elle peut être effectuée au laser avec le même système réflecteur, et même sans réflecteur, ce qui permet de collecter des mesures de points inaccessibles.

- **Station totale :**

La station totale permet de saisir automatiquement les mesures.

La technique de suivi du trait de côte par l'intermédiaire d'un théodolite est convenable pour tous types de cote. Notamment les plages avec tous ses types y incluent les plages de galets et les dunes. Cet outil est utile dans les mesures de profils topographiques et de levés d'indicateurs de trait de côte particulièrement ceux de type géomorphologique et hydrodynamique.

II.1.1.2.Simple méthode de mesure de profil de plage :

En 1961, K.O. EMERY a présenté une technique de profilage des plages, simple et facile, qui, selon Komar 1998, peut remplacer les équipements topographiques traditionnels. A la longue, elle été de plus en plus développée.

La méthode repose sur le principe physique des vaisseaux communicants, selon lequel un fluide dans les vaisseaux communicants forme une surface en équilibre hydrostatique. Si les deux extrémités d'un tuyau rempli d'eau sont également graduées et placées côte à côte, différentes lectures du niveau d'eau indiquent une élévation différentielle (FRANSISCO ANDRADE ET MARIA ADELAIDE, 2006).

A propos du domaine d'application, cette technique ne peut être utilisée sur tous types de cote mais seulement dans les mesures de profil des plages sableuses et les dunes, comme il est recommandé que la fréquence du levé soit mensuelle pour plus de précision dans les mesures du changement du profil.

II.1.1.3.Le système de positionnement global (GPS) :

En 1967, l'US Air Force en collaboration avec l'US Navy, ont contribué à la mise en place d'un Navstar Global Positioning System, un moyen de positionnement très précis en 3 dimensions totalement furtif couvrant la terre entière 24/24h, à des fins militaires. En 1983, le GPS est accessible par les civiles. En 1993, le système GPS comporte 24 satellites et devient alors 100% opérationnel en 1994.

Le GPS est un système de radionavigation spatial qui permet une précision de positionnement de 15 mètres. Le procédé de radio-positionnement s'appuie sur un réseau de satellites dont la localisation d'un point se détermine par la mesure du temps de trajet des signaux radioélectriques émis à partir de satellites. Le temps est multiplié par la célérité de la lumière et donne ainsi la distance du satellite au récepteur. Les localisations peuvent être enregistrées

directement dans le GPS sur le terrain, puis transmises sur un micro-ordinateur au bureau, et enfin, visualisables soit avec le logiciel fourni par le constructeur, soit sous SIG avant traitement.

Le GPS est un instrument de levé cartographique rapide. Les localisations peuvent être enregistrées directement dans le GPS sur le terrain, puis transmises sur un micro-ordinateur au bureau, et enfin, visualisables soit avec le logiciel fourni par le constructeur, soit sous SIG avant traitement.

Pour des levés du trait de côte, le système GPS peut être utilisé pour tous types de côte. Par conséquent il permet de réaliser des levés d'indicateurs diverses du trait de côte par simple mesure de l'opérateur au-dessus de l'indicateur visé, en lecture directe des coordonnées à l'écran ou en les enregistrant dans la mesure où l'indicateur est visible sur le terrain (C. MALLET et A. MICHOT, 2012). L'usage du GPS peut être très fréquent (tout dépend la zone d'étude), le GPS standard présente une précision qui varie probablement (en fonction du milieu, climat, matériel, etc.), de 1 à 10 mètres en (x, y) ainsi la valeur (z) est souvent n'est pas prise en compte pour sa grande imprécision.

II.1.1.4. GPS Différentiel (DGPS) :

Le système de positionnement global (GPS), a été développé par le département de la défense américain et déployé depuis les années 1994.

Le DGPS est un GPS différentiel qui consiste à utiliser un récepteur GPS, appelé ici « base », positionné sur une station dont les coordonnées sont connues. Cette base est couplée à un ou plusieurs GPS mobiles distants. Les deux GPS base et mobile réceptionnent simultanément les mêmes signaux issus des satellites, ce qui permet à chacun de calculer ses propres coordonnées. Le positionnement de la base étant connu avec précision (infra-centimétrique), celle-ci peut déterminer les corrections à appliquer par comparaison entre sa position calculée à partir des signaux satellitaires et ses coordonnées absolues afin de les transmettre au GPS mobile. Les corrections sont transmises par le récepteur de la base vers le ou les GPS mobiles distants par l'intermédiaire d'un système radio (C. MALLET et A. MICHOT, 2012). Le système complet se compose d'une base, d'un mobile et d'un système radio reliant ces deux.

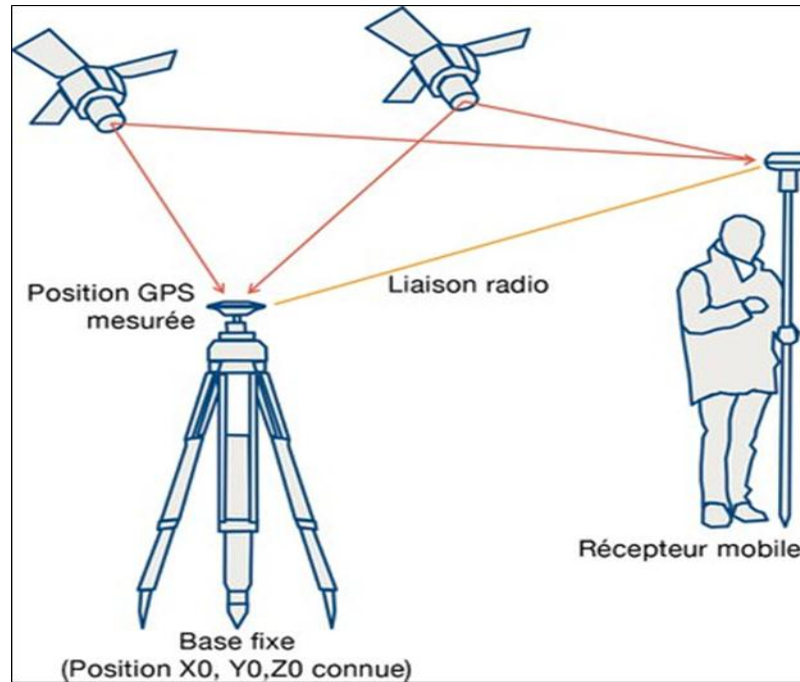


Figure 1: Fonctionnement d'un DGPS en mode RTK (Source : élaboré par Manuelle Philippe et Sébastien Hervé).

a. Scanner 3D :

Le scanner terrestre est un instrument permettant d'effectuer des mesures topographiques avec une haute résolution et une grande précision. Il émet un laser qui se réfléchit sur un point de l'environnement et retourne au scanner. Du temps d'aller-retour du signal, on déduit avec précision la distance entre le point et le scanner. Il balaie tout l'espace en mesurant la position d'environ 10.000 points par seconde, avec une portée autour de 250 m.



Figure 2: Scanner Laser Terrestre (LETORTU, 2011).

Cette technique est surtout utilisée dans les cas de suivi des falaises (types de côte à falaise). Les indicateurs pouvant être relevés sont ceux de type géomorphologique (sommet de l'ouvrage, pied de falaise, sommet de falaise, pied de dune, crête de dune) avec une fréquence du levé qui varie d'une semestrielle à annuelle ou après un évènement, par exemple : un effondrement d'un pan de falaise. Par ailleurs sa précision est centimétrique sur le plan (x, y) et sur le vertical (z), dont elle peut être de quelques millimètres dans le cas d'un appareil de qualité excellente (C. MALLET et A. MICHOT, 2012).

Cet appareil présente des images 3D (données qualitatives) de très haute résolution comme il offre un très grand nombre d'information très rapidement à distance (données quantitatives) ainsi qu'une estimation quantitative sur des processus d'érosion tels que le volume et la vitesse d'érosion.

II.1.2. Les levés aériens et imagerie satellite :

Actuellement, la télédétection représente un très bon moyen pour étudier et modéliser la surface de la zone côtière. Elle comprend l'ensemble des procédés et techniques qui permettent d'acquérir à distance des informations sur les objets terrestres, en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques émises ou réfléchies par ces objets. La collecte de données de télédétection est réalisée soit par des avions, soit par des satellites.

Les données acquises par télédétection fournies des informations très utiles pour caractériser l'état de la frange côtière ainsi que pour suivre l'évolution du trait côte (avancée ou recul).

II.1.2.1. La photographie aérienne :

Depuis 1927, les photographies aériennes sont utilisées pour des objectifs militaires puis civils pour des fins cartographiques.

Les photographies aériennes sont des images du territoire prises à une date donnée et elles servent à interpréter les formes et les détails qui les caractérisent. Cependant celles qui sont destinées à la cartographie sont caractérisées par leur format (généralement 24cm x 24cm), sa résolution (pixel de 10 à 50 cm) et aussi leur échelle (1/8000 jusqu'au 1/60000) (d'après le site de SEIG, a.). Elles sont prises à la verticale à l'aide d'un appareil spécialisé (numérique ou optique), installée à bord d'un avion équipé qui survole à altitude constante sur la zone d'intérêt suivant des axes de vols rectilignes prédéfinis.

Selon l'axe de prise de vue, les photographies aériennes sont classées en deux types, verticale où l'axe est très proche de la verticale de la zone d'intérêt, ou oblique prise d'une vue

perspective de la zone. Néanmoins, pour des fins de cartographie, les verticales sont utilisées. La représentation des objets est proche d'une projection sur plan (C. MALLET et A. MICHOT, 2012).

La photographie aérienne est utile pour un suivi de l'évolution de tous types de côtes. Duquel les indicateurs pouvant être relevés sont de types botanique et géomorphologique. Par ailleurs, elles sont utilisées dans le cas d'un suivi à long terme dont la fréquence d'acquisition chaque survol, pour une même zone, est de quelques années.

II.1.2.2. LiDAR (Light Detection And Ranging) aéroporté:

Le Lidar se base sur la mesure de distances par l'intermédiaire d'un scanner laser embarqué à bord d'un avion ou hélicoptère, Fixé à bord de celui-ci, en calculant le temps d'aller-retour d'une impulsion laser entre l'instant de son émission au niveau de la tête laser et sa réflexion sur la surface terrestre.

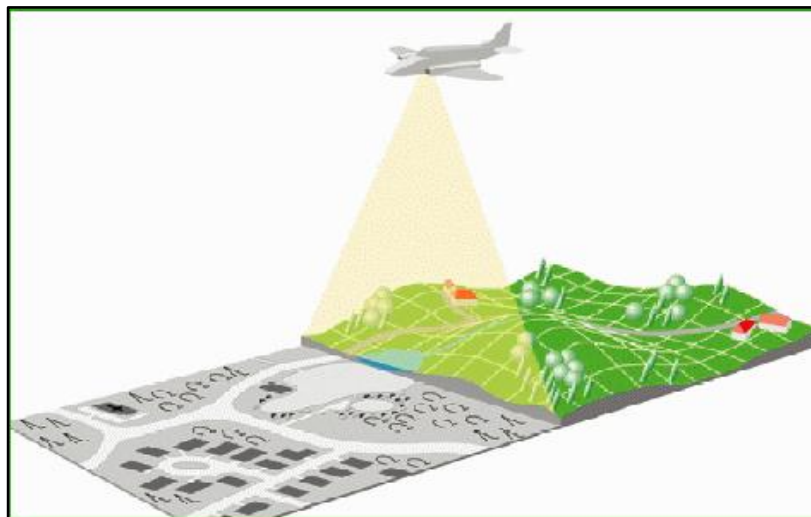


Figure 3: Principe de fonctionnement du Lidar aéroporté (COSTA, 2002).

Cette technique est utilisée dans les mesures topo-bathymétrique où il y'a un couplage de deux télémètres lasers à balayage transversal indépendants fixés à bord d'un avion ou d'un hélicoptère, par ailleurs le positionnement peut être estimé par l'intermédiaire d'un couple GPS / centrale inertielle ce qui permet un géo référencement direct (C. MALLET et A. MICHOT, 2012).

Il existe deux types de LiDAR : le LiDAR topographique et le LiDAR bathymétrique.

Tous types de littoraux peuvent être suivis par l'intermédiaire de données LiDAR à condition que les eaux de la zone d'étude soit claires. Pour un LiDAR bathymétrique, les mesures

peuvent atteindre de -20m jusqu'à -30m de profondeur quand les conditions sont favorables (eaux claires et non turbides). Les indicateurs pouvant être relevés sont de type géomorphologique.

II.1.2.3. La télédétection spatiale :

a. L'imagerie multi spectrale - exemple de SPOT 5 :

Décidé en 1977 par la France, SPOT est le premier programme européen dédié à l'observation de la Terre.

Une image multibande (multispectrale) est une image détenue par un capteur qui opère dans plusieurs bandes spectrales.

SPOT-5 est un satellite à défilement d'orbite quasi-polaire. Il acquiert donc des images suivant une trace légèrement inclinée par rapport à l'axe terrestre. L'imagerie de très haute résolution, dispose 4 bandes (bleu, vert, rouge et proche infrarouge). La bande bleue (associée aux bandes verte et rouge) permet de réaliser sans traitement important des compositions en couleurs naturelles. Elle peut également donner des informations sur la limite de végétation ou encore sur la limite eau-plage, etc. (d'après le site Astrium, a).

