L'érosion des anses de la ville de Schoelcher : détermination des dynamiques et processus en jeu

Laetitia Dupuis

▶ **To cite this version:**

Laetitia Dupuis. L'érosion des anses de la ville de Schoelcher : détermination des dynamiques et processus en jeu. Milieux et Changements globaux. 2016. dumas-01330522

HAL Id: dumas-01330522

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01330522

Submitted on 10 Jun 2016

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

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

UNIVERSITE DES ANTILLES :

Faculté des Lettres et des Sciences Humaines
Master de géographie, mention : environnement, territoire et sociétés dans le bassin Caraïbe et l'Amazonie

Mémoire de master recherche : géographie (2ème année)
Année universitaire 2015-2016

L'érosion des Anses de la ville de Schoelcher: Détermination des dynamiques et processus en jeu

Préparé par : DUPUY Laetitia
Sous la direction de Monsieur DOLIQUE Franck
Professeur des universités (UA)

Soutenu le 22 avril 2016 en salle des conseils devant un jury composé de:
DOLIQUE Franck, Professeur des universités (UA) président du jury et rapporteur
SAFFACHE Pascal, Professeur des universités (UA) et examinateur

Source de la photographie :
Erosion de la plage d'anse Madame le 28/08/2015 de DUPUY Laetitia

UNIVERSITE DES ANTILLES :

Faculté des Lettres et des Sciences Humaines
Master de géographie, mention : environnement, territoire et sociétés dans le bassin Caraïbe et l'Amazonie

Mémoire de master recherche : géographie (2ème année)
Année universitaire 2015-2016

L'érosion des Anses de la ville de Schoelcher: Détermination des dynamiques et processus en jeu

Préparé par : DUPUY Laetitia
Sous la direction de Monsieur DOLIQUE Franck
Professeur des universités (UA)

Soutenu le 22 avril 2016 en salle des conseils devant un jury composé de:
DOLIQUE Franck, Professeur des universités (UA) président du jury et rapporteur
SAFFACHE Pascal, Professeur des universités (UA) et examinateur

«Personne ne réussit sans effort. Le contrôle de l'esprit n'est pas acquis en naissant. Ceux qui réussissent doivent leur succès à leur persévérance» – RAMANA MAHARSHI

AVANT-PROPOS

Réaliser un mémoire me semblait être quelque chose de particulièrement difficile voire de presque infranchissable, au regard de mes problèmes en orthographe. Mais j'ai appris dans ma vie qu'il ne fallait jamais baisser les bras.

M. DOLIQUE a proposé cette étude à l'ensemble de la classe de Master 1 (M1) géographie, en précisant qu'il fallait être tout de même relativement à l'aise en informatique, en SIG (système d'information géographique), ce qui est mon cas.
De plus, le travail de terrain m'a fortement attiré car il me donne l'impression de réaliser un travail concret.
Enfin, mon sujet d'étude qui traite de l'évolution côtière est un problème contemporain. Cela rend le sujet extrêmement attrayant. Mais cette facette rend aussi le sujet relativement complexe puisque les données sont souvent de l'ordre de l'expérimentation.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de mémoire, Monsieur Franck DOLIQUE, qui m'a conseillée au moment du choix de mon sujet sur les anses de Schoelcher.
J'ai pu bénéficier de son aide précieuse et apprécié sa démarche, qui m'a donné le goût du travail de terrain.

J'adresse également mes plus chaleureux et sincères remerciements à :
Monsieur Nicolas FERCHAT qui m'a transmis certaines connaissances dans le domaine de la cartographie,

La DEAL et particulièrement Monsieur Jean-Christophe ROUILLE qui m'a fourni des cartes me permettant ainsi d'avoir une vision de l'évolution côtière schoelchéroise de 1950 à 2013,

Madame Murièle CIDALISE- MONTAISE (DEAL[1]) qui a su répondre à mes nombreuses questions concernant l'historique du littoral de Schoelcher,

Madame NASHBORD du BRGM[2] qui m'a transmis des documents concernant leurs études sur l'évolution côtière de Schoelcher.

Aux deux anciens adjoints au Maire de la ville de Schoelcher: Messieurs Deny LOVINCE et Fernand PLACIDE, ainsi qu'à Monsieur Claude CIVAULT qui travaille au service d'animation et de coordination des projets. Ils ont su répondre de manière précise à certaines de mes questions.

Des camarades étudiants et collègues de travail dont Messieurs Alan CAVALIN, Quentin JOSSO, et Anthony BIGOT, madame Alice COICAUD-THOMAS, sans qui le travail de terrain aurait été ardu,

Messieurs Benjamin KULLING, Uday MOORJANI et Robert THIELER qui ont été d'un grand secours pour l'utilisation du logiciel DSAS[3].

Je remercie Mme FARRAUDIERE Ketty pour son aide pour l'orthographe.

Mes remerciements vont également à ma famille, mes proches (ils se reconnaîtront), et tous ceux qui, directement ou indirectement, m'ont apporté leur aide et leurs soutiens et m'ont accompagnée tout au long de mon travail.

MERCI.

[1] DEAL: Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
[2] BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
[3] DSAS : Digital Shoreline Analysis System

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 5
REMERCIEMENTS 6
SOMMAIRE 7
INTRODUCTION 8
ETAT DE L'ART 15
A/ Gestion environnementale 15
B/ La dynamique des littoraux martiniquais 39
C/ Le littoral de Schoelcher et ses problèmes d'érosion 57
D/ les perspectives de rechargement de plages à Schoelcher (Méthodes, efficacités...) 66
2/ METHODOLOGIE : ESSAIS DE CARACTERISATION MULTISCALAIRE 69
A/ Cartographie du trait de côte : approche à long terme 69
B/ La surveillance topographique des plages : approche à moyen terme 71
C/ mise en place des protocoles MNT 74
D/ Suivi par photographie fixes 77
3/ RESULTATS 78
A / Analyses photographiques 78
B / Les tendances dynamiques identifiables à la travers la technique du DSAS 82
C/ Etude du littoral schoelcherois à l'aide des profils de plage 95
D / MNT différentiel 105
DISCUSSION 116
CONCLUSION 120
LES SIGLES 132
BIBLIOGRAPHIE 133
LISTE DES ILLUSTRATIONS 144
LISTE DES TABLEAUX 148
TABLE DES MATIERES 149

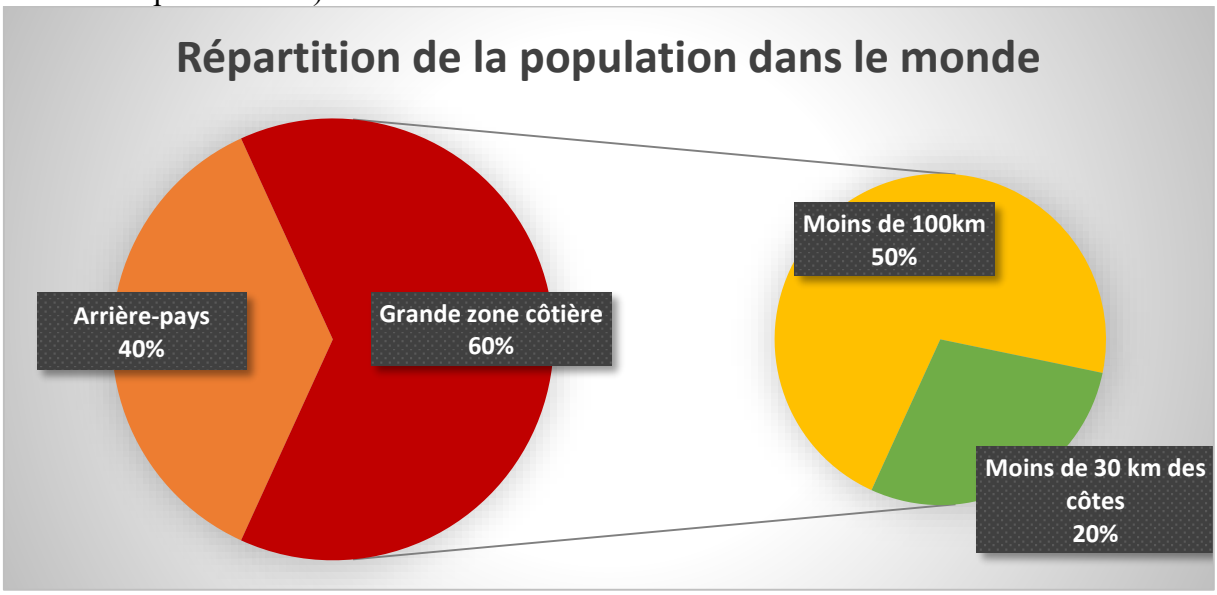
INTRODUCTION

Les littoraux sont des espaces où la croissance de la population est la plus forte. Des grandes agglomérations, des mégalopoles y sont situées et les usages touristiques de la mer ainsi que son rôle économique dans la mondialisation des échanges ne font que favoriser la croissance de la population.

Pourtant c'est un espace où les conditions naturelles ne sont pas les plus faciles. En effet, le vent y est plus fort qu'à l'intérieur des terres, les tempêtes y sont plus dévastatrices, les houles et vagues peuvent générer l'érosion et les inondations sont plus fréquentes.

Pour que la population puisse y vivre sans redouter constamment des catastrophes météorologiques, l'Homme a aménagé cet espace. Il a d'abord mis en place des ports puis d'autres aménagements comme les digues, les quais, les jetées, les chenaux… Ces aménagements ont progressivement été étendus aux autres zones habitées, puis aux espaces touristiques comme les plages. On considère qu' ¼ du littoral français est artificialisé.

Figure 1: Répartition de la population dans le monde (source : JOUZEL, 2015: III ; Réalisé par DUPUY)



Le mot littoral est une notion relativement complexe à définir. Ces interprétations sont multiples et changent selon leurs origines.

Les dictionnaires de Langue ont une vision parfois abrupte de ce terme. Selon le Larousse de la langue française de 1977, il est décrit comme appartenant au bord de mer, il serait comme une étendue qui borde la mer. Le Grand Robert de la langue française de 1986 le définit comme la zone de contact entre la terre et la mer.

Les géographes sont parfois plus explicites. Dans *Les mots de la Géographie,* les auteurs R. BRUNET, R. FERRAT et H. THERY disent que c'est un rivage maritime ou lacustre. Ils décrivent les multiples objets et phénomènes que l'on peut observer sur les côtes comme l'érosion littorale, les stations littorales, les industries littorales…

Les textes réglementaires ont une autre approche. Dans le rapport de PIQUART de 1973, le littoral est perçu comme une zone de contact entre la terre et la mer. Il y a trois approches :

- L'approche qualitative : qui en fait une succession de sites avec leurs propres caractéristiques. Le littoral suscite l'admiration et l'affection,
- L'approche quantitative : fondée sur les longueurs des plages,
- L'approche géométrique : le contact entre la terre et la mer s'opère selon une ligne changeant selon les marées. Sur l'ensemble de cette ligne le mode d'utilisation spatiale diverge complétement. Il en résulte que selon chaque fonction ou activité, on ne dispose que d'un espace partiel dont on pourrait disposer ailleurs.

Au fils des années l'Etat a cherché à définir au mieux le littoral.

- L'instruction du 4 Aout 1976, réalisé après le rapport de PIQUART hésite entre : les usages de l'espace et du milieu, et la surface couverte. *« Espace physiquement limité, écologiquement fragile, de plus en plus convoité par des utilisateurs souvent concurrents »* (Instruction du 4 août 1976 concernant la protection et l'aménagement du littoral),
- La loi du 3 janvier 1986 la définit comme une entité géographique.

Malgré cette tentative, la définition reste toujours floue ; c'est ce que le juriste J-M. BECET nous démontre dans Le droit du littoral et de la mer.
Tout cela nous a permis d'aboutir en 1990 aux définitions de B. BOUSQUET (géographe) dans *la revue juridique de l'environnement*. Il distingue trois définitions :

- Le littoral de nature : qui fait référence à la zone qui subit l'énergie et la dynamique du milieu,
- Le littoral d'œkoumène : qui fait référence à la zone urbanisée se tournant vers des activités maritimes et côtières de manière plus ou moins pacifique,
- Le littoral d'institution : qui renvoie aux textes législatifs et réglementaire (BOUSQUET, 1990 II.A).

Le littoral est défini comme l'interface physique des terres et de l'eau de nature dynamique et offre une sécurité économique et sociale pour les habitations du littoral (NATESAN *et al*, 2015: II.A). L'érosion est un phénomène mondial (CHARLIER *et al*, 1989: II.G) engendré par des phénomènes naturels [dont les phénomènes paroxysmaux (DOLIQUE, 2013 ; DISSANAYAKE *et al*, 2015 : II.C.f), le changement climatique (LARROUDE *et al*, 2014 :II.B)…] et humains (littoralisation, méthodes dures, déforestation etc.) (SA, C., 2014: II.F.i; HINKEL *et al*., 2013: II.D; BELL *et al*., 2014: II.D; ZHANG *et al*., 2004: II.D).

Après avoir défini, ce qu'est un littoral nous pouvons essayer de définir le phénomène préoccupant de notre époque : l'érosion.

Dans le Larousse, l'érosion est définie comme étant l'ensemble des processus responsables de l'évolution des reliefs engendrés par les déformations de l'écorce terrestre (par ablation, transport et aussi accumulation).

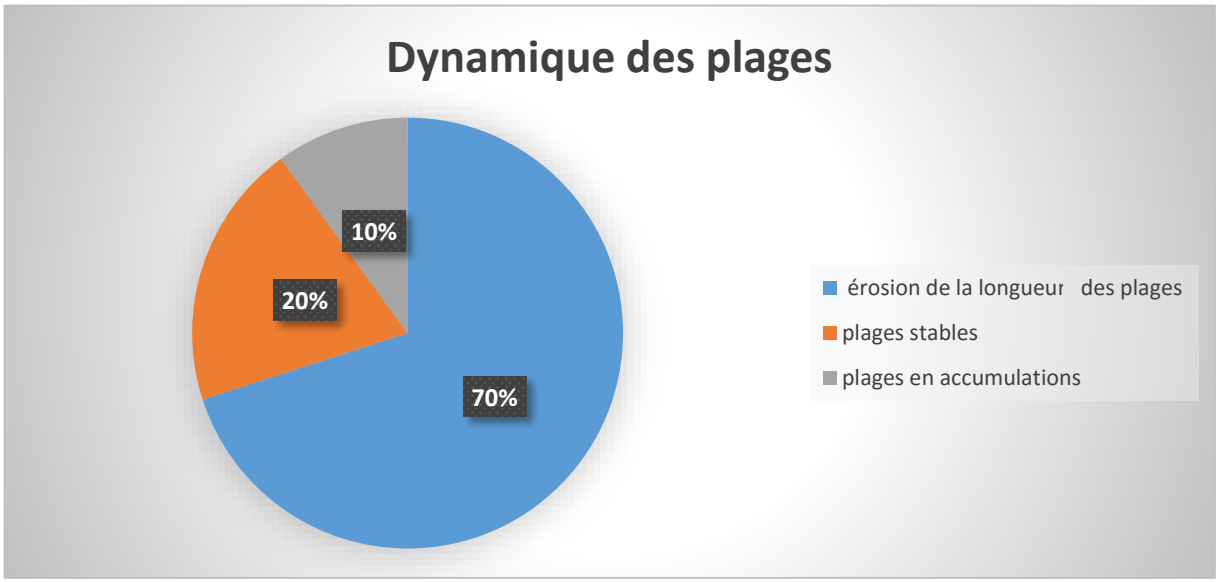
Les géographes définissent l'érosion comme « *un ensemble de phénomènes (chimique ou mécanique) qui modifient le relief par enlèvement de matière solide. L'érosion comprend Trois phases : le détachement des particules, le transport des particules et la sédimentation. La mer est un important agent d'érosion* » (SAFFACHE, 2003: I)

Selon M. MIOSSEC., A en 2012, l'érosion littorale est un phénomène fortement pris en compte dans nos sociétés actuelles, car l'on doit protéger les zones habitées contre l'action des vagues.

