



Université Assane SECK de Ziguinchor

Laboratoire d'Océanographie des Sciences de l'Environnement et du Climat

UFR : Sciences et Technologies

Département de physique

Mémoire de Master 2

Mention : Physique et Applications

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'océan

Stage préparé au Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC)

Dynamique sédimentaire et risques côtiers associés sur le littoral de Bargny, petite côte, Sénégal

Présenté par : M. Moussa TINE

Sous la direction de M. Issa SAKHO et de M. Bamol Ali SOW

Soutenu publiquement le **4 Février 2023** devant le jury composé de :

Prénoms et Noms	Grades	Qualité	Établissement
Samo DIATTA	Maître de Conférences	Président	UFR-ST/UASZ
Mouhamadou Bachir DIOUF	Professeur Titulaire	Rapporteur	FST /UCAD
Saïdou NDAO	Maître de Conférences	Examineur	UFR-SET/UIDT
Mamadou Lamine MBAYE	Maître-Assistant	Examineur	UFR-ST /UASZ
Issa SAKHO	Maître Assistant	Encadreur	ESMGE /UAM
Bamol Ali SOW	Maître de Conférences	Superviseur	UFR-ST /UASZ

Dédicace

Je dédie ce mémoire

À ma mère MOUSSOU SYLLA qui n'est plus de ce monde

À mon père CHEIKH TINE (Directeur d'école à la retraite)

À mes frères et sœurs Ablaye ; Djibril ; Mamadou Ngor ; Guilaye ; Mamadou ; Abdou Aziz ;

Ndeye Rokhaya et Khadidiatou

*À mon épouse Sokhna GUEYE À toute ma famille et mes amis que le seigneur puisse les
garder dans le bon chemin*

À toute ma promotion estudiantine : Ousmane ; Thierno ; Makhmout ; Aliou ; Serigne

Amadou ; Cheikh et Birame.

À mes aînés : Issa Ba et Souleymane Thiam

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Allah, l'Unique et le seul à être imploré pour ce que nous désirons de m'avoir guidé dans ce bon chemin. Alors que je viens à la rédaction de cette page, les souvenirs refont surface, lors des campagnes de données et lors de ma rencontre avec **Docteur Habib Ngom** à Saint-Louis, une personne humble et qui aime l'océanographie.

Avant tout, merci aux membres du jury pour avoir accepté d'apporter leur expertise à mes travaux de recherche.

Merci à mon encadreur **Dr. Issa SAKHO de l'Université Amadou Mahtar MBOW (UAM)** et au superviseur **Dr. Bamol Ali SOW de l'Université Assane SECK de Ziguinchor** les orientations, les conseils et leur soutien permanent tout au long de mes travaux de recherches. Merci également à tous les professeurs du département de physique et à tous les doctorants du LOSEC. Que le tout-puissant leur accorde le pardon et leur réserve ses bienfaits d'ici-bas. J'espère être à la hauteur de leurs attentes !

Mes chaleureux remerciements vont particulièrement à mon **Grand Frère et Mentor Djibril TINE** d'avoir accepté à travailler avec moi, de ses précieux conseils, de sa disponibilité. Je ne peux que mentionner ici mes plus profondes reconnaissances. Que le Seigneur t'accorde ses biens licites pour t'éviter de rechercher ses interdits et puisse sa générosité t'atteindre pour t'éviter de recourir à tout autre que Lui.

Mes remerciements à **Monsieur Amadou Diouf** de sa disponibilité et leurs conseils dans le but de me permettre à réaliser une bonne rédaction.

Je remercie également **Docteur Mamadou THIOR** pour sa disponibilité à tout instant

Je ne remercierai jamais assez mon épouse **Sokhna GUEYE** pour son soutien moral si important.

Résumé

L'érosion des côtes, un sujet brûlant, mais une réalité qui tend à être inquiétante. Le littoral est exposé depuis des dizaines d'années à la progression de la mer. Cette tendance est devenue de plus en plus terrible, les plages disparaissant et les inondations affectant les collectivités côtières. C'est en vue de produire des connaissances et des outils de prise de décision que se déroule ce projet de fin d'étude de maîtrise en sciences de l'atmosphère et des océans. Le thème est centré sur la dynamique sédimentaire et les risques associés à la côte de Bargny. Tout d'abord, l'analyse des paramètres de la houle a permis d'obtenir des hauteurs significatives allant jusqu'à 3,5 m (1998) et des périodes variantes aussi entre 8,2s et 17 s. La plupart des vagues prédominantes sont orientées NNE et NE. Le calcul des MNT (Model numérique de terrain) Bargny a une topographie basse. Ces MNT ont permis également de faire l'estimation des volumes sédimentaires entre 2020 et 2022. Ce dernier montre que sur les côtes de Bargny, 96% des sédiments ont été retirés et seuls 4% des sédiments ont atteint la côte. Sur la période 1984 à 2021, la moyenne annuelle du taux de recul est de -6,65 m/an. Tandis que sur la période 1949-2008, 2008-2016 et 2016-2021, on a une accrétion au nord de Bargny avec un taux d'accrétion moyenne + 0,027 m/s et une forte érosion avec un taux d'évolution moyenne de -0,027 m/an. L'indice côtier de vulnérabilité actuelle, de même que l'analyse multicritère ont aussi révélé une tendance similaire que l'analyse diachronique avec des risques de submersion marine et d'érosion côtière élevée de Bargny Guethe à Bargny Minâmes ; modérés à Bargny Ngoude et faibles au nord de Bargny Ngoude. Les résultats de l'indice côtier de vulnérabilité future suscitent de plus grandes inquiétudes. Avec les scénarios RCP8.5 et RCP4.5, l'indice de vulnérabilité est très élevé. Devant l'ensemble de ces problèmes, des solutions ont été proposées. L'une d'elles consiste à sensibiliser le public. Mais aussi se concentrer sur les infrastructures côtières telles que les brises lames, la retraite stratégique et la recharge de sable pour récupérer la plage.

Mots clés : érosion, diachronique, Trait de côte, petite côte, Vulnérabilité, littoral, Bargny

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	7
Chapitre 1 : Cadre de l'étude	10
I. Situation géographique	11
II. Cadre climatique	12
1. Pluviométrie	12
2. Température	13
III. Contexte géologique et Géomorphologique	13
3. Cadre géologique	13
4. Morphologie du littoral	13
5. Hydromorphologie marine-littorale	14
6. Sédimentologie	17
IV. Forçage météo-marin	18
7. Le vent	18
8. La houle	19
9. La marée	20
Chapitre 2 : Méthodologie de la recherche	22
I. Acquisition des données	23
1. Données cartographiques	23
2. Données topographiques	25
3. Données hydrodynamiques	27
4. Données sédimentologiques	28
II. Outils et processus de traitement des données	29
5. Etude diachronique de la dynamique du trait de côte de 1949 à 2021 :	29
6. Evaluation de la vulnérabilité actuelle du littoral de Bargny	33
7. Evaluation de la vulnérabilité future du littoral de Bargny	36
8. Traitement des données hydrodynamiques	37
9. Traitement des échantillons sédimentaires	38
Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	40
I. Analyse du forçage météo-marine	41
1. Analyses de l'évolution pluri-décennale des hauteurs significatives des vagues	41
2. Direction dominante des vagues	42
3. Identification des extrêmes de tempêtes	42
4. Analyse des composantes de la marée	44
4.1 Composantes harmoniques	44

4.2	Niveau de l'eau.....	44
II.	Etude de la vulnérabilité physique du littoral de bargny	45
5.	Evolution diachronique du trait de côte de 1949 à 2021	45
6.	Evolution de la vulnérabilité actuelle	47
6.1	Situation de vulnérabilité accentuée par la topographie.....	47
6.2	Analyse du profil multicritère et application de la roue des risques côtiers	48
6.3.	Risques d'inondation progressive	49
6.4.	Risques d'inondation.....	50
7.	Indice côtier de vulnérabilité.....	51
III.	Modélisation de la vulnérabilité future à l'horizon 2035	53
IV.	Solutions	57
	CONCLUSION :	59
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	60
	LISTES DES FIGURES.....	62
	LISTES DES IMAGES	63
	LISTES DES TABLEAUX.....	63

Liste des acronymes

ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

ICV : Indice Côtier de Vulnérabilité

DSAS: Digital Shoreline Analysis

ENM: Elevation du Niveau Marin

LRR: Linear Regression Rate

EPR : End Point Rate

MNT : Modèle Numérique de Terrain

RCP : Representative Concentration Pathway

RMS : Root Mean Square

UTM : Universal Transverse Mercator

Ept : Erreur de Position globale du Trait de côte

WGS : World Geodetic System

ECMWF (le centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme)

SIG : Système d'Information Géographique

INTRODUCTION

Longtemps restées à l'écart des établissements humains, les plages qui s'identifient à des rivages où s'accumulent des sables ou des galets offrent des sites privilégiés pour le tourisme balnéaire. Or, à une époque où leur occupation se densifie, on constate qu'elles ont fréquemment tendance à démaigrir et à reculer (Paskoff, 1998). La règle générale est la régression des plages et le recul du trait de côte. En effet, plus de 70% des côtes sableuses du monde connaissent des problèmes d'érosion côtière, matérialisés par des reculs de la ligne de rivage variant en moyenne entre 1 et 4 mètres par an (NIANG-Diop, 1995). En Afrique de l'Ouest, la vulnérabilité des populations aux risques côtiers est particulièrement élevée (Touré *et al.*, 2012).

Pays d'Afrique de l'Ouest, le Sénégal est bordé par l'océan atlantique sur sa partie occidentale. Il est constitué d'une petite Côte et d'une grande Côte. Cette dernière est située au nord de Dakar entre la presqu'île du Cap-Vert et l'embouchure du fleuve Sénégal. La petite côte est située au sud de Dakar et se prolonge jusqu'au delta du Sine-Saloum. Depuis plusieurs décennies, ces côtes, essentiellement sableuses sont menacées par l'érosion côtière qui se matérialise sur le terrain par une forte évolution du trait de côte et des submersions marines récurrentes (Sakho *et al.*, 2022). La problématique de la dynamique sédimentaire et des risques d'érosion et de submersions marines associée est assez bien étudiée sur la Petite Côte du Sénégal (Sakho *et al.*, 2011) ont porté sur la quantification de l'évolution et du fonctionnement hydro-sédimentaire de la lagune côtière de la Somone. Mais aussi les publications de Diedhiou (2016), sur l'étude comparative de l'évolution du trait de côte sur deux flèches sableuses de la petite côte (Sénégal) : cas de Joal et de Djiffère. Les travaux de Sadio (2019) se sont accentués sur la dynamique sédimentaire en contexte d'embouchure marquée par la présence de flèche sableuse. A la suite des travaux de thèse de Niang-Diop, (1995) sur l'érosion côtière à Rufisque, les travaux de recherche de Ndour (2014 et 2015) ont mis en évidence le rôle des ouvrages hydrauliques de protection côtière sur les changements morpho-sédimentaires à l'échelle du littoral de Rufisque. Plus récemment, les travaux de recherche de Ngom (2019) ont mis l'accent sur l'étude de l'évolution morpho sédimentaire et de la conception de modèles de protection shorelines du littoral sableux de Saly.

Sur les forçages naturels et anthropiques de l'évolution du littoral sénégalais, les récents travaux de Ndour *et al.* (2020) portant sur la modélisation 3D des mesures de protection côtière à court terme, l'approche cartographique de l'évolution du trait de côte dans l'estuaire de la Casamance par Thior *et al.*, (2021) , l'analyse du contexte biophysique de Bargny avec (Sene, 2019) et l'étude de la dynamique de l'upwelling « low-enrichment high-retention » centre sur le plateau sud du Sénégal par Ndoye *et al.*, (2017) ont permis de renforcer les connaissances scientifiques sur les forçages naturels et anthropiques qui gouvernent l'évolution du littoral sénégalais à des échelles différentes.

En effet, notre travail de recherche, qui porte sur l'étude de la dynamique sédimentaire et des risques côtiers associés sur le littoral de Bargny s'inscrit dans cette démarche scientifique de compréhension et de quantification du processus d'érosion côtière afin de proposer des solutions de gestion et de protection. Le Littoral, un système sédimentaire à topographie très basse et très vulnérable a été très peu étudié malgré sa forte dimension socio-économique (Pêche) et la forte pression foncière avec des industries en pleine expansion (Centrale à charbon). Situé sur un espace côtier restreint (3 km de côte), le littoral de Bargny constitue un site d'atelier

idéal pour aborder et étudier les mécanismes typiques de ces milieux côtiers hautement vulnérable.

- Ainsi, l'objectif général de notre étude est de quantifier la dynamique sédimentaire et les risques côtiers associés sur le littoral de Bargny afin de fournir les connaissances scientifiques nécessaires à la prise de décision pour une meilleure planification dans l'occupation de cet espace côtier, hautement stratégique.

Les objectifs spécifiques sont :

- Quantifier la vulnérabilité actuelle et d'estimer celle du future pour mieux appréhender et de proposer des solutions aux risques futures.
- De faire l'analyse de la mobilité du trait de côte de 1949 à 2021.
- Analyser les paramètres quantitatifs de la houle (Hauteur significative des vagues, période des vagues et leur direction et les régimes de vents).
- Proposition de schéma de gestion intégré des risques côtiers sur le littoral de Bargny pour une meilleure adaptation de la population locale face à ces risques.

Le présent manuscrit est structuré 3 chapitres :

- ❖ Le premier chapitre présente le cadre physique et socio-économique du littoral de Bargny, la morphodynamique et l'hydrodynamique marine-littorale
- ❖ Le second chapitre traite la méthodologie de la recherche ainsi que les outils d'analyse et de traitement des données.
- ❖ Le troisième chapitre est consacré à la présentation et discussion des résultats obtenus.

Chapitre 1 : Cadre de l'étude

I. Situation géographique

Bargny est située sur la côte sud de la presqu'île du Cap-Vert, à l'est de Rufisque et à 35 km au Sud de Dakar (Fig.1).

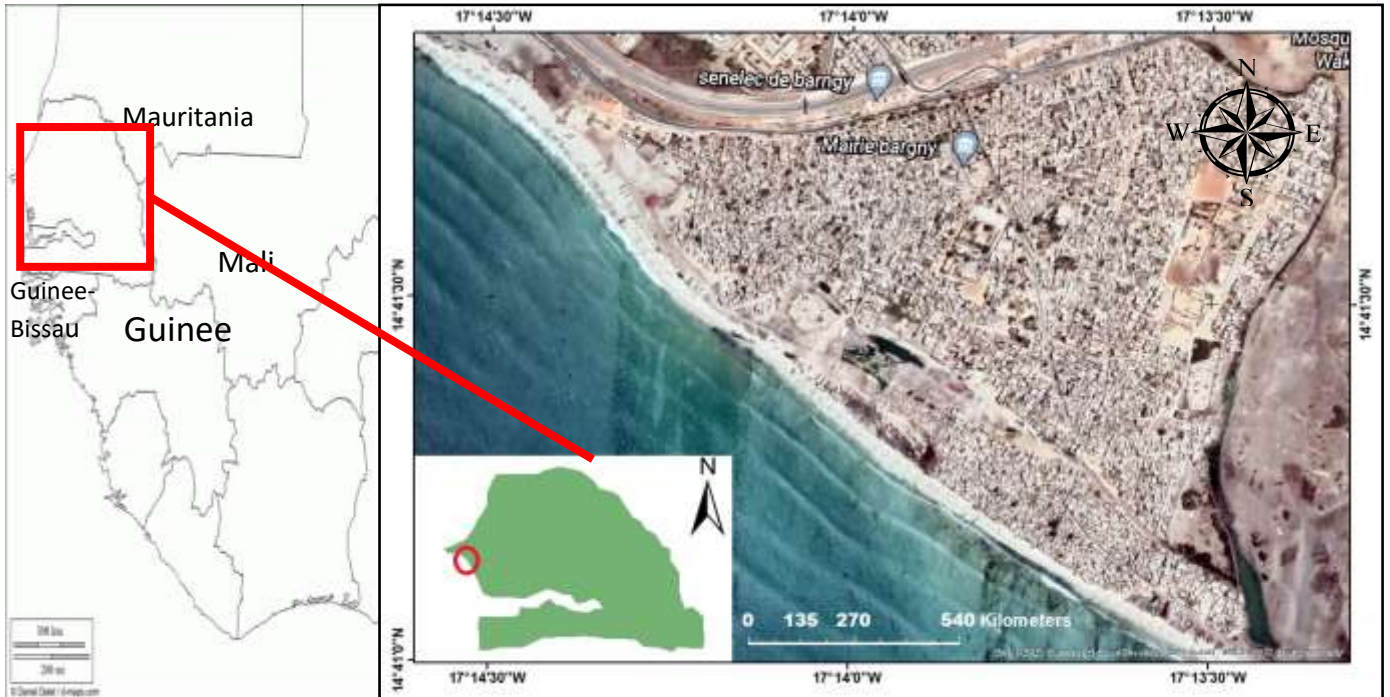


Figure 1 : Géolocalisation de la zone (Source : Travail personnel)

Commune d'origine Léboue (communautés du Sénégal concentrées dans la presqu'île du Cap-Vert et traditionnellement composées de pêcheurs et d'agriculteurs) est en passe de devenir une banlieue industrielle de la capitale sénégalaise.

Terres confisquées, ressources décimées, depuis plusieurs dizaines d'années, les habitants voient leur économie locale et leur organisation sociale mises à mal : installation d'une cimenterie en 1948 ; construction d'une centrale à charbon contre laquelle ils luttent depuis 2008 ; et développement du pôle urbain de Diarniadio et la construction d'un port minéralier et vraquier.

D'un point de vue démographique, la commune de Bargny regroupe 34 quartiers avec une population qui s'élève en 2013 à 51 188 habitants (ANSD, 2013). En 2002, Bargny comptait 36 516 habitants soit une augmentation de plus de 40% entre les deux recensements. Les quartiers de pêcheurs au nombre de cinq, regroupent 8 801 habitants en 2013, soit un peu plus de 17% de la population de la commune. La population de Bargny est en majorité jeune. Les moins de 20 ans représentent 53% contre 3% pour les personnes âgées de 65 ans et plus. Les quartiers de Bargny Guedj sont typiquement composés de lébous (Seck, 2014). La population masculine de la commune domine faiblement avec une proportion de 50,12% contre 49,88% pour les femmes (ANSD, 2013).

Selon les projections de l'ANSD la commune de Bargny comptera plus de 71 000 habitants à l'horizon 2025. À Bargny, comme dans de nombreuses communautés léboues, la pêche représente entre 70 et 80 % de l'économie. Elle est un secteur clé de l'économie familiale. Hommes, femmes, enfants, adultes et retraités dépendent de cette activité qui garantit le revenu des ménages (Cissé, 2009). Plus de 90% des chefs de concessions situées en bordure du littoral pratiquent la pêche.

La pêche et les activités liées à la transformation des produits de la mer représentent le noyau de l'économie de cette commune littorale. Toutefois, les pêcheurs de Bargny sont confrontés à une baisse des ressources halieutiques et d'espaces sableux (la plage) pour leurs embarcations. Il est à noter également que leurs habitations, établies près de la mer, sont progressivement détruites par les vagues. Cette vulnérabilité est directement liée à l'érosion côtière qui est extrêmement forte sur ce segment : plus de 150 m de recul du trait de côte a été observé entre 1949 et 2019 (Sakho, 2021).

II. Cadre climatique

1. Pluviométrie

Les précipitations sont provoquées par la présence de la mousson et sont généralement le résultat de deux phénomènes : la partie active de l'équateur météorologique et les lignes de grains qui constituent la source essentielle des précipitations à Dakar (Ndiaye, 2006). La pluviométrie constitue un paramètre important dans le budget sédimentaire littoral.

La région de Dakar a reçu en moyenne une pluviométrie annuelle de 401,8 mm par année entre 1988 et 2018 (Fig. 2).