Les données SPOT 5 peuvent être utiles pour l'étude de l'évolution de tous types de côte à l'exception des côtes à falaise, toutefois, dans le cas des zones où les évolutions sont supérieures à un mètre entre deux acquisitions, cette méthode peut être adoptée en raison de sa précision ainsi que la fréquence d'acquisition. Comme elle sont utilisées pour l'étude des zones humides (marais maritimes, mangroves, etc.).

Les indicateurs des traits de cotes pouvant être relevés sont de types botanique et hydrodynamique. Les images SPOT offrent une vaste couverture spatiale (60 x 60 km) et une gamme complète de résolution allant de 20 m jusqu'à 2,5 m de résolution pour des échelles régionales ou locales (du 1:100 000 au 1:10 000).

b. Imagerie pléiade :

Pléiades est un satellite à défilement d'orbite quasi-polaire. Il offre une imagerie de très haute résolution dotée d'une revisite quotidienne (en tout point du globe). Il dispose de 4 bandes spectrales (bleu, vert, rouge et proche infrarouge), il est donc à la fois adapté pour la cartographie d'indicateurs du trait de côte au-dessus du niveau marin et en dessous si les eaux sont claires.

Chapitre II : Synthèse des méthodes et des techniques de suivi du trait de côte

Ce satellite offre des données sur laquelle tous les types littoraux peuvent être étudiés et d'y extraire des indicateurs de types botanique et hydrodynamique dont plusieurs images pouvant être acquise par an sur programmation.

La résolution spatiale est excellente, elle peut aller jusqu'à 60 cm (niveau de détail très fin) pour des emprises comprises entre 20 et 100 km.

Tableau 1 : Tableau comparatif des méthodes d'acquisition de données et de suivi du trait de côte.

Outils et techniques d'acquisition de données (par ordre chronologique)	Avantages	inconvénients
Levés terrestre		
Théodolite(1570)	Le théodolite peut raccorder les mesures acquises à un référentiel géodésique (nécessité de mesurer un point connu).	La mise en œuvre nécessite du personnel qualifié qui augmente le coût de l'intervention
Simple méthode de mesure du profil de plage (1961)	le matériel utilisé est peu couteux et ne nécessite que deux personnes pour mesurer le profil de plage. Dont elle est plus rapide et simple et ne nécessite aucune correction pour la courbure de la terre.	son domaine d'application est limité.
GPS(1973)	le GPS permet de prendre des mesures facilement et rapidement dont il ne nécessite pas de formation lourde comme peut être utilisé par un seul technicien sur le terrain. le GPS est relativement « précis »	dans certains cas la précision trop faible de 10m ou plus. dans le cas des levés le long des falaises ou sous couverture végétale, il peut présenter quelques limites liées à des difficultés pour capter les

Chapitre II : Synthèse des méthodes et des techniques de suivi du trait de côte

	<p>(en fonction des besoins, il n'est pas forcément nécessaire d'avoir une grande précision).</p> <p>L'acquisition d'un récepteur GPS est moins couteuse.</p>	satellites.
DGPS	<p>mesures rapides et faciles avec des résultats très précises.</p> <p>la sous-traitance de la mesure topographique auprès d'un opérateur non expert est possible il est indispensable que le géomorphologue soit expert pour un bon relèvement d'un indicateur du trait de côte.</p>	<p>dans le cas d'une falaise à une couverture végétale ou à proximité d'un obstacle les levés DGPS peuvent montrer des limites et cela est liée à des difficultés pour captés des satellites.</p> <p>la liaison radio entre le capteur GPS mobile et sa base peut parfois être perturbée pour des raisons d'obstacles visuels, de mauvaises conditions météorologiques, présence d'autres signaux radiaux, etc.</p>
Scanner 3D (LiDAR terrestre)	<p>L'exhaustivité des relevés ;</p> <p>La suppression des erreurs de relevés</p> <p>L'obtention de fichiers 3D représentant fidèlement la réalité ;</p> <p>La précision des fichiers ;</p> <p>La vitesse de réalisation des mesures ;</p> <p>- L'économie de temps et d'erreur sur les études</p>	<p>Nécessite une vraie technicité.</p> <p>Les limitations d'utilisation du scanner terrestre sont les fortes vibrations, les mouvements, la fumée, le brouillard, le givre et la neige, les températures supérieures à 60° Celsius, les poussières fines,</p> <p>-les couts d'acquisition et de mise en œuvre sont très élevés</p>

Chapitre II : Synthèse des méthodes et des techniques de suivi du trait de côte

	d'ingénierie.	
Levés aériens et imagerie satellite		
Photographie aérienne verticale	<p>permet de suivre l'évolution des indicateurs de trait de côte sur une longue période</p> <p>les couts sont convenables par rapport aux images satellites de haute résolution</p>	<p>La mise en œuvre d'une campagne de photographie aérienne demande des moyens assez lourds comme exige d'excellentes compétences.</p>
L'imagerie stellite	<p>La nouvelle technologie satellitaire permet le développement d'images bien plus précises et utiles.</p> <p>Observation d'un site sous différents angles de vue</p> <p>Haute résolution</p> <p>Répétitivité de la prise de vue</p> <p>Programmation de l'acquisition</p>	<p>cout d'acquisition très élevé.</p>
LiDAR	<p>Le LiDAR topo-bathymétrique donne une grande résolution comme il fournit une cartographie 3D (MNT) complète de la zone étudiée.</p> <p>Le LiDAR topographique permet de sonder des zones dangereuses.</p> <p>Les données LiDAR peuvent couvrir de très larges zones très d'une manière rapide.</p>	<p>Le laser du LiDAR topo-bathymétrique ne peut pas traverser la couverture nuageuse et les nuages.</p> <p>Les couts sont très élevés.</p> <p>Nécessite des opérateurs spécialisés pour l'acquisition, traitement et interprétation des données.</p> <p>Le laser du LiDAR</p>

		bathymétrie ne pénètre pas dans les eaux turbides. Pour les LiDAR bathymétrie, les levés dans des cas de zones à très petits fonds.
--	--	--

II.1.3.Traitement des données brutes (exemple de photographies aérienne et imageries stellites) :

À l'heure des Systèmes d'Information Géographique (SIG), des capteurs d'images numériques (satellitaires ou aéroportés), les photographies aériennes « analogiques » peuvent sembler désuètes. Elles ne peuvent pas être intégrées directement à un environnement SIG, notamment en raison des déformations liées à la prise de vue et au relief de la zone étudiée. Aussi leur utilisation se limite souvent à une interprétation visuelle, éventuellement suivie d'un report manuel sur un fond cartographique (JULIEN MURAZ et al, 2010).

II.1.3.1.L'ortho rectification :

Les images satellitaires et aériennes sont de plus en plus utilisées dans les applications SIG et scientifiques pour la richesse des informations fournies sur une zone géographique. Cependant leur utilisation nécessite tout d'abord une ortho rectification, c'est-à-dire enregistrer avec précision les images au niveau des coordonnées au sol et les corriger géométriquement pour éliminer les distorsions qui se produisent lors de la capture d'images (exelis.com).

L'ortho-rectification est une correction géométrique des images qui a pour but de les présenter comme si elles avaient été acquises depuis la verticale (en télédétection, on dit "au nadir"). En pratique, il s'agit de rendre l'image acquise par le satellite superposable à une carte (cesbio.ups-tlse.fr). L'ortho rectification d'une photographie consistera à la recalculer pour la replacer dans la géométrie de projection choisie et la rendre ainsi superposable en tous points à une carte. Les photographies ortho rectifiées deviendront alors raccordables, permettant ainsi la réalisation d'une mosaïque. Le résultat pourra alors être utilisé au sein d'un Système d'Information Géographique (JULIEN MURAZ et al, 2010) (figure4).

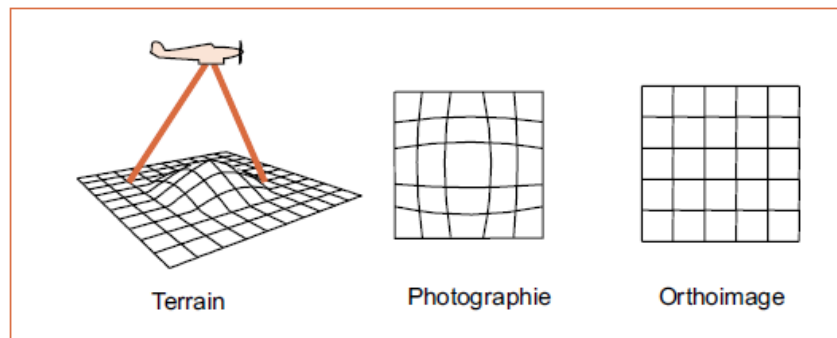


Figure 4: La différence entre une photographie aérienne et une ortho-photographie (JULIEN MURAZ et al, 2010).

II.1.3.2. La correction radio métrique :

Les images satellitaires sont utilisées à une large échelle pour la détection des changements que subit la surface de la terre. Ces données proviennent des capteurs. La collecte de la donnée par le capteur se diffère d'un capteur à l'autre selon les conditions atmosphériques, l'angle du soleil et l'angle du capteur. De ce fait, de nombreux traitements de base sont suivis afin de détecter et éliminer les différentes impulsions afin d'augmenter l'exactitude du suivi de l'évolution du trait de côte.

Ces traitements peuvent être effectués par plusieurs outils de système d'information géographique tels que l'ENVI.

II.1.4. Méthode d'extraction du trait de côte « la photo interprétation » :

Une fois, le choix de la ligne de référence est effectué, plusieurs stratégies existent pour modéliser conceptuellement la ou les lignes ; de ces choix découlent les types de représentation cartographique de la cinématique du trait de côte (ROBIN, 2002).

La technique de détection la plus courante appliquée aux lignes de référence visibles est l'interprétation visuelle réalisée soit directement sur le terrain, soit indirectement sur un document iconographique (photographies aériennes, images, cartes, etc.) (BOAK et TURNER, 2005).

La photo-interprétation est « une technique permettant, à partir d'un couple stéréoscopique de photographie, d'étudier et de définir avec précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace d'un phénomène quelconque » (Ordre des arpenteurs-géomètres du Québec : www.oagq.qc.ca). Cette technique peut être effectuée soit sous SIG, par différents logiciels tels que DSAS et MobiTC, ou QGIS, ArcView et MapInfo, soit par un opérateur qui détecte le

trait de côte visuellement soit sur l'écran ou sur une photo éditée sur un support papier. Cependant il faut choisir l'indicateur du trait de côte convenable au préalable, et de reporter la photographie aérienne ou satellite choisi sur une couche. L'effectuation du même procédé pour des photographies la même zone, acquises à différentes années permet de suivre l'évolution de la frange côtière. Cependant il est vivement conseillé de faire recours à des experts et des compagnes de terrain durant l'opération.

II.2. Les méthodes statistiques :

II.2.1. Analyse par la fonction orthogonale empirique (FOE):

La fonction orthogonale empirique (FOE), est une méthode statistique également connue sous le nom d'Analyse en Composante Principale (ACP), fournit une technique permettant de séparer la variabilité spatiale de la variabilité temporelle des données de profil de plage. Une description détaillée de la méthode se trouve dans les manuels de statistiques (par exemple, DAULTREY, 1976; JACKSON, 1991). En bref, si une fonction $x = (h_o, y, t)$ représente l'adaptation d'une ligne de contour littorale à une ligne particulière (h_o), cette fonction peut alors être définie comme une combinaison linéaire de fonctions propres de spatialité rare, $e_n(y)$, et fonctions propres temporelles, $c_n(t)$, par ...

$$x(y_i, t_j) = \sum e_n(y_i)c_n(t_j) (\lambda_n n_y n_t)^2 \quad (1)$$

Où x est la direction au large, n_y est le nombre de points dans la direction de la ligne littoral, n_t le nombre de campagnes effectuées pour mesurer la courbe du littoral et λ_n c'est la valeur propre associée à la nième fonction propre. Les fonctions propres sont classées en fonction du pourcentage de la variabilité qu'elles expliquent. Cette variabilité est représentée par la valeur quadratique moyenne des données. Parfois (WINANT et al, 1975), la valeur moyenne revêt une importance telle que, pour expliquer la variabilité, elle doit être supprimée des données initiales afin de permettre une identification plus précise d'autres changements plus modestes mais importants. Ensuite, le VQM se transforme en Variance. La première fonction propre explique la majeure partie de la valeur carrée moyenne des données, la seconde fonction propre explique la plus grande partie du VQM restant, etc. De plus, selon AUBREY (1978, 1979), bien qu'il n'y ait aucune raison de penser à l'avance que les fonctions propres représenteront un processus physique, vous pouvez observer que le sable est déplacé en réponse au forçage des vagues. On peut donc espérer que, puisque le forçage des ondes fournit l'essentiel de la variabilité, les fonctions propres le refléteraient. En examinant les structures spatiales et temporelles des

fonctions propres à la plage, on peut décider de représenter ou non certains processus physiquement significatifs.

De plus, quelques propriétés des fonctions propres empiriques doivent être prises en compte (DAVIS, 1976; AUBREY, 1978).