L'érosion littorale est essentiellement causée par l'action des houles sur les côtes. L'exposition du littoral face aux vagues varie. Les littoraux rocheux altérés ou taillés dans les roches tendres ont tendance à s'éroder plus rapidement tout comme les plages sableuses marquées par un fort déficit sédimentaire. Les côtes sableuses subissent une alternance érosion/accrétion selon les saisons.
C'est donc à travers des bilans que l'on peut quantifier l'évolution côtière. Il est important de prendre en compte ce phénomène pour une meilleure gestion du littorale. Il faut choisir convenablement nos techniques de protections du littorale pour ne pas favoriser l'érosion comme c'est souvent le cas avec les techniques dites dures (ex : enrochement, épis…). Pour cela nous devons réaliser des bilans qui comportent le contexte morpho dynamique et le degré d'exposition au risque de recul. La migration du sable reste parfois aléatoire et un secteur peut se retrouver en quelques années de nouveau protégé. Il faut donc une surveillance constante du littoral (MIOSSEC, 2012: I).

Selon les géographes, l'érosion peut se révéler destructrice pour l'ensemble de la population, ainsi que pour les activités anthropiques qui se situent sur celui-ci. L'érosion est un phénomène récurrent sur la terre. En effet 20% de la largeur des anses et 70 % de leurs longueurs sont en érosion, néanmoins 20% des plages sont stables et 10% sont plutôt en phase d'accumulation (PASKOFF, 2004: III). Le recul est un phénomène causé par différents agents naturels tel que le vent, les vagues, l'élévation du niveau de la mer, les courants, les actions physico-chimiques et biologiques etc... (PASKOFF, 2012: III). Il est exagéré par des activités anthropiques telles que la construction en avant-plage, l'installation de port etc...

Figure 2: L'érosion est un phénomène récurrent sur la terre (source : PASKOFF, 2015: III ; Réalisé par DUPUY)



L'une des causes naturelles la plus évoquée est celle de la montée du niveau de la mer. « *La vulnérabilité des territoires est fonction des probabilités de cumul des phénomènes climatiques et météorologiques, de la configuration des côtes et du niveau de protection offert par les reliefs naturels (dune, coraux)* » (PERRIN *et al*, 2015: III). Ceci sous-entend que

l'élévation du niveau de la mer risque d'affecter certains Etats déjà fragilisés. L'élévation du niveau de la mer joue et jouera un rôle important dans nos sociétés puisque 20% de la population vit à moins de 30km du rivage, plus de 50% à moins de 100km et 60% dans la grande zone côtière (PERRIN *et al*, 2015: III). La littoralisation des activités expose la population aux inondations et aux tempêtes. En effet l'OMM [4] a constaté une augmentation des inondations entre 1970 et 2010 (l'effectif moyen de la population exposé s'est accru de 114% au niveau mondial). Les populations exposées aux tempêtes a fortement augmenté, il y a eu une hausse de 192% (PERRIN *et al*, 2015: III).

Aujourd'hui nous avons une littoralisation des activités. L'enjeu est d'une telle importance que l'érosion est devenue en 1985 un risque. Pour remédier à cette problématique, de nombreuses solutions (méthodes rigides et douces) ont été inventées et mises en place. Toutefois, les méthodes rigides se sont souvent révélés être une cause d'amplification de l'érosion ; c'est pourquoi aujourd'hui on se tourne plutôt vers des méthodes plus douces (PASKOFF, 2012: III).

L'érosion côtière implique un déplacement du trait de côte dans l'espace et un changement de forme. Il est important de savoir si l'érosion est réversible ou non, s'il y a une tendance. Il semblerait que l'évolution du littoral soit déterminée par des réponses désordonnées et des changements déterministes donc prévisibles (au moins en partie) (REGNAULD, 1998: III).

La plage est définie comme une forme d'accumulation, à très forte variabilité, qui se met en place sur un rivage lorsque la quantité de matériaux disponibles dépasse le volume de sédiment que les vagues et les courants littoraux sont capables de déplacer. Elle peut être en sable ou en galet (REGNAULD, 1998: III).

La Martinique n'est pas épargnée par le phénomène d'érosion ; c'est pourquoi il est important qu'une étude et une sensibilisation soient réalisées.

Dans de nombreux cas, le développement côtier empêche les côtes de s'adapter à l'augmentation des taux d'érosion vers la terre. Les infrastructures touristiques augmentent, tout comme la vulnérabilité des plages. La majorité des constructions côtières et en particulier les hôtels touristiques sont construits sur des zones à risque d'inondations et d'érosions. L'évaluation spatiale de la capacité d'adaptation des zones humides et des plages à l'élévation du niveau de la mer de la Martinique a révélé que la majorité des plages sont très vulnérables à la réduction de la zone, tandis que seulement 29% des mangroves sont classées comme très sensibles à la compression du littoral. La majorité a une sensibilité moyenne, principalement due à un taux élevé de sédimentation. Mais de nombreuses zones humides en Martinique sont également surexploitées et polluées. L'état de l'écosystème est un facteur qui affecte le littoral. Les infrastructures touristiques occupent souvent des zones très proches de la mer. Les aspects clés de la popularité de la Martinique comme destination touristique sont ses plages de sable fin, ses eaux claires et ses habitats vierges. Si l'élévation de la mer s'accélère, la Martinique risque de perdre non seulement la majorité de ses célèbres plages et mangroves mais aussi de son prestige comme une destination de plage touristique (SCHLEUPNER, 2008: II.J).

[4] OMM : Organisation m étéorologique Mondial

Selon M. SAFFACHE., P trois processus seraient la cause principale du recul du littoral martiniquais :

- l'envasement des baies,
- la pollution des mers,
- l'érosion du littoral (EVERARD, 2012: III).

En Martinique le littoral est délimité à travers les 50 pas Géométrique. Sans démarcation explicite, elle correspondra à une largeur de 81,20m à compter de la limite du rivage de la mer. Le littoral a été borné en application à la législation et à la réglementation en vigueur à la date de cette séparation. Grâce à cette délimitation on a pu intégrer cette zone au domaine public maritime (loi littoral du 03 janvier 1986) et ainsi permettre la sauvegarde de la bande littorale. La loi du 30 décembre 1996 relatif à l'aménagement, la protection et la mise en valeur des 50 pas géométriques a permis de limiter les zones habitables. La population Martiniquaise ne peut plus s'installer de manière anarchique sur le littoral (MEDD, 2010: III). Malgré ces lois, on constate que le risque d'érosion engendre des enjeux qui restent encore très importants.

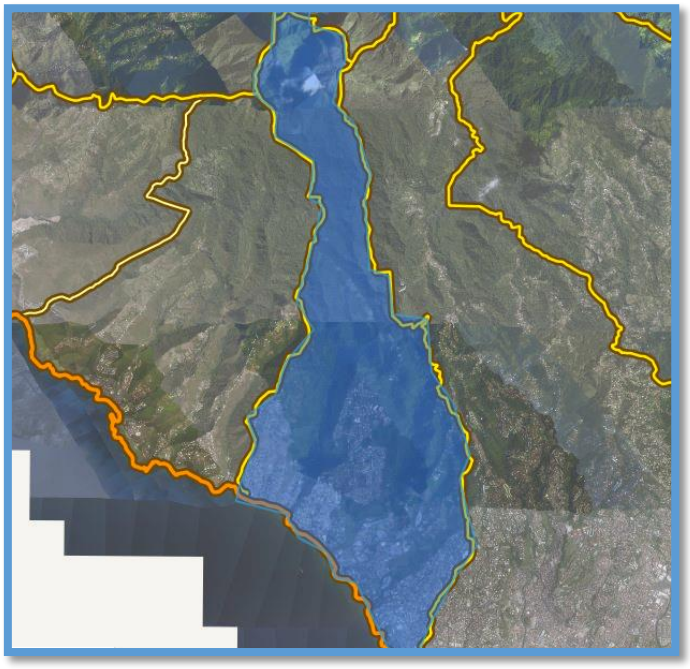


Figure 04 : Localisation de la ville de Schœlcher
Source: Geoportail
Image: landsat
Echelle 1:68 244

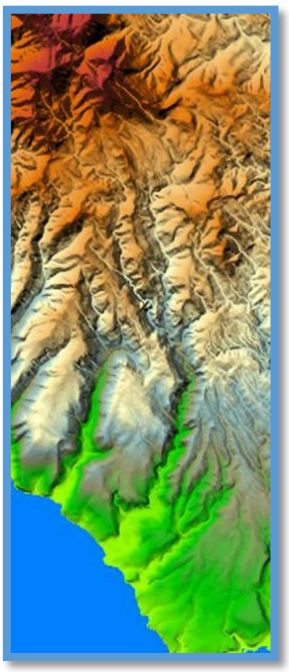


Figure 03 : Le relief Schoelcherois
Source: Geoportail (image MNT)
Image: landsat
Echelle 1:68 244
Date: 2015

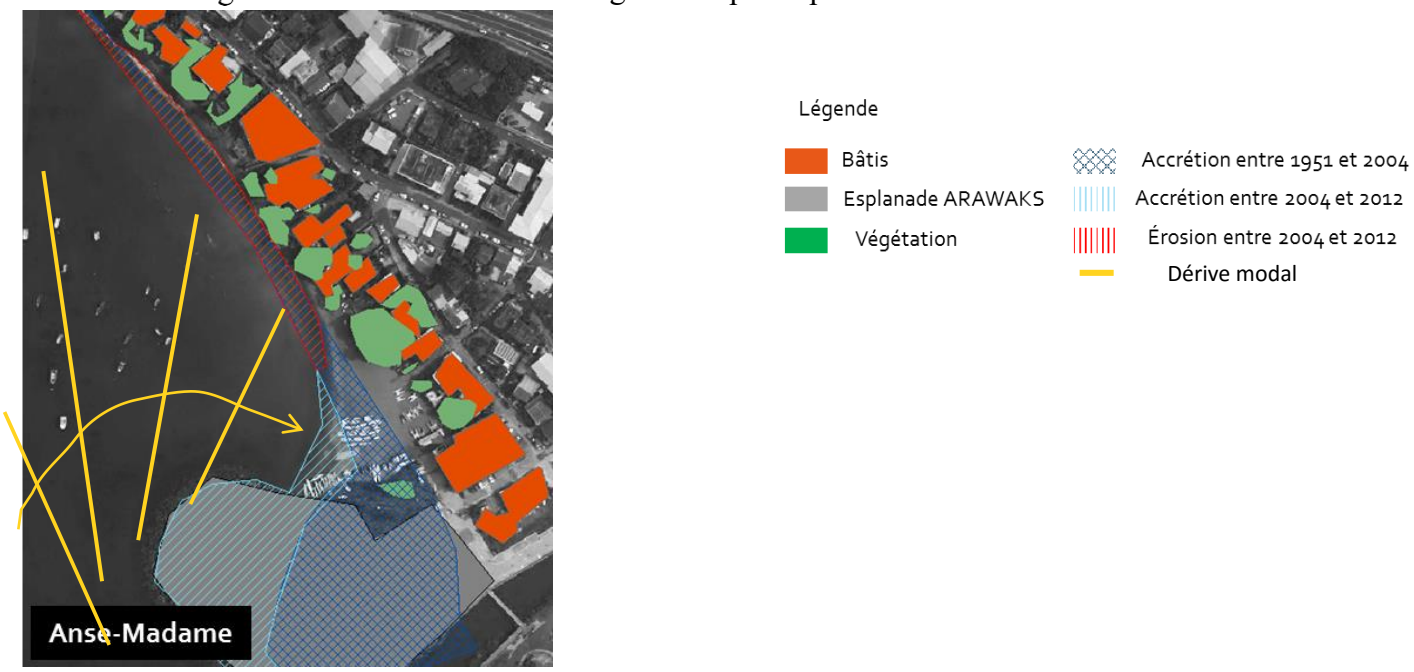
Schœlcher se situe entre Fort-de-France et Case Pilote. Cette commune s'étend depuis la pointe du Carbet (1200m) jusqu'à la mer. Le nord de Schoelcher est caractérisé par un relief important. Plus nous nous rapprochons du littoral et plus le relief diminue. Toutefois, il existe quelques zones abruptes au niveau des côtes. Ce relief pousse la population à littoraliser l'espace. Or, les plages de Schœlcher (tout comme la majorité des plages de la Martinique, soit 90%) connaissent une érosion, particulièrement au niveau de l'Anse-Madame. Selon SAFFACHE, P, il existe plusieurs raisons à l'origine de l'érosion martiniquaise:

- L’érosion est un phénomène spasmodique qui se réalise durant les phases de perturbations tel les cyclones (SAFFACHE, 1998 [1] : III).
- La côte septentrionale à une morphologie à forte bathymétrie ce qui décuple l'énergie des houles sur la côte (SAFFACHE, 1998: III).
- Les côtes du nord constituées de matériaux volcaniques de faibles résistances connaissent de fortes érosions (SAFFACHE, 2015: III)
- Augmentation du niveau de la mer de + 2,5 mm à + 3 mm (GIEC, 2014) due au réchauffement climatique.
- Extraction de végétation psammophile[5] pour satisfaire le fantasme des touristes durant les années 50. Il a été remplacé par des cocotiers qui ont un réseau racinaire trop faible pour fixer le sable sur de longues distances. Ils ont également mis du sable blanc sur du sable noir ce qui a entrainé une forte perte de densité sédimentaire, car ces deux sables n'ont pas la même granulométrie.
- Les constructions en avant-plage empêchent le transfert de va-et-vient (crosshore) des sédiments car elles empêchent le transfert du sable provenant de la terre d'atteindre la plage.
- Prélèvement des matériaux réalisés sur les plages par les habitants pour construire des maisons, mais aussi par des carriers dans le lit des rivières. Ce prélèvement a débuté au début des années 60 et s'est terminé vers la fin des années 90 (chaque année on prélevait environs 15000 à 30000 m³ de sédiments détritiques (SAFFACHE, 1999: II.J).
- Pollution de l'eau favorisant l'apparition d'algues filamenteuses qui étouffent les coraux et donc entraine leur mort. Leur mortalité induirait sur le long terme une diminution des apports en sédiments.