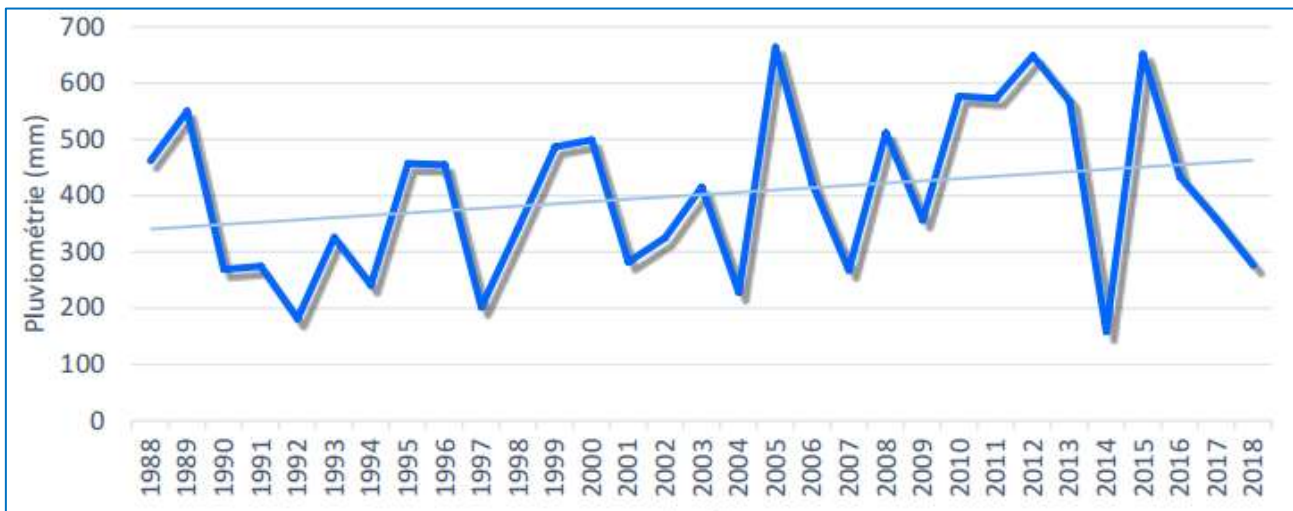


Figure 2 : Cumul annuel de la pluviométrie de la station de Yoff-Dakar (1988-2018) (Source de données : ANACIM) (Sène, 2019).

En 2005, le cumul annuel atteint 663,4 mm soit le cumul le plus élevé tandis que 2014 enregistre la plus faible pluviométrie, 158mm. La pluviométrie affiche une tendance à la hausse sur la période étudiée (Sene,2019).

2. Température

Les températures sont dans l'ensemble basses avec une moyenne annuelle de 23,8°C. La période septembre-octobre reste globalement la plus chaude (en moyenne entre 27 et 28°C). Les températures les plus basses sont enregistrées durant la période de janvier à mars. L'amplitude thermique varie entre 6 °C et 8 °C (FFEM, 2009).

III. Contexte géologique et Géomorphologique

3. Cadre géologique

Entre Bargny et Sendou ; la côte est parsemée d'affleurements de grès de plage. Ce sont des dalles rocheuses qui s'enfoncent sous le cordon littoral sableux et qui apparaissent entre le littoral et les affleurements de marnes yprésiennes (NIANG-Diop, 1995). Elles forment des amoncellements de gros blocs qui jonchent la plage, aussi bien à Bargny – Ngoude, à Bargny – Miname qu'à Sendou. Les dalles reposent en discordance sur les marnes et montrent des traces de karstification, plus prononcées sur le continent, derrière le cordon littoral, où les dalles s'observent aussi à l'affleurement sur de grandes distances (NIANG-Diop, 1995). C'est le cas notamment à Sendou, où, sur 700 m de long et 100 m de large, affleurent des dalles épaisses (1m à 1,50 m) en pente douce vers la mer. (FFEM, 2009)

4. Morphologie du littoral

Une étude très détaillée du relief du proche plateau continental (entre - 16 et -56 m) a été faite sur la zone comprise entre Rufisque et Mbour. Selon (Froidefond, 1975) On y distingue :

Des zones à forte pente (> 0,5 %) et forte rugosité située d'une part entre le rivage et -15 m, comprenant le haut-fond de Rufisque et d'autre part aux environs du dôme de Yène vers -30 et -35 m de profondeur. Ce sont aussi des zones à faible accumulation sédimentaire.

Une vaste zone à faible pente (<0,5 %) et faible rugosité située entre les isobathes - 15 et - 35 m. Elle est allongée selon une direction NW-SE. C'est à ce niveau que s'observent les plus fortes épaisseurs de sédiments (4 m à plus de 16 m). De plus, trois réseaux d'entailles de direction générale NE-SW ont été reconnus. Le plus encaissé est celui situé entre Bargny et Yène. (NIANG-Diop, 1995)

La carte présentée sur la figure 3 ci-dessous, montre que le talus continental est constitué de formation rocheuse alors le plateau est caractérisé par un faciès sédimentaire sableux-vaseux et vaseux (Turmine, 2001).

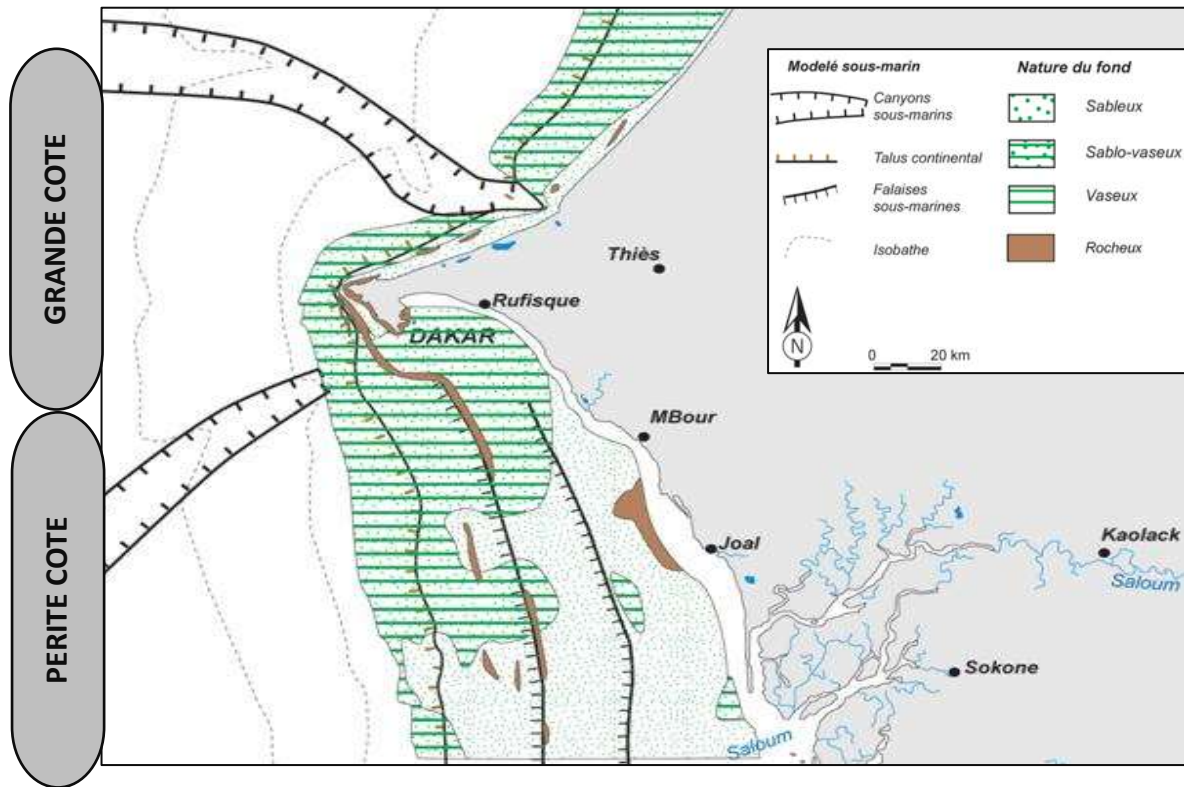


Figure 3 : Couverture sédimentaire marine de la Petite Côte du Sénégal (Turmine, 2001)

5. Hydromorphologie marine-littorale

Le littoral de Bargny présente une côte basse et sableuse. Limitée à l'exception des zones fortement urbanisées par un Cordon littoral de 2 à 23 m d'altitude en moyenne, colonisé ou non par des figuiers de ((Demoulin, 1967a) ; Lawson, 1970 ; (Diallo, 1982)).

Sur le domaine continental, le littoral est dominé au Nord par le bas-plateau de Mbao (altitude maximum : 25 m) et à l'Est par le plateau de Bargny (altitude maximum : 45 m). Par contre, les villes de Mbao, Rufisque et Bargny sont bâties dans des dépressions avec des altitudes globalement inférieures 5 m. Les plateaux sont drainés par des marigots. Ceux de Mbao, Diokoul et Bargny notamment qui forment des lagunes côtières et débouchent dans l'océan atlantique à travers une embouchure qui est aujourd'hui fermée naturellement. Ces hydrosystèmes ne peuvent plus assurer le transfert des eaux pluviales durant l'hivernage.

La partie côtière, entre Mbao et Bargny, appartient globalement à la baie de Gorée qui peut être subdivisée en deux catégories : la baie de Hann qui s'étend entre la Pointe de Bel Air et Diokoul et la baie de Rufisque comprise entre le Cap de Diokoul et Bargny. Cette baie de Gorée se caractérise par la présence de bancs et îlots rocheux, d'origine volcanique, qui sont situés entre le rivage et une profondeur de 10m,(Masse, 1968). L'isobathe -10 m est situé à une distance de 1,3 à 2,8 kilomètres par rapport à la ligne de rivage. Il est à noter également que les isobathes présentent, au niveau du banc de la résolue mais aussi à l'extrémité sud du Banc des Biches et des îlets de Khoniet, une orientation légèrement NW-SE, qui est celle de la dérive littorale, ce qui pourrait donc indiquer des dépôts dus à ce courant (NIANG-Diop, 1995)

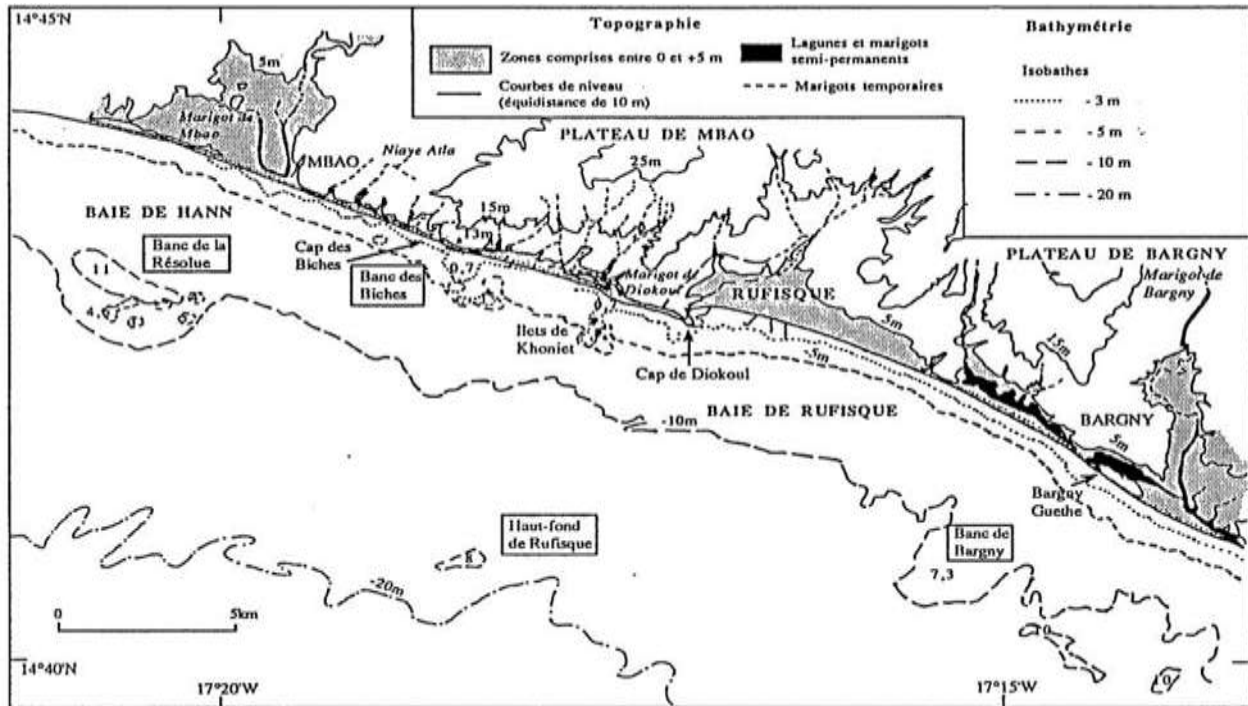


Figure 4 : Carte morpho-bathymétrique de la zone littorale entre Mbao et Bargny (d'après les cartes topographiques IGN au 1/20 000 de Rufisque et Bargny et la carte de bathymétrie SHOM N°5852 au 1/50 000).

Morphologie de la plage

À Bargny les plages ont une morphologie simple, avec notamment la présence des différentes unités morphologiques classiquement observées sur une côte sableuse : arrière-plage, la haute plage, estran, le domaine du large.

- La haute plage est l'unité morphologique de la plage qui est atteint par l'eau lors d'une marée haute exceptionnelle. Néanmoins, elle reste émergée. Dans cette unité les bermes et les gradins sont aléatoires.
- L'estran représente sur la plage une zone non couverte à marée basse constituant la zone intertidale. Elle est la zone de balancement de marée et son extrémité caractérise la ligne de rivage dont sa mobilité fluctue en fonction du jet de rive et de la nappe de retrait.
- Le domaine du large constitue la zone où le niveau moyen des basses mers moyennes à une profondeur égale à la demi-longueur d'onde des houles de beaux temps et donc à peu près au niveau des basses mers maximales (Fig.5)

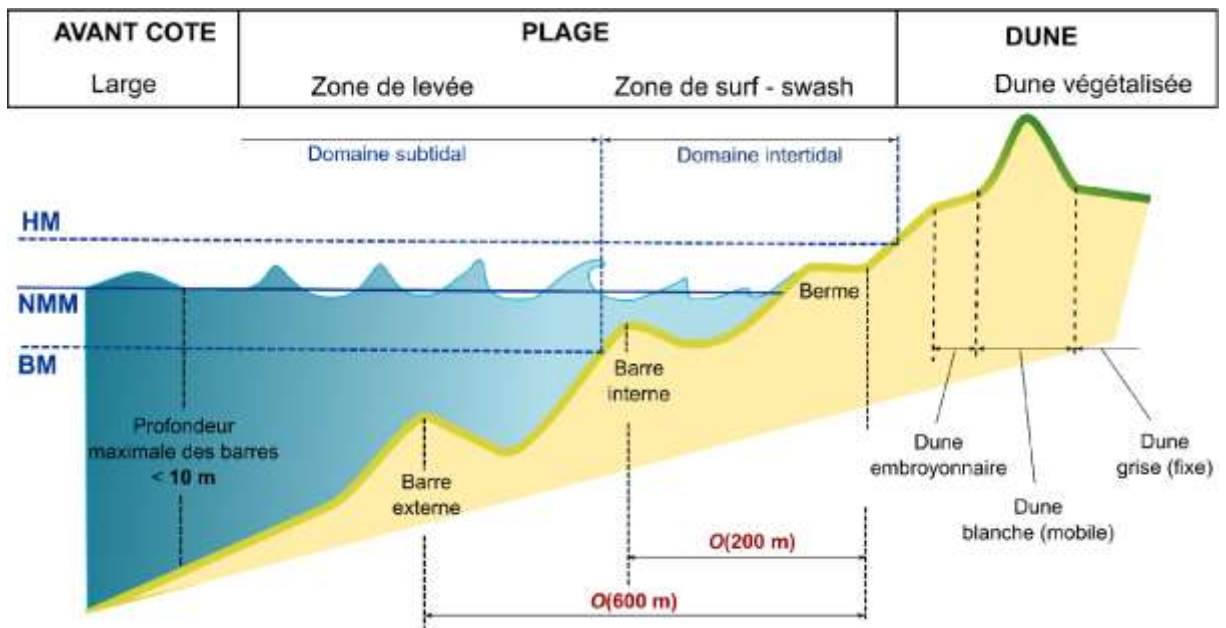


Figure 5 : Morphologie d'une plage sableuse (Source : Benjamin Dubarbier,2014)

✚ NOTION DE PLAGE REFLECTIVE

La plage de Bargny fait partie de la catégorie des plages réfléchives (Photo 1). Elle est associée à une pente plus forte et des sédiments plus grossiers.



Photo 1 : Caractéristiques de la plage réfléchive à Bargny (source : Sakho, 2022)

Le trait de côte est une ligne imaginaire qui marque la limite supérieure d'influence des eaux marines sur la côte. Il s'agit de l'extrémité du jet de rive lors des fortes tempêtes survenant durant les marées de vives eaux. Limite de référence indéniable en tant que séparation linéaire entre le domaine terrestre et le domaine marin, le trait de côte est pourtant une notion ambiguë tant, le passage de l'un vers l'autre est progressif dans l'espace et mobile dans le temps (Photo 2).

Sur une photographie aérienne ou une image satellite, on détermine le trait de côte par photo-interprétation manuelle ou assistée par ordinateur. Les lignes instantanées de rivage, les limites d'humectation et les limites de végétation sont repérées par des variations de couleur ou de tons (Faye, 2010) .



Photo 2 : Photo prise par drone à Bargny (11/01/2022,)

6. Sédimentologie

La zone côtière sénégalaise est de type afro-trainante selon la classification tectonique (Inman and Nordstrom, 1971). Il s'agit de côtes basses de plaine côtière, à potentiel très réduit d'érosion continentale et de dépôt, suite à l'absence de reliefs importants et à plateau continental étroit.

Il y'a trois sources possibles de sédiments pour le littoral Rufisquois qui, par ailleurs, ne pourront être mobilisées que si les agents de transport (vents, houles, courants de dérive littorale) sont efficaces.

IL s'agit de :

- La sédimentation biogène actuelle du plateau continental, en particulier celle qui se développe sur les hauts-fonds rocheux est constituée d'accumulations coquillières sur les plages après une période de houles fortes.
- Les apports éoliens : des études de (Barusseau, 1984) ont montré l'importance de ce type d'apports pour l'alimentation des fonds marins de la baie de Gorée. Ces dépôts constituent de sables très fins. Aucune donnée n'existe sur les apports éoliens de sables plus grossiers, seuls utiles pour les plages, mais rien ne permet d'exclure ce type d'apports.
- Les cycles érosion/accrétion du littoral, s'exerce particulièrement sur le cordon littoral et sur la falaise du Cap des Biches. Des auteurs ont signalé l'existence d'une parenté granulométrique entre les sables de plage et ceux du cordon littoral qui est souvent sapé par la mer ((Hebrard, 1966); Demoulin, 1967 ; Lawson, 1970).

IV. Forçage météo-marin

7. Le vent

Les vents, en tant que forces génératrices de la houle, jouent un rôle important dans l'évolution morpho-sédimentaire d'un littoral et des risques de submersions marines associés. Cependant, les vents locaux de basse altitude interviennent également dans la dynamique côtière, car ils sont responsables des mers de vent et parfois des upwellings mais aussi parce qu'ils sont les agents de transport des sables dans la zone côtière (NIANG-Diop, 1995). Ils ne sont efficaces que lorsqu'ils atteignent des vitesses de l'ordre de 5,55 m/s (Gaye, 1999 and Ndour, 2015).

Entre les mois de novembre et d'avril, les vents de secteur N, NE et NNE dominant largement (Fig.6) et représentent près de 94% des observations. Les vents de secteurs W et surtout NW prédominent entre les mois de mai et octobre, plus de 74% des vents observés. Les vents de secteur W sont plus présents au mois de juillet où ils forment près de 26% des occurrences (Sène, 2019).