II.2.2. Taux de point extrêmes (PE) :

La méthode PE est un simple calcul de la distance du mouvement total du littoral divisé par le temps écoulé entre les mesures. Habituellement, les dates les plus anciennes et les plus récentes sont utilisées, mais si plusieurs positions de rivage sont disponibles, des combinaisons d' PE peuvent être calculées.

$$m_{PE} = \frac{Y_N - Y_1}{X_N - X_1} \quad (2)$$

Et l'interception de l'EPR est ;

$$B_{PE} = Y_1 - m_{PE} * X_1 \quad (3.1)$$

$$= Y_N - m_{PE} * X_N \quad (3.2)$$

Où : Y : pour indiquer la position du rivage ;

X : pour la date ;

B : pour l'interception ;

m : pour le taux de mouvement du trait de côte.

II.2.3. Le taux moyen (TM) :

FOSTER et SAVAGE (1989) a développé la méthode TM pour calculer les taux de changement de littoral le long de la côte de Floride. Avec cette méthode, les PE individuels sont calculés à partir des données sur les positions du littoral lorsque plus de deux positions du littoral sont disponibles. FOSTER et SAVAGE (1989) ont développé une équation qui intègre la précision des données de position du littoral et l'ampleur du taux de variation pour déterminer si un PE donné répond à un critère de temps minimal (T_{min}):

$$T_{min} = \frac{\sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2}}{R_1} \quad (4)$$

Où : E1 et E2 sont les erreurs de mesure dans les premier et deuxième points, respectivement ;

Et R1 est l'PE du plus long intervalle de temps pour un transect particulier.

II.2.4. Longueur de description minimale (LDM) :

Étant donné que les changements à court terme peuvent influencer sur les tendances à long terme, FENSTER, DOLAN et ELDER (1993) ont proposé une forme simplifiée de la méthode de la LDM pour aider à identifier les changements influents à court terme. En supposant des erreurs gaussiennes, LDM utilise une composante d'erreur et une pénalité de complexité pour sélectionner le meilleur ajustement de modèle, qu'il s'agisse d'une constante, d'une ligne, d'un quadratique. Les taux de LDM basés sur des modèles non linéaires ont tendance à donner des prévisions variables ou très imprécises, bien que le critère de la LDM puisse aider à identifier les changements physiques au sein d'une plage (CROWELL, DOUGLAS et LEATHERMAN, 1997).

II.2.5. Jackknifing (JK) :

La méthode JK est une adaptation de régression linéaire. Cependant, JK utilise toutes les combinaisons possibles de RL données en omettant une description de chaque point. Les pentes de chaque droite de régression sont ensuite moyennées pour donner une estimation de la tendance à long terme ;

II.2.6. Régression linéaire (LR) :

Une autre approche consiste à calculer la ligne de meilleur ajustement, en utilisant la méthode des moindres carrés (MCO), à travers l'échantillon entier des positions du littoral; la pente de la ligne est une estimation du taux de variation du littoral.

La régression linéaire produit presque toujours une ligne différente sur le même ensemble de données. LR utilise toutes les données disponibles, pas seulement les deux points d'extrémité, pour trouver la ligne qui présente une distance minimale au carré globale par rapport aux points connus. Bien que des progiciels statistiques soient généralement utilisés pour obtenir la droite de régression, les équations sont simplement :

$$m_{LR} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_{XX}} \quad (5)$$

$$B_{LR} = \bar{Y} - m_{LR} * \bar{X} \quad (6)$$

Où :
Y : pour indiquer la position du rivage ;
X : pour la date ;
B : pour l'interception ;
m : pour le taux de mouvement du trait de côte.

σ_{XY} est la covariance de l'échantillon entre les dates, X et les positions correspondantes; Y:

$$\sigma_{XY} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad (7.1)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i * Y_i - \bar{X} * \bar{Y} \quad (7.2)$$

σ_{XX} est la variance de l'échantillon de date (également noté $\sigma^2 X$) = $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2 - \bar{X}^2$ (8)

\bar{Y} est la position moyenne du trait de cote = $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$

Et \bar{X} est la date moyenne

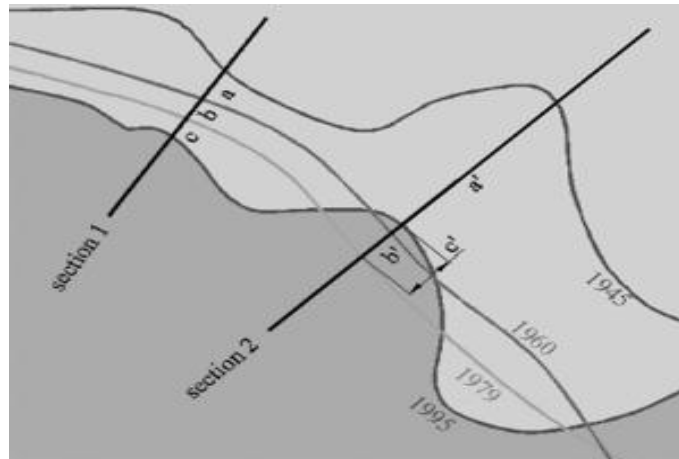


Figure 5: Transects du rivage pour le calcul de la régression linéaire.

Nous devons souligner ici que dès que les positions des rivages seront regroupées, certains rivages historiques auront plus d'influence sur la ligne de régression que d'autres. Il est bien connu que les rivages historiques remontent à plusieurs décennies et incluent des erreurs de position beaucoup plus importantes que les rivages récents (imaginaire par satellite, par exemple). Les taux calculés à partir de ce type de données comportent de grandes incertitudes.

II.2.7. Moindres Carrés Pondérés (MCP) :

MCP suppose des incertitudes hétéroscédastiques. Cela signifie que la variance associée à chaque composant Y (position du rivage) n'est pas nécessairement la même à chaque composant X (heure) (par exemple, KLEINBAUM et al, 1998). Si les écarts sont les mêmes, MCP se réduit à MCO (GRAYBILL et IYER, 1994). Dans de nombreuses études, il peut être difficile de quantifier les incertitudes pour MCP; toutefois, si la variance (σ^2) ou l'écart type

(σ) pour chaque composante Y est connu, la pondération (w) est égale à $1/\sigma^2$. Sous forme matricielle, résolvant pour b , un vecteur de colonne avec des paramètres inconnus d'intercepte et pente, résulte en

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{Y} \quad (9)$$

Dans lequel Y est un vecteur de colonne contenant des positions de rivage, X est une matrice composée d'une colonne des uns et d'une colonne de données temporelles, et \mathbf{X}^T est la transposée de la matrice X (par exemple, DRAPER et SMITH, 1998). La matrice de poids, W est :

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} w_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & w_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w_n \end{pmatrix} \quad (10)$$

Où $w_i = 1 / \sigma_i^2$ et n est le nombre total de points de données (par exemple, GRAYBILL et IYER, 1994). Les points de données avec une variance importante auront moins d'influence sur la ligne de tendance que les points de données avec une variance plus petite (GRAYBILL et IYER, 1994).

II.2.8. Moindre écart absolu (MEA) :

Le plus petit écart absolu est plus robuste vis-à-vis des absents que des moindres carrés. Contrairement aux résidus carrés des moindres carrés, la somme des résidus de valeur absolue dans le MEA est minimisée (c'est-à-dire que la fonction inadaptée est $\sum_i |y_i - b_0 - b_1 x_i|$). Étant donné que les résidus ne sont pas cadrés, une valeur extrême a moins d'effet dans la MEA que dans la méthode des moindres carrés. La distribution supposée des erreurs de mesure est une distribution de Laplace, ou exponentielle à deux faces, plutôt qu'une distribution gaussienne, et la queue plus longue de la distribution de Laplace la rend moins sensible aux étrangers (TARANTOLA, 1987). En comparant des estimateurs robustes, ROUSSEEUW ET LEROY (1987) a déclaré que la méthode MEA est préférable aux méthodes des moindres carrés lorsque les valeurs aberrantes se situent dans la direction y, ce qui est le cas dans presque toutes les analyses historiques du littoral. Le calcul de l'estimation de la source MEA n'est pas aussi simple qu'avec les moindres carrés. Une recherche sur la grille est effectuée pour calculer une inadéquation sur une plage de pentes et des intersections. La meilleure ligne d'ajustement est celle dont la pente et l'interception minimisent les défauts d'adaptation

II.3. Les avantages et les inconvénients des méthodes statistiques :

Tableau 2 : Comparaison entre les différentes méthodes statistiques.

mét hodes	Avantages	Inconvénients
EO F	<p>Ses avantages résident dans le fait qu'il décompose des données spatio-temporelles complexes en une série linéaire de modèles spatio-temporels couplés.</p> <p>EOF présente l'avantage de pouvoir décomposer un ensemble de variables inter-corrélées en un ensemble de variables statistiquement indépendantes. Les nouvelles variables sont des combinaisons linéaires des variables d'origine mais orthogonales entre elles. L'analyse propre sépare la dépendance temporelle et spatiale des données, les représentants comme une combinaison linéaire de produits de fonctions correspondantes du temps et de l'espace.</p>	<p>La méthode EOF requiert un ensemble de données systématiquement réparti dans l'espace et dans le temps, ce qui est toujours impossible à obtenir (FAIRLEY et al. 2009). De plus, la méthode EOF fournit un moyen de discuter du comportement de la variable étudiée au cours de la période d'échantillonnage, mais les résultats ne peuvent, en principe, être simplement extrapolés au-delà de cette période. Dans les travaux de Horrillo-Caraballo et al. (2014),</p>
PE	la facilité de calcul et son utilisation généralisée	dans certains cas, les données disponibles, qui enregistrent des modifications du littoral, ne sont pas utilisées dans l'analyse de la dynamique du littoral et que seules deux données peuvent influencer fortement les résultats.
TM	Utilise les erreurs de mesure pour identifier le taux de changement de	Il n'y a pas de norme de calcul pour la modélisation de l'équation de la durée

	<p>rivage.</p> <p>La méthode de TM a été conçue pour traiter des données de qualité variable et / ou des données regroupées.</p> <p>Elle permet de calculer la variance en fonction du temps à partir de la moyenne des taux.</p>	<p>minimale. Les faibles taux dans le dénominateur de cette équation produisent une longue période minimale. Dans ce cas, le délai maximum PE peut être le seul taux à long terme disponible. Inversement, des périodes de temps minimales courtes résultent de l'utilisation de valeurs extrêmes (changements de grande amplitude) obtenues à partir de périodes courtes.</p> <p>Les résultats sont sensibles au choix des valeurs sélectionnées pour représenter les erreurs de mesure (E 1 et E 2). Les grandes limites d'erreur au numérateur de l'équation de rejet produisent un résultat similaire à celui des petites PE au dénominateur; par défaut au temps maximum PE.</p>
RL	<p>La régression linéaire est purement informatique (c'est-à-dire ne nécessite aucune analyse a priori), est basée sur des concepts statistiques acceptés et est facile à utiliser. De plus, RL utilise toutes les données pour calculer les taux.</p>	<p>L'un des principaux problèmes de RL est que, lorsque les positions du littoral sont regroupées, certaines dates auront plus d'influence sur la régression que d'autres. Par exemple, de nombreux ensembles de données à long terme se composent d'au moins une première position du littoral, obtenue à partir d'une feuille en T et d'un groupe de positions modernes, obtenues à partir de photographies aériennes. Les régressions calculées à partir de ces données entraînent des taux qui peuvent</p>

Chapitre II : Synthèse des méthodes et des techniques de suivi du trait de côte

		ne pas correspondre à l'équilibre entre l'ancienne date et une série de dates modernes, en particulier lorsque les dates modernes contiennent des informations sur les tendances plus récentes du changement de littoral
JK	JK est purement informatique et l'analyse inclut toutes les données, mais les résultats sont moins influencés par les clusters de données. La méthode JK fournit des valeurs quantitatives pour la variabilité des données et réduit l'influence des données extrêmes.	Les principaux inconvénients sont la quantité de calculs et la question de la valeur statistique ajoutée lors de l'utilisation d'un petit nombre de points de données sur le littoral.
LM D	lors de l'identification meilleure ajustement model	Suppose une tendance linéaire; sensible aux valeurs aberrantes statistiques
MC P	Incorpore les incertitudes dans la ligne de tendance; utilise des statistiques tests	Suppose une tendance linéaire; sensible aux valeurs aberrantes statistiques
ME A	Robuste aux statistiques aberrantes	Suppose une tendance linéaire; analyse identifie la gamme de pentes et intercepte

II.4. Les méthodes numériques :

II.4.1. Les modèles d'une ligne :

Les modèles à une seule ligne qui ont été utilisés avec succès dans diverses études pour calculer les taux de transport des sédiments le long des côtes et les modifications à long terme des rives (US CORPS ARMY OF ENGINEERS, 1992). Ces modèles reposent sur

Chapitre II : Synthèse des méthodes et des techniques de suivi du trait de côte

l'hypothèse que la forme géométrique du rivage ne change pas et que le déplacement ne se produit que perpendiculairement au rivage. Cela implique que le transport des sédiments est uniformément réparti sur la partie mobile du profil du rivage. La conservation de la masse des sédiments peut s'écrire comme suit, comme illustré dans la figure 7 ci-dessous (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1992):

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{1}{D_B + D_C} * \left(\frac{\Delta Q_1}{\Delta y} \pm q \right) = 0 \quad (11)$$

Où Q_1 est le taux de transport des sédiments le long de la côte, Δx est le changement de rivage dans la direction transversale, Δy est la longueur du segment de rivage, D_C est la profondeur de la fermeture au large, D_B est la hauteur de la crête de la berme, q est une source linéaire telle que les rivières et les falaises côtières ou les puits qui pourraient être causés par l'extraction de sable, et t est le temps. Par conséquent, le volume incrémentiel de sédiment dans le segment de rivage Δy est simplement $(D_B + D_C) \Delta x \Delta y$ (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1992).