L'ensemble des causes de l'érosion des plages n'indique pas de manière concrète leur impact sur le milieu ; c'est pourquoi il est intéressant de se tourner vers des anciennes descriptions du littoral. Depuis 1825 les anses de Schœlcher sont passées de 804,5 m à environ une cinquantaine de mètres. Comme nous l'avons vu précédemment l'érosion est un phénomène naturel, mais amplifié par l'action de l'Homme sur son milieu. Pendant longtemps l'absence de connaissance de notre milieu a favorisé la mise en place de construction anarchique au niveau du littoral. On peut prendre pour exemple la place Arawak à l'Anse-Madame qui a généré une diffraction de la houle

[5] Psammophiles : espèces vivant dans les interstices des grains de sable ou qui se développent sur les sols sablonneux

Figure 5 Réfraction des houles générées par la place ARAWAK



En effet, nous avons une forte érosion au nord de l'anse qui a été accentuée par la construction de la place Arawak. Elle cause une réfraction des houles et la dérive littorale est inversée sur cette plage. Si aucune solution n'est mise en place dans les années qui suivent, la dérive inversée pourrait étendre sa zone d'impact vers la plage Lido (Collat). Le BRGM[6] prône un rechargement de l'anse. Cette méthode douce pourrait changer la face du littoral (extension de la plage) et diminuer voire effacer l'impact de la dérive inversée (Sud- Est Nord-Ouest). Mais pour recharger il faut respecter quelques règles comme:

- avoir une bonne ressource sédimentaire à proximité (Case-Navire),
- faire une étude granulométrique entre le sable de l'Anse-Madame et le sable de l'embouchure Case-Navire,
- faire une étude d'impact sur le milieu, sur la faune et la flore,
- prévoir une multiplication des rechargements,
- faire différentes observations sur les causes d'érosions de l'anse, en faisant une étude multiscalaire en établissant :
    - une cartographie du trait de côte : approche à long terme,
    - Une surveillance topographique des plages : approche à moyen terme,
    - Une modélisation 3D : approche à court terme.

La dernière étape (l'étude multiscalaire) est importante à la compréhension du système plage schoelcherois ; Nous mettrons tout en œuvre pour la réaliser.
C'est pourquoi, nous nous poserons la question suivante : comment allons-nous procéder pour faire une observation scientifique de l'érosion de la plage de Schœlcher ? Quelle solution devons-nous prioriser sur la plage d'Anse-Madame?
Pour cela nous verrons dans un premier temps le fonctionnement du système plage, puis nous chercherons à comprendre et déterminer comment nous allons réaliser notre étude multiscalaire sur Schoelcher et enfin, nous transmettrons les résultats des recherches.

[6] BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières

A/ Gestion environnementale

- **Les politiques environnementales**

Les politiques environnementales varient selon les pays et souvent les opinions des politiciens varient au sein même d'une société. Au cours de l'année 2013, des entretiens semi-structurés approfondis ont été menés avec les membres de la communauté. Ces entretiens avaient pour but d'établir le point de vue de la population sur le rechargement de Portonovo Bay. Les résultats ont révélé que les perceptions, les valeurs et les intérêts, mais aussi leurs principaux objectifs étaient dissemblables.

Nous avons trouvé des opinions polarisées concernant les systèmes antagonistes de valeurs partagées par les participants, qui ont été associés à des perceptions tout à fait opposées de l'existence, de la gravité du problème, de l'efficacité et de la nocivité du rechargement de la plage. Les perceptions des répondants ont été classées en deux grandes catégories qui reflètent deux points de vue philosophiques de la relation homme-environnement: c'est l'écocentrisme contre l'anthropocentrisme. Quatre catégories de stratégies de résolution de conflit proposées ont été identifiées (PRATI *et al*, 2016: II.H):

- les informations,
- le dialogue et le contact,
- les compromis,
- l'absence de solution.

L'adoption d'une approche participative et la mise en œuvre des compétences de gestion des conflits et de la technique peuvent être considérées comme des éléments non négligeables de la gestion du littoral. Il est nécessaire de comprendre comment la population perçoit les aménagements, car elle nous permet d'adapter une sensibilisation. Pour protéger un milieu il est important que l'ensemble de la population participe (PRATI *et al*, 2016: II.H).

En France, face à l'érosion la politique suivante a été mise en place :

1) Développer l'observation du trait de côte et identifier les territoires subissant l'érosion pour hiérarchiser l'action publique :

   - Il faut créer un réseau d'observation et un suivi de l'évolution du trait de côte à l'échelle nationale, en s'appuyant sur les acteurs locaux ;
   - Il faut réaliser dès 2013 une cartographie nationale de l'érosion côtière et identifier des territoires à fort risque d'érosion.

2) Élaborer des stratégies de gestion de l'érosion côtière entre les acteurs publics et privés. Pour cela il faut :

- La mise en place de stratégies locales des risques d'érosion dans les territoires concernés avec l'adoption de mesures cohérentes d'urbanisme, de préservation des espaces naturels et de prévention des risques ;
- La meilleure utilisation des outils d'urbanismes et de préventions des risques : prise en compte explicite dans les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les schémas de cohérences territoriales (SCOT) du phénomène d'érosion côtière ;
- Une évolution des modalités de gestion du domaine public maritime en délivrant des autorisations d'occupation du domaine public maritime en tenant compte systématiquement de l'impact des aménagements sur l'évolution du trait de côte ;
- Une élaboration d'un plan de sensibilisation des populations aux risques littoraux. Il s'agit notamment de développer une véritable « culture du risque » chez les populations littorales.

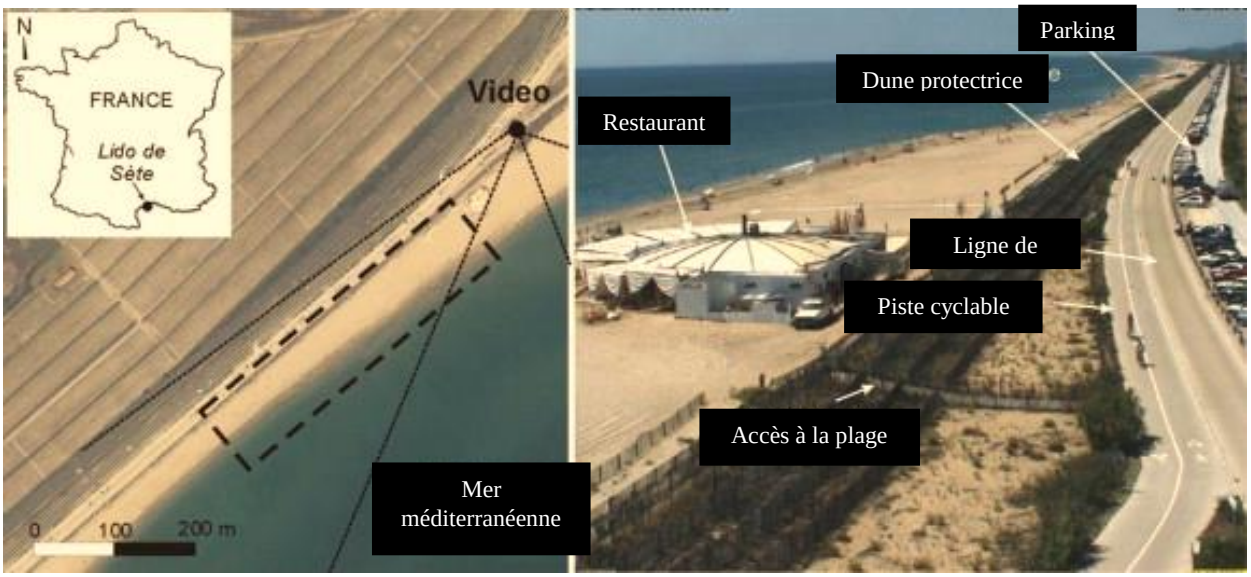
3) Favoriser la relocalisation des activités et des biens situés dans des zones à haut risque, tout en maintenant le dynamisme des territoires en faisant :

- Un lancement, auprès des collectivités locales intéressées, d'un appel à projets sur la « relocalisation » des activités dans les territoires fortement menacés par les risques littoraux. Son objectif est d'encourager, lorsque c'est nécessaire, la mise en œuvre de démarches pilote de relocalisation des activités et des biens.

4) Préciser les principes de financement pour la gestion du trait de côte, en identifiant ce qui est du ressort de l'État et des collectivités locales.

Pour une meilleure gestion du littoral nous devons évaluer les paramètres importants de l'utilisation de la plage pour déterminer une gestion de la zone côtière. Une étude de BALOUIN, Y., REY-VALETTE, H., *et* PICAND, P. A. en 2014 a été réalisée. Le long des côtes de la Méditerranée, le tourisme représente l'une des principales ressources économiques des régions côtières. Dans le contexte de l'augmentation des risques côtiers, les grands projets de gestion sont actuellement menés et l'évaluation de l'utilisation de la plage est un paramètre important pour la gestion des zones côtières. Ils doivent le prendre en compte dans leurs stratégies pour réduire les risques et maintenir la capacité de loisirs de la plage. Pour l'observation détaillée de la plage, une nouvelle méthode automatique a été développée pour quantifier et localiser le nombre des visiteurs sur la plage, en utilisant des ensembles de données de surveillance vidéo. Un système ARGUS vidéo situé derrière la dune, à environ 60 m du rivage a été mis en place. Des images ont été acquises 3 fois par heure pendant la journée, ils ont présenté des instantanés et 10 min en moyenne d'images. Ces images vidéo ont été utilisées pour obtenir des informations sur la variation temporelle de l'intensité du tourisme sur la plage pendant toute l'année 2012. L'activité touristique était plus importante durant les week-ends. Les deux variations temporelles et spatiales de tourisme de plage ont été analysées (BALOUIN *et al*, 2014: II.H).

Figure 6 Localisations de la zone d'étude sur la partie nord du Lido de Sète. Gauche : vue aérienne du Lido montrant la zone surveillé ; Droite : vue oblique du système vidéo montrant les infrastructures d'accessibilité (source : BALOUIN *et* al, 2014: II.H).



Les résultats indiquent que la fréquentation de la plage et l'emplacement des utilisateurs de la plage sont principalement motivée par les conditions météorologiques, tandis que la densité indique que la plupart des utilisateurs de la plage sont des locaux ou excursionnistes, plutôt que des touristes. Les résultats de l'utilisation totale au cours de l'année 2012 montrent bien une augmentation importante de la fréquentation depuis le grand projet de gestion côtière qui a été mis en œuvre au cours des dernières années. Étant donné le grand nombre d'images et la vidéo disponible sur de nombreuses côtes, la méthodologie et les outils mis au point seraient utiles dans de nombreuses applications de gestion des zones côtières dans le monde entier (BALOUIN *et al*,2014: II.H)

Dans un autre cadre, des recommandations ont été proposées pour une meilleure gestion côtière certaine:

- Une sensibilisation de la population,
- Des écoplages avec une gestion adaptive des plages qui devrait intégrer la gestion physique contre l'érosion côtière et l'amélioration de la qualité des plages,
- Une hiérarchisation où les priorités de gestion de plage dans les différents pays dépendent des problèmes locaux.
- Il faut adopter et adapter des solutions: Les bonnes pratiques dans la gestion des problèmes d'érosions côtières et d'écoplage dans d'autres régions côtières du monde doivent être adaptées aux spécificités locales.
- On doit Évaluer l'impact et l'efficacité: l'application des mesures dures / douces devrait être suivie par l'étude d'impact environnementale et l'évaluation de son l'efficacité, afin de prévenir la détérioration de la qualité des plages et de traiter des solutions de gestion en temps opportun. (SEMEOSHENKOVA., 2015)
- Les processus de réduction des risques nécessitent une vision systémique, intégrant les variables naturelles et socio-économiques pour permettre une analyse des risques sur les plages afin d'aider les politiques et la prise de décision dans le cadre du processus de gestion des plages intégrées (LOZOYA *et al*., 2011: II.H)

- la gestion future doit tenir compte de la connectivité des habitats de sable en haut de plage et en bas de plage littorales afin d'utiliser cette défense naturelle du littoral plus efficacement (HANLEY *et al*., 2014: II.H)

Ainsi nous pouvons dire qu'une bonne gestion côtière dépend en partie de l'étude préalable réalisée sur l'anse. S'il n'y a pas d'études, alors la chance d'aggraver l'érosion côtière est renforcée. C'est pourquoi la mise en place d'aménagement contre l'érosion est en réalité très complexe.

- ## Les études préalables

Il est extrêmement important d'étudier la dynamique de la plage. Pour une bonne gestion des côtes il faut avoir une approche multidisciplinaire. Des observations dans des sites différents avec des caractéristiques de diverses plages permettent la compréhension de l'évolution du littoral (JARA *et al*, 2015: II.C.h).

Par exemple, Lorsque la RTR[7] (gammes de marées relatives) est entre 2 et 5, les processus de surf dominent la barre intertidale et la partie inférieure de la face de la plage, tout en oscillant, possède les plus importants temps de résidence sur la face de la plage supérieure. Ces conditions, associées à la zone de surf d'alésages se propage à travers la barre de marée. Ils ont été observés pour savoir si la barre intertidale migre lentement (onshore) et si la face de la plage supérieure est accentuer. Pour les RTR avec des valeurs inférieures d'environ 2, les processus de la zone de surf dominent sur la barre intertidale, alors que la domination des processus oscillants s'étend aujourd'hui à travers la plupart de la face de la plage. Les processus de la zone de surf, ont été observés et conduisent à la migration au large de la barre. Tandis que les oscillations érodent la face de la plage supérieure. Nous constatons que les frontières sont des dépendances fonctionnelles de la hauteur des vagues locales par rapport à la pente d'onde locale. Cela contraste avec l'utilisation de la hauteur des vagues ou des niveaux d'eau sont relativement constante (PRICE *et al*, 2008: II.C.g).

Un autre exemple : la conception intégrée d'une défense côtière, en appliquant les connaissances acquises dans le DELOS (EVK3-CT-2000 à 00041) à un cas de prototype existant. Pour cela, le Lido di Dante (Ravenne, Italie) a été sélectionné. C'est un site qui souffre d'une grave érosion. La méthode de conception proposée suit les lignes directrices de conception pour les structures à faible crête livrées par DELOS. Après une analyse préliminaire du contexte environnemental et les différentes contraintes, des alternatives de conception ont été proposées et ensuite modélisés avec le modèle bains 2DH MIKE 21 pour l'hydrodynamique représentative et les conditions météorologiques. L'effet d'Ingénierie, au niveau écologique et social de chaque option est ensuite évalué, sur la base des résultats des simulations et des expériences dans le domaine numérique. Un jugement global des solutions de rechange est donné y compris l'examen des deux coûts de construction et d'entretien. Le schéma préféré est alors optimisée grâce à une conception plus détaillée et vérifiée par modélisation numérique. La nécessité d'une telle approche intégrée est enfin discutée. L'analyse effectuée et les résultats présentés pour ce site ont montré les interactions étroites entre la conception de LCS[8], les modifications de l'habitat, l'hydrodynamique, l'érosion des plages, la qualité de l'eau et la valeur

[7] RTR : gammes de marées relatives
[8] LCS : Low-Crested coastal defence

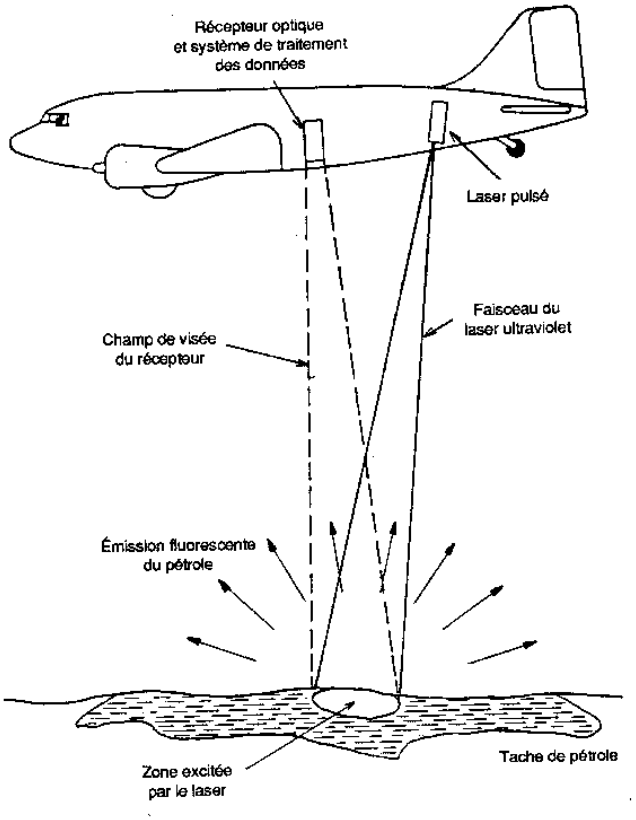
de la plage. Il est donc important de suivre et de prendre en compte tous les effets multiples de la LCS sur l'environnement littoral et de promouvoir ainsi un système de défense côtière efficace durable (ZANUTTIGH *et al*, 2005: II.G).