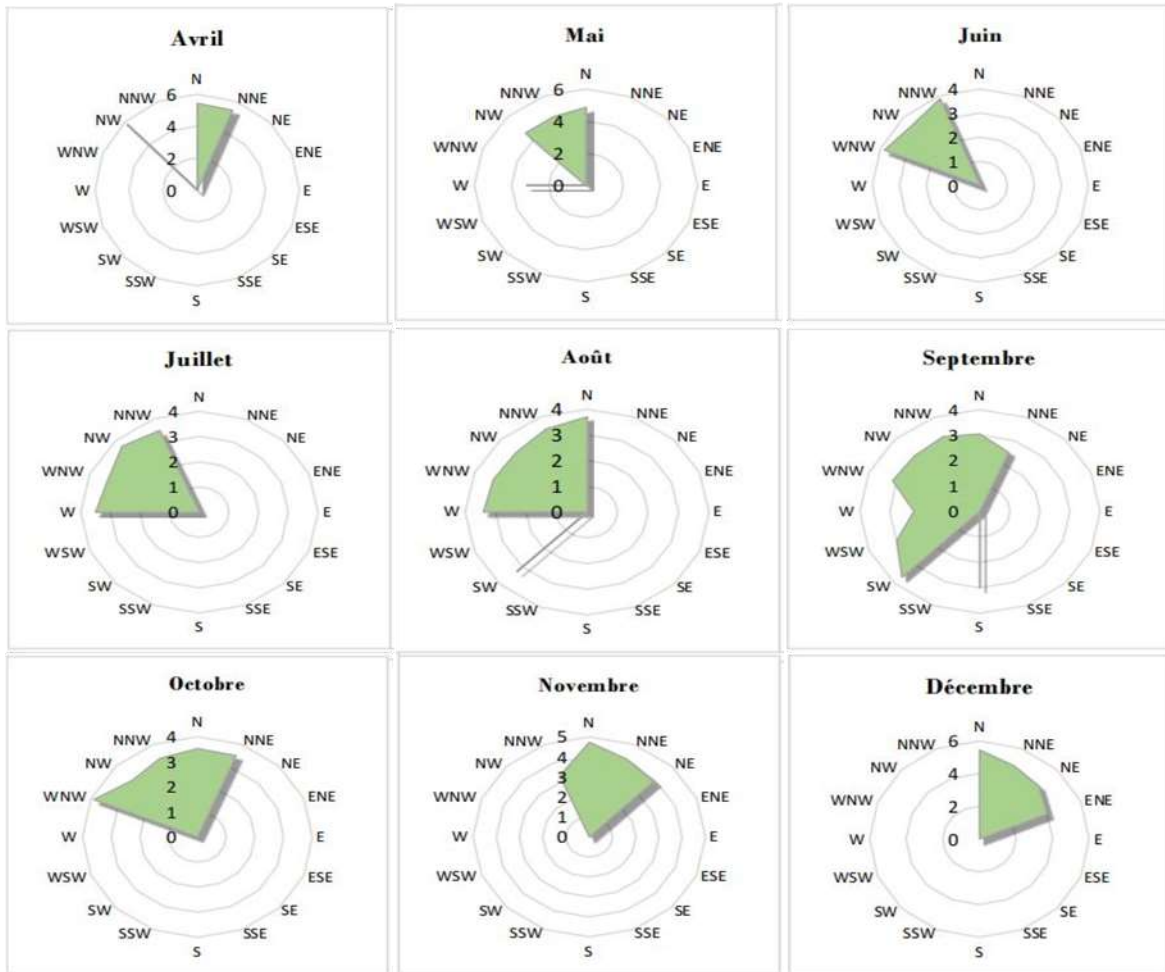


Figure 6 : Variations mensuelles des directions des vents selon les mois à la station de Yoff-Dakar de 1988 à 2018 (Source de données : ANACIM)

8. La houle

Le forçage hydrodynamique est le principal facteur de contrôle des processus d'engraissement et d'érosion des plages, des changements morphologiques de profils et du transport des sédiments cross shore et long shore.

Les côtes sénégalaises sont affectées par des houles d'origine lointaine et des "mers du vent" locales (ou vagues) qui est souvent difficile de distinguer. Ces mouvements ondulatoires peuvent engendrer des courants perpendiculaires (courants de houle) et parallèles (courant de dérive littorale) à la côte.

Deux principaux types de houles longues issues des hautes latitudes (entre 40° et 60°) des deux hémisphères, atteignent les côtes sénégalaises (Fig.8)

Les houles de Nord-Ouest (N320° à 20°E) sont issues de l'Atlantique nord et sont présentes toute l'année. En arrivant à la côte, ces houles subissent des phénomènes de réfraction (fig.7) (Riffault, 1980)

Les houles de Sud-Ouest (180° N à 230° E) sont issues de l'Atlantique sud. Elles n'affectent que la côte au Sud de Dakar et ceci uniquement de juillet à octobre. En fait, la petite côte semble être la limite septentrionale de la zone d'action de ces houles.

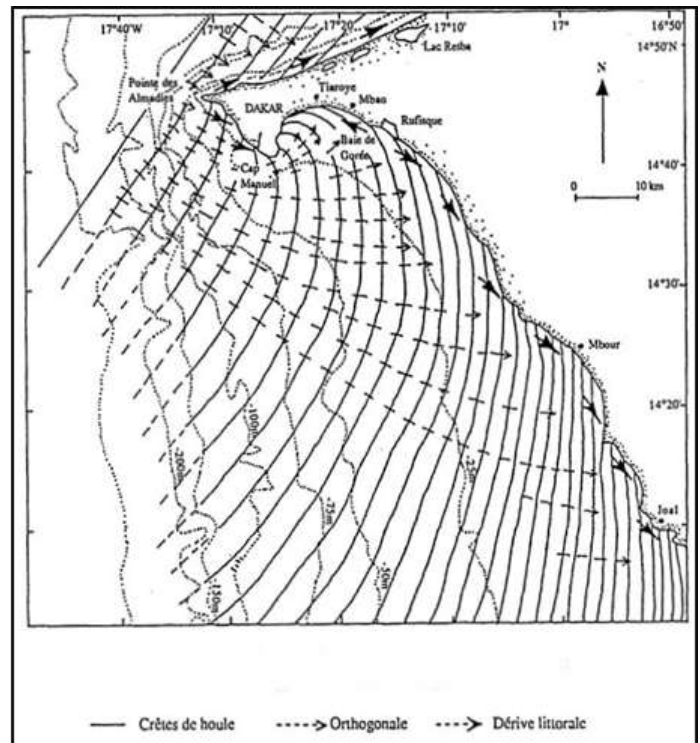
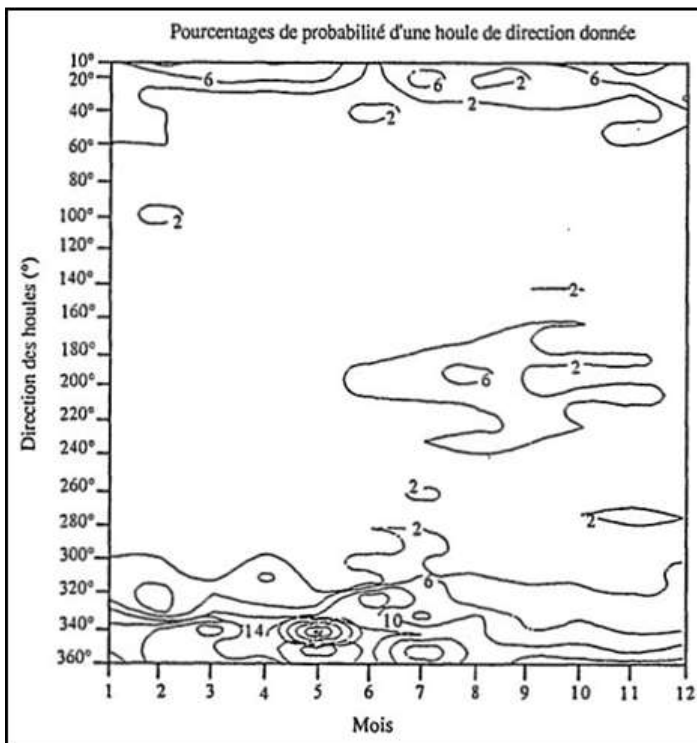


Figure 7 : Directions des houles aux larges des côtes Sénégalaises en pourcentage de probabilités selon les mois. Période 1991-Debut 1993 (Nardari, 1993)

Figure 8 : Modifications de la direction des houles de Nord-Ouest (RIFFAULT,1980)

Les fortes houles, supérieures ou égales à 3 m, sont en général de direction nord-nord-ouest à nord, à l'exception d'une houle d'ouest observée en mars 1988. Les périodes varient entre 3 et 14 secondes, les périodes moyennes mensuelles oscillant entre 6 et 8 secondes. (NIANG-Diop, 1995).

9. La marée

La marée désigne le mouvement à allure périodique du niveau de la mer, visible le long des côtes, et dont l'origine est l'attraction gravitationnelle entre la lune, la terre et le soleil. Ce mouvement périodique de 12h 25 mn oscille entre une valeur maximale de hauteur d'eau, appelée « pleine mer (PM) » et une valeur minimale, nommée « basse mer (BM) ». Le marnage est le principal paramètre quantitatif de la marée. Il représente la différence de hauteur d'eau entre une pleine mer (PM) et une basse mer (BM) consécutives (SHOM, 1997). Sur la Petite Côte, la propagation de l'onde de marée et des courants de dérive littorale se font du Nord vers le Sud (Ba et al., 1995). Le courant qui accompagne la marée montante est appelé courant de flot et celui de la marée descendante, courant de jusant. Ces courants ont des vitesses faibles, inférieures à $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ (NIANG-Diop, 1995).

Par contre, au niveau des embouchures, ces courants sont plus forts : environ 0,5 m.s⁻¹ en moyenne à la station de Djifère (Diop, 1990). Toutefois, ces vitesses varient en fonction des caractéristiques hydrologiques et morpho-sédimentaires des embouchures mais aussi des conditions météorologiques saisonnières (Sène et al., 1999)

La marée est de type semi-diurne sur les côtes sénégalaises. Le profil annuel de la marée à Dakar (1960-2006) fait état d'un marnage moyen de l'ordre d'un mètre (Ndour, 2015). Il varie entre 1,2 et 1,6 m en marée de vives eaux et entre 0,4 et 0,6 m en marée de mortes eaux (Diarra, 1999). Les courants de marée, avec des vitesses inférieures à 0,15 m/s enregistrés sur les côtes du Sénégal, n'interviennent pas dans le transport des sédiments (Domain, 1976 ; Rebert, 1983 in Ndour, 2015). Ils n'ont donc qu'un rôle mineur dans l'évolution morphologique du rivage.

Chapitre 2 : Méthodologie de la recherche

I. Acquisition des données

1. Données cartographiques

Les données cartographiques sont essentiellement composées de photographies aériennes, d'images satellitaires et une ancienne carte de Bargny (1984).

❖ Photographies aériennes

La photographie aérienne est faite à partir d'un drone. Et plus de 200 photos ont été prises au niveau de la cote. C'est à partir de ces photos que l'on fait l'étude sur les estimations des volumes sédimentaires.



Photo 3 : Une série de photos prise par drone au large des côtes de Bargny (Source Ingénieur Géomètre-Topo, TINE)

❖ Images satellitaires :

Les images satellitaires proviennent de google earth. Les images de 2008,2016 et 2021 ont été utilisées. Ces images ont permis de faire l'étude sur la mobilité du trait de côte.



Photo 4 : Séries de photos satellitaires (Source : Google Earth)

❖ Carte ancienne de Bargny (1984)

Toujours dans la dynamique de l'analyse du trait de côte, cette ancienne carte de Bargny de 1984 a été également utilisée.

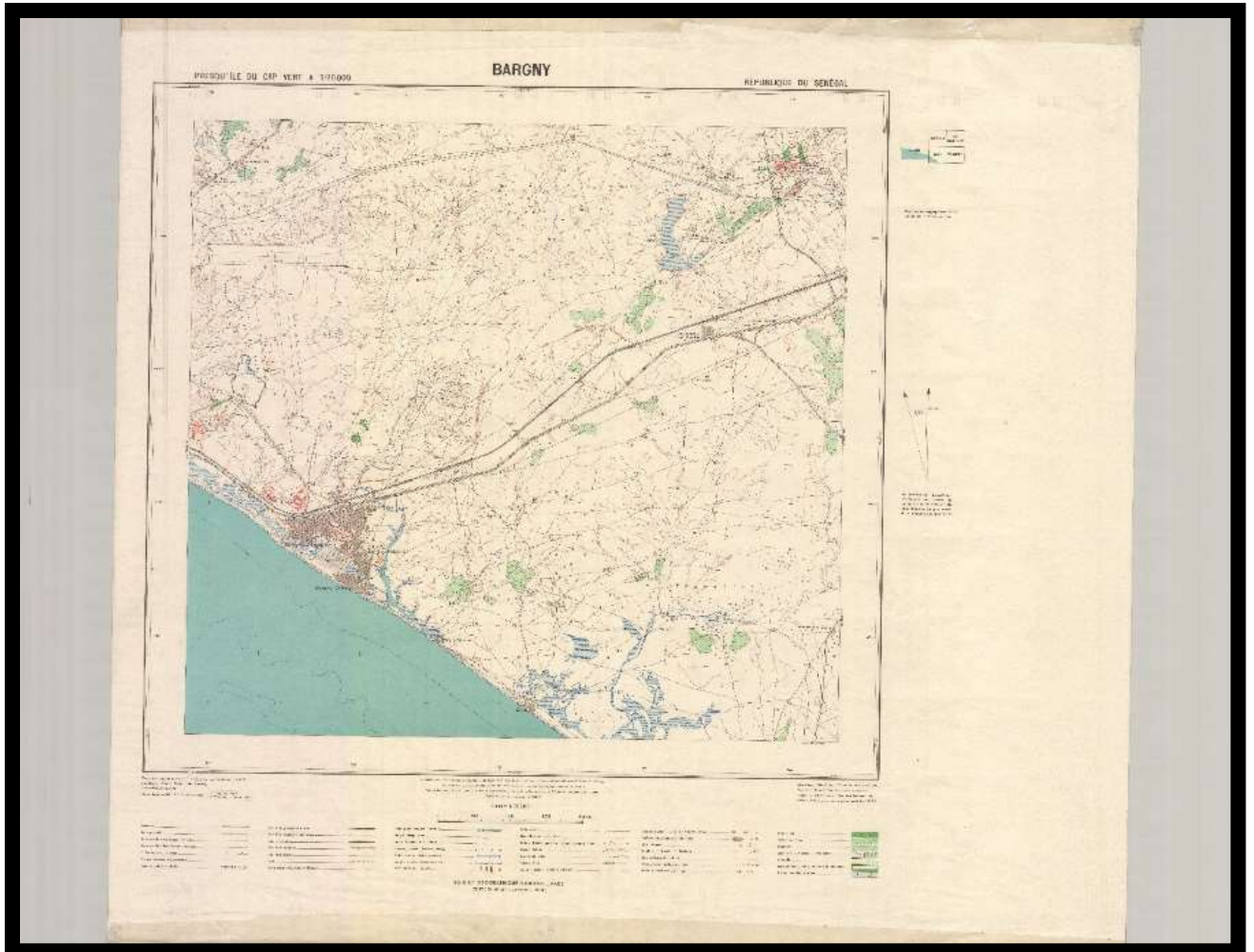


Photo 5 : Ancienne carte de Bargny datant de 1984 (Source : Dr. THIOR)

2. Données topographiques

Au large du littoral de Bargny, Nous avons couplé les plateformes DGPS et Drone pour l'acquisitions des données Topo-bathymétriques.

- 9h00 : positionnement de la base sur un point géodésique au stade de bargny à 1 km du site d'étude (point B003).
- 757 points ont été levés sur le site (Fig.9)

Ces nuages de point ont permis à la modélisation des MNT avec le logiciel ArcGIS.

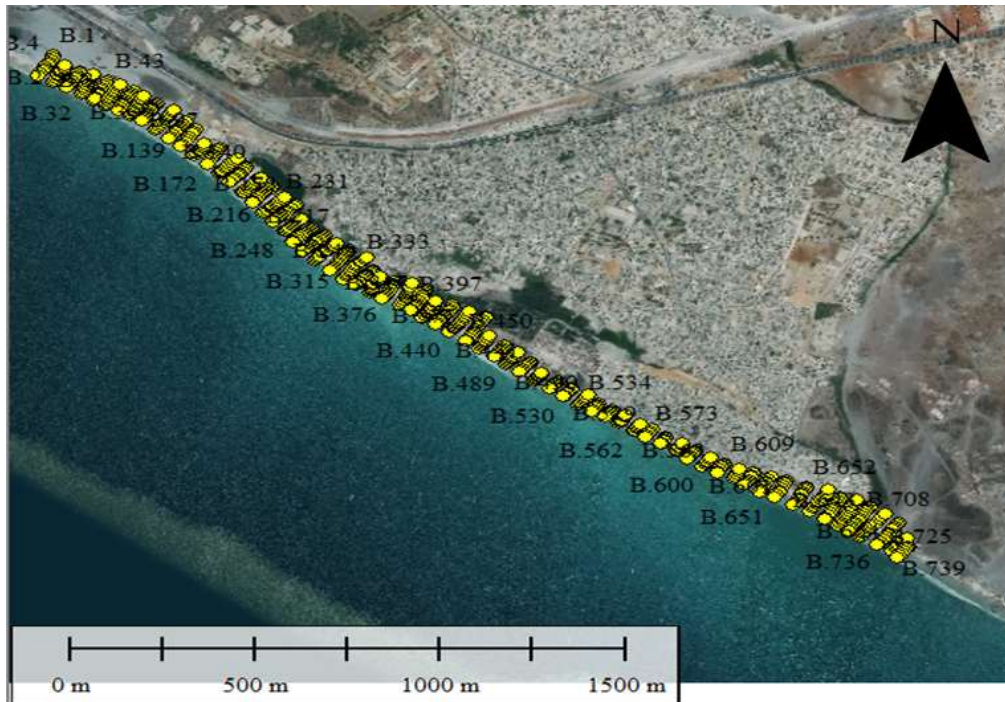


Figure 9 : Nuages de points sur le littoral de Bargny (Source : Ingénieur Géomètre-Topo, TINE)

Au cours de cette campagne, les matériels suivants ont été utilisés : Le modèle de GPS différentiel de marque E-Survey, modèle E300 pro (avec plus de 800 canaux, une longueur de base d'au moins 21 km) et un drone DJI Phantom 4 pro quadra-capteur ayant une résolution de 1 à 5 cm avec durée de vol de 30 minutes.



Photo 6: Drone et GPS différentiel

La méthodologie consiste à :

- Poser des balises sur le long du littoral de notre zone d'étude. Après avoir stationner le DGPS à un point de référence connu. Ensuite à partir de ce point on marche vers le nord tout en posant des balises et d'y faire des levées topographiques.
- Après avoir fait les levées topographiques avec les balises, on lance le drone. Ce dernier est programmé à parcourir la zone par des aller et des retours de façon rectiligne tout en faisant des captures d'images.
- Sur ces images, apparaitront les balises d'où la raison de couplage des levées topographiques et drone afin de minimiser les erreurs.



Photo 7 : Stationnement au point de référence



Photo 8 :Lever des points topographiques avec balises

3. Données hydrodynamiques

Il faut savoir que le courantométrie mesure avec précision la direction et la vitesse du courant d'eau dans les lacs, rivières ou en mer. Tandis qu'un courantomètre est un instrument destiné à mesurer la vitesse d'écoulement de l'eau (marine.geophysicsgpr.com)



Photo 9 : Courantométrie

ERA5 est la réanalyse ECMWF (le centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme) de cinquième génération pour le climat et la météo mondiale au cours des 4 à 7 dernières décennies. En effet, elle fournit des estimations horaires d'un grand nombre de variables climatiques atmosphériques, terrestres et océaniques. Les données couvrent la Terre sur une grille de 30 km et résolvent l'atmosphère en utilisant 137 niveaux depuis la surface jusqu'à une hauteur de 80 km. ERA5 comprend des informations sur les incertitudes pour toutes les variables à des résolutions spatiales et temporelles réduites. Les mises à jour mensuelles de qualité garantie d'ERA5 (de 1959 à aujourd'hui) sont publiées dans les 3 mois en temps réel (Source : sds.climate.copernicus.eu).

4. Données sédimentologiques

Une campagne de prélèvement a été faite dans un secteur situé avant le point de déferlement des vagues. Le littoral de Bargny est caractérisé par plusieurs unités morphologiques avec des faciès sédimentaires relativement différents. Avant le point de déferlement, des prélèvements sédimentaires ont été effectués également.



Photo 10 : Un secteur situé avant le point de déferlement marqué par des sédiments vaseux (Sakho, Décembre 2019)

Les échantillons sont obtenus par la méthode de dragage en remontant le sable par un système. Les échantillons de sédiments de chaque point de dragage (D1, D2...) sont ensuite mis dans des sachets nommés (S1, S2...). Ce dernier facilitera le traitement de données sédimentaires de façon organisée (S1 provient de D1, S2 provient de D2).

II. Outils et processus de traitement des données

5. Etude diachronique de la dynamique du trait de côte de 1949 à 2021 :

Pour l'étude diachronique, on a utilisé des images satellitaires et une ancienne carte de Bargny datant de 1949. Pour extraire le trait de côte, il a été décidé de ne pas faire des captures d'image avec google Earth. Parce qu'on s'est rendu compte que toute image capturée sera tôt ou tard géoréférencée. Et ce dernier engendre des erreurs.