Il est clair que le modèle de prévision du rivage ci-dessus est une fonction du taux de transport des sédiments le long de la côte, qui doit être calculé avant de pouvoir estimer le changement du rivage. Cela nécessite la détermination de l'angle des vagues déferlantes par rapport au rivage, puis l'utilisation d'un modèle de vagues, qui nécessite beaucoup de calculs.

Le modèle utilisé est le GENESIS (Generalized Model for Simulating Shoreline Change) développé par le CERC aux Etats-Unis est le modèle le plus abouti (COHEN et al, 2002).

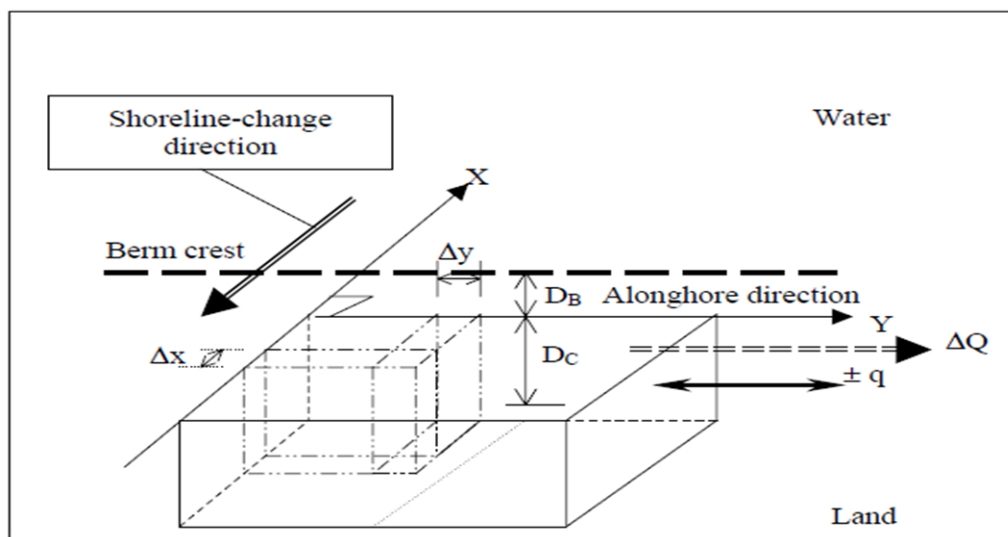


Figure 6: principe de la conservation de la masse sédimentaire dans le modèle d'une ligne de changement de rivage dans l'espace 3D.

II.4.2. Approche par la segmentation dynamique :

LI *et al.* (2001), LIU (1998) et ; SRIVASTAVA *et al.*, (2005) ont présenté des méthodes de la modélisation du changement littoral et de l'analyse dans le cadre d'un SIG en utilisant le concept de la segmentation dynamique. Ce concept était initialement fondé sur un modèle de données dans ArcInfo pour les éléments linéaires (trait de côte), où chaque tronçon le long du trait de côte pourrait être attribué précisément. De même, les points correspondants sur deux traits de côte peuvent être déterminés en fonction de la proportion de l'ensemble du littoral, et la mesure du recul littoral est donc représentée par la moyenne des distances mesurées entre les points correspondants sur les deux traits de côte.

Cette méthode établit la correspondance entre les rives en fonction du segment de rivage, ce qui s'adapte parfaitement à la nature d'un rivage servant d'interface entre la terre et l'eau.

L'association entre les segments correspondants sur les rives acquis respectivement aux temps k et $(k-1)$ est établie dans cette étude à l'aide du modèle mathématique suivant, illustré à la figure 1 ci-dessous:

$$S_{m,k} = C_{m,k,(k-1)} * S_{m,(k-1)} + \Delta_{m,k,(k-1)} \quad (12)$$

$$C_{m,k,(k-1)} = R_{m,k,(k-1)} * L_{m,k,(k-1)} \quad (13)$$

Où $S_{m,k}$ et $S_{m,(k-1)}$ sont les segments m sur les rives du temps k et $(k-1)$ respectivement. Les coefficients $C_{m,k,(k-1)}$ et $\Delta_{m,k,(k-1)}$ sont supposés être fonction des facteurs d'érosion suivants: forme du rivage, changement du niveau de l'eau, géologie du rivage ou types de sol, et structure de l'érosion.

Les coefficients $\Delta_{m,k,(k-1)}$ et $C_{m,k,(k-1)}$ représentent la translation et l'effet combiné de la rotation et de l'échelle sur le segment de rivage $S_{m,k,(k-1)}$, respectivement.

Le coefficient $R_{m,k,(k-1)}$ représente la rotation et $L_{m,k,(k-1)}$ est le facteur d'échelle appliqué par les facteurs d'érosion sur le segment $S_{m,(k-1)}$ donnant le segment $S_{m,k}$.

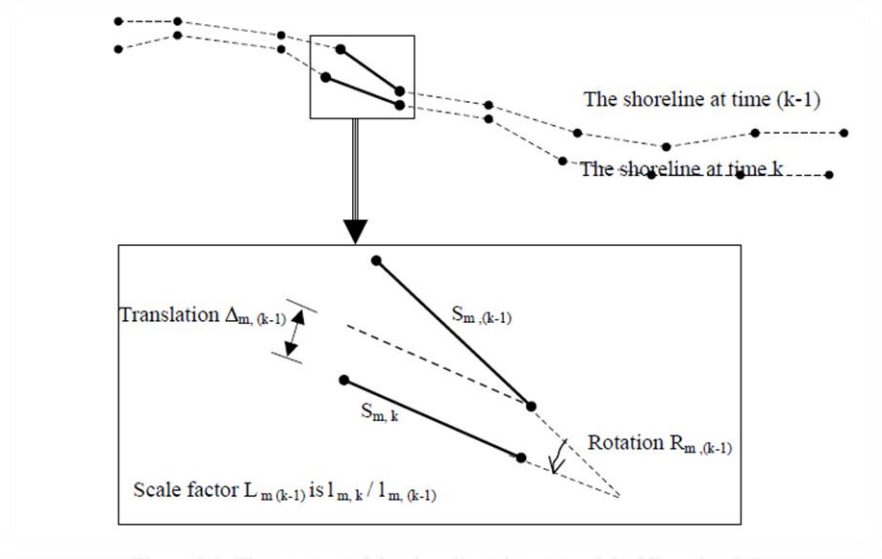


Figure 7: Concept du modèle de l'équation(1) basé sur le changement de rivage.

II.4.3.Approche basée sur la zone d'érosion :

ALI (2003) a suggéré une approche basée sur la zone d'érosion pour modéliser les changements littoraux. Cette méthode est très similaire à la méthode de segmentation dynamique, la différence entre les deux méthodes est que cette dernière calcule la zone d'érosion entre deux traits de côte qui est ensuite normalisée par la valeur moyenne des longueurs des deux traits de côte. Cette valeur peut être considérée comme l'une des solutions de mesure du recul du littoral.

II.4.4.Approche par tampon et l'estimation des moindres carrés non-linéaires :

Cette méthode proposée par HEO *et al.* (2009) intègre deux valeurs physiquement significatives, l'ampleur et la variabilité du recul de la côte, en fonction de la moyenne et l'écart-type des transects orthogonaux au littoral, respectivement. La mesure des transects orthogonaux et l'estimation de la moyenne et l'écart-type de ces transects sont calculées en utilisant respectivement le tampon et l'estimation des moindres carrés non-linéaires.

La proportion (p) de segments de ligne dans la distance tampon est :

$$P(X) = \frac{\text{Longueur des segments de ligne dans un tampon}}{\text{Longueur totale du littoral actuel}}$$

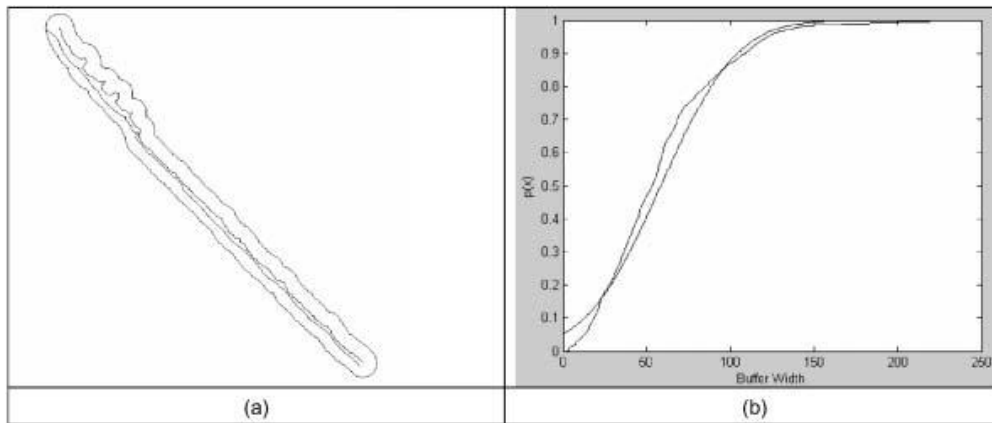


Figure 8: Calcul de la récession du littoral : (a) récession du littoral à l'aide d'une estimation non linéaire par la méthode des moindres carrés; (b) probabilité de distribution gaussienne par rapport à la proportion de segments de ligne dans la distance tampon.

II.4.5. La méthode polynomiale:

Les méthodes de taux de changement de rivage PX (polynôme dans la côte X) et PXT (polynôme dans la côte X et le temps) combinent les données de tous les transects le long d'une plage et le changement de rivage modèle pour toute la longueur de la plage par régression polynomiale.

Pour trouver le meilleur modèle pour décrire le changement se produisant sur une plage, une gamme de modèles possibles est testée, dont le nombre de paramètres et le type de fonction de base mathématique varient:

- Polynômes de Legendre (LX et LXT)
- Fonctions trigonométriques (péchés et cosinus) (RX et RXT)
- Composantes principales (vecteurs propres) des données de plage (EX et EXT).

Un critère d'information objective (IC) est utilisé pour trouver le «meilleur» modèle, c'est-à-dire le modèle le plus parcimonieux pour décrire le changement sur une plage. Le modèle avec le score IC le plus bas est le meilleur parmi les modèles testés.

FRAZER et al. (Sous presse) donne l'exemple simple d'une équation polynomiale (quadratique) qui pourrait être utilisée pour modéliser la variation des taux de changement de rivage le long des côtes:

$$y(x, t) = y(x, t_1) + (t - t_1)(a + bx + cx^2) \quad (14)$$

Les positions du rivage à l'emplacement x et le temps t est y et t₁ est la première position temporelle.

Les fonctions de base dans cette équation sont 1, x et x². Les paramètres a, b et c sont les coefficients des fonctions de base et sont calculés à l'aide d'une analyse de régression.

Chapitre II : Synthèse des méthodes et des techniques de suivi du trait de côte

En utilisant le code Matlab développé par FRAZER (sous presse) et GENZ (sous presse), de nombreux modèles possibles sont calculés pour les six types de modèle de fonction de base (trois PXT et trois PX). Les modèles varient dans le nombre de fonctions de base de chaque type (paramètres utilisés en combinaison linéaire).

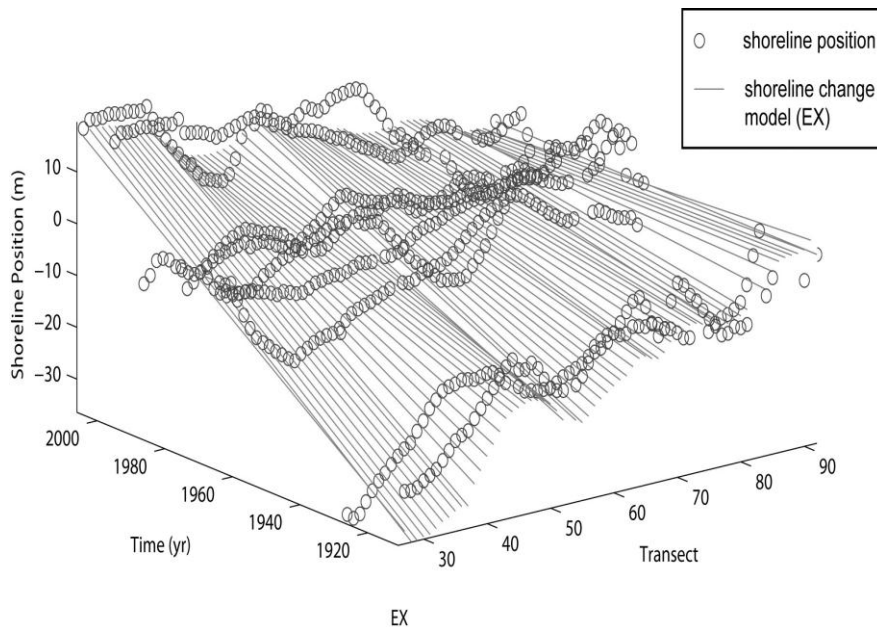


Figure 9: Modèle de changement de rivage PX (EX) pour la plage North Bellows. Les taux (pente) sont variables en permanence dans la direction mais sont constants (linéaires) dans le temps (pas d'accélération).