❖ Outils géographiques

Comme on peut le voir pour réaliser nos études sur le littoral nous avons besoin de différents outils comme :

- Le lidar : c'est une technologie de mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur. Par exemple, le LiDAR bathymétrique sur les plages australiennes montre que les transitions entre les zones de l'état de plage sont marquées principalement par des caps, mais les transitions se produisent également progressivement le long de plages de sable continue. La distribution littorale des États de plage et les types de barres associés à l'échelle régionale peuvent être liés à la variabilité des conditions hydrodynamiques (incidence des vagues et énergie) et les caractéristiques des sédiments (taille des particules). Cependant, l'influence de ces paramètres sur l'état de la plage semble être largement contrôlée par le contexte géologique comme la présence d'une embouchure de la rivière, cap ou de la roche plate-forme (ALEMAN *et al*, 2015: II.C.e).

Figure 7 Le LiDAR bathymétrique (source: AFTER *et al*, 1983)



- La vidéo (voir figure 6) : La méthode basée sur la vidéo a été utilisée pour acquérir des informations de vague run-up[9] de trois plages microtidales, des plages en sédiments de «poche» sur l'île de Lesbos (Grèce, Méditerranée). Les résultats ont montré que les plages étudiées présentent des caractéristiques particulières à l'égard de la vague run-up, par rapport aux plages océaniques de sable précédemment étudiées. Les Hauteurs run-up semblaient être caractérisées par des fréquences similaires à celles des vagues littorales (étudié par l'acquisition des données d'ondes à haute fréquence dans la zone littorale). Les Mouvements de basse fréquence sont introduits par le clapotis, mais leur contribution à l'énergie de montée totale semblait être moins importante que dans les études précédentes (VOUSDOUKAS *et al*, 2009: II.C.f)
- L'approche hybride pour modéliser l'évolution du rivage : Un modèle d'évolution hybride axée sur les comportements / data-driven rivage a été réalisé. Le modèle est fondé sur une forme de formulation d'advection-diffusion largement connue pour décrire la modification du littoral. L'approche se caractérise par l'équation modèle de gouvernance. Elle est en deux parties, l'une décrit la contribution des processus pilotés par les vagues moyennes dans le temps grâce à un coefficient de diffusion variant spatialement. L'autre décrit les contributions d'onde variant dans le temps et tous les autres processus qui contribuent au changement du littoral à travers une fonction source. Les mesures de l'onde incidente historiques sont utilisées pour déterminer le coefficient de diffusion à un site donné. La fonction source est calculée par la solution de l'équation inverse de modèle de gouvernance au moyen de sondages historiques du littoral. La méthode est démontrée pour la plage à Colwyn Bay dans le Nord du Pays de Galles, au Royaume-Uni. Pour les rivages de dérive-dominée, la technique peut isoler les contributions de cross-shore pour changer de rive sur une plage sur des échelles de temps, ce qui est essentiel dans la mise en œuvre des mesures de défense côtière (KARUNARATHNA *et al*, 2013: II.C.h).
- Un modèle simple (TABORDA *et al*, 2015: II.D): pour évaluer par exemple les effets de l'élévation du niveau de la mer sur les plages de la plate-forme qui repose sur la conservation du volume de sable de plage et assume une forme invariante de profil de la plage. Dans les systèmes fermés, en comparaison avec le modèle d'inondation, les résultats montrent de plus grandes retraites; les différences sont plus élevés pour les plages avec des bermes larges et lorsque la plate-forme littorale développe à de faibles profondeurs. L'application du modèle proposé sur les plages de Cascais (Portugal), en utilisant le scénario d'élévation du niveau de la mer du 21 e siècle, montre qu'il y aura une réduction significative de la largeur de la plage (TABORDA *et al*, 2015: II.D).
- Les Sondages (CASTAÑO-ISAZA *et al*, 2015: II.I) : La zone colombienne de San Andres est la plus grande SMPA[10] dans les Caraïbes. L'économie de l'île de San Andres (ISC[11]) repose essentiellement sur le tourisme. Une enquête a été réalisée pour recueillir des informations sur l'expérience et la valeur que les touristes donnent aux plages de l'ISC. Les touristes considèrent les plages comme la raison principale du choix ISC en tant que destination et ont exprimé qu'ils seraient prêts à payer de l'argent supplémentaire, soit 997 468 US $ par an, au-dessus de ce qu'ils avaient déjà payé pour

[9] Run up: c'est l'altitude maximale atteint par le jet-de-rive (c'est-à-dire les eaux turbulentes qui montent sur la plage après le déferlement d'une vague) sur la côte
[10] SMPA : Seaflower Marine Protect Area
[11] ISC : Ile de San Andres

leurs vacances pour que les plages de Sai soit protégée. L'étude a également montré comment l'érosion des plages pourrait nuire économiquement au secteur du tourisme de l'ISC, réduisant les recettes de 66,6% (estimé à 73 millions $ par année). Cette recherche a contribué à la première étape dans le développement d'un paiement pour les services écosystémiques (PSE[12]) pour protéger les plages de San Andres. L'intérêt de la plage de San Andres est la perte potentielle de revenus en raison de l'érosion des plages. Nous devons inciter le secteur privé à investir dans l'infrastructure naturelle pour le maintien et la protection de l'anse. Cette étude informe également le potentiel d'application des études d'évaluation pour le développement des instruments de financement novateurs, comme le PSE, pour atteindre la viabilité financière pour le réseau d'AMP[13] en Colombie (CASTAÑO-ISAZA *et al*, 2015: II.I).

- Les prédictions (McCALL *et al*, 2015: II.G): Certain scientifiques ont cherché à prédire l'impact des tempêtes. Par exemple l' XBeach-G est capable de reproduire le type de réponse morphodynamique de la barrière ainsi dans le sens qualitatif et quantitatif (médiane 0,75 BSS), avec une habileté plus élevée pour des conditions de tempête plus énergiques. Une Inclusion des forces d'accélération sur les plages de graviers grossiers est montrée pour augmenter de façon significative le modèle de compétences et peut être essentiel dans la modélisation de ces types de plages. Le nombre de cas de validation et le manque de calibrage spécifique au site montrent que XBeach-G peut être appliqué pour prédire les effets des tempêtes sur les plages et les barrières de gravier pures avec une confiance raisonnablement élevée pour une gamme de conditions de forçage hydrodynamiques (McCALL *et al*, 2015: II.G). Il serait intéressant de voir son intérêt sur des plages microtidales.

  Pour mieux comprendre et finalement prédire chaque année la modification du littoral à l'échelle décennale une autre technique a été mise en place. L'analyse des données commence par une tentative pour trouver des associations entre des variables. Pour analyser la variabilité et les tendances du rivage, une définition fonctionnelle de la fonction dynamique du littoral est généralement effectuée. La définition doit prendre en compte les modifications du littoral à la fois dans un sens temporel et spatial et de sa variabilité sur l'échelle de temps. Les modèles de séries chronologiques constituent l'un des groupes les plus importants de la modélisation et de prévision (CHANG *et al*, 2014: II.C.f). L'application de l'analyse de données et la modélisation de système intégré révèlent que l'évolution du trait de côte le long de l'échelle d'une cellule décennale du littoral du Nord-Ouest du Pacifique aux Etats-Unis est très dépendante de l'offre de sédiments et de la variabilité du climat d'onde. En particulier, des estimations précises (Columbia River) d'offre et de rechargement sédimentaire de l'avant-côte inférieure sont des composantes essentielles pour équilibrer le budget de sédiments de la plage de barrière et sont donc essentielles pour faire l'hindcasts et les prévisions de changement du littoral sensible. Un modèle de la modification du littoral simple déterministe d'une ligne, appliqué d'une manière quasi-probabiliste, permet d'évaluer l'influence de l'apport de sédiments et la variabilité du climat d'onde grâce à la simulation de l'évolution du trait de côte historique. Grâce à l'itération, un éventail de scénarios réalistes sont développées pour contraindre les prévisions à l'échelle décennale la modification du littoral. Les modifications du littoral modélisées sont nettement sensibles aux

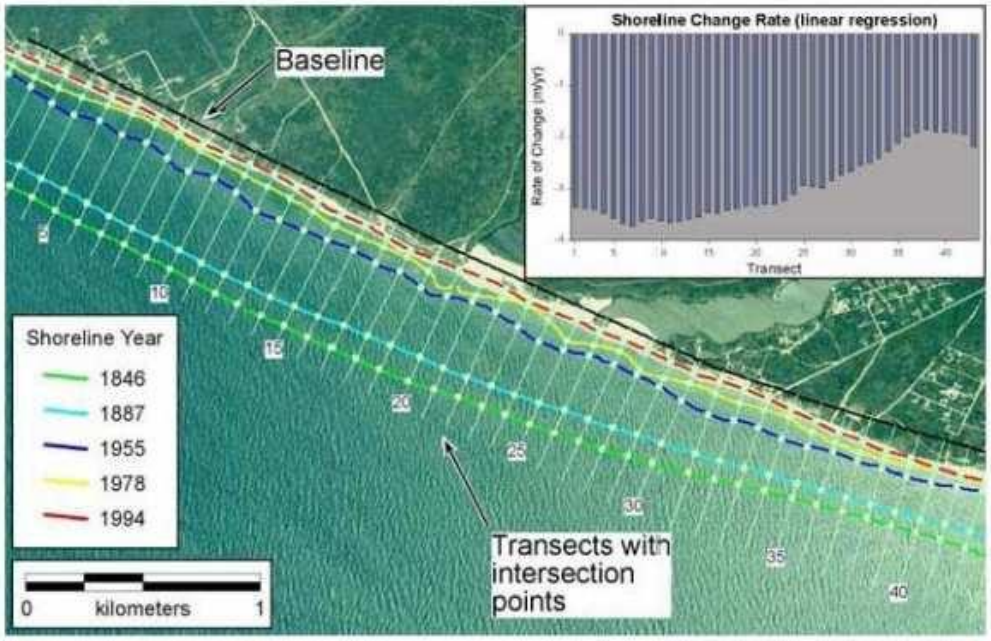
[12] PSE : Paiements pour Services Environnementaux
[13] AMP : aires marines protégée

changements directionnels dans les ondes incidentes, et donc sensibles à l'apparition de fluctuations climatiques interannuelles tels que les grands événements comme El Niño. Une augmentation est prévue ainsi qu'une intensification du climat des vagues de l'est du Pacifique (1,0 m augmentations de hauteur de vague significative dans 20 ans). Elles affecteront les positions du rivage uniquement lorsque cette augmentation se produira au cours de la saison des tempêtes d'hiver. Cependant, l'effet de cette augmentation de puissance de la tempête au cours d'une année donnée est faible par rapport à l'impact des grands événements El Niño. Le modèle a compétence importante dans l'échelle décennale d'hindcasts suggère que les gradients Alongshore dans le transport des sédiments dominent le changement côtier à cette échelle sur ce site (RUGGIERO *et al*,2010: II.B) [L'évolution non linéaire des ondulations Alongshore est composée de trois différentes formes de rivages en fonction des conditions d'ondes: ondulations sans broches, des ondulations avec la rive broche parallèle et les ondulations avec broches reconnecter (KAERGAARD *et al*, 2013: II.C.f)]. Toutefois, les données et les résultats du modèle suggèrent que l'onshore net de rechargement de l'avant-côte inférieure est responsable d'environ 20% de la variation du littoral à l'échelle décennale. Les mesures de terrain et le mauvais modèle de compétences à l'échelle annuelle indiquent que les processus de littoral transversaux dominent probablement le changement côtier à des échelles de temps plus courtes (RUGGIERO *et al*,2010: II.B)

- Les techniques cartographiques comme le DSAS[14] c'est-à-dire une combinaison de photographies aériennes (RESTREPO *et al*, 2012: II.C.d ; FORD, 2013: II.C.d ; YANG *et al*., 2012: II.C.e; GARES, 2006: II.G.n; AEDLA *et al*, 2015: II.C.i ; SAFFACHE, 2000: II.J; KELLEY, 2013: II.C.d) : l'élément indispensable à la compréhension du littoral est la cartographie. De nombreux scientifiques utilisent la cartographie pour connaitre l'évolution d'une anse sur le long terme (KILIBARDA *et al*., 2014 :II.C.a ; PATRICK *et al*., 2011: II.C.a). La superposition de carte de différentes périodes peut être réalisée (SAFFACHE, 1999: II.J) par le biais d'une technique nommée DSAS à l'aide de logiciel tel qu'Arcgis (JONAH., 2015: II.C.d) ce qui nous permettra d'avoir quelques données statistiques. La télédétection peut également être utilisée car elle permet de délimiter précisément le rivage (YANG *et al*., 2012: II.C.e ; GARES, 2006: II.G.n).Plusieurs études ont été réalisée avec la technique du DSAS. Exemple : Entre 1945 et 2010 le rivage de Woje à plus tendance à l'accrétion, avec un déplacement moyen net du littoral de + 1,74 m. Les rivages étaient en accrétion le long de la lagune, l'océan et le canal face aux rivages, ainsi que sur des broches allongées et les petites îles. Une évaluation à haute fréquence du changement de rivage sur un sous-ensemble d'îles dans l'est de Wotje révèle que les îles ont été stables, avec un équilibre entre rivage accrétion et l'érosion. Les littoraux interprétés à partir des images haute résolution par satellite capturées entre 2004 et 2012 indiquent que les rivages au sein de cet échantillon d'îles sont en grande partie dans un état érosif. Le changement post-2004 en direction de l'érosion peut être induit par élévation du niveau marin, ou causé en partie par un rivage d'oscillation non résolue (FORD, 2013: II.C.d).