✓ Procédure de classification

La procédure de classification côtière et d'évolution des risques est effectuée avec le logiciel Arcgis 10.4 et les cartes ont été choisies dans google Earth car, il détient une bonne résolution.

Dans un premier temps, une géodatabase sera créée dans ArcGIS qui contiendra toutes les données de classification côtière ainsi que des données sur les niveaux de danger (Rosendahl Appelquist and Balstrøm, 2015). Pour une numérisation relativement détaillée et à jour du littoral de Bargny qui peut être utilisé pour la classification côtière, une nouvelle classe d'entités linéaires est créée dans la géodatabase faisant référence au système de coordonnées WGS 1984 UTM Zone 28N.

Pour faciliter l'évaluation de la pente côtière et de l'équilibre sédimentaire, deux entités linéaires supplémentaires sont créées dans Google Earth. L'entité linéaire pour faciliter l'évaluation de la pente consiste en une gamme de sections de lignes parallèles au rivage qui sont tracées vers la terre du littoral dans toutes les zones côtières avec une pente supérieure à 4 %. (Rosendahl Appelquist and Balstrøm, 2015).

✓ Extraction et numérisation du trait de côte

Pour extraire et numériser les traits de côtes, la technique semi-automatique d'extraction a été utilisée. Premièrement, Nous avons extrait les traits de côte de différentes dates sur Google explorer en posant des marqueurs le long des traits de côte de chaque année. Ces traits de côte provenant de google earth, nous facilite la numérisation sur arcgis. Ensuite arcgis 10.4 a été utilisé pour créer une base de données Littorale 1949-2021. Nous avons utilisé cette base de données pour créer des entités Baseline et une shoreline.

Ainsi, L'espace en jaune sur la figure 10 est le Buffer shoreline. Ce dernier permet de stabiliser l'espace linéaire dans lequel les traits de côte ont été numérisés.

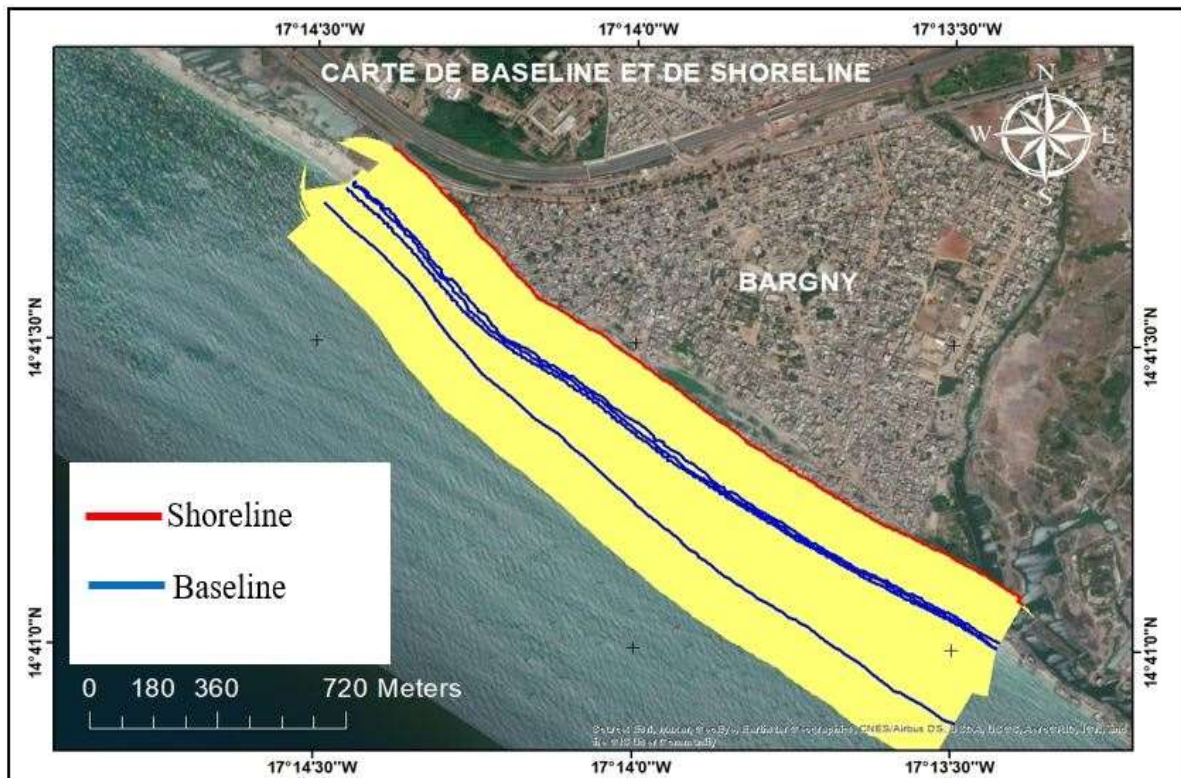


Figure 10 : Carte montrant une Baseline et un Shoreline (Source travail personnel)

✓ **Baseline**

Il s'agit de numériser une ligne de base imaginaire à partir de laquelle DSAS crée des transects qui coupent les différents traits de côtes. Ainsi, tous les transects sont perpendiculaires à la baseline qui elle aussi doit être parallèle à la côte. Cependant, il arrive que les transects soient déformés du fait de l'irrégularité de la côte. Ce qui entraîne parfois des transects aberrants ou qui s'entrecroisent avant leur intersection sur les traits de côte. Il est ainsi possible de les corriger en les redressant ou en les supprimant (Thior *et al.*, 2021).

✓ **Shoreline**

Les shorelines représentent les traits de côte déjà numérisés dans la Géodatabase. Il s'agit en effet, des traits de côte auxquels la baseline doit être parallèle et devant servir de mesure dans l'environnement de DSAS. Ainsi, pour pouvoir effectuer un calcul d'indices (EPR, LRR) les shorelines doivent être au minimum de deux entités de dates ou encore d'heures différentes. (Thior *et al.*, 2021)

La numérisation de la ligne instantanée de rivage a d'abord nécessité un travail d'identification et d'extraction des marqueurs pertinents de trait de côte. Ce travail peut se faire manuellement sur les images satellitaires. Les marqueurs de trait de côte peuvent être directement visibles sur l'image si celle-ci a une haute résolution comme c'est le cas des images. C'est la raison pour laquelle la photo-interprétation et la photogrammétrie sont les techniques les plus utilisées pour extraire les lignes de référence (Boak and Turner, 2005)

✓ **Calculs statistiques sur Digital Shoreline Analysis System (DSAS)**

Le taux de recul du trait de côte a été calculé d'un point de l'année de départ à un point de l'année d'arrivée. Avec l'outil Dsas V5, des transects espacés de 54,5 m de toutes les dates et le End Point Rate (EPR) ont été tracés. Ce dernier génère un tableau donnant le nombre de points, les dates de chaque ligne de côte ainsi que la distance d'intersecte d'une année à l'autre.

L'End Point Rate (EPR) calcule le rapport de la distance entre le trait de côte correspondant à la date la plus ancienne et à la date la plus récente. Ainsi, lorsqu'on dispose uniquement de deux traits de côte, l'EPR reste un bon indice pour évaluer la cinématique (Moore, 2000 ; Thieler et al., 2009 ; Himmelstoss, 2009.)

Le Linear Regression Rate (LRR) est l'indice qui permet d'estimer l'évolution de chaque segment sur plusieurs dates. Le nombre d'individus de la série statistique est celui du nombre de traits de côte. Si ce nombre est faible comme pour l'EPR, cela pose le problème de la pertinence et de la robustesse des résultats. Ainsi, calculant le taux d'évolution annuelle de la ligne de référence le long de chaque transect, le LRR est donc plus pertinent lorsqu'on analyse la cinématique littorale pour plus de deux dates. En effet, la méthode de calcul tient compte de la distance évolutive du trait de côte sur toute la période considérée (Djagoua et al., 2016), (Faye, 2010)

✓ **Les marges d'erreurs**

Dans la littérature, l'erreur globale appelée Erreur de Position Globale du Trait de côte (Ept) est calculée en prenant la racine carrée de la somme des carrés de chaque erreur (Mathieu 2014 ; Juigner 2012 ; Fletcher et al., 2003)

$$Ept = \sqrt{Ep^2 + Eg^2 + Ed^2} \qquad E\alpha = \frac{\sqrt{Ept1^2 + Ept2^2}}{\text{periode}(t)}$$

Ept : Erreur de position globale du trait de côte

Ep : Erreur de pixel (résolution spatiale)

Eg : Erreur de Géoréférencement (RMS)

Ed : Erreur de digitalisation

$E\alpha$: Erreur globale en moyenne (m/an)

La somme de ces racines carrées donne l'erreur d'un pas de temps étudié.

Ainsi, pour intégrer la marge d'erreur sur les résultats d'analyse, il faut obtenir le cumul des sommes des erreurs de position globale du trait de côte pour chaque pas de temps d'analyse.

✓ **Analyse du profil multirisque**

Pour analyser la vulnérabilité côtière de Bargny, on a besoin d'un outil appelé le Coastal Hazard Wheel (CHW). Le CHW est une application Web qui a été recommandé par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) comme outil d'évaluation des risques pour aider les gestionnaires côtiers, les planificateurs et les décideurs politiques à évaluer comment les

zones côtières sont susceptibles d'être affectées par rapport aux différents niveaux de risque induits par le changement climatique. (Rosendahl Appelquist, 2013)

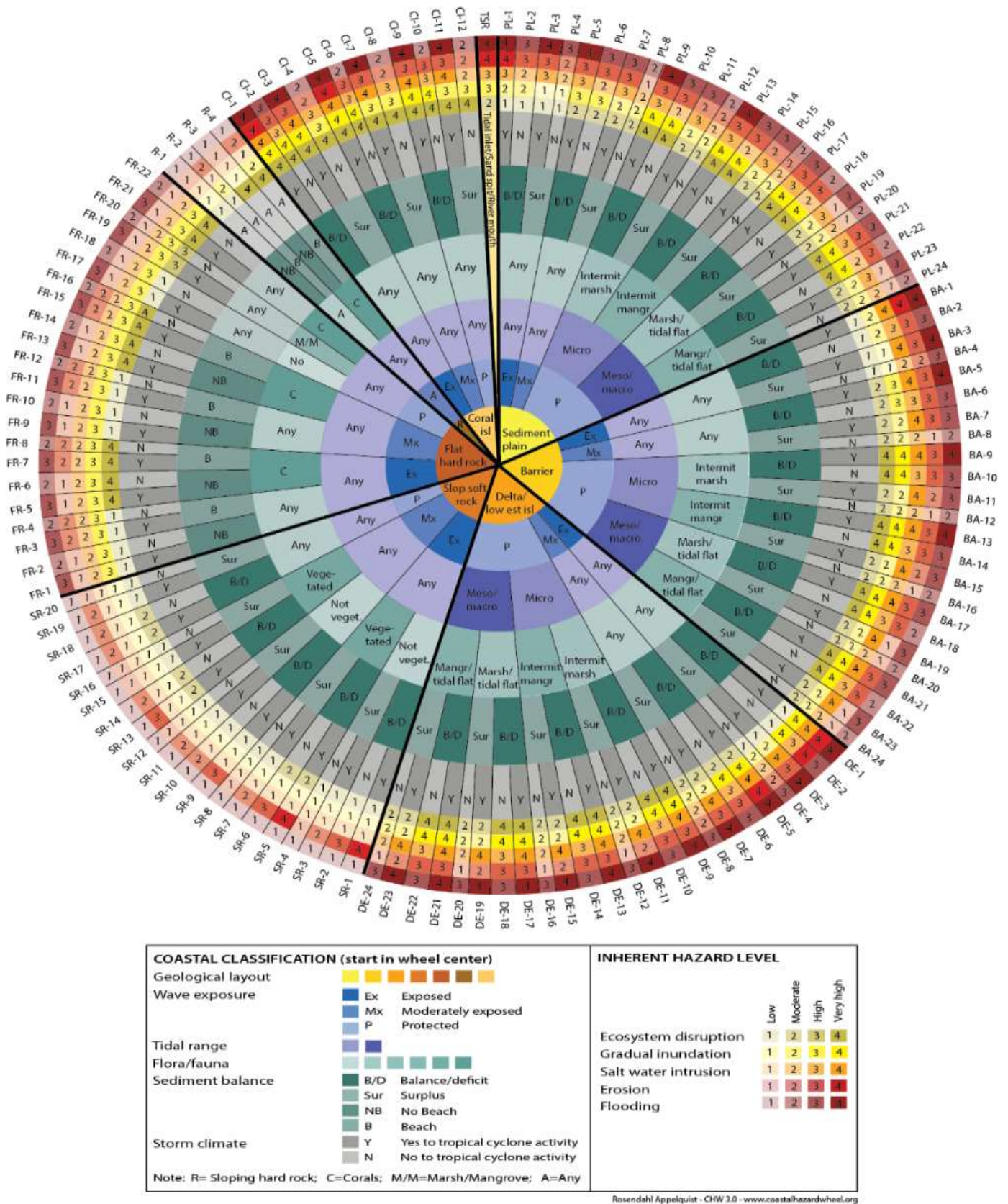


Figure 11 : Roue de la classification côtière

6. Evaluation de la vulnérabilité actuelle du littoral de Bargny

Dans cette partie, nous allons caractériser la vulnérabilité actuelle avec le calcul de l'indice de vulnérabilité côtière.

A l'approche des côtes, les vagues générées au large (eaux profondes) vont se transformer par l'interaction avec le fond. Trois zones peuvent être distinguées depuis le large jusqu'au trait de côte. La zone de levée (shoaling zone) qui s'étend du point de formation des vagues au point de déferlement. Ensuite la zone de déferlement (surf zone) qui s'étend depuis le point de déferlement des vagues vers le haut de plage. Enfin, le haut de plage ou "swash zone" correspond à la zone de la pente affectée par le jet de rive qui monte sur la plage jusqu'au trait de côte sous l'impulsion donnée par une vague après un déferlement, et par la nappe de retrait (backwash) contrôlée par la gravité (Aagaard and Power ,2012).



Photo 11 : Unités hydrodynamiques et morpho-dynamiques sur le site côtier de Bargny (Source : Sakho, Décembre 2019)

✓ Indice côtier de vulnérabilité (ICV)

Sous la menace du réchauffement climatique, la zone côtière est exposée à des risques de perturbations d'ordre physique telles que **l'inondation, l'érosion côtière et la déstabilisation des dunes littorales** suite à **une élévation du niveau de la mer**. L'ICV permet d'évaluer la vulnérabilité d'une zone côtière à l'élévation du niveau marin (Gomitz et al., 1997). L'ICV combine ainsi la sensibilité du système côtier avec sa capacité naturelle à s'adapter à des conditions environnementales changeantes, ce qui donne une mesure quantitative de la vulnérabilité naturelle du littoral aux effets de l'élévation du niveau de la mer (Klein et Nicholls, 1999 ; Pendleton et al., 2010).

Les six variables sont classées sur une échelle linéaire de 1 à 5 par ordre de vulnérabilité croissante due à l'élévation du niveau de la mer (Tableau 1). Elles comportent des informations quantitatives et qualitatives. Les variables quantitatives se voient attribuer un classement de vulnérabilité basé sur leurs valeurs réelles, alors que la variable de géomorphologie non numérique est classée qualitativement en fonction de la susceptibilité relative d'un relief donné au changement physique (Thieler and Hammar-Klose, 2000).

a = géomorphologie ; b = altitude; c = vitesse relative d'élévation du niveau marin; d = taux de recul du trait de côte; e = amplitude moyenne de la marée; f = amplitude moyenne de la houle; g = type de roche. Il existe trois classes de risques selon (Gomitz et al., 1997) :

- Indice bas ou à faible risque, avec des valeurs inférieures à 11
- Indice modéré ou à risque modéré, avec des valeurs entre 11 et 22
- Indice élevé ou à risque élevé, avec des valeurs supérieures à 22.

C'est la racine carrée du produit des différentes variables divisée par le nombre de variables utilisées :

$$ICV = \sqrt{((a \times b \times c \times d \times e \times f \times g) \div 7)}$$

	Très bas	Bas	Modéré	Elevé	Très élevé
Variables	1	2	3	4	5
Géomorphologie	Côtes rocheuses, côtes escarpées, Fards	Falaises moyennes, cotes dentelées	Falaises basses, dépôts glaciaires, plaines alluviales	Plages de galets, Estuaire, lagune	Plages de barrières, Plages de sables, vasières, deltas, Mangrove, récifs coralliens
Pente côtière (%)	>1.20	1.20-0.90	0.90-0.60	0.60-0.30	<0.30
Changement relatif du niveau de la mer (m/an)	<1.8	1.8-2.5	2.5-3.0	3.0-3.4	<3.4
Erosion/accrétion de la ligne du rivage	>2.0	1.0-2.0	-1.0 - +1.0	-1.1- -2.0	<-2.0
Amplitude moyenne de la marée (m)	>6.0	4.0-6.0	2.0-4.0	1.0-2.0	<1.0
Altitude (m)	≥30,1	20,1 - 30,0	10,1- 20,0	5,1 -10,0	0 -5,0
Hauteur moyenne des houles(m)	<0.55	0.55-0.85	0.85-1.05	1.05-1.25	>1.25

Tableau 1 : Les sept niveaux des cinq variables de la classification côtière faite par l'USGS sur la côte Atlantique des Etas-Unis (Thieler et Hammar-Klose, 2000a)

✓ Loi de BRUUN : calcul du taux de recul

Pour estimer le recul du rivage dû à l'élévation du niveau de la mer, la loi de Bruun a été utilisée (Bruun, 1962, 1988) :

$$R = \frac{S \times G \times L}{(b+h)}$$

Où **R** est le recul dû à l'élévation du niveau de la mer, **S** est l'élévation du niveau de la mer, **G** est la proportion de matériau érodé qui reste dans le profil actif, **L** est la largeur du profil actif, **b** est la hauteur de la dune et **h** est la profondeur de fermeture. Cette règle de Bruun est la méthode la plus couramment appliquée (exemple : Niang-Diop, 1995 ; EUROSION, 2004 ; Cowell, 2006 ; Hinkel et Klein, 2009 ; Zang et al., 2004, Niang et al., 2005) pour évaluer le recul du rivage causé par l'élévation du niveau de la mer (Yates-Michelin et al., 2011).

- La loi de Bruun est appliquée à partir de $G = 1$ (quand les sédiments **sont des sables** (Niang et al., 2005) ; $h = 5,56$ m et $L = 1831$)

✓ La vitesse d'élévation du niveau de la mer

Sur cette zone côtière, le taux de l'élévation du niveau de la mer (Cf. Fig.12), varie entre 2 et 3 mm/an (Bakhoum *et al.*, 2017).

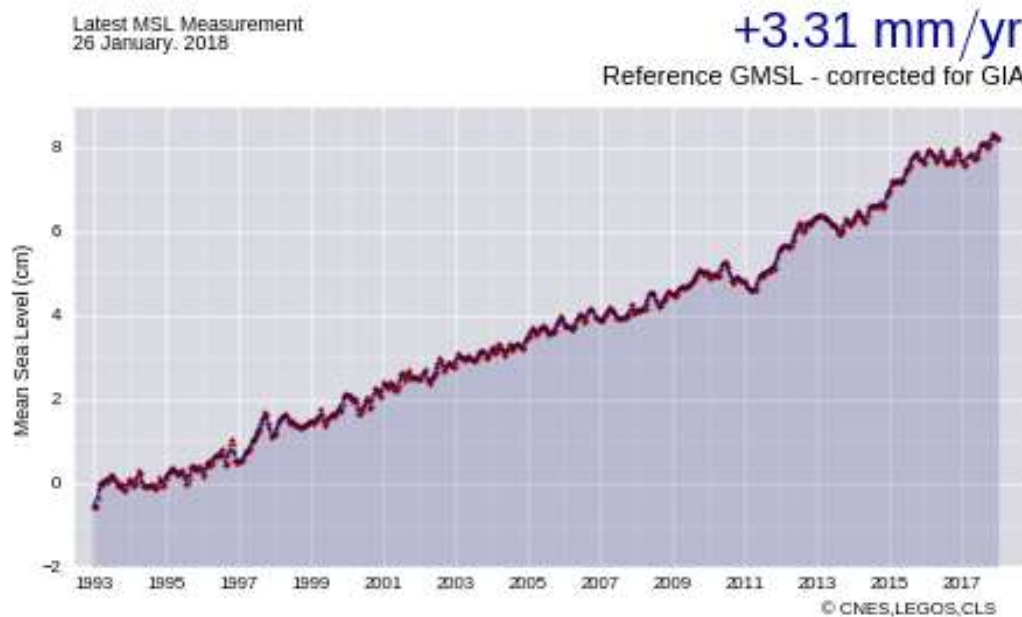


Figure 12 : Elévation du niveau de la mer dans l'Atlantique Nord de 1993 à 2018 Source : Cnes (<http://www.aviso.oceanobs.com> / Duacs)

7. Evaluation de la vulnérabilité future du littoral de Bargny

Pour la modélisation de la vulnérabilité future, il sera proposé une stratégie qui permettra de faire des prévisions dans le future sachant que la vulnérabilité actuelle est connue (Fig.13). C'est pourquoi, il serait important d'introduire la notion de scénario. Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols constituent la base du calcul des futurs climats possibles. La génération de scénarios d'émissions, les Representative Concentration Pathways (RCP), définit, pour un objectif climatique déterminé (NCCS).