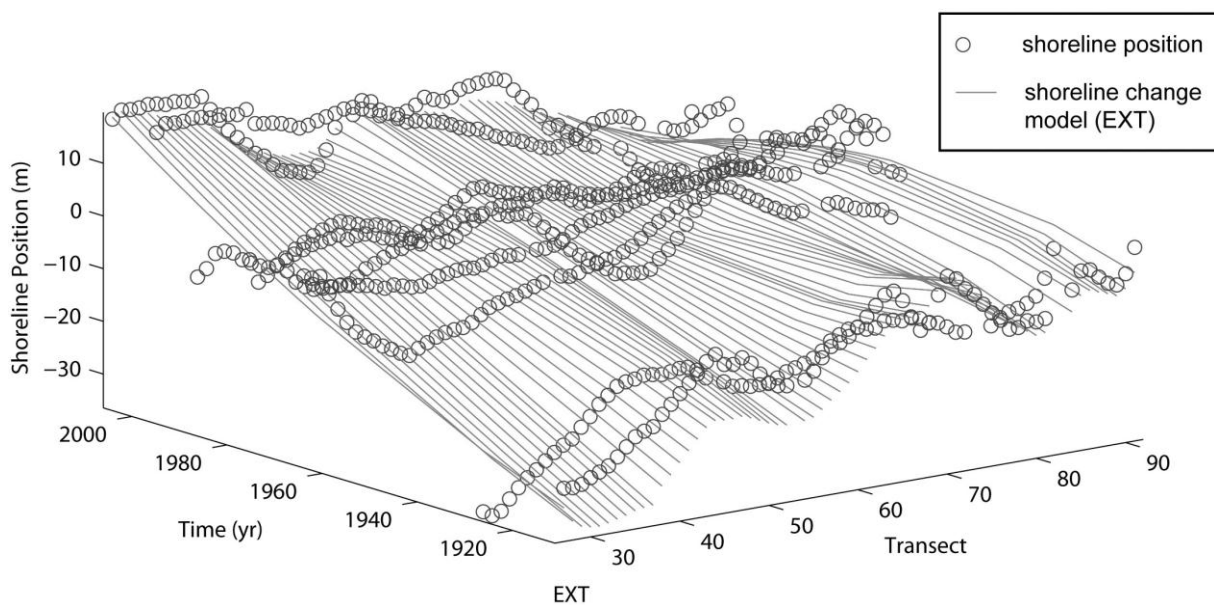


Figure 10: Modèle de changement de rivage PXT (EXT, comprenant l'accélération du taux en fonction du temps) pour la plage de North Bellows. Les taux (pente) varient continuellement dans le sens de la côte et dans le temps (accélération).

Chapitre II : Synthèse des méthodes et des techniques de suivi du trait de côte

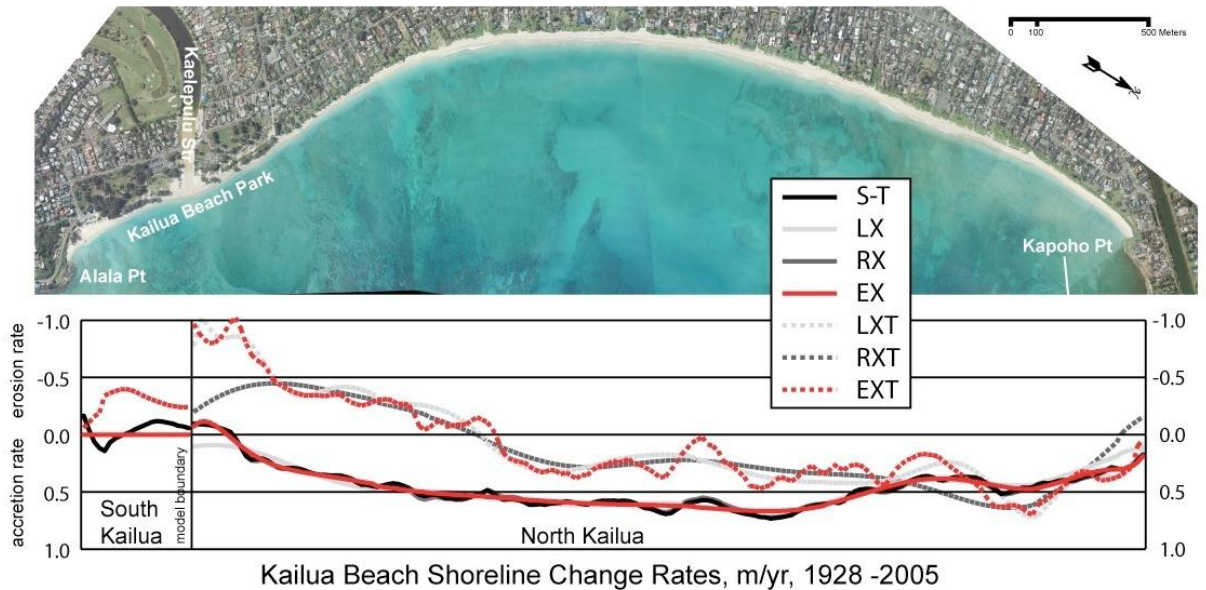


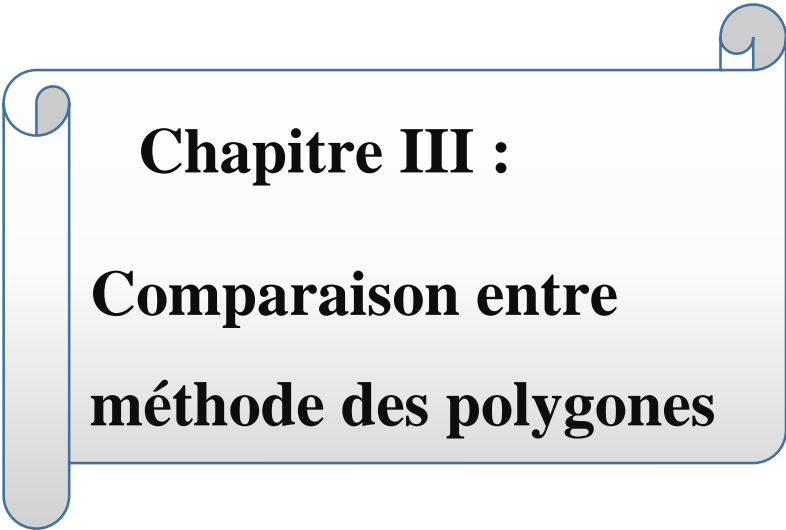
Figure 11: L'évolution du trait de côte de Kailua (m/an).

Tableau 3: les avantages et les inconvénients des méthodes numériques.

Méthodes	Avantages	inconvénients
Les modèles d'une ligne	Evaluation précise à court terme (1 an) visualisation de simulation	Manque de fiabilité car ne prend pas en compte tous les facteurs dynamiques d'un milieu
Approche par la segmentation dynamique	Il préserve les relations topologiques entre le littoral et les entités côtières, qui sont essentielles pour l'analyse spatiale	La que la distance mesurée de chaque segment n'est pas toujours la distance perpendiculaire, car les points correspondants de deux côtes sont déterminés en fonction de la proportion de la ligne entière.
Approche par tampon et l'estimation des moindres carrés non-linéaires	Il n'y a pas de composante subjective dans le calcul: une entrée de deux côtes génère une sortie de valeurs de récession du littoral. Il n'est pas nécessaire de faire	Si deux limites se croisent, leurs positions relatives se sont inversées partiellement le long de la ligne. Elles ne peuvent pas détecter cette transposition, ce qui entraîne des erreurs sur les

Chapitre II : Synthèse des méthodes et des techniques de suivi du trait de côte

	correspondre les points correspondants sur deux côtes, puisqu'il considère un littoral en entrée comme une variable aléatoire unique.	résultats.
La méthode polynomiale	PX et PXT produisent des taux de changement de rivage statistiquement plus importants que ST. PXT peut trouver une accélération du taux de changement de rivage avec le temps.	Les modèles PXT (et les modèles PX) ne peuvent pas identifier plusieurs événements d'érosion et d'accumulation dans un jeu de données. Pour ce faire, il faudrait adapter des modèles plus complexes (une sinusoïde, par exemple) à un ensemble limité de données sur le littoral, ce qui conduirait à un sur-ajustement des données. Les modèles PXT sont limités par leur incapacité à modéliser la décélération inévitable qui devrait suivre toute période de changement accéléré du rivage. Théoriquement, un taux qui continue d'accélérer dans le futur finira par devenir irréaliste. Par conséquent, les modèles PXT peuvent ne pas être appropriés pour prévoir les positions futures des rives à long terme (par exemple, 50 ans) sur la plupart des plages.



Chapitre III :
Comparaison entre
méthode des polygones

Deux méthodes bien connues, sont la méthode des transects (peut être effectuée par le système numérique d'analyse du littoral DSAS) et la méthode du polygone (peut être effectuée par ArcMap ou ArcPro)

Par conséquent, ce chapitre vise à caractériser la précision de la méthode des transects et de la méthode des polygones en ce qui concerne la quantification des taux de variation sur le littoral dans les zones côtières sujettes aux processus érosifs.

III.1. La méthode des transects :

Selon Albuquerque, *et al*, Le DSAS a été développé par l'USGS et est réalisé par le logiciel ARCGIS®. Il permet aux utilisateurs de calculer les taux de variation sur le littoral à l'aide de lignes de surveillance tracées perpendiculairement (transects) au tronçon côtier surveillé.

L'agence fédérale de gestion des urgences (FEMA) a utilisé l'approche du transect et la considère comme la méthode standard pour déterminer les taux de changement côtier à long terme et les zones à risque côtier exposées à une forte érosion (CROWELL et AL. 1991).

Le terme transect désigne pour les géographes « un dispositif d'observation de terrain ou la représentation d'un espace, le long d'un tracé linéaire et selon la dimension verticale, destiné à mettre en évidence une superposition, une succession spatiale ou des relations entre phénomènes » (MIRIE-CLAIRE ROBIC).

La méthode du transect a été appliquée avec succès dans différentes études (DOUGLAS et AL. 1998 ; FENSTER et AL. 2001) et continue à être utilisée pour mesurer les changements d'accrétion et d'érosion le long du littoral (WRIGHT et AL. 2007).

L'approche des transects est une approche qui permet, en termes de suivi de la frange côtière, de mesurer le taux de variation du trait de côte, alors que la procédure est basée sur « la génération de lignes perpendiculaires équidistantes (transects) tracées sur une ligne de base, une ligne parallèle aux rives dont la ligne d'eau » (MIGUEL ALBUQUERQUE et al. 2012), où la ligne de base ou la ligne de référence suit parallèlement la trajectoire globale du rivage (figure 14).

Chapitre III : Comparaison entre méthode des polygones

Une intersection entre les transects et les autres lignes de côte pour des dates différentes permet de déterminer la position de variation du trait de côte en calculant la distance linéaire entre les points d'intersection de deux lignes de côte et d'un certain transect. En conséquence, le taux de variation du rivage est calculé pour chaque transect à chaque date. Elle peut être effectuée par le système numérique d'analyse du trait de côte (DSAS).

Cette méthode est basée sur une technique statistique de nature similaire, appelée « end-point-rate », dans laquelle la distance entre deux lignes de côte est divisée par le temps écoulé entre les deux (CROWELL et AL. 1997).

La valeur estimée de l'érosion côtière sur une certaine période est ensuite obtenue par la moyenne arithmétique des valeurs de la variation du rivage calculées pour chaque transect.

Le calcul du coefficient de détermination (R^2) est obtenu par une droite de régression linéaire dans la méthode de moindre carré (LSM).

Où R^2 , le **coefficient de détermination (R^2)** détermine à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points lors de l'établissement d'une équation de régression.

Si le R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0% de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé n'explique absolument pas la distribution des points.

Si le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100% de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé, ainsi que les paramètres a et b (modèle linéaire $Y=a+bX$) calculés sont ceux qui déterminent la distribution des points.

Cela se traduit de manière graphique selon la relation suivante :

Plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points est diffus autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se rapproche de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, $R^2=1$ (www.lexique.netmath.ca).

Dans le cas du DSAS, la valeur de R^2 montre la précision de la méthode en ce qui concerne le calcul du taux de variation du rivage et sa valeur finale d'érosion ou accumulation pour la ligne d'intérêt. Pour la base de données, cette valeur est obtenue par la moyenne arithmétique

simple de toutes les valeurs de R^2 pouvant être trouvée pour toutes les lignes perpendiculaires (transects) analysées (MIGUEL ALBUQUERQUE et AL. 2012).