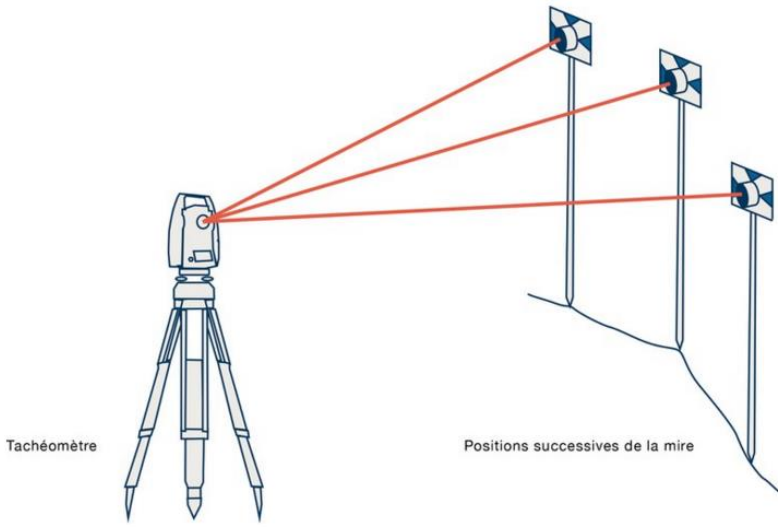
[14] DSAS: Digital Shoreline Analysis System

Figure 8 Technique du DSAS sur l'île de Nantucket Island, Massachusetts (source : USGS, 2008)



- Les études topographiques (avec des tachéomètres ou des DGPS[15]) par le biais de profils sont aussi des études relativement communes. Car elles permettent aisément de voir l'impact des houles sur les anses (DOLIQUE, 2013). En raison de cela, les scientifiques peuvent les utiliser pour observer l'impact des tempêtes sur une anse rechargée en sable (BRUTSCHE *et al*., 2014: II.C.c). Cette technique a permis par exemple de déterminer les zones d'érosion sur la plage d'Anse Madame en Martinique. L'érosion a tendance à être au nord de cette plage alors que le sud a plutôt tendance à s'accrêter (DOLIQUE*et al*, 2013).

Figure 9 Principes d'un levé au tachéomètre le long d'un profil (PHILLIPE *et al*, ND)



[15] DGPS : Differencial Global Positionning System

- Les méthodes statistiques dites « linéaires » sont très utiles pour l'analyse et la modélisation des systèmes morphologiques côtiers. La gestion du littoral nécessite souvent la quantification précise de l'érosion de la tempête et les risques d'inondations. La méthode comprend les trois étapes principales suivantes:
    - « La simulation de forcer des variables aléatoires » à partir de modèles statistiques inclue la probabilité conjointe entre les variables aléatoires clés;
    - « La simulation de la durée » entre les tempêtes en utilisant un processus de poisson non homogène;
    - « La simulation de chaque événement » afin de déterminer la quantité d'érosion.

Réaliser des analyses de données climatiques a aussi son importance ; elles permettent de comprendre les causes du taux de transport de sable et le mouvement de dunes côtières (KILIBARDA *et al*, 2014 II.C.a).

L'utilisation de données statistiques peut être intéressante en ce qui concerne la variation texturale du sable. En effet, une étude a prouvé que la saisonnalité pouvait jouer un rôle important sur leurs plages (KULKARNI *et al*, 2015: II.C.i). L'analyse Statistique, quadrant et spectrale peut révéler aussi la nature intermittente anisotrope et les contraintes de REYNOLDS (échange de quantité de mouvement) dans la couche limite d'onde, dans les trois plans orthogonaux de mouvement (KASSEM *et al*, 2015).

Les statistiques permettent de faire des études quantitatives et qualitatives. En effet une étude de DORA, G. U., KUMAR, V. S., VINAYARAJ, P., PHILIP, C. S., *et* JOHNSON, G. en 2014, a permis décrire la dynamique à court terme de l'environnement sédimentaire inter-marée sur les plages le long de la côte de micro-marée. En outre, une corrélation est estimée en morphodynamique littorale transversale et caractérise la texture des sédiments superficiels. La plage Devbag (côté nord) et de la plage Ravindranath Tagore (côté sud) à l'embouchure de la rivière Kali, Karwar, sur la côte ouest de l'Inde sont caractérisées à partir d'une douceur extrême de la pente moyenne, et sont largement composées de sables unimodaux. L'environnement sédimentaire est sensiblement composé de textures ayant des sables fins à moyens, bien à modérément triés, fine à grossière biaisée, et platicurtique à leptokurtique dans la nature. Au cours du cycle annuel une inversion de tendance est observée entre les deux plages adjacentes, où un taux plus lent d'accrétion sédimentaire est observé à la plage tandis que la plage Devbag Ravindranath Tagore est exposée à l'érosion. La dynamique de plage avec la propagation des vagues du sud-ouest et le sud-ouest-ouest vers la côte présente de manière significative une dominance du transport des sédiments vers le nord avec l'existence d'un nord le long du rivage actuel. Des profils littoraux transversaux spatio-temporels et des caractéristiques de texture sont les paramètres clés pour comprendre la dynamique de l'environnement sédimentaire inter-marée. (DORA *et al*, 2014: II.C.f).

❖ **Une étude multidisciplinaire**

Pour comprendre notre milieu, il est important d'intégrer différentes disciplines comme l'ingénierie côtière, l'économie de l'environnement, les risques etc. (ALEXANDRAKIS *et al*., 2015: II.C.g ; SAENGSUPAVANICH *et al*., 2008: II.C.g).

L’un des éléments à intégrer dans notre étude est l’étude sédimentaire des plages car elle nous permet de comprendre les dominantes hydrodynamiques, morphologiques (ERGIN *et al*, 2013: II.C.f). Pour déterminer le type de sable, nous sommes obligés de nous référer à différentes caractéristiques morphologiques :

- Type 1: Sable et gravier de plages,
- Type 2: Sable et gravier de plages séparées,
- Type 3: Gravier et sable de plages,
- Type 4: Gravier et sable de plages séparées,
- Type 5: Plages de gravier pur,
- Type 6: Plages de sable ouvertes,
- Type 7: Prise en charge des plages de sable,
- Type 8: Plages de sable avec une double prise en charge,
- Type 9: Plages closes (LOPEZ *et al*., 2015)

Il faut également faire une étude sur la dynamique sédimentaire. En Grèce, une étude a été réalisée. Les résultats ont montré que la partie de beachrock occupée de la plage se caractérise par des morphodynamiques distinctifs (VOUSDOUKAS, *et al*, 2009: II.C.f):

- une beachface est associée à de grandes pentes (VOUSDOUKAS, *et al*, 2009: II.C.f),
- il y a une bonne corrélation spatiale entre le profil de la plage moyenne sous-aérienne et peu profonde immergée et la surface de beachrock supérieur enterré / affleuré; (VOUSDOUKAS, *et al*, 2009: II.C.f)
- les marges des affleurements beachrocks submergés vers le large sont toujours associées à une «étape de l'affouillement c’est-à-dire une falaise immergée (VOUSDOUKAS, *et al*, 2009: II.C.f).

Les résultats ont également montré que les affleurements beachrocks peuvent faire un échange inter-rive par le biais des sédiments en entravant le transport terrestre en raison de la présence de l'étape de l'affouillement. En ce sens, les affleurements beachrocks peuvent être considérés comme en transport offshore conduits pour les sédiments de plage (VOUSDOUKAS, *et al*, 2009: II.C.f).

Selon le modèle, le matériel de plage à partir de sources terrestres adjacents est transporté le long du rivage, vers la partie centrale de l'échancrure, où une zone de convergence de transport littoral se produit dans la plupart des conditions de vagues. Là, les sédiments latéralement fournis sont perdus en mer (VOUSDOUKAS, *et al*, 2009: II.C.f).

Les ondes peuvent jouer un rôle important en ce qui concerne l’avancée du littoral ; c’est pourquoi il est important de déterminer l’impact des ondes longues sur le littoral. Les ondes longues libres en zone d'influence de surf favorisent l'augmentation du transport de sédiments à terre dans des conditions rentables et ont diminué le transport en mer dans des conditions érosives. En revanche, la vague des groupes, qui peuvent générer deux longues

vagues forcées et libres, peut réduire globalement le transport terrestre dans des conditions rentables et augmenter le transport en mer dans des conditions érosives (BALDOCK *et al*, 2010: II.C.f).

Une forte diminution de la hausse de transport de sédiments a été sur les barres. Elle est particulierement plus élevés sous des conditions de houles de fortes énergies. Des distributions verticales plus uniformes ont été observées dans des trough. Ces différences dans la distribution verticale des flux longshore de sédiments peuvent être expliquées par :

- les processus de déferlement et la zone de surf spatialement variables sur la topographie bar-trough.
- par la distribution des ondulations à petite échelle à travers la zone intertidale. Elle influe sur les processus de remise en suspension de sable et contrôle la morphologie des profils verticaux de transport des sédiments.

Les Grands flux littoraux de sédiments sur barres peuvent être expliqués par l'action des vagues déferlantes qui sont responsables de l'augmentation de remobilisation des sédiments, mais la domination pour répandre les disjoncteurs sur les plages étudiées est un résultat probable dans une importante dissipation de la turbulence, conduisant à la remise en suspension de sable limitée dans la colonne d'eau. Comparativement, côté terre la propagation de surf d'alésage sur barres est favorable à une augmentation de la concentration de sédiments à des altitudes plus élevées au-dessus du fond de la cuve adjacente (CARTIER *et al*, 2015: II.C.f).

Le transport de sédiments éoliens varie dans le temps avec la marée tandis que la vitesse du vent est restée constant. À marée basse, le transport mesuré était significativement plus grand que pendant la marée haute. Les Gradients spatiaux mesurés dans le transport des sédiments sur les plages inférieures et supérieures dans des conditions de vents assez constants suggèrent que le transport de sédiments éoliens sur les plages peut être en partie régi par la variabilité spatiale de l'apport de sédiments. La zone intertidale peut être une source importante de sédiments pour le transport des sédiments sur les plages (DE VRIES *et al*, 2014: II.C.f; MILES *et al*, 2015: II.C.f).

Il faut également se pencher sur l'étude floristique comme celle des fucus. Les détritus de fucus jouent un rôle important dans l'élaboration de la dynamique communautaire et les réseaux trophiques sur les plages sablonneuses. Sur la plage les macro-algues sont les fucus les plus abondants, et ils sont décomposés par la combinaison des processus environnementaux, le pâturage de la macrofaune et la dégradation microbienne avant de retourner à la mer en tant que nutriments. Des changements modérés dans les rayons UV sont capables de promouvoir des différences substantielles sur les assemblages bactériennes. Les correctifs de fucus exposés à des traitements de plein soleil ont montré des assemblages similaires. Tandis que, d'autres algues subissant la même exposition bloquent une partie du rayonnement solaire. Les variables spécifiques en éléments nutritifs d'algues liées à la qualité sont les principaux déterminants de la dynamique bactérienne sur les dépôts de fucus. Il y a une relation positive entre la plage de macrofaune (en particulier les fucus utilisateurs les plus abondantes) et les actifs. Les variations modérées de rayonnement solaire et les changements naturels dans les espèces d'algues qui entrent dans les écosystèmes de plage peuvent modifier le rôle de fucus dans le flux d'énergie du milieu littoral avec des implications écologiques inconnues pour les écosystèmes côtiers (RODIL *et al*, 2015: II.C.g).

Il est important de prendre en compte les tempêtes car elles jouent un rôle important dans la modification du milieu. Dans l'étude D'ARMAROLI, C., GROTTOLI, E., HARLEY, M. D., *et* CIAVOLA, P. en 2013, l'objectif était d'examiner la réponse d'un système de dunes et de la plage sur la côte adriatique dans le nord de l'Italie à l'arrivée des orages, la comparer avec les phases saisonnières (mois), à moyen terme (3 ans) le changement morphodynamique et évaluer les résultats prédits par un modèle numérique. Les résultats ont démontré que la pente de la zone oscillant n'a pas montré de variabilité significative pour l'ensemble de la région. Une tendance saisonnière faible dans la variabilité de la pente avant-dune moyenne a été observée, avec des pentes plus raides généralement pendant l'hiver et des pentes moins prononcées pendant l'été. L'analyse de la taille des grains a révélé que les sédiments de la plage sont bien triés en sable fin tendant vers un sable moyen. Ils ont une tendance à la diminution de la taille vers le sud en direction de la rivière Bevano Lido Di Classe. Les tempêtes sont considérées comme le principal facteur contrôlant l'évolution de la plage et les pentes des dunes. La tempête la plus importante a été enregistrée en Mars 2010 avec une hauteur maximale de vague significative de 3,91 m. Contrairement à la tendance saisonnière de dunes, une érosion s'est faite suite à cet événement. Elle peut être attribuée à l'action de l'effondrement des dunes sur des dunes déjà affaiblies (ARMAROLI *et al*, 2013: II.C.f).

- **Etats des lieux**

Il est important, avant d'établir des techniques adaptées contre l'érosion côtière, de réaliser un état des lieux de l'écosystème aquatiques et l'eau

Etat des lieux sur les écosystèmes aquatiques et l'eau.

- **Identification des impacts indirects potentiels :**

- Contrastes saisonniers accentués ;
- Rechargement irrégulier des eaux souterraines ;
- Bouleversement de l'activité des écosystèmes aquatiques ;
- Peu d'impact sur les AEP[16] ;
- Contamination accrue des eaux superficielles ;
- Développement accru des contaminants biologiques ;
- Modifications des écosystèmes aquatiques aux propriétés tampon ou filtrant ;
- Amplification du stress hydrique (évaporation plus élevée, demande plus élevée, ...) ;
- Accentuation de la pollution par rejet des eaux usées si le traitement est non adapté ;
- Variation des débits et étiages ;
- Perturbation de la structure des cours d'eau, de l'érosion des berges et de l'envasement des lits.

[16] AEP : activité des écosystèmes aquatiques

- **Effets potentiels sur la Population et la santé publique :**

- Emergence ou/ et recrudescence de risques infectieux (fièvre du Nil, chikungunya, leptospirose, paludisme) ;
- Favorisation d'un terrain à des contaminations de l'eau par la salmonelle et de l'air par les spores ;
- Développement de micro algues toxiques telles que les sargasses. (Schémas directeur d'aménagement et de gestion des eaux, 2016-2021)

• Méthode de lutte rigides/ souples

Traditionnellement, les côtes ont été protégées de l'érosion par des structures de génie civil comme les digues (CHARLIER *et al*, 1989: II.G). L'érosion est aujourd'hui un risque naturel important. De nombreuses tentatives ont été réalisées. En Chine il y a eu l'utilisation de plusieurs types de méthodes:

- ▶ Méthodes dures: comme l'épi, l'enrochement,
- ▶ Méthodes douce: comme le rechargement,
- ▶ Ou une combinaison de méthodes dures (LUO *et al*, 2015: II.G.r).

Pendant longtemps la méthode la plus prisée par les ingénieurs a été la solution « rigide », bien qu'encore aujourd'hui leurs utilisations restent fortes. On s'est rendu compte de leur impact néfaste sur le milieu. Les auteurs tel que CARTER (1995) ont prôné ces techniques et pensaient que les lacunes de certains ouvrages pouvaient être résolus en corrélant par exemple deux ouvrages rigides (technique : Inlet-Outlet). Aujourd'hui nous primons plutôt les méthodes souples qui semblent plus en harmonie avec la dynamique des côtes. Nous verrons dans cette partie quelques ouvrages ainsi que leurs limites.

Les structures de protection du littoral continueront à être construites et entretenues pour protéger les infrastructures côtières. Cet avis identifie les facteurs qui influent sur notre capacité à conserver ou restaurer les caractéristiques naturelles ou de construire des habitats artificiels sur les plages et les dunes dans la présence de ces structures. Les structures de protection sont des intrusions visuelles et physiques dans des paysages naturels. Ils modifient les processus naturels et introduisent les habitats exotiques. L'impact sur les reliefs et les habitats varie selon le type de structure et la taille, la forme, l'orientation, le type de matériaux utilisés, l'âge et l'état de la réparation. Les changements se produiront sur toutes les structures à travers le temps, et les décisions doivent être prises pour compléter, reconstruire, remplacer, enlever ou permettre qu'ils se détériorent. Les décisions concernant la suppression des structures de protection sont problématiques parce qu'ils pourraient déjà être considérés comme un habitat, et les effets de la suppression sont aussi difficiles à prévoir que les effets de leurs mises en place originales (NORDSTROM, 2014: II.G).