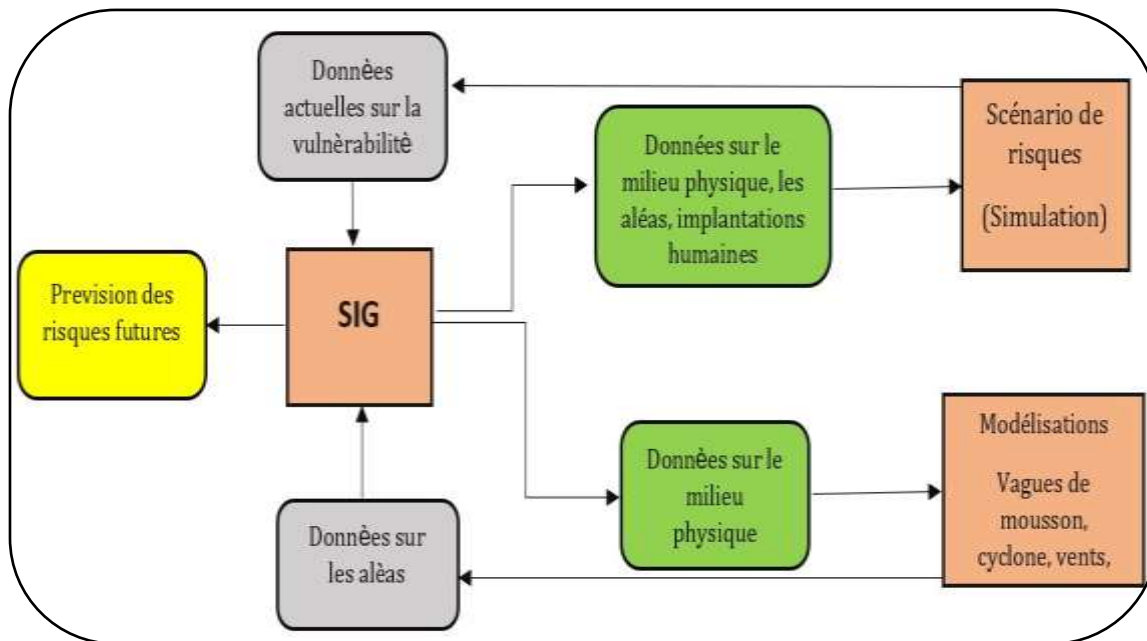


Figure 13 : Proposition schéma de modélisation pour la prévision des risques futures

Sur ce schéma, on propose un modèle pour la prévision des risques futurs. Dans le logiciel ArcGIS, il y'a une partie qui peut permettre de créer un schéma de model en définissant les données d'entrée et les données de sorties. C'est pourquoi, dans cette proposition nos données d'entrée sont les données sur la vulnérabilité actuelle (l'ICV, le taux de recul R) et les données sur les aléas climatiques (Hauteurs significatives des houles, périodes et directions). Ce model prendra en compte également les hypothèses des scenarios. En effet, c'est sur cette base que l'on tourne le model pour avoir des fichiers de sortis donnant des informations sur les Hauteurs significatives des houles, leurs directions et leurs périodes. Ces dernières peuvent nous renseigner, dans le future les types de houles (Hs et Périodes) susceptibles d'affecter nos côtes en termes de dégâts.

✓ Risques de submersion marine

La submersion marine désigne une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques extrêmes.

L'une des premières conséquences de l'élévation du niveau de la mer est l'augmentation du risque d'inondation associé aux ondes de tempête dans les zones côtières basses. L'élévation

relative du niveau de la mer (St) est de 25 cm (0,25 m) sur l'horizon 2035, et 50 cm (0,5 m). (Sadio et al., 2019)

Dans notre cas on utilisera le scénario RCP4.5 et le scénario RCP8.5 à l'horizon 2035 (Tableau 2).

Elévation du niveau marin (ENM)	Horizon 2035	
	0.25 M (25 CM)	
Hauteur significatives (Hs)	Scenario RCP4.5	Scenario RCP8.5
Moyenne des houles	1.62m	1.55m

Tableau 2 : Exemple de Variables adaptée au calcul de l'ICV pour le futur (source :Sadio et al., 2019)

8. Traitement des données hydrodynamiques

Dans la littérature les données hydrodynamiques comme les vagues sont traitées soit par Matlab soit par python 3 pour tracer les roses de vagues. Pour le traitement avec python 3 il faut d'abord importée les packages :

```
# Import the required packages
>> Import pandas as pd
>> Import NumPy as np
>>from matplotlib import pyplot as plt
>> import matplotlib.cm as cm
>> from math import pi
```

Ensuite ouvrir le fichier contenant les données de vagues (**df = pd.read_excel('chemin du fichier')**), puis utiliser un type de figure (Template). Il faut bien noter qu'il n'existe pas encore de fonctions ou de scripts spécifiques à la réalisation de rose de vagues. Mais se sont les scripts ou fonctions, pour la réalisation de rose de vent qui sont ritualisées afin de créer des roses de vagues. Apres cela, il faut afficher la rose en utilisant les lignes de commandes suivantes (exemple) :

```
# Plot a windrose
>> ax = windroseAxes. from ax ()
>> ax.bar (df. DIRECTION, df.Hs_m, normed=True, opening=0.8, edgecolor='white')
>> ax.set_legend ()
```

9. Traitement des échantillons sédimentaires

Les études sédimentologiques consistent à caractériser les environnements sédimentaires faisant appel à de multiples méthodes dont le tamisage qui est la plus ancienne mais encore très largement utilisée car étant la plus économique, pertinente et de qualité.

✚ Lavage

Tout d'abord, les sédiments sont lavés avec de l'eau dans le but d'enlever les impuretés et éliminer les sels puis séchés à 70°C dans l'étuve.

✚ Décarbonisation

Un deuxième lavage qui a pour but d'éliminer les fragments de coquille se fait à l'acide (HCl) dilué au 1/10 à partir d'un poids initial de 230g de sédiments. La formule suivante est utilisée pour déterminer le taux de carbonates présents dans les sédiments :

$$\%C=100 \times (P1-P2)/P1$$

(Avec **P1** : Masse sèche initiale et **P2** : Masse sèche après lavage à l'**HCL**).

✚ Tamisage

Une masse de 150g d'un échantillon sec, décarbonaté est mise dans une colonne de 18 tamis (2 à 0,04 mm de maille) de norme AFNOR. La tamiseuse est programmée et mise à en marche pour 15mn de tamisage. À la fin de chaque tamisage, les refus des tamis sont recueillis pesés puis cumulés à l'aide d'une balance électronique de précision puis reportés sur une fiche de tamisage (Fig.14)



Figure 14 : Traitement de données sédimentologiques

Représentation graphique

Les poids des différents refus cumulés des tamis sont transformés en pourcentage. Les données cumulées en pourcentage obtenues après le tamisage et avec la classification granulométrique de **Wentworth** permettent de tracer sur Excel des histogrammes traduisant les pourcentages de chaque type de sédiments.

Tableau 3 : **Classification granulométrique de Wentworth**

Cette classification est basée sur la taille des sédiments c'est-à-dire leurs diamètres. Ce dernier peut être exprimé en millimètres ou en unités phi (ϕ) avec $\phi = -\ln(d)/\ln(2)$ et d étant le diamètre.

2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	0,0039	(mm)
Sable très grossier	Sable grossier	Sable moyen	Sable fin	Sable très fin	Silts	Argiles	
-1	0	1	2	3	4	8	(ϕ)

Le traitement des échantillons sédimentaires donne Globalement, les fractions granulométriques sont comprises entre 50 μ m et 1,60 mm. Les sédiments dominant dans la zone est du sable Moyen (Fig.15) puis viennent les sables fins et très fin.

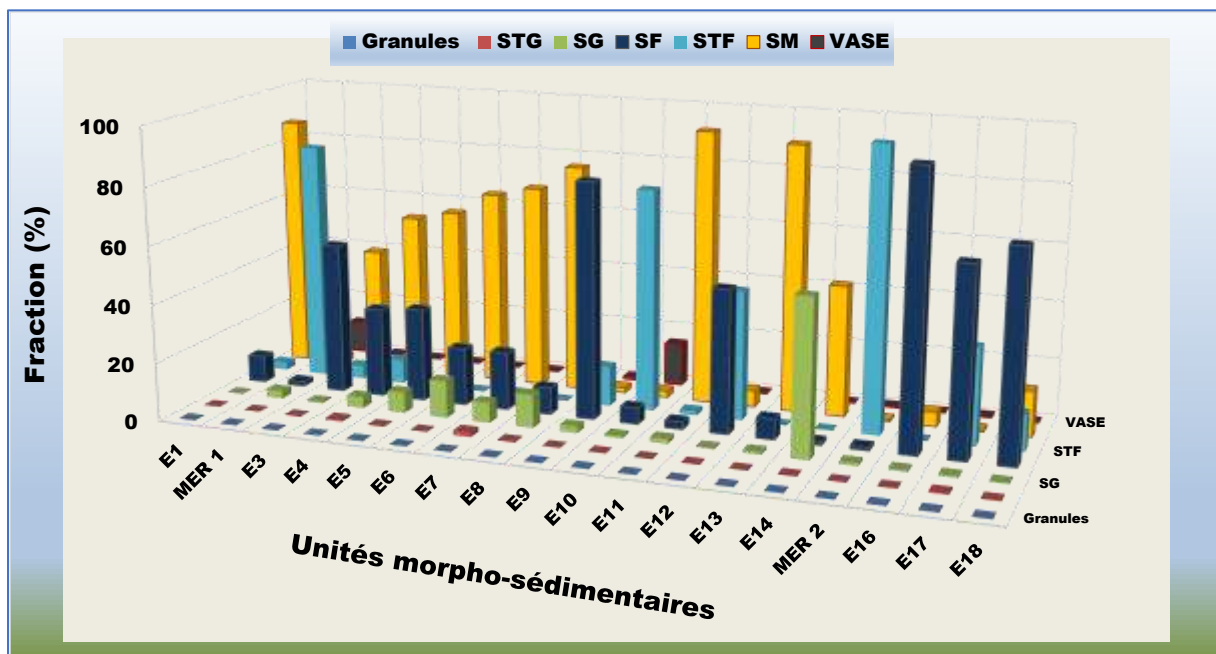


Figure 15 : Nature des sédiments sur les différentes unités morphologiques de la côte de Bargny : STG = Sable Très Grossier, SG = Sable Grossier, SM = Sable Moyen, ST = Sable Fin et STF = Sable Très Fin.

Chapitre 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

I. Analyse du forçage météo-marine

1. Analyses de l'évolution pluri-décennale des hauteurs significatives des vagues

Avec les données Era5 de 1978 à 2022, on a pu voir la variation des hauteurs significatives des houles (Fig.16). Cette dernière montre d'une part que la grande hauteur significative est de 3,5 m et est enregistrée pour les années 1984,1996 et 1998. Et d'autre part la plus petite hauteur significative est de 1,4 m pour les années 1980,1990,1992 et 2004.

Il faut noter que de 2020 à 2022 les hauteurs significatives se sont diminuées allant jusqu'à 1,7 m. Les résultats obtenus avec les données Era5 montrent : La plus grande période soit 17 s pour l'année 2014. Et la plus petite période soit 8,2 s pour les années 1986 et 1990.

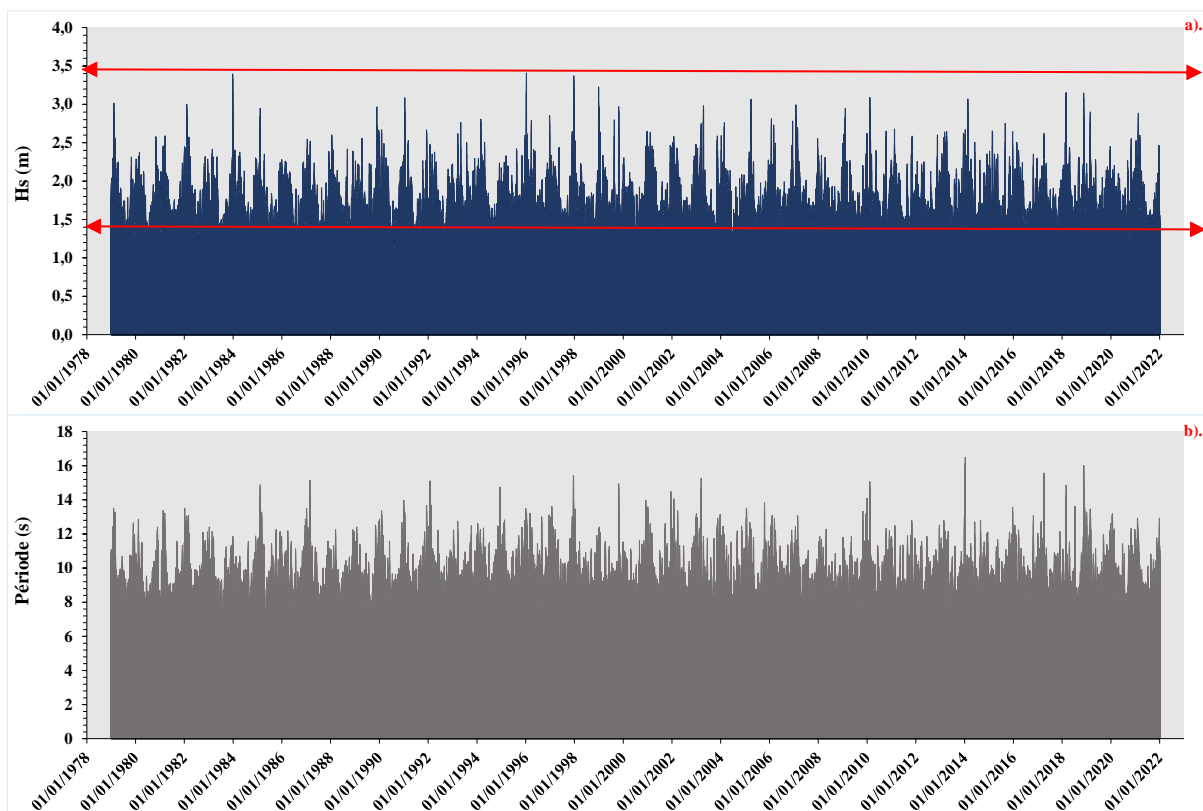


Figure 16 : Hauteurs significatives des vagues (en haut) et périodes associées (en bas) de 1978 à 2022

2. Direction dominante des vagues

Ici la plupart des houles avec une vitesse de propagation forte sont de direction Nord-Ouest avec des hauteurs significatives allant de 3 à 3,5 m. Tandis que les catégories de houles ayant les hauteurs significatives les plus faibles sont de directions Sud-Ouest soit 0,5 à 1 mètre (fig. B). La figure (A) montre un nuage de points représentant les hauteurs significatives des vagues. Ces derniers montrent une corrélation positive. Ce qui justifie la dominance des vagues de direction Nord-Ouest.

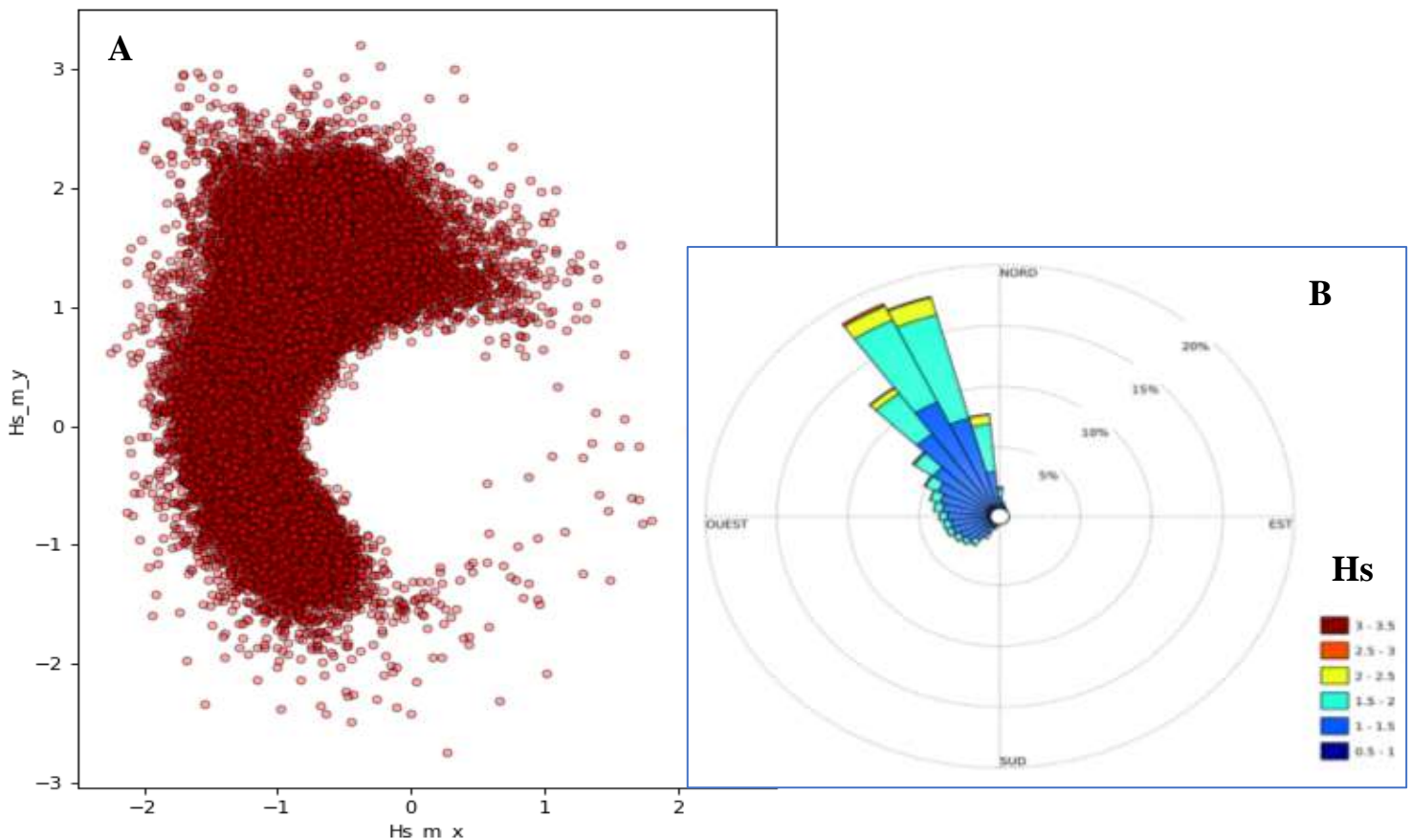


Figure 17 : Nuage de point traduisant la répartition des vagues avec leurs hauteurs significatives (A) et la rose des vagues montrant la direction et la hauteur des vagues

3. Identification des extrêmes de tempêtes

Dans cette étude, il est considéré comme une tempête majeure, si le $H_s \geq 2,51$ m. Cette H_s , prise comme référence, correspond à celle enregistrée lors des tempêtes de Février 1987 et de Mai 2014 (Fig.18). Pour l'identification de l'anomalie positive, il faut soustraire la hauteur significative de l'année considérée H_s par la hauteur significative de référence $H_s(\text{réf})$.