La distance réelle se mesure par la longueur du transect entre la ligne de base et la position de l'intersection de l'ancien rivage, moins la longueur du transect entre la ligne de base et le rivage le plus jeune. Si le point d'intersection le plus proche de la ligne de base appartient à l'ancienne rive, la mesure est négative, indiquant un changement de rive en érosion ; sinon, la mesure est positive, indiquant un changement de rivage au niveau du dépôt (MARTYN. J. SMITH et ROBERT. G. COMLEY. 2012).

III.2.La méthode des polygones :

Pour éviter les difficultés associées à la mise en œuvre de la méthode des transects à partir de la ligne de base, une approche alternative est proposée basée sur une géométrie de calcul différente (MARTYN. J. SMITH et ROBERT. G. COMLEY. 2012). Cette approche est appelée « l'approche de polygone ».

Les entités spatiales traitées dans l'analyse et la planification sont souvent représentées sous forme de polygones dans les SIG...les polygones sont créés artificiellement dans le SIG par des opérations spatiales : polygones de Thiessen, régions tampons, lignes de contour, etc. (YUKIO SADAHIRO. 2000).

Au lieu d'utiliser une ligne de base arbitraire comme base d'analyse comparative, l'approche de polygone utilise deux côtes distinctes pour créer une topologie de polygone représentant la différence de surface totale entre deux côtes (MARTYN. J. SMITH et ROBERT. G. COMLEY. 2012).

La méthode de polygone est basée sur la création de polygones avec des lignes de différentes périodes, peut être utilisée pour calculer la superficie de la région étudiée et la comparer à celle d'autres périodes (ALBUQUERQUE, et AL 2013).

La méthode des polygones est basée sur l'élaboration de polygones et sur l'algèbre polygonale : deux lignes de côte (une ligne de base et celle de l'année d'intérêt) sont utilisées pour déterminer les zones érodées ou accumulées et les taux de variation dans une zone donnée. L'approche de polygones utilise deux côtes distinctes pour créer une topologie de polygone représentant la différence de surface totale entre deux côtes. Lorsque les deux rives se croisent, elles créent une série de polygones représentant des régions en alternance, de recul et d'avancée du trait de côte (figure 16). Dans la méthode des polygones, la zone

Chapitre III : Comparaison entre méthode des polygones

d'évolution entre deux côtes est quantifiée - toutes les portions des deux rivages sont utilisées dans le calcul de la superficie. Ce polygone complexe peut être décomposé en une série de polygones simples représentant des zones d'évolution négative (où le trait de côte le plus récent est tombé à l'intérieur des terres de la bande littoral la plus ancienne) et d'évolution positive (où le trait de côte le plus récent se situe au large de la bande littoral la plus ancienne) (MARTYN. J. SMITH et ROBERT. G. COMLEY. 2012).

Dans la méthode des polygones, l'indicateur du trait de côte vectorisé sur une photo aérienne ou une image satellite (appelée ligne de base ou ligne de référence) est utilisé pour générer et calculer les polygones. Chaque processus comprenait les éléments suivants : la ligne de base (la ligne de référence), la ligne de côte de l'année d'intérêt et deux lignes qui limitaient la zone d'étude (lignes de fermeture/ closure lines) qui sont orthogonales à la ligne de base (ALBUQUERQUE et AL. 2013).

Afin de créer des polygones, nécessaires à l'application de la méthode, les lignes perpendiculaires qui délimitent l'aire (lignes de fermeture) doivent intersecter la ligne de base et la ligne de l'année d'intérêt afin de générer un polygone entre la date analysée et la ligne de base.

Ce processus doit être réalisé pour chaque intervalle « ligne de base – ligne de l'année d'intérêt ».

Pour calculer la surface érodée ou accumulée, dans chaque intervalle analysé, le polygone résultant de la date la plus ancienne doit être soustrait de celui résultant de la plus récente. La valeur de la zone finale, en mètres carrés, représente la zone érodée ou accumulée pendant cette période. Compte tenu que chaque polygone soustrait est homogène, la zone érodée ou accumulée trouvée après la soustraction de chaque polygone sera divisée par l'extension du tronçon qui correspond à la ligne d'intérêt ; la valeur moyenne d'évolution entre les deux lignes de côte au cours de la période analysée sera ensuite déterminée. Afin de déterminer le taux de variation annuelle, la valeur de variation sera divisée par l'intervalle, en années.

La détermination du coefficient R^2 est basée sur la régression linéaire, par la méthode LSM³ (Least Square Method), des taux de variation de rivage en fonction de l'intervalle de temps. La régression est basée sur certains polygones. Pour chaque date, le taux de variation moyen de l'ensemble du littoral analysé est déterminé en mètres / an.

³ La méthode des moindres carrés (LSM) est une procédure permettant de déterminer la meilleure ligne d'ajustement aux données.

Chapitre III : Comparaison entre méthode des polygones

Ce taux général est obtenu par la moyenne arithmétique de tous les taux extraits de chaque polygone soustrait. La régression linéaire, par la méthode LSM, pour le croisement de chaque taux de variation et son intervalle de temps respectif génère un coefficient R^2 pour la variation du littoral au fil du temps. Plus le R^2 tend vers 1 (de zéro à 1), plus le nombre de mesures pouvant expliquer leur variabilité par le modèle de régression estimé est élevé. Cela représente la capacité de la méthode employée d'expliquer la variabilité du rivage dans la zone d'étude. (ALBUQUERQUE et AL, 2013).

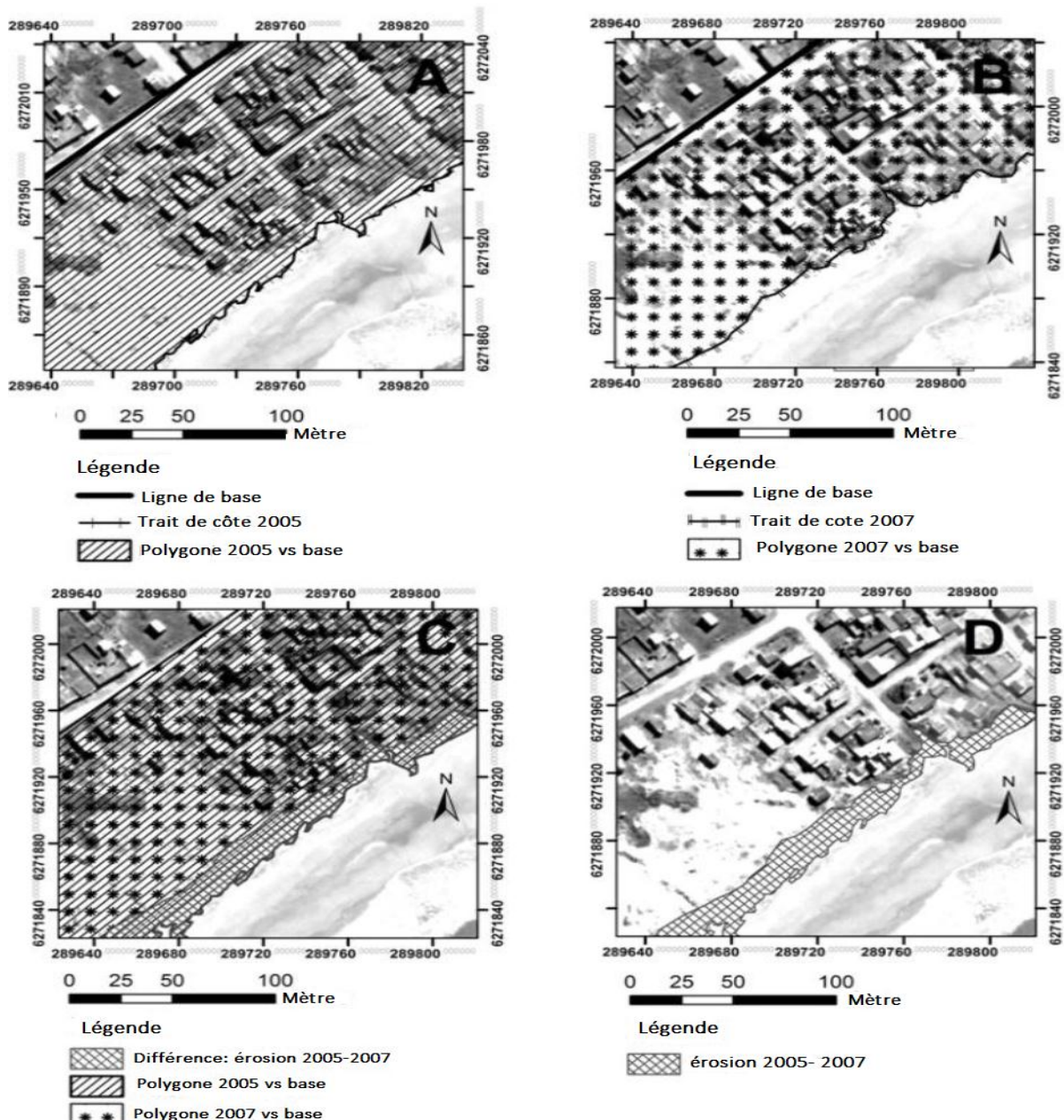


Figure 12: Un exemple d'un cas d'étude pour la caractérisation de la méthode des polygones (source : Journal of Coastal Research, ALBUQUERQUE et al 2013).

Par ailleurs, selon MARTYN J. SMITH et ROBERT G. CROMLEY, la longueur du tronçon du trait de côte (utilisé comme dénominateur) est indispensable pour l'estimation du taux de variation du rivage. Cependant, l'estimation de celle-ci est ambiguë, par la suite deux solutions sont proposées. La première consisterait à la division de la zone par la longueur moyenne des deux rivages.

La deuxième est basée sur l'estimation de la longueur du centre de chaque polygone soustrait (polygone représentant la surface de variation), par cela, il est nécessaire de créer une ligne représentant l'axe médian de l'ensemble du polygone.

Comme Blum l'a défini en 1967, un axe médial est le lieu des points centraux des plus grands cercles qui peuvent être complètement contenus dans une forme plus grande.

Dans la mesure où l'axe médial d'un polygone est un type de diagramme de Voronoï, il peut être approximé par la création de **polygones de Thiessen** (ou Voronoï) associées à des points centraux dans un processus en plusieurs étapes.

- **Définition de polygone de Thiessen :**

L'outil Thiessen permet de diviser et de distribuer proportionnellement une couverture de points dans des régions connues sous le nom de polygones de Thiessen ou de Voronoï.

Un diagramme de Voronoï (polygones de Voronoï) représente une décomposition particulière d'un espace métrique déterminée par les distances à un ensemble discret d'objets de l'espace, en général un ensemble discret de points.

Tout d'abord, des points sont ajoutés le long de chaque segment de ligne représentant l'angle du polygone qui représente à son tour la surface variée. Plus la densité de points est grande, plus le diagramme de Thiessen se rapproche d'un véritable axe médian. Un diagramme de Thiessen doit être calculé pour les polygones soustrait (figure 19).

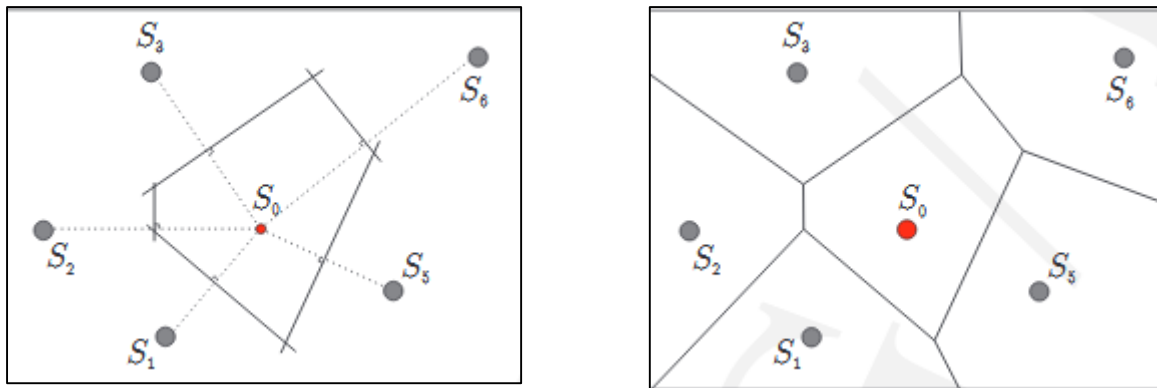


Figure 13: construction et découpage de polygone de Thiessen.
(Pierre.Bosser@ensg.eu).

Les polygones résultants sont ensuite convertis en segments linéaires individuels et les segments qui entrent complètement dans le polygone soustrait d'origine ou qui se connectent à un point de croisement sont conservés et convertis en une couche de segment linéaire distincte. La ligne médiane de chaque polygone de modification simple est maintenant définie comme le chemin le plus court sur son axe médian qui relie les deux points de croisement de ce polygone soustrait (MARTYN J. SMITH et ROBERT G. CROMLEY) (figure 20).