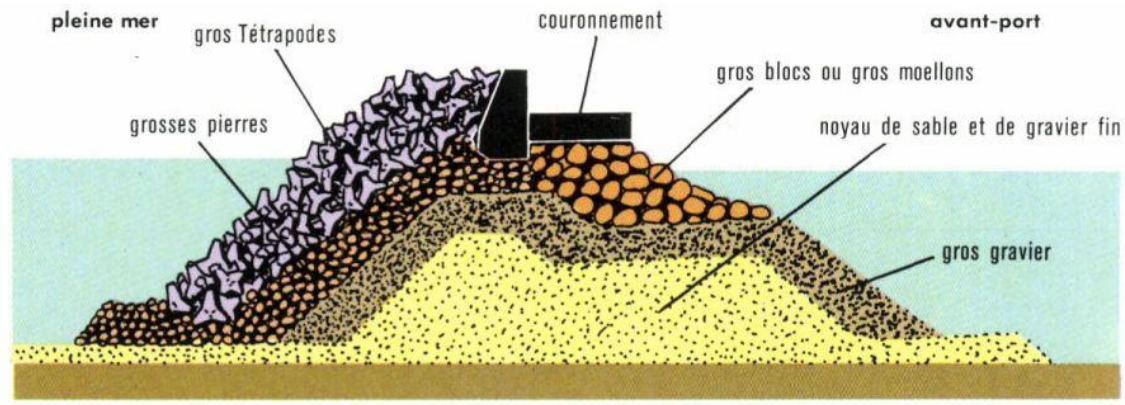
❖ **Méthodes rigides (inadaptées)**

- Les digues

Des études ont été réalisées pour établir l'efficacité des différentes méthodes. Les scientifiques ont établi que les méthodes dures dont les digues (la technique la plus utilisée dans le monde) sont néfastes aux plages. La Construction de digues a entraîné le déplacement de sites d'érosion d'un endroit à un autre à proximité, tandis que des brise-lames ont agi comme des obstacles pour la dérive littorale (SHETTY *et al*, 2015: II.G.r).

L'endiguement est une des plus vielle méthode de lutte contre les eaux. On l'a d'abord utilisé pour faciliter l'agriculture puis pour faire face à l'érosion côtière. C'est pour mieux protéger les intérêts économiques et sociaux que nous en sommes venus à utiliser cette technique. La mise en place de digues s'est essentiellement concentrée dans des zones fortement littoralisées. Les espaces où les constructions sont plus ponctuelles sont généralement abandonnés en raison des coûts trop élevés. Cette technique est néfaste pour l'environnement car elle entraine la perte d'une grande richesse du milieu (MIOSSEC, 2012 : I).

Figure 10 Digue de mer classique (source : http://medias.larousse.fr/archives/img/grande-encyclopedie/full/digue_et_jetee_002.jpg)



Digue de mer classique.

Les européens ont mis en place le LCS[17] à travers le projet DELOS. Les caractéristiques géométriques des sites sont très larges. Ils sont profondément immergés et sont bien performés lorsque les épis sont présents (Pellestrina), alors que pour les systèmes de classeurs (Lido di Dante), l'entretien semi-immergé doit être prévu pour les parties vulnérables (tels que les gaps et les roundheads) où de forts courants sont responsables de l'érosion. Les LCS émergeant montrent la formation de reliefs (Altafulla) ou tombolos (Lønstrup) en fonction des distances du rivage. Dans les plages à macro-marée (Elmer), les courants de marée peuvent contrôler le développement saillant et la performance globale du système. Sur la base des observations de terrain décrites ici, les LCS semblent travailler efficacement dans différentes conditions environnementales, offrant la possibilité de protéger les plages dans le contexte de la gestion intégrée des zones côtières (LAMBERTI *et al*, 2005: II.G.r). Des estimations quantitatives sur les effets économiques de la modification du littoral et de la protection structurelle dure dans

[17] LCS: Low crested and submerged structures ou Digues à moindre impact écologique

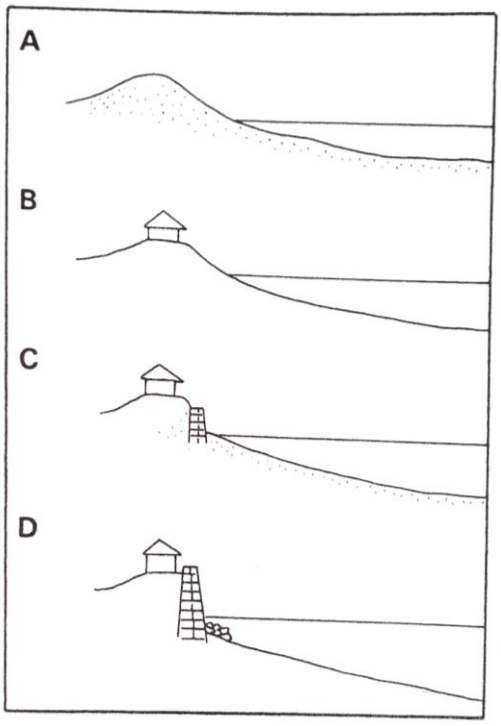
les zones côtières de la Nouvelle Angleterre ont été réalisées. L'augmentation marginale moyenne des valeurs des propriétés côtières associées à une élévation de 1 m d'altitude est de 2%, à 1 m (distance horizontale). La diminution du taux d'érosion est de 0,2 %, et l'emplacement derrière une digue est de 10 %. Les effets de l'érosion, l'altitude et les digues semblent être limités à des propriétés situées à proximité de l'eau ou à des résidences en bord de mer (Jin *et al*, 2015: II.G.r).

- Les murs de protections

C'est une technique très fréquemment utilisée (en France, les murs représentent une longueur totale de 350 km de longueur) qui visent à contenir l'attaque frontale de la houle et à arrêter l'avancée de la mer. La fréquence de leur utilisation est essentiellement due à leur facilité d'accès. En effet, ils sont peu coûteux et faciles à mettre en place. Néanmoins ce type de construction a de nombreuses contre-indications:

- ils enlaidissent le paysage,
- gênent l'accès des plages en réduisant leurs surfaces,
- ils accélèrent bien souvent l'érosion en empêchant les échanges sédimentaires,
- ils modifient le processus hydrodynamique en créant une réflexion de la houle, ce qui renforce l'agitation de la mer et favorise le prélèvement de sable et de galet (PASKOFF, 2004: III).

Figure 11 Mur de protection (PASKOFF, 2012: III)



A : A l'origine existent une plage et une avant-dune en état d'équilibre dynamique.

B : On édifie une maison sur l'avant-dune à proximité de la plage.

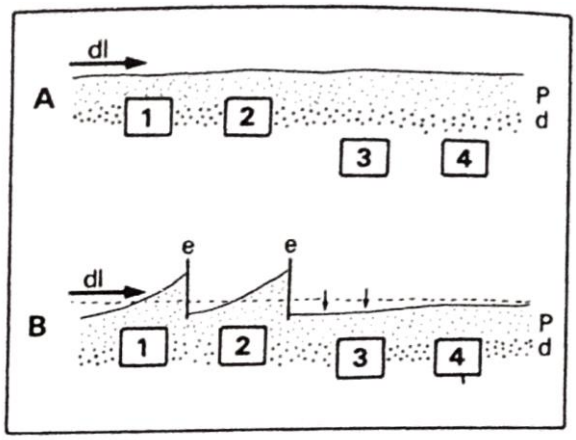
C: Le sort naturel d'une avant-dune est d'être partiellement érodée lors des tempêtes et restaurée pendant les périodes de beau temps. Pour mettre la maison à l'abri de l'action destructive des vagues, un mur de protection est érigé. En interdisant tout échange de matériaux entre la dune et la plage d'une part, en renforçant la turbulence de l'eau d'autre part, il déclenche un démaigrissement et un recul de la plage.

- Les épis :

La première mention de l'épi remonte à la fin du XVIIIème siècle. LARMANDE, l'ingénieur du roi de l'île de Noirmoutier, s'est rendu compte que l'épi a la capacité de stagner le sable. La technique est relativement utilisée bien qu'elle ne soit pas toujours garantie. (MIOSSEC, 2012: I). Les épis sont perpendiculaires au rivage, ils ont pour but de retenir une partie de la charge sédimentaire véhiculée par la dérive littorale en freinant ce courant (PASKOFF, 2004: III). Toutefois, il y a également des effets néfastes :

- la répartition des sédiments est troublée. En effet, en aval de l'épi il y a érosion alors qu'en amont il y a accumulation. (CATALIOTTI *et al*, 1997: III),
- il faut calculer convenablement l'espacement entre deux épis (bonne distance = une fois et demis la longueur de l'épi). Quand ils sont trop rapprochés les sédiments sont dispersés et sont perdus vers le large. Quand ils sont trop espacés les sédiments peuvent être déchaussés de leurs racines (PASKOFF, 2004: III),
- un épi nécessite la construction d'un autre épi (MIOSSEC, 2012: I),
- il faut qu'il soit assez haut mais pas trop pour éviter qu'il ne piège trop de sable (MIOSSEC, 2012: I).

Figure 12 Epis (PASKOFF, 2012: III)



A : les maisons 1 et 2, imprudemment construite sur l'emplacement de l'avant-dune (d), sont menacées par les vagues de tempête, ce qui n'est pas le cas de celles (3 et 4) installées en arrière de la dune.

B : afin de mettre à l'abri de la destruction les maisons en danger, on décide d'élargir la plage (p) par l'implantation d'épis (e). Les épis freinent la dérive littorale (dl) et l'obligent à déposer une partie de sa charge. Le résultat est un déficit en sédiments immédiatement à l'aval, d'où un recul de la plage qui met à la portée des vagues les maisons jusque-là hors de leurs atteinte. Pour les protéger, il faut alors construire des épis en face d'elles, épis qui en appelleront d'autre à côté.

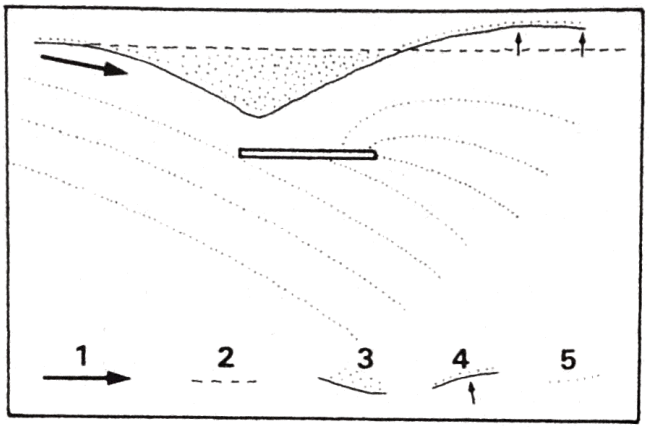
- Les Brise-lames

Ce sont des ouvrages qui sont mis en place sur de petits fonds en avant-côte et qui sont disposés de façon plus ou moins parallèle par rapport à la côte ; leur but est de réduire, voire de supprimer l'impact des vagues en réfléchissant ou en absorbant l'énergie des vagues (PASKOFF, 2004: III). Les points négatifs :

- il y a une érosion à l'aval de l'ouvrage (CATALIOTTI *et al,* 1997: III),
- le coût élevé (PASKOFF, 2004: III),
- la mise en place de plusieurs brise- lames entraine un recul du rivage entre les deux ouvrages (CATALIOTTI *et al,* 1997: III),
- ce type d'ouvrage génère des tombolos c'est-à-dire une accumulation sédimentaire à l'arrière du brise-lame (CATALIOTTI *et al,* 1997: III),
- en arrière des brise-lames il y a une stagnation des eaux. On peut réduire ce problème en diminuant la taille de l'ouvrage (PASKOFF, 2004: III),
- traumatisme des milieux sous-marin durant son installation. Néanmoins, après l'édification de nouveaux biotopes rocheux, ils sont rapidement colonisés par les espèces végétales et animales. (PASKOFF, 2004: III)

.

Figure 13 Impact du brise – lames (PASKOFF, 2012: III)



1 : dérive littorale dominante.

2 : tracé de la côte avant la construction du brise-lames

3 : progradation/ **4** : érosion

5 : crête des vagues incidentes

La faible formation au niveau environnemental des ingénieurs a entrainé la mise en place de ces ouvrages qui se sont au final révélé être des erreurs. Ce type d'ouvrages revient cher car on est obligé de le changer assez régulièrement. Par exemple le cordon d'enrochement est remplacé par l'épi. De plus, leurs mises en place a plutôt tendance à amplifier l'érosion.

❖ **Méthode Douce**

Les méthodes douces ou la combinaison des méthodes dure sont des techniques à privilégier car elles favorisent une avancée des anses (LUO *et al*, 2015: II.G.r; SEINO, 2015: II.G.r; GARES *et al*, 2006: II.G.n).

Toutefois il faut savoir que les méthodes douces ont leurs limites. En effet, face aux phénomènes paroxysmaux de fortes intensités, les méthodes douces peuvent aussi avoir des impacts limités sur les anses (MUNSCH *et al*., 2015 II.C.b ; SCHLACHER *et al*., 2012: II.G.n ; ARAGONES *et al*., 2015: II.G.n). C'est pourquoi il faut une observation constante.

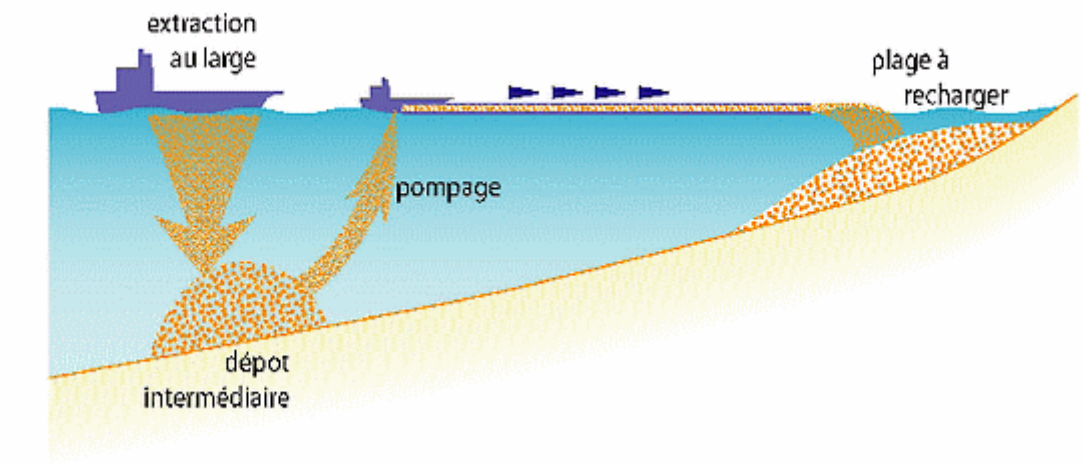
Il existe une multitude de solutions douces que de nombreux auteurs prônent aujourd'hui (PASKOFF, 2004 ; BRGM, 2014: III ; MDEE, 2010 …). Nous étudierons par la suite quelques-unes de ces techniques.