Exemple : détermination de l'anomalie positive de Hs de la tempête FRED en 2015

$$A = H_s - H_s(\text{réf}) \quad \longrightarrow \quad A = 2,75 - 2,51 = 0,24 \text{ m}$$

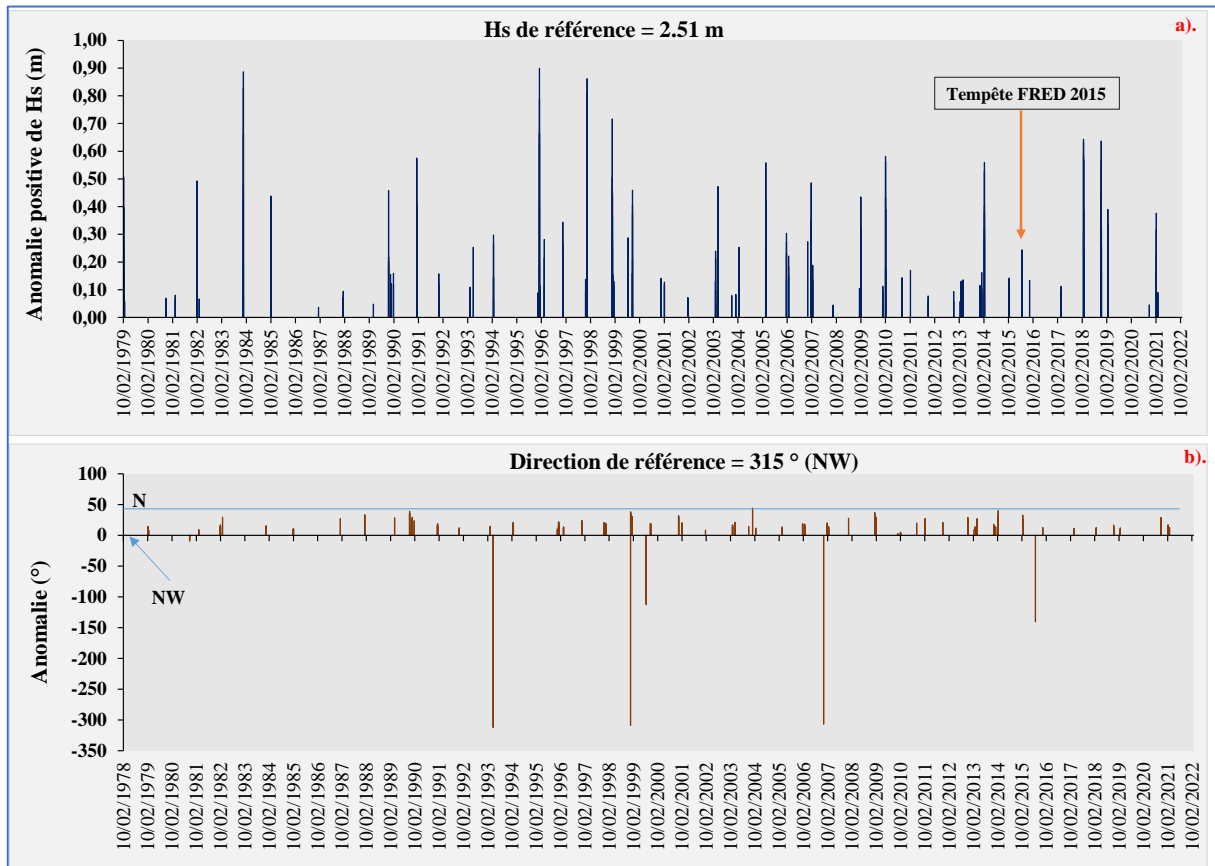


Figure 18 : Identification des niveaux extrêmes au large de Bargny de 1979 à 2021 : a). Ecart positifs par rapport à la hauteur significative de référence ($H_s=2,51 \text{ m}$) et b). Les directions des Hs représentées par rapport à 315° (NW).

Dans la figure 18, nous avons la représentation de l'anomalie sur un intervalle d'années de 1978 à 2022. Cette représentation permet de trouver n'importe quelles tempêtes dans la période d'étude. Mais permet également de trouver leurs directions. C'est pourquoi, un exemple a été émis pour trouver la tempête de Fred en 2015.

4. Analyse des composantes de la marée

4.1 Composantes harmoniques

Le type de marée dépend en fait de l'importance relative des composantes diurnes par rapport aux composantes semi-diurnes selon le rapport :

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

Autrement dit c'est le rapport des amplitudes diurnes (solaire **O1** et lunaire **K1**) sur les amplitudes semi-diurnes (solaire **S2** et lunaire **M2**).

Les résultats montrent que nous avons une marée de type semi-diurne (deux basses mers et deux pleines mers) sur les côtes de Bargny.

4.2 Niveau de l'eau

La marée est de type semi diurne à inégalité diurne Les observations faites sur 5 jours en période de vives-eaux, montrent un marnage moyen de 1,25 m. Les courants de marée sont faibles, avec des vitesses maximales <0,2 m.s-1 (Fig.19b). La figure 19a montre le niveau de l'eau sur une observation de 5 jours. On constate deux basses mers et deux pleines mers dans une journée.

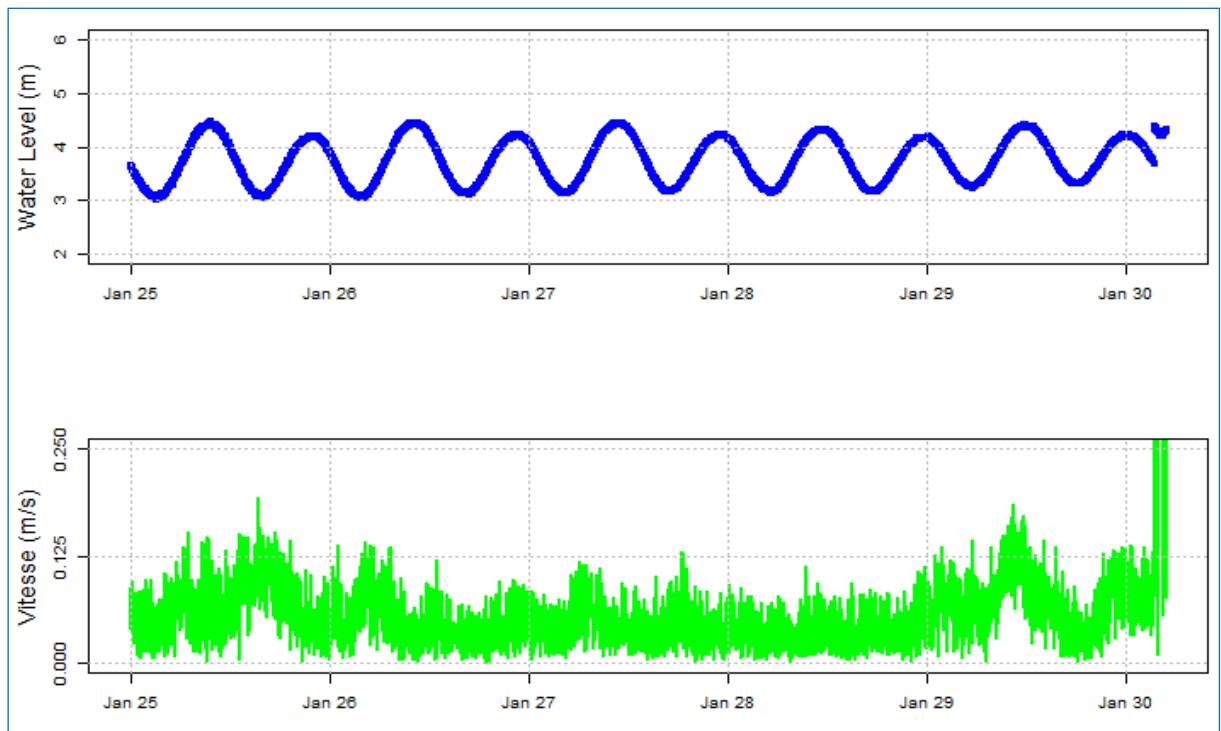


Figure 19 : Conditions hydrodynamiques devant le point de déferlement en période de vives-eaux. Le point de mesure est situé à 3 m de profondeur.

II. Etude de la vulnérabilité physique du littoral de bargny

5. Evolution diachronique du trait de côte de 1949 à 2021

Sur les côtes de Bargny, les traits de côte s'étendent environ de 2,5 km. Au cours de ce travail (Fig.20), il a été choisi un espacement de 100 m entre les transects pour mieux voir le phénomène de l'évolution du trait de côte.

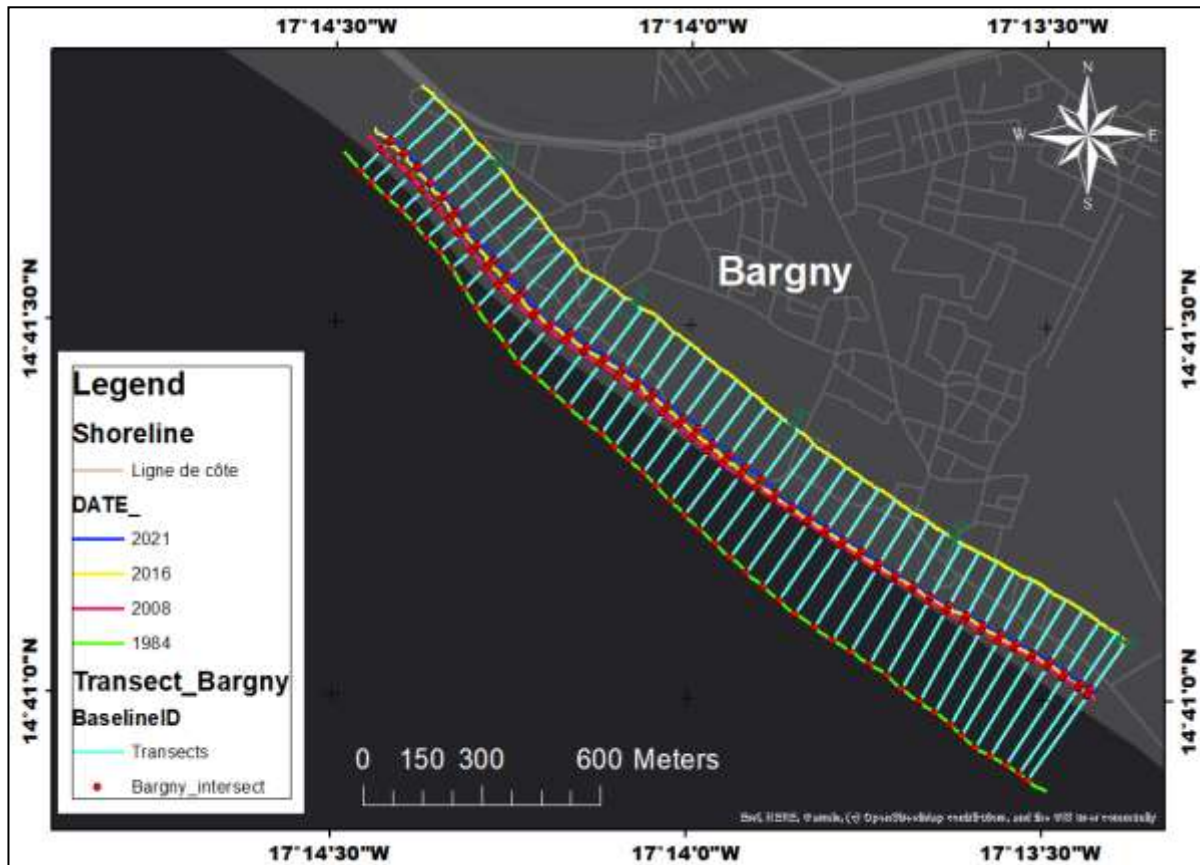


Figure 20 : Cartographie globale des traits de côte (2021, 2016, 2008, 1949)

La figure 20 montre les traits de côte 1984, 2016, 2008 et 2021. Ces traits de côte montrent clairement une mobilité du trait de côte très sévère entre 1984 et 2016.

✓ Evolution du trait de côte en 1949 et en 2008

Les résultats de simulations ont permis également de tracer un profil d'EPR (L'End Point Rate) pour l'année 1949 et 2008 qui est un bon indice pour évaluer ce phénomène d'évolution du trait de Côte.

L'année 1984 et 2008, Bargny a connu une érosion (perte de sable) atroce sur ses côtes. Cette érosion est localisée en général vers le sud de Bargny ou il y'a un écart extraordinaire entre les

traits de côte soit un taux de recule allant de 10.9 m/an à 3 m/an d'où une moyenne de 6.65 m/an soit une moyenne annuelle de -50,68 m (1949 et 2008) sur une distance de 1.8 km (fig.21).

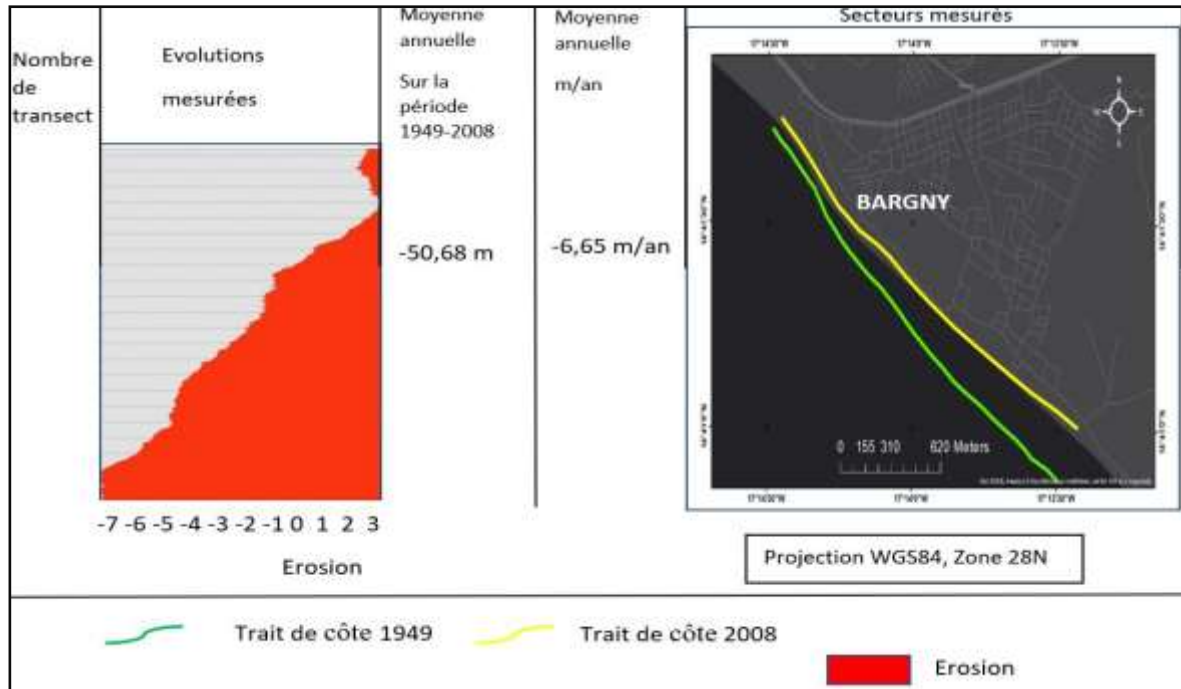


Figure 21 : Evolution des traits de côte entre 1949 et 2008

✓ L'évolution du trait de côte entre 1949-2008, 2008-2016 et 2016-2021

Dans cette partie, nous essayons de voir l'évolution du trait de côte entre 1949-2008, 2016-2021 et 2016-2021. Sur ces ensembles intervalles la tendance est impressionnante. Les résultats montrent une accrétion au nord de Bargny avec un taux d'évolution moyenne + 0,027 m/an sur une distance de plus de 400 m traduisant de l'accrétion.

Par ailleurs, une forte érosion a été enregistrée avec un taux d'évolution moyenne de -0,027 m/an sur une distance de 2 km soit 84 % de perte sur les côtes de Bargny (Fig.22).

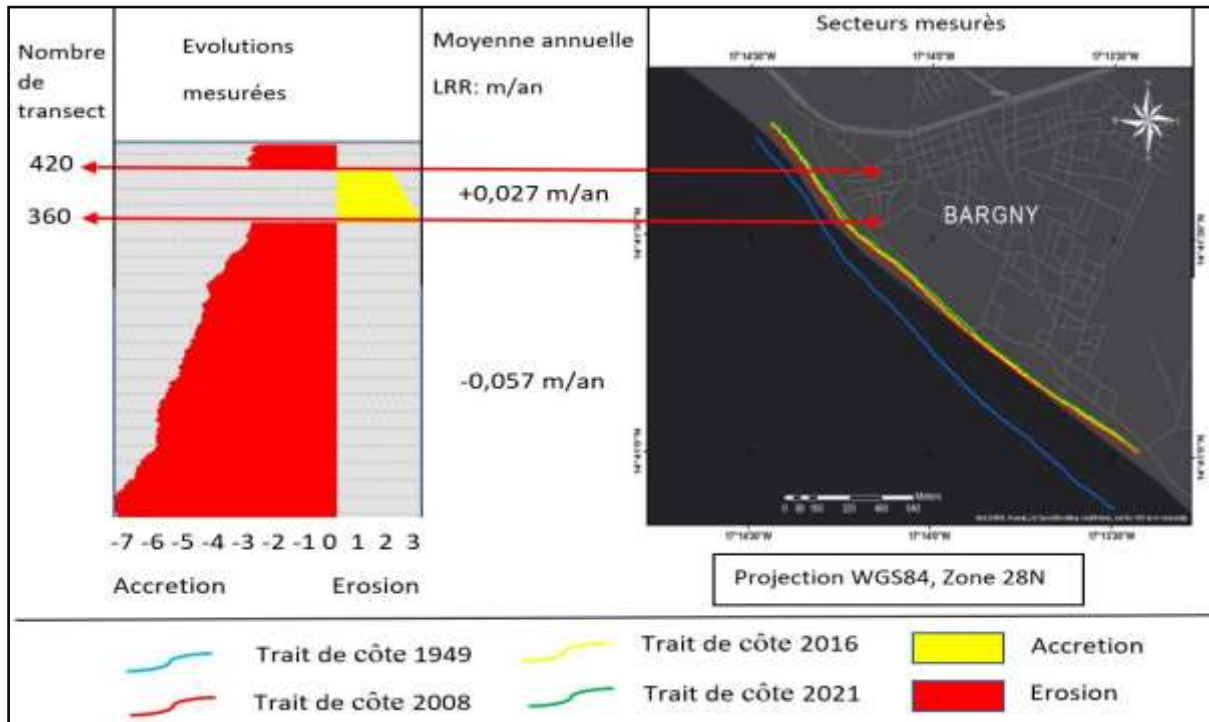


Figure 22 : l'évolution du Trait de Côte entre 1949-2008,2008-2016 et 2016-2021

6. Evolution de la vulnérabilité actuelle

6.1 Situation de vulnérabilité accentuée par la topographie

Les levés topographiques effectuées en décembre 2020 et celles effectuées en Janvier 2021 à l'aide d'un drone, montrent que le littoral de Bargny présente une côte très basse. L'altitude maximale est d'environ 7,50 m.

En allant au nord, vers la route nationale l'altitude est maximale avec des valeurs allant de 7,48 à 5,90 m. Ce même constat est noté au Sud vers Bargny Minâme.

Les plus faibles altitudes sont enregistrées vers la côte avec des valeurs allant de 1,08 à -0,11 m.

Donc ce qu'il faut retenir ici, c'est que le MNT montre : Plus qu'on s'éloigne de la côte l'altitude augmente et lorsqu'on s'éloigne des habitations l'altitude diminue (Fig.23).