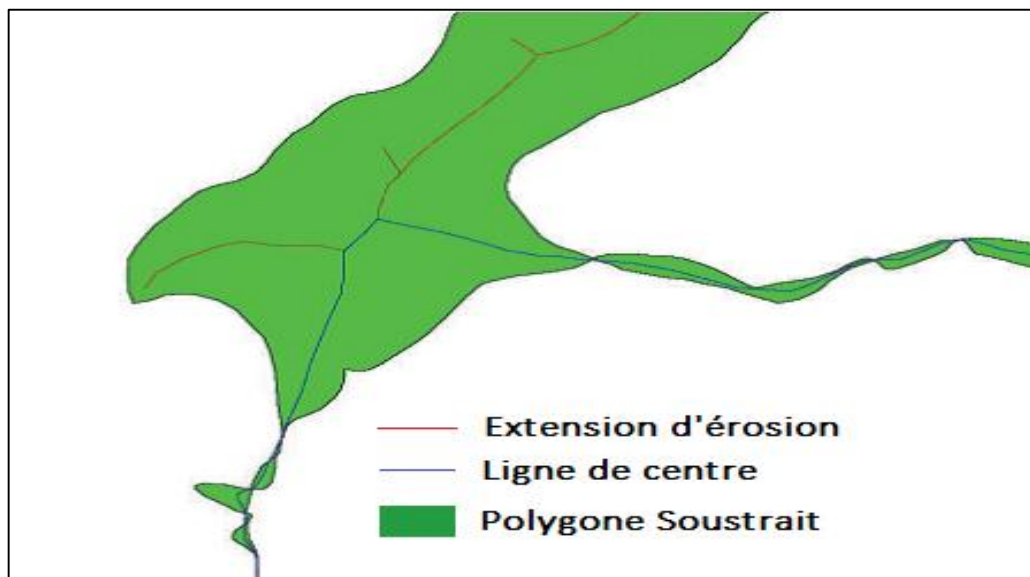


Figure 14: Codage des segments squelettiques dans un axe médian (les lignes bleues indiquent la ligne médiane ; les lignes rouges indiquent les longueurs de ligne perdues en raison d'une érosion) (MARTYN J. SMITH et ROBERT G. CROMLEY).

Cette ligne médiane est la ligne la plus généralisée que l'une ou l'autre des deux rives d'origine et sa longueur est inférieure à la longueur moyenne des deux rives.

III.3. Les avantages et les inconvénients des deux méthodes :

Selon une étude faite par Albuquerque et al en 2013, les résultats obtenus par la méthode des transects en utilisant le DSAS, ont montré un coefficient de détermination (R^2) de 13% (0,13) qui se rapproche de 0% (0) ce qui montre une faible corrélation statistique, en revanche, pour la méthode des polygones le coefficient de détermination (R^2) était de 94% (0,94) qui se rapproche de 100% (1) ; il a montré une bonne corrélation entre les données.

La faible corrélation statistique et la non représentation du processus de variation dans un modèle de régression linéaire suscite des doutes quant aux taux de variation de la zone côtière obtenus par la méthode des transects en utilisant le DSAS.

D'une manière ou d'une autre, les deux méthodes montrent une variabilité côtière. Cependant, la méthode des transects est plus sujet aux erreurs dans la détermination des taux de variation puisqu'elle prend en compte la mesure ponctuelle de la variabilité dans un certain secteur de la côte (ALBUQUERQUE et AL, 2013).

Bien que les deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients, la méthode des polygones s'est avérée plus efficace pour déterminer les taux de variation réels dans les zones côtières soumises à des processus qui influent la dynamique du trait de côte. Cette méthode permet non seulement d'obtenir les taux de variation linéaire du littoral, mais elle permet également d'estimer toutes les zones érodées (MARTYN J. SMITH et ROBERT G. CROMLEY).

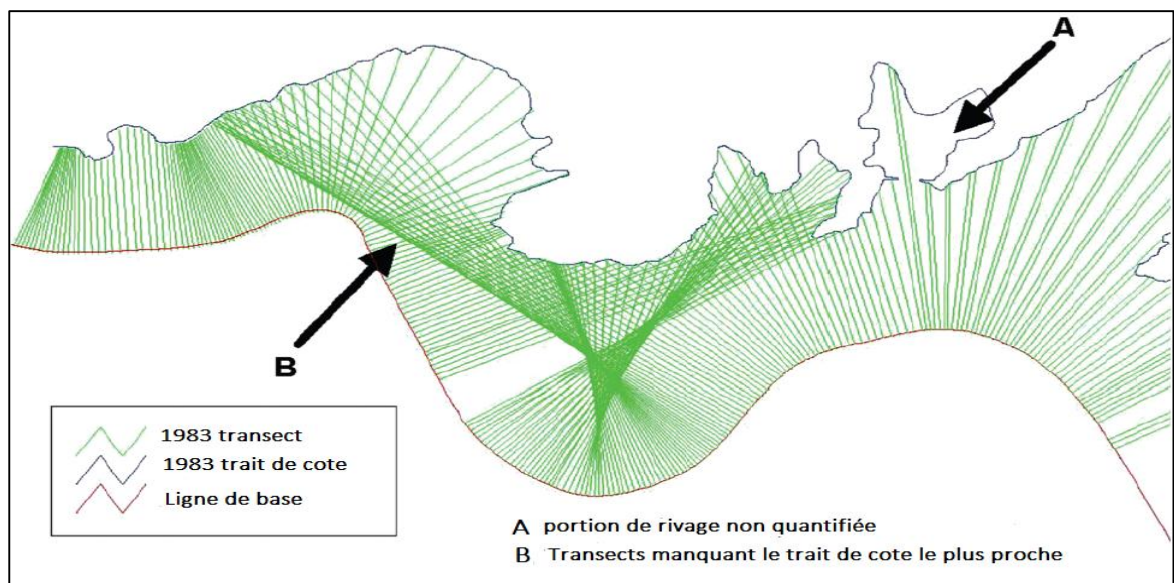


Figure 15: Problèmes liés à l'approche par transect (la situation A montrée une partie du rivage sans transects ; la situation B montre des transects se croisant et manquant la partie la plus proche du rivage).

Chapitre III : Comparaison entre méthode des polygones

Tableau 4 : Tableau comparatif entre la méthode des polygones et la méthode transects.

Méthode	Avantage	Inconvénient
Polygone	<ul style="list-style-type: none"> -aucune région de changement n'est laissée non quantifiée. - la méthode du polygone de changement ne montre aucun biais en ce qui concerne les variations isolées, il s'est avéré plus efficace de calculer les taux de variation. -elle prend en compte l'ensemble du tronçon côtier où l'espacement entre les lignes perpendiculaires n'est pas pris en compte pour calculer l'érosion dans la méthode des transects. -elle s'est avéré très utile de quantifier les zones réellement variées. 	<ul style="list-style-type: none"> - la ligne médiane peut surestimer la largeur de la variation du trait de côte (avancée ou recul). -l'ambiguïté dans l'estimation de la longueur du trait de côte utilisée comme dénominateur pour estimer le taux de variation. - la meilleure ligne de base pour un rivage peut ne pas correspondre correctement au second rivage dans l'analyse de variation.
Transects	<ul style="list-style-type: none"> -Généralement cette méthode donne de bonnes estimations de trait de côte. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le tri de la ligne de référence peut affecter les résultats produits par cette méthode. -plus l'échelle de laquelle dépend la longueur du trait de côte augmente, plus les détails sont plus irréguliers. - la généralisation de la ligne de référence peut éliminer des détails très important dans le trait de côte tels que les baies. -les transects peuvent ne pas atteindre le point de côte le plus proche, mais plutôt se croiser (situation B sur la figure). -dans certains cas, la relation spatiale entre le trait de côte et la ligne de référence est inadéquate et la perpendicularité des transects sur la ligne de référence peut engendrer des problèmes considérables lors de l'analyse tels qu'il est mentionné au-dessus. - de grandes longueurs d'un trait de côte peuvent être omises dans le processus de mesure (situation A sur la figure). - Les résultats obtenus par cette méthode peuvent amener des résidus de régions non atteintes par les transects ce qui permet d'une certaine manière d'affecter les statistiques finales en surmontant le taux de variation.



**Conclusion et
recommandations**

Le trait de côte est la ligne qui sépare deux milieux de nature absolument différente qui représentent des ressources naturelles très riches que l'homme peut exploiter par la suite son étude est cruciale, elle permet de comprendre leur comportement.

Nous avons classées les méthodes de suivi du trait de côte en méthodes expérimentales, numériques et statistiques en raison de leurs critères et modes d'utilisations. Les méthodes expérimentales sont à leur rôle divisé en levés topographique, aérien et satellite selon l'instrument utilisé, in situ ou à distance. Ensuite les données acquises, avant l'étape d'intégration dans le système d'information géographique et d'extraction du trait de côte de chaque année ainsi que le calcul du taux de variation de rivage, nécessitent un traitement numérique tel que l'ortho rectification, dans le but de corriger les déformations dues à différents facteurs et qui influent directement la précision des résultats finaux.

Après la détermination de la position future du littoral avec toutes les méthodes statistiques possibles et des bases appropriées, les cas les plus possibles et les plus fiables, en fonction des précisions estimées et de la tendance générale de la côte, sont choisis. Ce meilleur résultat reste un choix dépendant de l'expert et dépend directement de la résolution des données de rivage dans le temps et dans l'espace.

Pour les futurs chercheurs et les études ultérieures, y compris les études d'ingénierie, de planification, de gestion et de protection dans les zones côtières, l'établissement d'une base de données contenant des positions plus fréquentes sur le littoral avec différents régimes saisonniers sera très utile lors de l'analyse des changements à court et à long terme tendances des rivages et en se rapprochant des futures positions du rivage.

Il existe deux méthodes principales pour délimiter et calculer la surface du littoral variée avec le temps, la méthode des transects qui est la plus ancienne et celle des polygones, toutes les deux présentent des avantages et des inconvénients, d'une manière ou d'une autre, les deux méthodes montrent une variabilité côtière. Cependant, selon des études faites par des spécialistes, la méthode des polygones offre la capacité de calculer toute la zone variée sans laisser aucune partie, en revanche la méthode des transects est plus sujette aux erreurs dans la détermination des taux de variation.

Tout ceci a permis de déduire à la fin de notre étude que le suivi de l'évolution du trait de côte et de tout le domaine littoral est une combinaison d'un ensemble de techniques technologiques,

Conclusion et recommandation

numérique et statistique, ainsi qu'un ensemble de sciences topographique, géographique, informatique et cartographique qui ont été développés peu à peu avec le temps jusqu'à arriver à des techniques et outils de haute qualité qui permet aux spécialistes d'étudier cet environnement complexe. Cependant, il implique une connaissance approfondi de ce système naturel et une coordination multidisciplinaire afin d'arriver à des résultats meilleurs et une gestion adéquate de ce milieu riche et fragile dans un contexte de développement durable.

Conclusion et recommandation

Nous recommandons les points suivants :

Pour une meilleure précision avec le GPS il est recommandé d'utiliser plusieurs satellites. Alors qu'il faut utiliser plus de trois satellites afin d'obtenir un affichage de trois dimensions (3D) sur l'appareil lors de la mesure dans le but de garantir une bonne précision

La qualité d'images très haute résolution fournies par LIDAR est la meilleure à moins qu'elle soit la plus coûteuse.

Le littoral est très dynamique. Ainsi, la délimitation du rivage à partir de données satellitaires haute résolution sera plus précise que celle des données satellitaires à résolution moyenne. Les modèles PR et RL ont été utilisés la prévision de rivage, mais des modèles tels que Le taux moyen, Jackknifing (JK), la régression linéaire pondérée, peuvent être testés pour la prévision de rivage. La mise en place de structures côtières et le boisement de forêts de mangroves sont nécessaires pour protéger le continent contre le taux élevé d'érosion côtière.

Les méthodes des polygones et la méthode des transects, représentent toutes les deux un moyen de mesure de l'évolution du trait de côte et donnent de bons résultats. Cependant l'utilisation de la méthode des polygones estimant que c'est la méthode la plus opérationnelle car la méthode des transects est plus sujette aux erreurs.

D'après nos recherche et d'une manière générale nous présumons que tous les outils de topographie donne des résultats fiables, toutefois, avec une différence de précision. Pour une utilisation adéquate de l'un de ces outils, il est impératif d'identifier : le type de côte et l'indicateur du trait de côte qu'on peut relever.

Perspectives :

Pour l'étude de l'évolution du trait de côte, les drones offrent la possibilité d'acquisition des images aériennes à très haute résolution si on travaille à une échelle spatiale réduite.

Pour l'étude diachronique de l'évolution du trait de côte, les levés aériens sont les plus adéquats car les levés terrestres ne sont pas représentatifs pour un suivi sur une série temporelle.

Les repères de terrain peuvent être complémentaires de tous les types de levés car ils servent de points de référence invariants lors d'un levé cartographique.

D'ailleurs un nouveau modèle numérique à complexité réduite nommé LX-Shore, permettant de simuler les évolutions du trait de côte le long des littoraux sableux, sur des échelles de

Conclusion et recommandation

temps allant de l'heure à quelques décennies, et avec des temps de calcul très réduits. En plus LX-Shore est couplé avec le modèle spectral de vagues SWAN pour simuler la transformation des vagues au-dessus de bathymétries complexes et assurer une rétroaction de l'évolution du trait de côte sur la propagation des vagues et par la suite cet outil ouvre la voie vers : -

- une meilleure évaluation des processus physiques contrôlant les évolutions du trait de côte et de leurs contributions respectives,
- et la réalisation de projections.