– le rechargement des plages

Il compense les déséquilibres littoraux, élargit les plages, limite l'impact de l'érosion (BRGM, 2014: III). Pour recharger de manière artificielle, il nous faut une source de sédiments proche, aisément accessible et adéquate, d'où la nécessité d'une étude préalable. Le sable choisi doit être légèrement plus grossier pour empêcher toute mobilité sédimentaire. S'il est trop grossier l'impact sur la plage se révèlera néfaste car il aura la formation d'une pente forte qui réfléchira plus aisément les vagues et donc amplifiera l'érosion. Les sédiments peuvent être extraits de carrières, mais on préfère généralement faire une extraction en avant-côte (l'extraction ne doit pas s'étendre à plus de 20 mètres du rivage). Le rechargement des anses doit se faire régulièrement (une fois que la moitié du volume fourni disparait). Le temps de rechargement peut largement varier d'une plage à l'autre. En effet, aux États-Unis, sur 155 plages rechargées, 26 % ont eu besoin d'un rechargement en moins d'un an, 62 % entre 1 et 5 ans et 12 % après 5ans (PASKOFF, 2004: III). Cette technique a eu de nombreux effets positifs. Le cas le plus célèbre est celui de Miami Beach qui a connu une forte extension de son anse.
Le rechargement qui consiste à rengraisser la plage en sable avec des sédiments de même densité est une technique largement utilisée car elle permet de ralentir l'impact des évènements de fortes intensités (CHU *et al*., 2014: II.G.n). Il génère très souvent une accrétion de l'anse (GARES *et al*, 2006: II.G.n ; KARAMBAS *et al*., 2014 ; JONES *et al*, 2001: II.G.n). Le rechargement des plages fonctionne (JONES *et al*, 2001: II.G.n). Que l'on parle en termes d'atténuation de la tempête ou en termes économiques tels que le tourisme et la croissance de la communauté, le rechargement de la plage est une alternative viable et économique contre l'érosion. La Caroline du Nord est un bon exemple de l'utilisation du rechargement pour lutter contre l'impact érosif des tempêtes. Les résultats indiquent un besoin pour des révisions majeures des politiques de la FEMA[18], les paramètres utilisés pour la conception de projets d'alimentation, et la nécessité d'inclure d'autres coûts / avantages, tels que le tourisme. Les changements de politique recommandés sont inclus dans la section finale comme une base de discussion. Il est important de mettre en corrélation politique et rechargement (JONES *et al*, 2001: II.G.n).

[18] FEMA: Federal Emergency Management Agency ou L'Agence fédérale des situations d'urgence

Figure 14 Méthode de rechargement d'une plage par extraction et importation de sable du large (ALLAIN, 2009)



Mais le rechargement, bien qu'il soit considéré comme une méthode douce peut entrainer des impacts négatifs (à court et moyen terme) sur l'écosystème, particulièrement la faune et la flore (MUNSCH *et al*., 2015 : II.C.b ; SCHLACHER *et al*., 2012: II.G.n; ARAGONES *et al*., 2015: II.G.n). Toutefois, son impact reste beaucoup moins important que celui des méthodes dures (SPEYBROECK *et al*, 2006: II.G.n). C'est pourquoi les scientifiques sont en quête constante d'une solution pour à la fois favoriser une accrétion des plages et limiter les dégâts sur l'écosystème. Ces recherches ont permis aux scientifiques de créer des techniques telles que le géotextile (SHIN *et* OH, 2007: II.G.o). De plus, les lois actuelles et des directives techniques sur cette question devraient être considérablement améliorées pour évaluer correctement la compatibilité des sédiments dans les zones marines affectées par des anomalies géochimiques ; Elles devraient inclure des approches intégrées écotoxicologiques physico-chimique et devrait être en mesure d'évaluer l'écotoxicité et la biodisponibilité des polluants. En outre, les aspects liés à la pollution microbiologique, la couleur et la compatibilité granulométrique devraient être davantage pris en compte dans les lignes directrices. Le cas fréquemment observé des sédiments de plage qui sont plus pollués que ceux des dépôts marins doit être considéré pour donner aux parties prenantes les instruments techniques nécessaires pour prendre des décisions. L'analyse coûts-avantages effectuée a montré que le dragage de petites quantités de sédiments entraînerait des coûts importants qui ne peuvent être facilement couverts par les administrations publiques. (BIGONGIARI *et al*, 2015: II.G.n).

- Revégétalisation des Anses

« *Cette méthode consiste à planter les végétaux adaptés au milieu côtier qui retiendront les sédiments grâce à leurs racines. Il peut s'agir de ballots de terre et de matières végétales ou de plantations de plantes et d'arbustes en bordure de la côte*. » (MINISTERE DE LA SECURITE PUBLIQUE, 2011). C'est une technique avec de nombreux avantages, elle est peu coûteuse (MINISTERE DE LA SECURITE PUBLIQUE, 2010), elle permet une accumulation de la plage en limitant l'érosion, par la présence d'important réseaux racinaires qui stabilisent les sédiments. L'érosion éolienne est limitée et elle limite les dégâts liés aux piétinements.

Cependant, l'extension des couvertures sont limitées, il faut donc une surveillance périodique. On ne peut re-végétaliser dans les zones à forte pentes (BRGM, 2014: III).

Figure 15 Atelier de revégétalisation des plages organisé à St Leu par l'Ecole du Jardin Planétaire et Kélonia le 27 juin 2015 (source : Région Réunion)

La revégétalisation est une technique douce qui peut permettre l'accrétion d'une plage (CRAFT *et al*, 2008: II.G.p; DAHL *et al*, 1975: II.G.p). C'est ce que démontre l'étude de DAHL, B. E., FALL, B. A., *et* OTTENI, L. C. en 1975. Pour un certain nombre de raisons, le « Coastal Engineering Research Center » de l'armée américaine a été obligée d'étudier les voies et moyens par lesquels les dunes primaires bien végétalisées pourraient être restaurées sur les îles de la barrière le long de la côte du Texas. En conséquence ils ont contracté avec le Consortium de recherche du Golfe des Universités de Galveston, au Texas, pour établir des spécifications techniques et des méthodologies pour une utilisation rentable des herbes naturelles pour construire et / ou stabiliser les crêtes d'avant-dunes, les barrières naturelles contre les ondes de tempête. En fin de compte, un membre du consortium a été chargé de formuler des plans pour sa mise en œuvre, la recherche sur le site et sur les moyens d'atteindre cet objectif. Les attributs d'une plante est nécessaire pour la plage. Les plantations d'avant-dunes sont un système racinaire fibreux. La capacité d'une plante à se développer dans la zone de pulvérisation de sel, à piéger le sable, à favoriser l'accumulation d'une anse, la rend nécessaire sur ce milieu.

Parmi les espèces testées, le Panic amère, est le mieux adapté pour la transplantation. L'Avoine de mer était moins souhaitable car la transplantation de la survie a été légèrement plus faible et ils étaient plus difficiles à gérer. Les autres espèces indigènes testées étaient insatisfaisantes pour une raison ou une autre, de même que treize espèces exotiques dans la région. Les deux espèces préférées ont été plantées avec succès à partir de Décembre à mai. Les plantations de janvier ont eu plus de succès pour l'avoine de mer, les greffes de Panic amères on aussi bien survécu pendant ces mois. La Sécheresse prolongée et l'eau de mer mis en fourrière et les nouvelles ondes de tempêtes saisonnières étaient les deux raisons évidentes pour ne pas réussir à planter. Les greffes ont été incapables de survivre à des niveaux de 4300 u mhos / cm de salinité du sol pendant plus de quelques jours. Par conséquent l'inondation prolongée par l'eau de mer (de conductance de plus de 13,340 µ mhos / cm) non accompagnée par la pluie, a été fatale à la transplantation. Les plantations expérimentales avec pas plus de 8% de survie

ont accumulé autant que 42,4 m3 / m de plage à 50 mois. 20% d'autres plantations greffé ont permis une accumulation de 48,9 m3 / m de la plage pendant 50 mois. Le golfe du Mexique, la côte bordant les États-Unis ont connu cette évolution positive sur 2610 km de longueur.

Les îles-barrières de la Floride au milieu de la côte du Texas, sont discontinues. Toutefois, ils sont en continu le long de la côte sud du Texas. Ces îles-barrières de sable, construites par des processus naturels, offrent une protection à la partie continentale de la marée en haute saison contre les ondes de tempête, et les vagues d'ouragan généré. Les Îles de barrière dans les régions humides sont recouvertes d'une variété de la végétation, y compris les arbres, les arbustes et les herbes, tandis que ceux dans les régions semi-arides ont peu de végétation ligneuse. Bien que qu'une érosion considérable peut se produire naturellement le long de la côte et dans les zones basses. Le rivage a été submergé par la montée des eaux. L'érosion est accélérée dans les régions qui manquent d'un couvert végétal (DAHL *et al*, 1975: II.G.p).

- Les tubes géotextiles

Les tubes géotextiles sont des techniques relativement récentes. L'avantage est que la mise en place d'un tube est rapide (moins d'1 h). Il génère également peu d'impact négatif sur la nature, en effet sa composition en polymère n'empêche en rien l'apparition d'algue sur les tubes (SHIN *et al*., 2007: II.G.o). Il donne également des résultats probants concernant l'érosion côtière (LEE *et al*., 2012: II.G.o). Toutefois, La durée de vie des tubes géotextiles est limitée et doit être correctement planifiée. Le placement en termes de profondeur et l'alignement jouent un rôle crucial dans la fonctionnalité pour décider de la durée de vie du tube. Il est conseillé de réaliser des études appropriées, avant la mise en œuvre du projet ; une évaluation de la sédimentation du rivage est conseillée (TAYADE *et al*., 2015: II.G.o). Il existe plusieurs types de géotextile dont le géotextile en fibre de coco (SUBAIDA *et al*, 2008: II.G.o), le LCS Geotube etc.

Figure 16 Géotextile utilisé contre l'érosion côtière sur une plage de Malaisie à l'est de Terengganu (source : LEE *et* al: II.G.o)

Figure 17 Accumulation de la plage après installation du géotextile sur une plage de Malaisie à l'est de Terengganu (source : LEE *et al*: II.G.n*)*

Avant installation du géotextile (juillet 2006)

Après installation du géotextile (décembre 2009)

Un Géotube est un géotextile Texion qui est tissé en forme de tube, sans coutures, ou qui a été confectionné en forme tubulaire à partir de bandes de géotextiles assemblées. Il a eu un impact positif sur la plage de Sigandu (SULAIMAN *et al*, 2015: II.G.o) :

- Le LCB [19]Geotube a montré des résultats remarquables. Ce rivage ordinairement érodé a, dans un temps relativement court, établi une nouvelle côte par une formation saillante et des tombolos (SULAIMAN *et al*, 2015: II.G.o).
- Le Placement de la position de la LCB, la longueur de la structure, et la largeur de l'écart entre les LCB détermine le succès de l'application de la LCB (SULAIMAN *et al*, 2015: II.G.o).
- Il joue un rôle majeur dans le processus de sédimentation. Le transport de sédiments dans la plage va continuer à travers l'espace, même pendant la marée basse (SULAIMAN *et al*, 2015: II.G.o).
- La demande croissante pour les plages touristiques contribue grandement à l'application de LCB respectueux de l'environnement (SULAIMAN *et al*, 2015).

Certaines des améliorations doivent être apportées à la structure du géotube LCB comme l'élargissement de l'écart, afin que le flux résultant n'ait pas un trop grand impact sur l'affouillement local (SULAIMAN *et al*, 2015: II.G.o).

- En raison de la fragilité du tube de matière géotextile, il informer les touristes sur les précautions à suivre (SULAIMAN *et al*, 2015: II.G.o).
- La réhabilitation de la plage de Sigandu, par l'installation de géotube LCB, sera plus efficace s'il est combiné avec la plantation de végétation côtière, tels que les mangroves qui agiront comme un liant de sédiments et comme un protecteur naturel contre les conditions extrêmes (SULAIMAN *et al*, 2015: II.G.o).

[19] LCB: Low Crested Breakwaters

La protection de la plage de Sigandu sur le côté Est devrait être effectuée plus tôt afin d'établir un système unique. (SULAIMAN *et al*, 2015: II.G.o).

- Les récifs artificiels

Les MFAR[20] font aussi partie des techniques relativement récentes. Les Açores sont un groupe d'îles isolées dans le milieu de l'océan Atlantique Nord. Ils sont riches en biodiversités, en géodiversités et en patrimoines culturels. Ils comprennent neuf petites îles volcaniques, éparpillées sur 600 km et sont vulnérables aux risques côtiers en raison de la disponibilité limitée des terres et à l'exposition de l'océan. Pour atténuer et s'adapter aux risques et l'occupation humaine, des méthodes dures traditionnelles ont été utilisées. Cependant, ces structures ont des impacts négatifs sur le caractère naturel du littoral et sur la valeur d'agrément et la prise de conscience environnementale. Des méthodes douces visant à travailler avec les processus naturels, tels que les MFAR, sont globalement de plus en plus attrayantes. Ce sont des structures immergées en mer qui assurent la protection du littoral tout en améliorant les infrastructures de loisirs tels que le surf, la plongée. Grace à cette technique, les plages s'élargissent (NG *et al*, 2013).

❖ **Conclusion**

Il faut savoir que les structures de protection du littoral continueront à être construites et entretenues pour protéger les infrastructures côtières. Il existe des facteurs qui influent sur notre capacité à conserver, restaurer les caractéristiques naturelles ou construire des habitats artificiels sur les plages et sur les dunes avec la présence de ces structures. Ces dernières ont un impact visuel et physique dans les paysages naturels. Ils modifient les processus naturels et introduisent l'habitat exotique. Les Impacts sur les reliefs et les habitats varient selon le type de structure, la taille, la forme, l'orientation, le type de matériaux utilisés, l'âge et l'état de la réparation. Les changements se produiront sur toutes les structures à travers le temps, et les décisions doivent être prises pour compléter, reconstruire, remplacer... Les décisions concernant la suppression des structures de protection sont problématiques parce qu'ils pourraient déjà être considérés comme un habitat, et les effets de la suppression sont aussi difficiles à prévoir que les effets de leurs mises en place originales

Les Alternatives aux structures traditionnelles peuvent être utilisées afin de préserver ou améliorer le milieu. Cela peut se produire en faisant des structures plus petites, en les plaçant au sous-sol ou au niveau de l'eau, le choix des matériaux de construction qui améliorent l'habitat, ou en utilisant la plage de remplissage pour surmonter les effets indésirables. Si une structure traditionnelle dite « dure » doit être améliorée ou détruite, alors une prise de décision est nécessaire. Les humains doivent désormais être considérés comme des agents intrinsèques de l'évolution du paysage. Les décisions sur comment, quand et où placer, modifier ou supprimer des structures de protection dépendent de nombreux apports humains, nécessitant des interventions qui ont une perspective interdisciplinaire et sont placées dans un contexte sociétal (NORDSTROM, 2014: II.G).

[20] MFAR: les Récifs Artificiels Multifonctions

Mais bien souvent l'étude et la mise en place de techniques ou de loi ne suffit pas à protéger les anses. Certaines îles de la Caraïbe ont pu s'en rendre compte ; c'est le cas de Porto-Rico, Anguilla et Nevis. En effet, il y a eu une résistance considérable de la part d'institutions gouvernementales et de la part du public ce qui a ralenti la mise en place de technique et favorisé l'érosion (CAMBERS, 2009: II.I).

B/ La dynamique des littoraux martiniquais

A l'échelle mondiale de nombreux ouvrages ont traité de la dynamique du littoral. A l'échelle martiniquaise la dynamique du littoral est peu étudiée. L'un des premiers auteurs à s'être intéressé au littoral martiniquais est MONNIER. P en 1825. REVERT, E en 1949, s'est essentiellement appuyé sur les travaux de MONNIER, ce qui sous-entend une quasi totale absence de documentation dans ce domaine jusque-là. Il paraîtrait que ce soit véritablement après la thèse de SAFFACHE P. en 1998 que les ouvrages et articles à ce sujet se soient véritablement multipliés en Martinique.