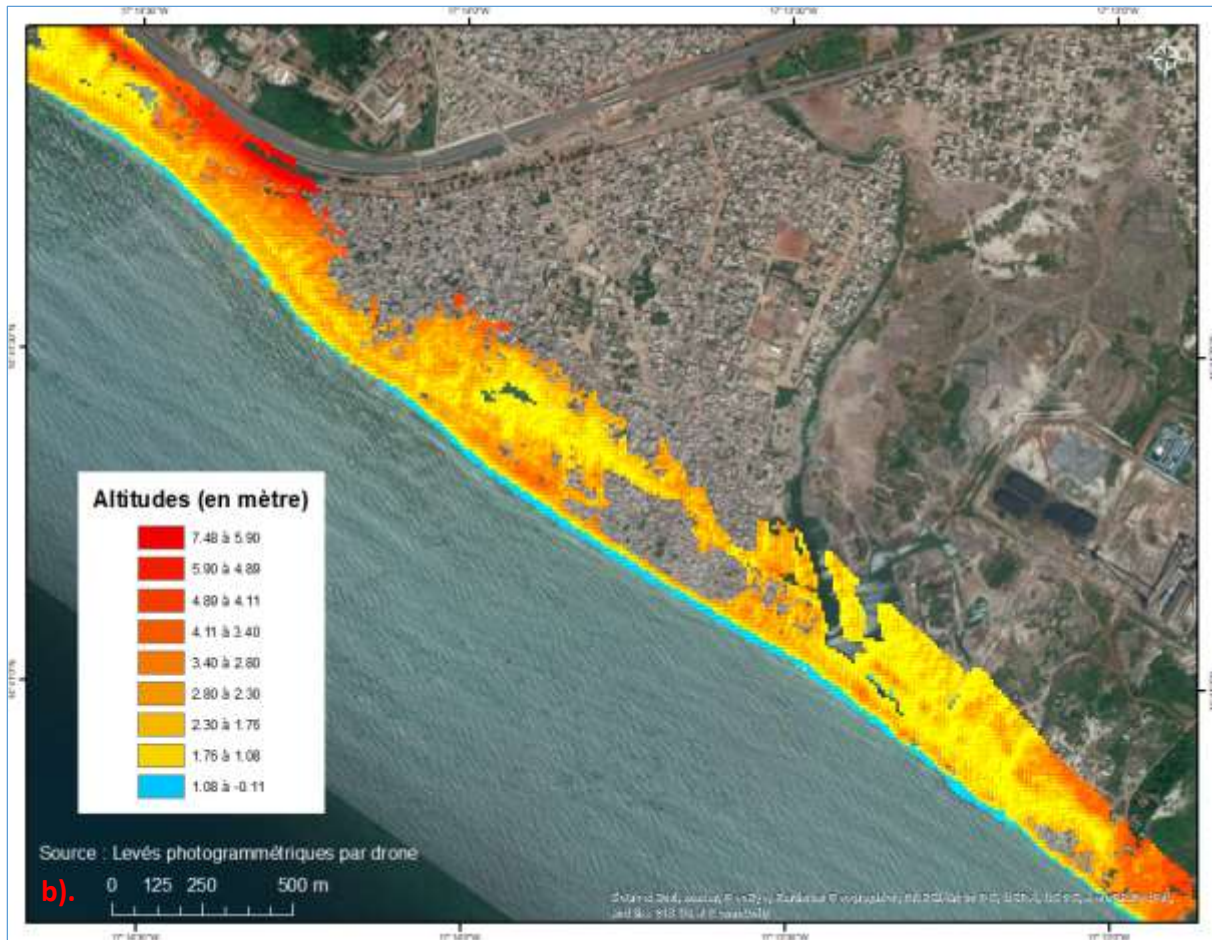


Figure 23 : Modèle Numérique de Terrain du littoral de Bargny (Situation en Janvier 2022)

6.2 Analyse du profil multicritère et application de la roue des risques côtiers

Cette carte (Fig.24), illustre le niveau de danger côtiers en termes de risques d'érosion. Ces risques sont liés principalement **aux entrées de marée** ainsi **qu'aux étendues sédimentaires** plates et aussi la pente le long du littoral.

- Le long des côtes de Bargny présente des risques d'érosion de Bargny Nguoude en passant par Bargny Nguèthe et Bargny Minâme.
- Puis, des risques d'érosion moderne enregistré au nord de Bargny Nguoude.
- En fin, des risques d'érosion faible entre Bargny Nguèthe et Bargny Nguoude



Figure 24 : Carte des risques d'érosion

6.3. Risques d'inondation progressive

Cette carte illustre les risques d'inondation progressives côtières au niveau de Bargny (Fig.25). Ce risque est principalement lié aux plaines rocheuses et sédimentaires. Des niveaux de risques élevés au sud de Bargny Ndaldali jusqu'à Bargny Minâme et aussi entre Bargny Ngoude et Bargny Nguèthe. Il a été constaté des zones à risque modéré plus ou moins à Bargny Nguèthe et au sud de Bargny Ngoude. Des zones de risques faibles au sud-ouest de Bargny Nguèthe et à l'ouest Bargny Ngoude.

Il faut savoir que l'inondation progressive est un processus lent et à long terme et est donc principalement pertinente pour la planification côtière à plus long terme.



Figure 25 : Carte des risques d'inondation progressive

6.4. Risques d'inondation

Cette carte illustre les risques d'inondation particulièrement lié à la géomorphologie mais aussi à l'érosion donc ce sont des zones susceptibles de subir des inondations dans les années à venir (Fig26).

- Des zones d'habitations à forts risques d'inondation eu été constatés surtout la zone de Bargny Minâme vers le Sud. D'ailleurs lors de la campagne de données ces habitations sont à peu près à 300 mètres de la mer avec des protections de roche pour lutter contre l'avancement de la mer.
- Puis, viennent des zones à risque modéré comme à l'ouest de Bargny Nguèthe, au sud-ouest de Bargny Ndaldali et nord de Bargny Nguode.
- En fin, viennent les zones à risque faible comme à l'ouest de Bargny Nguode.



Figure 26 : Carte des risques d'inondation

7. Indice côtier de vulnérabilité

L'ICV permet d'évaluer la vulnérabilité d'une zone côtière à l'élévation du niveau marin (Gomitz et al., 1997).

Selon les résultats obtenus sur l'ensemble des facteurs intervenant sur la vulnérabilité de la zone de Bargny (Fig.27), nous sommes amenés à faire l'analyse suivant :

- Une estimation de l'indice de **vulnérabilité très élevé** $ICV=32,7$ a été trouvé :
- Le calcul du taux de recul par la loi de BRUUN a donné $R= 7,08 \text{ m/an} < 2$ (Indice très basse)

Donc le risque de **submersion marine** est beaucoup plus visible au sud (Bargny Guethe à Bargny Minâmes).

- Les résultats obtenus avec le profil d'érosion justifient les résultats obtenus avec l'analyse diachronique des traits de côtes en préambule c'est-à-dire une forte érosion Bargny Guethe à Bargny Minâmes, une érosion modérée à Bargny Ngoude et une érosion faible au nord de Bargny Ngoude.

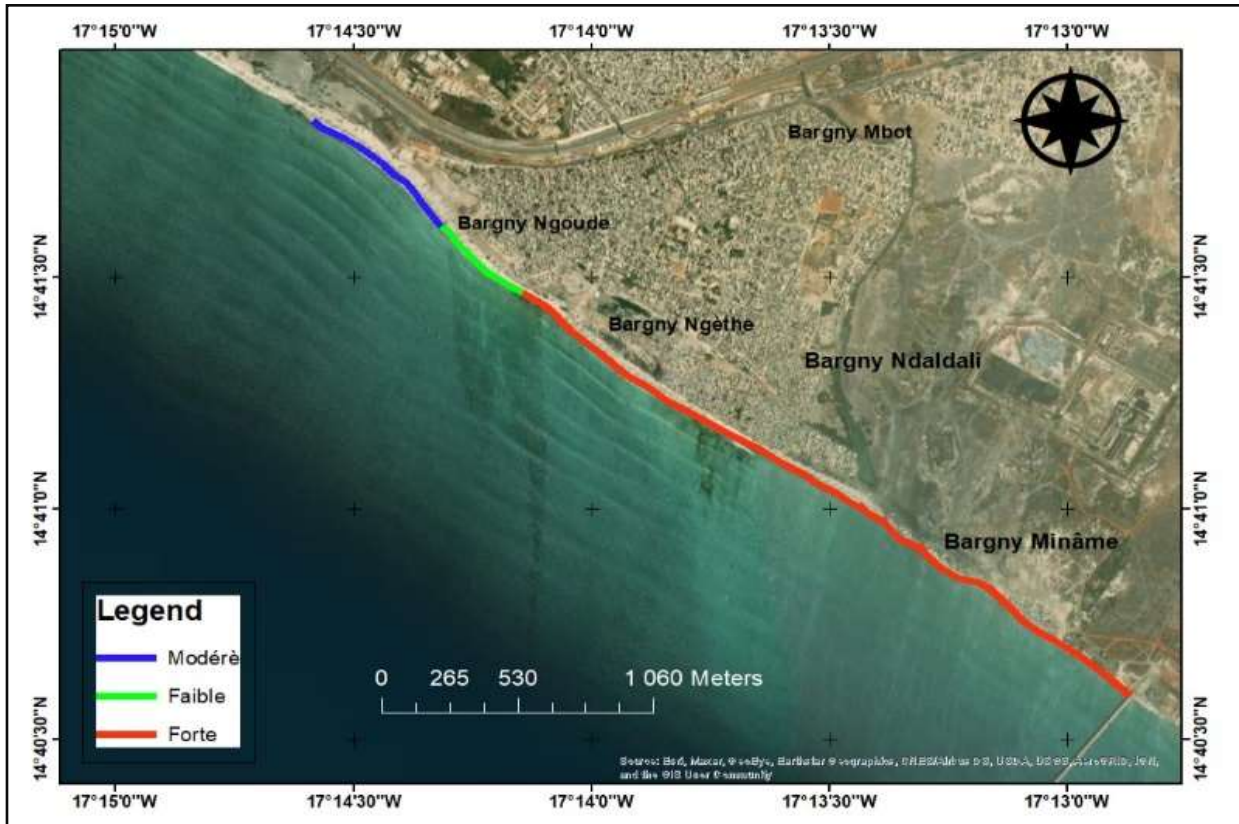


Figure 27 : justificatif de l'ICV par la Carte des risques d'érosion

• **Synthèse : Evaluation des risques côtiers**

En combinant les résultats de l'analyse diachronique du trait de côte, en tenant compte de la géomorphologie du littoral de Bargny et les observations du terrain, il a été noté que les résultats concordent. Il a été constaté que les zones à forte érosion présentent des risques **d'inondation en générale**. Les pourcentages de risque en matière de distance (sur 4 kilomètres) sont présentés ci-dessous :

Tableau 4 : Evaluation des risques par pourcentage de distance sur le littoral de Bargny

Niveau de risque	Erosion(m)	Inondation progressive (m)	Inondation (m)
Fort	72.5	55	35
Modéré	15	29,5	37,5
Faible	10	10	20

Sur la figure 28, les niveaux de risques est plus visible. L'allure de la courbe d'évolution de risque d'érosion est au-dessus des autres allures ce qui signifie justifie tout simplement le niveau de danger de l'érosion au niveau du littoral de Bargny.

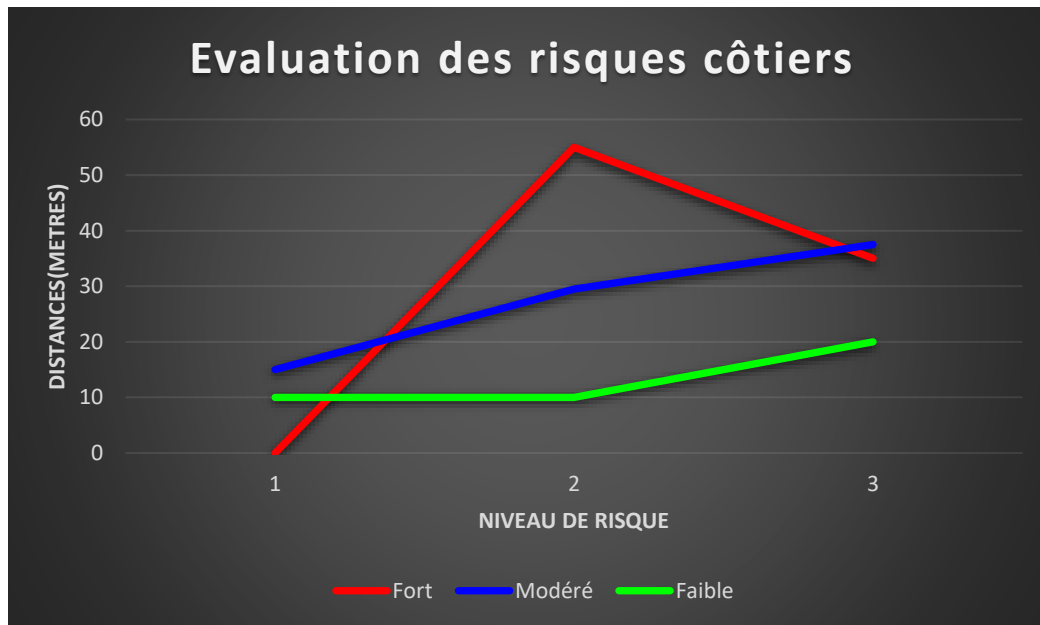


Figure 28 : Courbe d'évolution des niveaux de risques côtiers

III. Modélisation de la vulnérabilité future à l'horizon 2035

L'étude de la vulnérabilité actuelle de la localité de Bargny pourrait nous aider à prévoir à quoi cette localité risque de subir dans le futur. Mais avant cela, on analysera en premier la pente du littoral de Bargny.

La pente est un paramètre essentiel pour caractériser la morphodynamique des plages. La variabilité de la pente peut être responsable de modification de l'asymétrie, de l'étirement et les processus de transport des sédiments et changement de morphologie Floch and Delacourt (2016).

Les résultats montrent un intervalle de pente (Fig.29) : une pente très élevée entre Bargny Ngoude et Bargny Ngethe, une pente basse au nord de Bargny Ngoude et une pente plus ou moins élevée de Bargny Nguèthe à Bargny Miname. Il a été constaté une pente maximale de 4,2% et une pente moyenne de 0,5% au large du littoral de Bargny.

Néanmoins cette pente dépend du comportement géomorphologique (accrétion et érosion) du littoral. C'est pourquoi dans les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, elle suivra la variabilité géomorphologique du littoral.

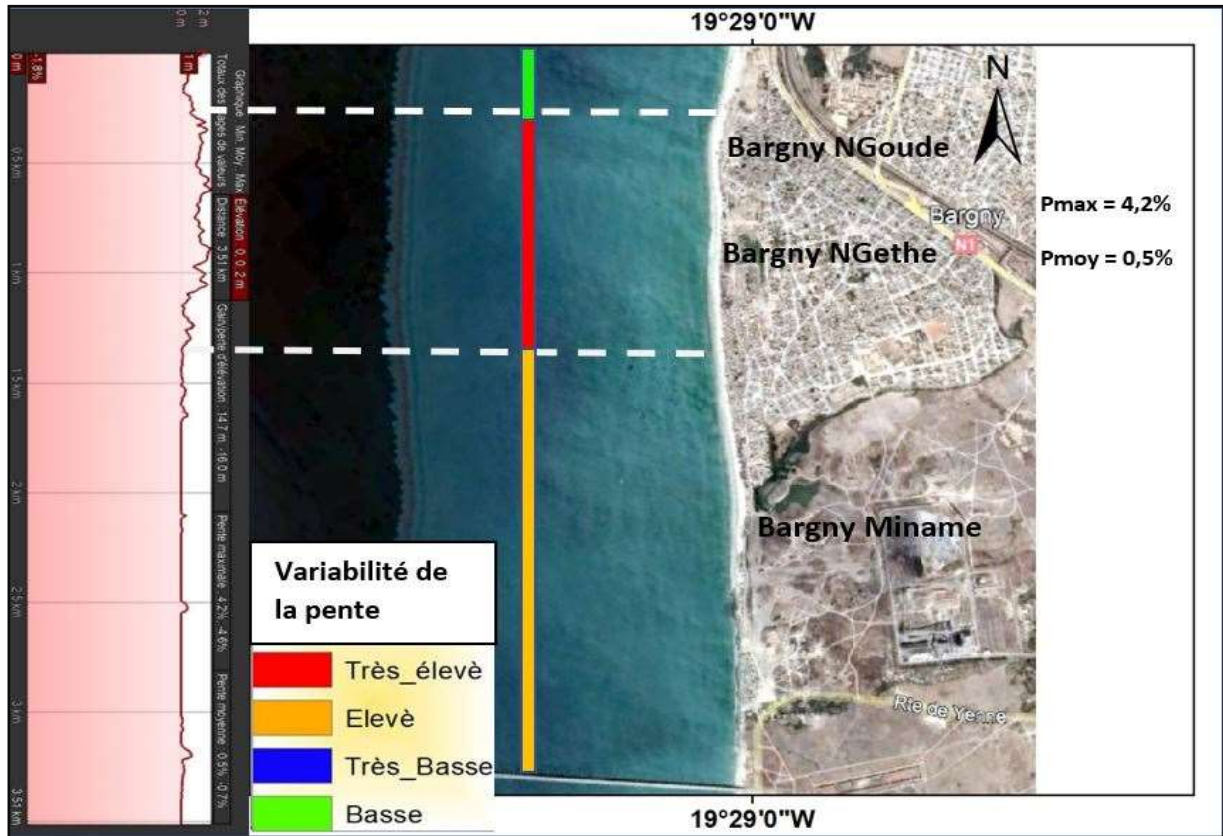


Figure 29 : Carte d'illustration de la pente du littoral de Bargny en 2022

Pour le scénario RCP4.5, on a une élévation du niveau de la mer de 25 cm et la hauteur significative des vagues serait de 1,62m.

Ces informations nous ont permis de se projeter en 2035 et les résultats montrent :

- Un indice de vulnérabilité très élevé augmente légèrement avec un ICV = 32,7 sur toute la côte.
- La gamme de marée et la hauteur moyenne des houles est très élevée. Elles varient entre 1,25 et 1,5 m (en Vive-Eau) sur toutes les côtes de Bargny.
- Le niveau de la mer est très élevé avec des valeurs supérieures à 3,4 mm/an sur le classement de vulnérabilité.
- Le changement de la ligne de rivage est plus ressenti entre Bargny Nguèthe et Bargny Miname et est très élevé. Ce changement de la ligne de rivage est peu ressenti entre Bargny Ngethe et Bargny Ngoude.

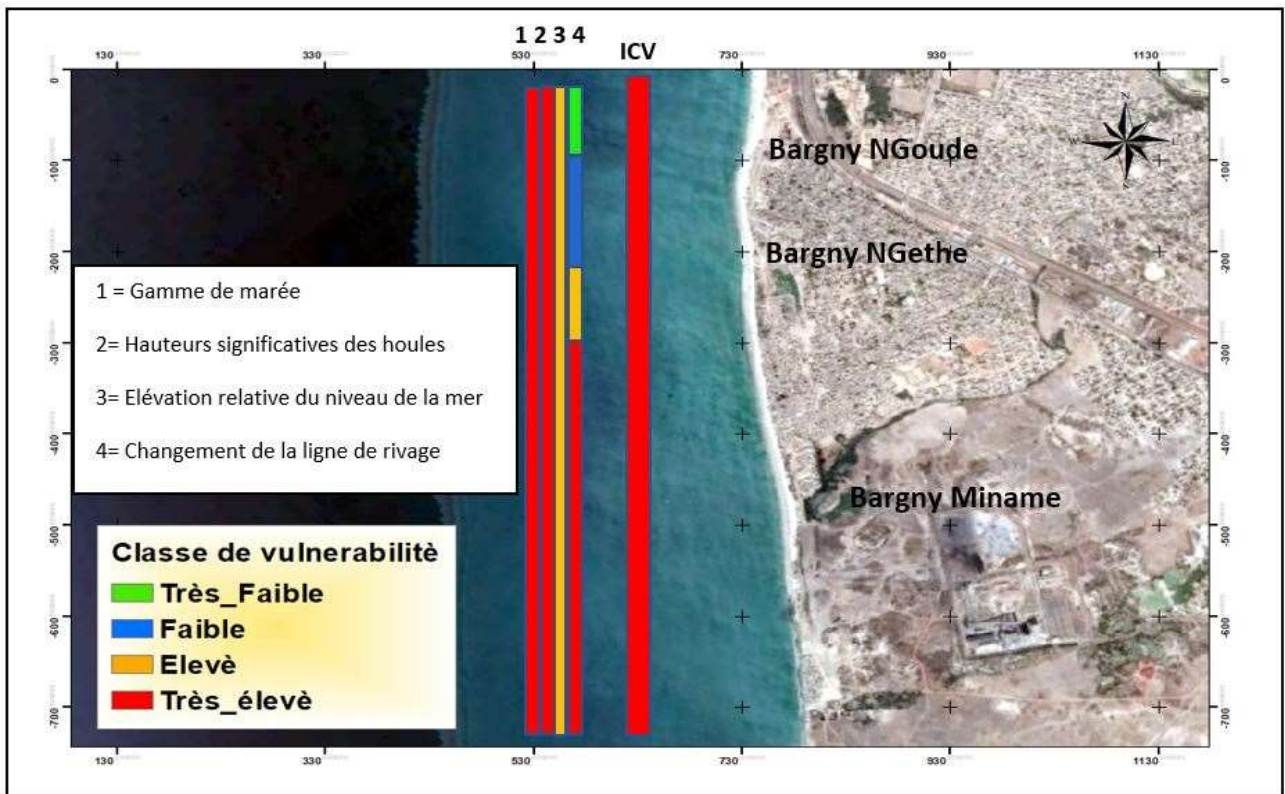


Figure 30 : Indice côtier de vulnérabilité du littoral de Bargny pour le scénario RCP4.5, projection 2035

Pour le scénario RCP8.5, l'élévation du Niveau de la mer reste la même (ENM = 25cm) mais la hauteur significative des houles moyennes des houles est de 1.55 m. Les résultats révèlent pour ce scénario RCP8.5 (projection 2035, Figure31) :

- L'ICV du littoral de Bargny toujours l'ICV est très élevé (>32,7).
- Une gamme de marée et des hauteurs significatives des houles très élevées au large des côtes de Bargny.
- Le changement de la ligne de rivage très élevé de Bargny Miname à Bargny Ngethe, faible et très faible de Bargny Ngethe à Bargny Ngoude et basse au nord de Bargny Ngoude.