Bibliographie

Bibliographie :

Addo, K. A., M. Walkden, et al. (2008). "Detection, measurement and prediction of shoreline recession in Accra, Ghana." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63(5): 543-558.

Albuquerque, M., J. Espinoza, et al. (2013). "Erosion or coastal variability: An evaluation of the DSAS and the change polygon methods for the determination of erosive processes on sandy beaches." *Journal of coastal research* 65(sp2): 1710-1714.

Alvarez, F. and S. Pan (2014). "Modelling long-term coastal morphology using EOF method." *Coastal Engineering Proceedings* 1(34): 65.

Alvarez, F. and S.-q. Pan (2016). "Predicting coastal morphological changes with empirical orthogonal function method." *Water Science and Engineering* 9(1): 14-20.

Andrade, F. and M. A. Ferreira (2006). "A Simple Method of Measuring Beach Profiles." *Journal of Coastal Research*: 995-999.

Arias Moran, C. A. (2004). *Spatio-temporal analysis of Texas shoreline changes using GIS technique*, Texas A&M University.

Beckers, J.-M. and M. Rixen (2003). "EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets." *Journal of Atmospheric and oceanic technology* 20(12): 1839-1856.

Bilaşco, Ş., C. Horvath, et al. (2009). "Implementation of the USLE model using GIS techniques. Case study the Someşean Plateau." *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 4(2): 123-132.

Boak, E. H. and I. L. Turner (2005). "Shoreline definition and detection: a review." *Journal of coastal research*: 688-703.

Chand, P. and P. Acharya (2010). "Shoreline change and sea level rise along coast of Bhitarkanika wildlife sanctuary, Orissa: an analytical approach of remote sensing and statistical techniques." *International Journal of Geomatics and Geosciences* 1(3): 436.

Chen, L. (1998). "Detection of shoreline changes for tideland areas using multi-temporal satellite images." *International Journal of Remote Sensing* 19(17): 3383-3397.

Chen, S.-s., L.-f. Chen, et al. (2005). "Remote sensing and GIS-based integrated analysis of coastal changes and their environmental impacts in Lingding Bay, Pearl River Estuary, South China." *Ocean & coastal management* 48(1): 65-83.

Chen, W.-W. and H.-K. Chang (2009). "Estimation of shoreline position and change from satellite images considering tidal variation." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 84(1): 54-60.

Costa S., Delahaye D. (2002). *Pérennité des plages de galets de l'espace Rives-Manche (beach Erosion of the Rives Manche). Rapport final. Préfecture de Haute-Normandie. Programme Européen Interreg II.*

Cousin, A. (2011). "Propositions pour une stratégie nationale de gestion du trait de côte, du recul stratégique et de la défense contre la mer, partagée entre l'État et les collectivités territoriales." Rapport au gouvernement 60.

Crowell, M., B. C. Douglas, et al. (1997). "On forecasting future US shoreline positions: a test of algorithms." *Journal of coastal research*: 1245-1255.

Crowell, M., S. P. Leatherman, et al. (1991). "Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy." *Journal of coastal research*: 839-852.

Crowell, M., S. P. Leatherman, et al. (1993). "Shoreline change rate analysis: long term versus short term data." *Shore and Beach* 61(2): 13-20.

Dabees, M. and J. W. Kamphuis (1999). ONELINE, a numerical model for shoreline change. *Coastal Engineering* 1998: 2668-2681.

De Vriend, H. J., M. Capobianco, et al. (1993). "Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review." *Coastal Engineering* 21(1-3): 225-269.

Dean, R. G. (1991). "Equilibrium beach profiles: characteristics and applications." *Journal of coastal research*: 53-84.

Dolan, R., M. S. Fenster, et al. (1991). "Temporal analysis of shoreline recession and accretion." *Journal of coastal research*: 723-744.

Douglas, B. C., M. Crowell, et al. (1998). "Considerations for shoreline position prediction." *Journal of coastal research*: 1025-1033.

Doukakis, E. "INTERGENERATIONAL EQUITY OF THE COASTAL AREAS."

Doukakis, E. and N. Petrelis (2011). "Recursive Filter for Coastal Displacement Estimation." World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering 5(11): 1712-1716.

Doukakis, E. and N. Petrelis (2011). "Recursive Filter for Coastal Displacement Estimation." World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering 5(11): 1712-1716.

Emery, K. (1961). "A simple method of measuring beach profiles." Limnology and oceanography 6(1): 90-93.

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

Faye, I. B. N., A. Hénaff, et al. (2008). "Évolution du trait de côte à Nouakchott (Mauritanie) de 1954 à 2005 par photo-interprétation." Norois. Environnement, aménagement, société(208): 11-27.

Galgano, F. A., B. C. Douglas, et al. (1998). "Trends and variability of shoreline position." Journal of coastal research: 282-291.

Heo, J., J. H. Kim, et al. (2009). "A new methodology for measuring coastline recession using buffering and non-linear least squares estimation." *International Journal of Geographical Information Science* 23(9): 1165-1177.

Heo, J., J. H. Kim, et al. (2009). "A new methodology for measuring coastline recession using buffering and non-linear least squares estimation." *International Journal of Geographical Information Science* 23(9): 1165-1177.

Honeycutt, M. G., M. Crowell, et al. (2001). "Shoreline-position forecasting: impact of storms, rate-calculation methodologies, and temporal scales." *Journal of coastal research*: 721-730.

Horritt, M. and P. Bates (2001). "Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach." *Hydrological processes* 15(5): 825-842.

Hsu, T.-W., C.-D. Jan, et al. (2006). "Analysis and prediction of riverbed changes using empirical orthogonal functions." *Journal of Hydraulic Research* 44(4): 488-496.

Huang, D. and K. Andreasen (2005). Tachometer, Google Patents.

Kraus, N. C. and S. Harikai (1983). "Numerical model of the shoreline change at Oarai Beach." *Coastal Engineering* 7(1): 1-28.

Kuleli, T. (2010). "Quantitative analysis of shoreline changes at the Mediterranean Coast in Turkey." *Environmental Monitoring and Assessment* 167(1-4): 387-397.

Le Mehaute, B. and M. Soldate (1978). Mathematical modeling of shoreline evolution. *Coastal Engineering* 1978: 1163-1179.

Liu, H., D. Sherman, et al. (2007). "Automated extraction of shorelines from airborne light detection and ranging data and accuracy assessment based on Monte Carlo simulation." *Journal of coastal research*: 1359-1369.

Loubersac, L., P. Lazure, et al. (2003). "Communication de l'information géographique maritime et côtière pour la gestion d'une crise environnementale: le naufrage du chimiquier «Ievoli Sun» en Centre Manche." *Revue Internationale de Géomatique* 12(3).

Maiti, S. and A. K. Bhattacharya (2009). "Shoreline change analysis and its application to prediction: a remote sensing and statistics based approach." *Marine Geology* 257(1-4): 11-23.

Morton, R. A., M. P. Leach, et al. (1993). "Monitoring beach changes using GPS surveying techniques." *Journal of coastal research*: 702-720.

Muñoz-Pérez, J. J., R. Medina, et al. (2001). "Evolution of longshore beach contour lines determined by EOF method." *Scientia Marina* 65(4): 393-402.

Muraz, J., S. Durrieu, et al. (1999). "Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG?" *Ingénieries-EAT*(20): p. 39-p. 58.

Pardo-Pascual, J. E., J. Almonacid-Caballer, et al. (2012). "Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision." *Remote Sensing of Environment* 123: 1-11.

Pilkey, O. H. and T. W. Davis (1987). "An analysis of coastal recession models: North Carolina coast."

Raju, D., K. Santosh, et al. (2010). "Coastline change measurement and generating risk map for the coast using geographic information system." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38(part II): 492-497.

Reeve, D. E., J. M. Horrillo-Caraballo, et al. (2008). "Statistical analysis and forecasts of long-term sandbank evolution at Great Yarmouth, UK." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 79(3): 387-399.

Rey-Valette, H., P. Carbonnel, et al. (2006). "L'apport de la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) à la gestion de l'érosion côtière: intérêt et exemple en Méditerranée française." *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement* 7(3).

Romine, B. M., C. H. Fletcher, et al. (2009). "Historical shoreline change, southeast Oahu, Hawaii; applying polynomial models to calculate shoreline change rates." *Journal of coastal research*: 1236-1253.

Romine, B. M., C. H. Fletcher, et al. (2009). "Historical shoreline change, southeast Oahu, Hawaii; applying polynomial models to calculate shoreline change rates." *Journal of coastal research*: 1236-1253.

Romine, B. M., C. H. Fletcher, et al. (2009). "Historical shoreline change, southeast Oahu, Hawaii; applying polynomial models to calculate shoreline change rates." *Journal of coastal research*: 1236-1253.

Romine, B. M., A. Genz, et al. "CALCULATING SHORELINE CHANGE RATES: APPLYING THE NEW PX AND PXT METHODS."

Schupp, C. A., E. R. Thieler, et al. (1994). Mapping and analyzing historical shoreline changes in Massachusetts. Proceedings of CoastGIS.

Schupp, C. A., E. R. Thieler, et al. (1994). Mapping and analyzing historical shoreline changes in Massachusetts. Proceedings of CoastGIS.

Schwarzer, K., M. Diesing, et al. (2003). "Coastline evolution at different time scales—examples from the Pomeranian Bight, southern Baltic Sea." *Marine Geology* 194(1-2): 79-101.

Sesli, F. A., F. Karsli, et al. (2009). "Monitoring the changing position of coastlines using aerial and satellite image data: an example from the eastern coast of Trabzon, Turkey." *Environmental Monitoring and Assessment* 153(1-4): 391-403.

Sheik, M. (2011). "A shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin, India, using digital shoreline analysis system." *Geo-spatial information science* 14(4): 282-293.

Stauble, D. K. (1998). Techniques for measuring and analyzing inlet ebb-shoal evolution, ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS COASTAL AND HYDRAULICS LAB.

Stockdonf, H. F., A. H. Sallenger Jr, et al. (2002). "Estimation of shoreline position and change using airborne topographic lidar data." *Journal of coastal research*: 502-513.

Temmerman, S., P. Meire, et al. (2013). "Ecosystem-based coastal defence in the face of global change." *Nature* 504: 79.

Thieler, E. R., O. H. Pilkey Jr, et al. (2000). "The use of mathematical models to predict beach behavior for US coastal engineering: a critical review." *Journal of coastal research*: 48-70.

Vittal Hegde, A. and V. Radhakrishnan Reju (2007). "Development of coastal vulnerability index for Mangalore coast, India." *Journal of coastal research*: 1106-1111.

White, K. and H. M. El Asmar (1999). "Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta." *Geomorphology* 29(1-2): 93-105.

Wróblewski, A. (1994). Empirical Orthogonal Functions (EOF) method in determining and forecasting storm floods in the coastal zones of the sea. *Coping with Floods*, Springer: 503-512.

Young, R. S., O. H. Pilkey, et al. (1995). "A discussion of the generalized model for simulating shoreline change (GENESIS)." *Journal of coastal research*: 875-886.

Résumé :

Le présent travail est une synthèse des différentes méthodes pour l'étude de l'évolution du trait de côte ainsi une comparaison entre ces méthodes par rapport aux avantages et inconvénients de chaque méthode en respectant l'ordre chronologique d'apparition de ces méthodes.

Nous avons détaillé deux méthodes ; la méthode des transects et celle des polygones et nous avons conclu que la méthode des polygones est la meilleure en ce qui concerne le calcul du taux de variation de rivage (érosion, accrétion, stabilité).

Il existe plusieurs méthodes et techniques pour l'étude du trait de côte quelles doivent être classées selon des critères, pour ce faire nous avons établi trois grandes catégories ; les méthodes expérimentales, les méthodes numériques et les méthodes statistiques.

تلخيص

تغيرات الشريط الساحلي حيث تطرقنا لمقارنة بين هذا العمل هو عبارة عن دراسة شاملة للطرق المختلفة لمراقبة وفهم هذه الطرق اعتمادا على مزايا وعيوب كل طريقة من خلال احترام الترتيب الزمني لظهورها. في هذه المذكرة قمنا بمقارنة اهم طريقتين طريقة الخطوط المعامدة للشريط الساحلي و طريقة لدينا تفصيل طريقتين المضلعات المتغيرة وخلصنا إلى أن طريقة المضلعات هي الأفضل لحساب معدل تغير الشريط الساحلي (التآكل، التراكم، الاستقرار)

هناك العديد من الطرق والتقنيات لدراسة الساحل التي يجب أن تصنف وفقا للمعايير ، للقيام بذلك أنشأنا ثلاث فئات رئيسية الطرق التجريبية والطرق الرقمية والأساليب الإحصائية.

Abstract :

The present work is a synthesis of the different methods for the study of the evolution of the coastline and a comparison between these methods compared to the advantages and disadvantages of each method by respecting the chronological order of appearance of these methods.

We have detailed two methods; transect from baseline and polygon methods and concluded that the polygon method is best for calculating the rate of change of shoreline (erosion, accretion, stability).

There are several methods and techniques for the study of the coastline change that must be classified according to criteria; for this, we have established three main categories; experimental methods, numerical methods and statistical methods.