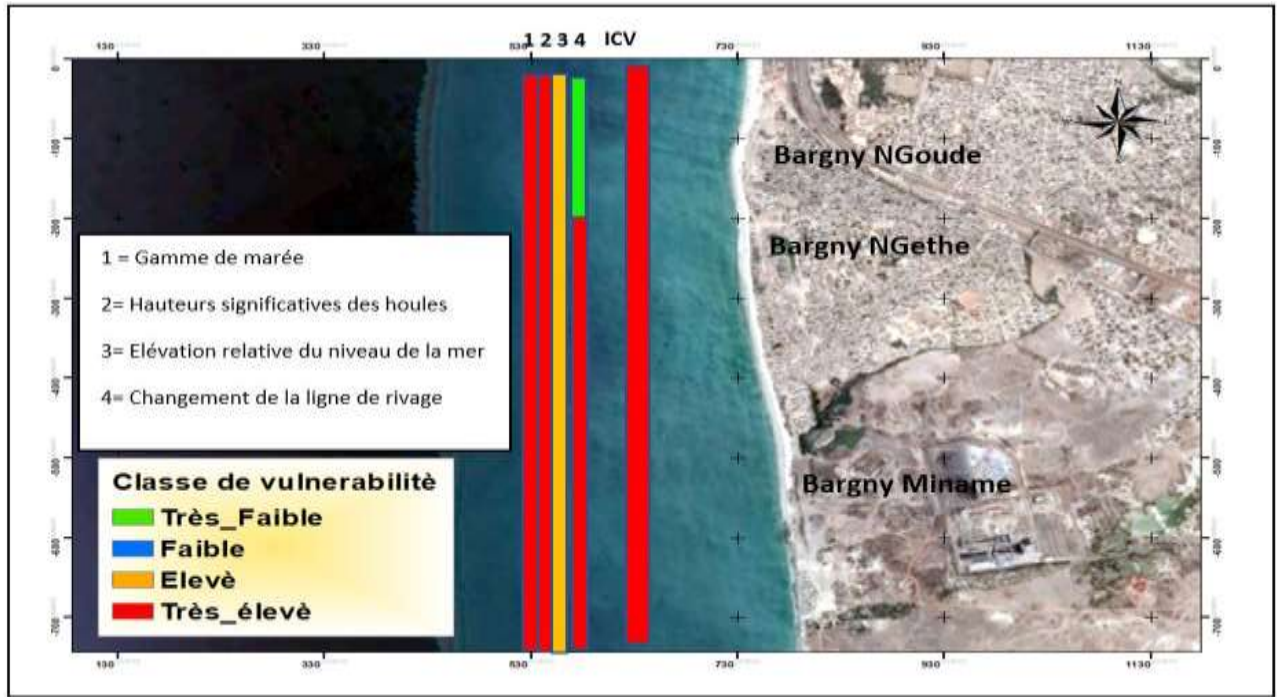


Figure 31 : Indice côtier de vulnérabilité du littoral de Bargny pour le scénario RCP8.5, projection 2035

Synthèse :

Les projections en 2035 du scénario RCP4.5 et RCP8.5 révèlent des pourcentages de vulnérabilité alarmante soit 55% du littoral de Bargny seront exposées à l'érosion côtière, au risque de submersions marine et d'inondations. Les 32 % de ce littoral subiront une vulnérabilité très élevée. Enfin 9 % et 4% de ce littoral subiront respectivement une vulnérabilité basse et très basse (Fig. 32).

Ceux-ci peuvent être expliquées par la nature même du littoral de Bargny c'est-à-dire la géomorphologie. Cette dernière est classée en vulnérabilité très élevée (voir fig.33)

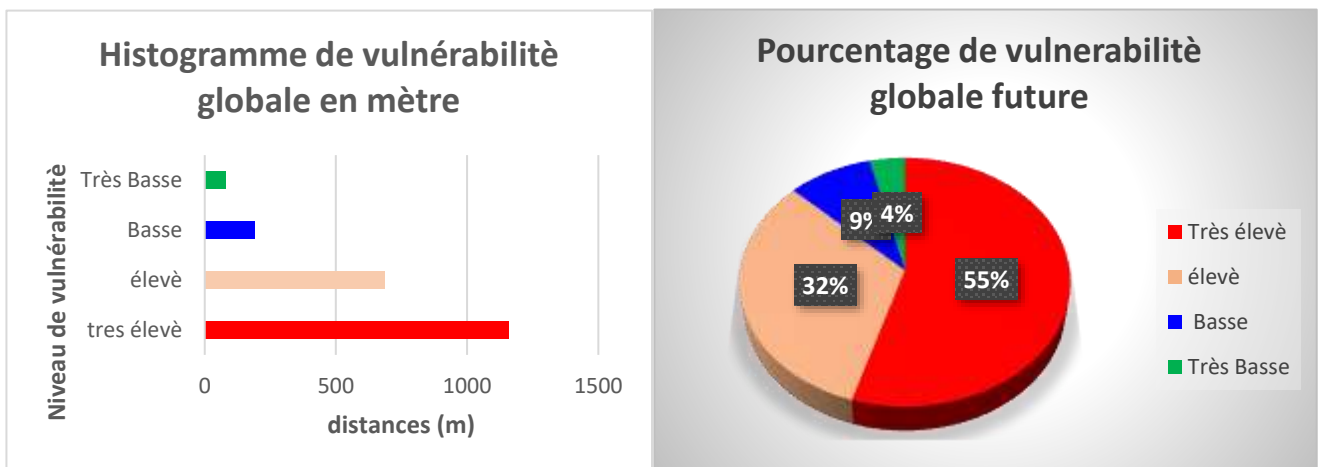


Figure 32: Estimation et représentation graphique de la vulnérabilité future globale

		Classement de l'indice côtier de vulnérabilité (ICV)				
		Tres bas	Bas	Modéré	Elevé	Tres elevé
Variables		1	2	3	4	5
Géomorphologie		Côtes rocheuses, côtes escarpées, Fjords, Fiards	Falaises moyennes, côtes dentelées	Falaises basses, dépôts glaciaires, plaines alluviales	Plages de galets, estuaire, lagune	Plages de barrières, plages de sable, marais salants, vasières, deltas, mangrove, récifs coralliens

Figure 33 : Classement géomorphologique de l'ICV du littoral de Bargny

IV. Solutions

Pour mieux atténuer les dégâts dans le futur des propositions d'adaptions sont proposer. C'est pourquoi ci-dessous nous proposons des moyens d'atténuation de cette vulnérabilité.

- **Sensibilisation :**

Parfois négligée, les campagnes de sensibilisation pourront permettre de mettre au courant la population et les autorités concernées du danger qui guette ces côtes hautement vulnérables des aléas climatiques. Mais aussi de les expliquer les termes : érosion côtière, submersion marine, recule du trait de côte....

- **Le repli stratégique planifié**

Toujours dans cette démarche de se sauver de ces aléas climatiques, il est possible de renforcer les ouvrages de protection par le repli stratégique. Ce dernier n'est rien d'autre de prévoir la construction d'un cordon dunaire fixée par les filaos et des cocotiers sur une distance de 20 m (fig.34)



Figure 34 : repli stratégique avec la construction d'un cordon dunaire

- **Infrastructure côtière**

Les infrastructures côtières sont un excellent moyen de lutter contre l'érosion côtière.

Pour lutter contre ce problème d'érosion on est amené à proposer des infrastructures costières suivantes : 5 Brises Lames dont 2 en formes de T. Pour renforcer ces ouvrages, un rechargement de sable sera fait tout au long de la cot côte. (Fig.35)



Figure 35: Séries de Brises Lames et d'Epis le long du littoral Bargnois.

CONCLUSION :

Dans ce projet de fin d'étude, il a été traité et analysé la dynamique sédimentaire et les risques côtiers qui guettent cette localité Lébou. C'est pourquoi, nous avons cherché à quantifier la dynamique sédimentaire et les risques côtiers associés sur le littoral de Bargny afin de fournir les connaissances scientifiques nécessaires à la prise de décision pour une meilleure planification dans l'occupation de cet espace côtier, hautement stratégique.

Tout d'abord, les résultats sur la mobilité du trait de côte ont montré que le taux de recule varie de 10.9 m/an à 3 m/an d'où une moyenne de 6.65 m/an (1949 et 2008). Mais aussi un taux d'évolution moyenne + 0,027 m/an a été noté. Par ailleurs, une forte érosion a été enregistrée avec un taux d'évolution moyenne de -0,027 pour la même période d'étude. Des risques de submersions marines et d'inondations ont été également découverts avec l'indice de vulnérabilité côtière qui dépasse le seuil standard (ICV=22). De même que l'estimation des volumes sédimentaires, nous avons constaté 96 % de sédiments qui se sont arrachés des côtes de Bargny et 4% qui ont rejoint la côte entre l'année 2020 et l'année 2022. Et si rien n'est fait, Bargny se verra privée de plage. Toujours dans cette dynamique, la vulnérabilité future a été aussi étudiée avec les scénarios RCP8.5 et RCP4.5. Les résultats obtenus avec ces derniers sont inquiétants, avec 55% d'indice côtier de vulnérabilité classé élevé et 32% d'indice côtier de vulnérabilité classé très élevé sur le littoral. C'est pourquoi, des ouvrages côtiers restent nécessaires pour atténuer ces risques côtiers.

Pourquoi pas utiliser des modèles comme DELFT3D et XBEACH pour faire la modélisation hydrodynamique mais aussi de voir l'impact de ces ouvrages au niveau de ces côtes en vue d'aider la prise de décisions aux autorités impliquées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bakhoun, P.W. *et al.* (2017) 'Coastline mobility of Goree Island (Senegal), from 1942 to 2011', *Marine Science*, 7(1), pp. 1–9.

Barusseau, J.-P. (1984) 'Analyse sédimentologique des fonds marins de la " Petite côte"(Sénégal)'.

Boak, E.H. and Turner, I.L. (2005) 'Shoreline Definition and Detection: A Review', *Journal of Coastal Research*, 214, pp. 688–703. Available at: <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>.

Courantométrie et mesure des marées - Géophysique Marine (no date) *Marine Geophysics*. Available at: <https://marine.geophysicsgpr.com/fr/techniques-geophysiques-marine/courantometrie-et-mesure-des-marees> (Accessed: 14 December 2022).

Demoulin, D. (1967a) *Etude de la morphologie littorale de la Petite CSte de Bargny au marigot de la Nougouna (S~n~gal). La c6te basse de Bargny-Guedj~Y~ne-Tode*. PhD Thesis. Thesis. Univ. Dakar.

Demoulin, D. (1967b) *Etude de la morphologie littorale de la Petite CSte de Bargny au marigot de la Nougouna (S~n~gal). La c6te basse de Bargny-Guedj~Y~ne-Tode*. PhD Thesis. Thesis. Univ. Dakar.

Diallo, S. (1982) *Evolution géomorphologique du littoral de la Petite Côte à Rufisque*. PhD Thesis. Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences Humaines, Département de

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*. PhD Thesis. Université de Bretagne occidentale-Brest.

FFEM, C. (2009) 'Sendou 125 MW Centrale à Charbon'.

Froidefond, J.-M. (1975) *Analyse cartographique de la bathymétrie du proche plateau continental de la baie de rufisque (Sénégal)*. PhD Thesis.

Gomitz, V.M., Beaty, T.W. and Daniels, R.C. (1997) *A Coastal Hazards Data Base for the US West Coast (1997)(NDP-043C)*. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem

Hebrard, L. (1966) 'Les formations tertiaires et quaternaires de l'isthme de la presqu'île du Cap-Vert (Feuille Tiaroye, Sénégal)', *Rapport-Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université de Dakar* [Preprint], (16).

Inman, D.L. and Nordstrom, C.E. (1971) 'On the tectonic and morphologic classification of coasts', *The Journal of geology*, 79(1), pp. 1–21.

Masse, J.P. (1968) 'Contribution à l'étude des sédiments actuels du plateau continental de la région de Dakar', *Essais d'analyse de la sédimentation biogène. Rapport du Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université de Dakar*, 23.

NIANG-Diop, I. (1995) 'L'EROSION COTIERE SUR LA PETITE COTE DU SENEGAL A PARTIR DE L'EXEMPLE DE RUFISQUE PASSE - PRESENT - FUTUR', p. 477.

Paskoff, R. (1998) 'LA CRISE DES PLAGES : PÉNURIE DE SÉDIMENTS', p. 5.

Rosendahl Appelquist, L. (2013) 'Generic framework for meso-scale assessment of climate change hazards in coastal environments', *Journal of Coastal Conservation*, 17(1), pp. 59–74. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11852-012-0218-z>.

Rosendahl Appelquist, L. and Balstrøm, T. (2015) 'Application of a new methodology for coastal multi-hazard-assessment & management on the state of Karnataka, India', *Journal of Environmental Management*, 152, pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.017>.

'Sadio et al., 2019' (no date).

Sakho, E. *et al.* (2011) 'EVOLUTION ET FONCTIONNEMENT HYDRO-SEDIMENTAIRE DE LA LAGUNE DE LA SOMONE, PETITE CÔTE, SENEGAL', p. 253.

Thior, M. *et al.* (2021) 'Approche cartographique de l'évolution du trait de côte dans l'estuaire de la Casamance', *Mappemonde. Revue trimestrielle sur l'image géographique et les formes du territoire* [Preprint], (131). Available at: <https://doi.org/10.4000/mappemonde.5939>.

Touré, B. *et al.* (2012) 'L'influence des actions anthropiques dans l'évolution historique d'un littoral sableux à forte dérive sédimentaire: la baie de Port-Bouët (Abidjan, Côte d'Ivoire)', *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 18(3), pp. 369–382.

Turmine, V. (2001) 'Les variations spatio-temporelles des marais à mangrove et de leur hydrodynamisme en Afrique de l'Ouest entre la Petite côte et la Guinée (Géomorphologie et Télédétection)', *Mémoire de DEA, Université Paris VII-Denis Diderot* [Preprint].

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Géolocalisation de la zone (Source : Travail personnel)	11
Figure 2 : Cumul annuel de la pluviométrie de la station de Yoff-Dakar (1988-2018) (Source de données : ANACIM) (Sène, 2019).....	12
Figure 3 : Couverture sédimentaire marine de la Petite Côte du Sénégal (Turmine, 2001).....	14
Figure 4 : Carte morpho-bathymétrique de la zone littorale entre Mbao et Bargny (d'après les cartes topographiques IGN au 1/20 000 de Rufisque et Bargny et la carte de bathymétrie SHOM N°5852 au 1/50 000).....	15
Figure 5 : Morphologie d'une plage sableuse (Source : Benjamin Dubarbier,2014).....	16
Figure 6 : Variations mensuelles des directions des vents selon les mois à la station de Yoff-Dakar de 1988 à 2018 (Source de données : ANACIM)	19
Figure 7 : Directions des houles aux larges des côtes Sénégalaises en pourcentage de probabilités selon les mois. Période 1991-Debut 1993 (Nardari, 1993).....	20
Figure 8 : Modifications de la direction des houles de Nord-Ouest (RIFFAULT,1980)	20
Figure 9 : Nuages de points sur le littoral de Bargny (Source : Ingénieur Géomètre-Topo, TINE)	26
Figure 10 : Carte montrant une Baseline et un Shoreline (Source travail personnel)	30
Figure 11 : Roue de la classification côtière.....	32
Figure 12 : Elévation du niveau de la mer dans l'Atlantique Nord de 1993 à 2018 Source : Cnes (http://www.aviso.oceanobs.com / Duacs).....	35
Figure 13 : Proposition schéma de modélisation pour la prévision des risques futures	36
Figure 14 : Traitement de données sédimentologiques	38
Figure 15 : Nature des sédiments sur les différentes unités morphologiques de la côte de Bargny : STG = Sable Très Grossier, SG = Sable Grossier, SM = Sable Moyen, ST = Sable Fin et STF = Sable Très Fin.....	39
Figure 16 : Hauteurs significatives des vagues (en haut) et périodes associées (en bas) de 1978 à 2022	41
Figure 17 : Nuage de point traduisant la répartition des vagues avec leurs hauteurs significatives (A) et la rose des vagues montrant la direction et la hauteur des vagues.....	42
Figure 18 : Identification des niveaux extrêmes au large de Bargny de 1979 à 2021 : a). Ecart positifs par rapport à la hauteur significative de référence ($H_s=2,51$ m) et b). Les directions des H_s représentées par rapport à 315° (NW).....	43
Figure 19 : Conditions hydrodynamiques devant le point de déferlement en période de vives-eaux. Le point de mesure est situé à 3 m de profondeur.	44
Figure 20 : Cartographie globale des traits de côte (2021, 2016, 2008, 1949).....	45
Figure 21 : Evolution des traits de côte entre 1949 et 2008	46
Figure 22 : l'évolution du Trait de Côte entre 1949-2008,2008-2016 et 2016-2021	47
Figure 23 : Modèle Numérique de Terrain du littoral de Bargny (Situation en Janvier 2022)	48
Figure 24 : Carte des risques d'érosion	49
Figure 25 : Carte des risques d'inondation progressive	50
Figure 26 : Carte des risques d'inondation	51
Figure 27 : justificatif de l'ICV par la Carte des risques d'érosion.....	52
Figure 28 : Courbe d'évolution des niveaux de risques côtiers.....	53
Figure 29 : Carte d'illustration de la pente du littoral de Bargny en 2022	54
Figure 30 : Indice côtier de vulnérabilité du littoral de Bargny pour le scenario RCP4.5, projection 2035	55
Figure 31 : Indice côtier de vulnérabilité du littoral de Bargny pour le scenario RCP8.5, projection 2035	56
Figure 32: Estimation et représentation graphique de la vulnérabilité future globale.....	56
Figure 33 : Classement géomorphologique de l'ICV du littoral de Bargny	57

Figure 34 : repli stratégique avec la construction d'un cordon dunaire 57
 Figure 35: Séries de Brises Lames et d'Epis le long du littoral Bargnois..... 58

LISTES DES IMAGES

Photo 1 : Caractéristiques de la plage réfléchive à Bargny (source : Sakho, 2022)..... 16
 Photo 2 : Photo prise par drone à Bargny (11/01/2022,) 17
 Photo 3 : Une série de photos prise par drone au large des côtes de Bargny 23
 Photo 4 : Images satellitaires (Source, Google-Earth) 24
 Photo 5 : Ancienne carte de Bargny datant de 1984 (Remis par Dr.THIOR) 25
 Photo 6: Drone et GPS différentiel..... 26
 Photo 7 : Stationnement au point de référence Photo 8 : Lever des points topographique 27
 Photo 9 : Courantométrie 27
 Photo 10 : Un secteur situé avant le point de déferlement marqué par des sédiments vaseux (photo de Sakho, Décembre 2019) 28
 Photo 11 : Unités hydrodynamiques et morpho-dynamiques sur le site côtier de Bargny (Source : de Sakho, Décembre 2019) 33

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les sept niveaux des cinq variables de la classification côtière faite par l'USGS sur la côte Atlantique des Etas-Unis (Thieler et Hammar-Klose, 2000a)..... 34
 Tableau 3 : **Classification granulométrique de Wentworth**..... 39
 Tableau 4 : Evaluation des risques par pourcentage de distance sur le littoral de Bargny 52