Selon le BRGM[21], jusqu'en 2011 aucune étude de quantification des phénomènes érosifs n'a été entreprise en Martinique. Ce n'est qu'à partir de cette date que l'on s'est véritablement intéressé à la quantification (BRGM, 2011: III). Depuis, des travaux ont été faits par le BRGM, l'IRD[22] et la DEAL.[23]

L'absence de données exige bien souvent d'avoir une vision plus globale du sujet (échelle de la Caraïbe, de l'Amérique etc...). L'Étude du littoral est une étude complexe. Il est difficile de le définir.

Le littoral se définit souvent de manière simpliste comme étant la zone de contact entre la terre et la mer. Mais la réalité est plus complexe. En effet, cet espace a la particularité d'être mobile dans le temps, cela sous-entend que sa limite est également labile. Il n'y a pas de définition unique du littoral. Exemple : *« la limite sable sec / sable mouillé, la limite de rupture de pente de la plage ou encore la limite de végétation sur l'estran sont autant de limites pouvant matérialiser le trait de côte* » (BRGM, 2013: III). Il faut donc adapter cette définition selon le contexte géographique, selon les moyens qui nous permettent de l'identifier et enfin selon l'application que l'on souhaite lui donner. Il est important de définir le trait de côte avant de travailler sur l'espace concerné.

En Martinique cette délimitation se fait à travers les 50 pas Géométrique. S'il n'y a pas de délimitation explicite, elle correspondra à une largeur de 81,20m à compter de la limite du rivage de la mer telle qu'elle a été délimitée en application de la législation et de la réglementation en vigueur à la date de cette délimitation. Grâce à cette délimitation on a pu intégrer cette zone au domaine public maritime (loi littoral du 03 janvier 1986) et ainsi permettre la sauvegarde de la bande littorale. La loi du 30 décembre 1996 relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur des 50 pas géométriques ont permis de limiter les zones habitables. Grâce à la mise en place de cette loi, la population Martiniquaise ne peut plus s'installer de manière anarchique sur le littoral (MEDD, 2010: III). Néanmoins, il faut savoir

[21] BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
[22] IRD : Institut de recherche et de développement
[23] DEAL: Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

que cette loi a pris beaucoup de temps pour être acceptée par la population et a encore du mal aujourd'hui à être respectée.

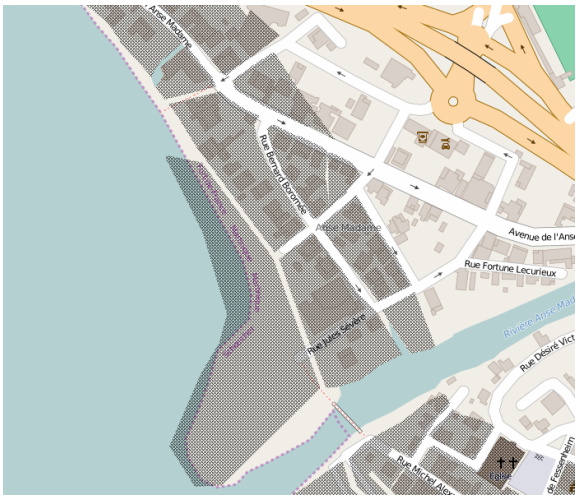


Figure 18 Exemple d'habitat situé sur les 50 pas géométriques à Anse-Madame, Schœlcher (source : AIHP-GEODE WebSIG/ Image:Openstreetmap /Echelle 1 : 2 257/Date: 2014)

La première description du littoral martiniquais date du 19e siècle. Elle a été réalisée par MONNIER entre 1824-1825. Au fur et à mesure de notre lecture, on se rend compte que le paysage martiniquais a beaucoup évolué depuis le 19ème siècle.
Entre 1824 et 1825 tout était plus sauvage, on ne percevait qu'avec difficulté le sable sur le sol tellement la végétation était dense sur les plages. À cette époque, les plages étaient bordées par des ipomea pes caprea communément appelés patates bord de mer. Les plages pouvaient atteindre une largeur de 350m. Aujourd'hui les plages ont largement diminué et ne font qu'une trentaine de mètres de large ; la végétation a presque totalement disparu.
Selon les observations de MONNIER, nous avons pu constater que dans certaines zones, cette érosion est très soutenue ; c'est le cas par exemple de l'Anse Belleville qui a perdu près de 80m de sa longueur, ce qui demeure très important surtout sur une île dont la superficie est de 1100km² (SAFFACHE,1998: III).

Le littoral martiniquais peut se caractériser par quatre entités morphologiques différentes :
- les anses sablonneuses,
- les falaises,
- les mangroves
- les récifs coralliens
- les embouchures des rivières (SAFFACHE,1998: III).

Selon les observations du BRGM en 2015, les milieux les plus mobiles sont les mangroves et les anses sableuses. Toutefois, 43 % des mangroves sur le long terme semblent connaître une avancée alors que les anses connaissent au contraire un fort recul à long terme (21 % du linéaire des plages). Ces divergences sont provoquées par plusieurs facteurs qui sont : terrestres (topographie, climatologie, pédologie, hydrologie), marines (houles, courants, marées) et sous-marines (bathymétrie, sédimentologie).

Malgré la faible taille de l'île, on constate qu'elle peut se diviser en deux grandes parties : le nord caractérisé par un sable noir et le sud par un sable blanc. Cette colorimétrie découle directement des facteurs terrestres (volcaniques) et marins (biogénétiques) sur les arcs anciens (sud de l'île) et récent (nord de l'île). L'arc ancien est caractérisé par des particules bioclastiques résultant du démantèlement des récifs et des concrétions madréporiques. Tandis que le nord de l'île, par le biais du ruissellement et des courants côtiers est caractérisé par des particules volcanoclastiques (SAFFACHE, 1998: III).

Pour comprendre les mécanismes de l'érosion actuelle, il faut en étudier les causes. Nous pouvons dire que les causes sont naturelles mais qu'elles sont amplifiées par l'anthropisation. On a également constaté que l'érosion est plus importante au nord qu'au sud de l'île.

- ## Causes Anthropiques :

Les actions anthropiques ont également joué un rôle important. L'Homme a un impact nocif sur les plages : les plages proches de grandes villes ou de villages ont déjà été largement développées pour leurs usages récréatifs, et sont soumis à une dégradation environnementale significative. Les autres plages ont été en conflit entre les possibilités récréatives, touristiques, et / ou d'exploitation de plus riches biodiversités. L'analyse de scénarios montre que les stratégies de gestion qui mettent l'accent sur la réduction de la nature invasive d'infrastructures de parcs et améliorent la restauration biophysique peuvent augmenter considérablement la valeur de la conservation de la plage, et déplacer des sites dans la zone de conservation (AMYOT *et al*, 2014: II.F.m).

- Le tourisme : Jusqu'aux années 50 la verdure en Martinique demeurait forte. Pour dynamiser l'espace, les décideurs locaux ont voulu miser plutôt sur le tourisme en implantant des hôtels. Mais le touriste a une vision déformée des plages de l'époque. Il espère trouver au Antilles de belles plages de sables blancs et des cocotiers. Les décideurs ont dû, pour satisfaire l'imaginaire des touristes, détruire la flore littorale. C'est le cas des patates bord de mer (Ipomea-pes-caprea) qui permettaient grâce à leurs racines de stabiliser le sable sur de longues distances. Les décideurs ont implanté à la place des cocotiers (faiblement pourvus en réseaux racinaires). On a également voulu remplacer le sable noir (vue par les touristes comme un sable « sale ») par du sable blanc. Or ces sables n'ont pas la même granulométrie ; ceci a donc entrainé une déstabilisation sédimentaire des plages (SAFFACHE, 1999: II.J).
- Les décideurs ont également aménagé l'avant-dune des plages. Les constructions en avant plage empêchent le transfert de va-et-vient (cross-shore) des sédiments, car ils empêchent le transfert des sédiments, provenant de la terre, d'atteindre la plage (SAFFACHE, 1999: II.J).
- Des prélèvements de matériaux ont été réalisés sur les plages par les habitants pour construire des maisons et par des carriers dans le lit des rivières. Ces prélèvements ont débuté au début des années 60 et se sont terminés vers la fin des années 90. Chaque année étaient prélevés environ 15000 à 30000 m^3 de sédiments détritiques (SAFFACHE, 1999: II.J).
- Pollution de l'eau : de nombreuses maisons ne disposent pas de fosses septiques. Ces eaux sont déversées dans les rivières comme la baie de Fort-De-France. Ce qui favorise l'apparition d'algues filamenteuses qui étouffent les coraux. Cette pollution a pour conséquence de réduire les ressources halieutiques et d'augmenter le taux de mortalité des coraux. Les coraux sont importants pour l'approvisionnement des anses du sud de la Martinique (SAFFACHE, 2005: III). Leurs morts induiraient sur le long terme une diminution des apports en sédiments.
- L'absence de réaction de la part des politiciens peut aggraver la situation du littoral et la situation économique. C'est pourquoi il faut réagir au changement du littoral. La Martinique possède 55 km2 de récifs coralliens, 50 km2 d'herbe de mer et 20 km2 de mangroves. Ces trois écosystèmes produisent des services pour une valeur estimée à 250 millions € (M €) / an (valorisation récemment entrepris dans le cadre de l'initiative

française Coral Reef Conservation-programme pour l'IFRECOR). Il est estimé qu'environ 60% de cette valeur provient d'usages directs tels que des activités de loisirs (plongée, excursions, activités de plage, etc.) tourisme et la pêche. Les services écosystémiques (utilisations indirectes) tels que la protection du littoral, la séquestration du carbone, la production de biomasse et de purification de l'eau sont importantes puisque leur valeur totale atteint 94 M € par an (38% de la valeur économique totale). Les valeurs de non-usage liées à l'amélioration de la santé des écosystèmes côtiers est estimé à 10 M € / an. Au niveau de l'écosystème, de l'herbe de la mer et de la mangrove qui contribuent le plus (par km2) à la création de richesse (2,16 M € / km2, 1,87 M € / km2, respectivement, contre 1,78 M € / km2 pour les récifs coralliens). Ils doivent, par conséquent, bénéficier de la protection et de gestion des mesures dans le même ordre de grandeur que les récifs coralliens. L'évaluation montre également que, en raison de l'inaction politique, la perte de valeur est d'environ 2,5 M € / an, ce qui pousse les politiciens à élaborer une politique rationnelle de la conservation (FAILLER *et al*, 2015: II.J).

- Le maintien de la biodiversité de la CRAE[24] doit être considéré du point de vue évolutionniste. On cherche à préserver les espèces présentes. On veut protéger le potentiel de l'évolution future des entités vivantes et les fonctions des écosystèmes. Pour cela nous devons assurer le maintien de la capacité des processus vitaux. Il est donc fondamental d'adopter une approche concertée entre tous les acteurs de la zone côtière. En ce qui concerne les politiques publiques, ils doivent tenir compte de la protection de la CRAE et encore plus de leur valorisation à partir d'un point de vue qui combine l'utilitarisme économique et l'altruisme. La CRAE semble en effet faire partie de l'identité des populations côtières de la Martinique et, pour cette raison, doit être valorisée. Elle est également une source potentielle importante de l'emploi et du développement économique et mérite donc plus que la négligence inattentive actuelle (FAILLER *et al*, 2015: II.J).
- Enfin, les pressions actuelles exercées sur la CRAE, en particulier la destruction, la fragmentation et la dégradation des habitats, la surexploitation ou l'insertion d'espèces de poissons, introduisent la notion de coût de l'inaction publique. Estimé à environ 2M€ par an pour l'ensemble de la CRAE, ce coût montre que de ne rien faire a un prix: le prix de la perte économique, pour laquelle il est conseillé d'ajouter le prix de la restauration des écosystèmes endommagés. Dans ce contexte, la reconnaissance de la valeur économique totale de la CRAE est fondamentale pour l'optimisation de l'action publique, d'autant plus que les valeurs qui la composent montrent la très forte liaison entre les considérations économiques et les vivants (FAILLER *et al*, 2015: II.J).

- Causes Naturelles :

- Nous avons une érosion spasmodique déclenchée par deux phases : celle de la perturbation (saisons des alizés, saisons des pluies) où les anses sont plutôt en phases d'érosion et la phase de beau temps où les plages à l'inverse tendent vers l'accumulation (SAFFACHE, 1998: III).

[24] CRAE : Commission Régionale Agri- Environnement

Figure 19 Impact de la tempête Erika-> les photos en noir et blanc sont prises avant la tempête le 19/08/2015 et les photos de couleur ont été réalisées après la tempête le 28/08/2015

- La côte septentrionale a une morphologie de type Accores ce qui veut dire que la bathymétrie est fortement marquée (canyon sous-marin). Ce type de morphologie a pour conséquence de canaliser les houles à la façon de couloir d'accélération, l'énergie est donc décuplée sur la côte (SAFFACHE, 1998: III).
- Les côtes du nord constituées de matériaux volcaniques de faible résistance connaissent de fortes érosions (ils subissent quotidiennement une altération provoquée par les embruns) (SAFFACHE, 2015: III).
- Le changement climatique : Selon le dernier rapport du GIEC[25] (mars, 2014), le niveau de la mer dans le bassin antillais pourrait connaître aujourd'hui des variations eustatiques annuelles de + 2,5 mm à +3 mm. En 2050, cette élévation pourrait atteindre un peu moins d'une dizaine de centimètre. En couplant cette élévation à une surcote provoquée par une tempête, tout le centre historique de Fort-de-France devrait être inondé ainsi que de nombreuses zones actives telles que des zones industrielles, portuaires, etc… (SAFFACHE, 2014: III).

  L'élévation du niveau de l'eau, induite en partie par le réchauffement climatique, est une cause majeure du phénomène (PASSERI *et al*, 2015: II.D). Le niveau de la mer a monté de 20 cm depuis le milieu du 19e siècle (LE COZANNET *et al*, 2014). On peut ressentir son impact sur l'île de la Grande Glorieuse. Le niveau de la mer a augmenté dans la zone sur 7,5 ha entre 1989 et 2003: une accrétion a eu lieu sur plus de 47% de la longueur du littoral, alors que 26% sont stables et 28% sont érodés. Les Transects topographiques et des observations de terrain montrent que l'accrétion est due au transfert de sédiments des pentes externes du récif plat et ensuite à la plage. Cette accrétion a eu lieu dans un contexte de hausse du niveau de la mer (TESTUT *et al*, 2015). Elle a engendré la mort de la barrière de corail. Le mouvement des sédiments net est très variable et est contrôlé par la bathymétrie du récif et le lagon. Une gamme importante de la bathymétrie du récif du lagon, des récifs peu profonds et étroits notamment, semble conduire à de bonnes conditions hydrodynamiques. Les plages sont susceptibles d'être stables ou même de s'accrêter. La perte de récif augmente les

[25] GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

chances de transport des sédiments des plages et en mer et ceci jusqu'à leur disparition totale (BALDOCK *et al*, 2015: II.D).

Cependant, les récifs coralliens jouent un rôle important dans la réduction des houles. La disparition d'un récif corallien signifie donc la disparition d'une protection naturelle des plages (DE ALEGRIA-ARZABURU *et al*, 2013: II.B). Le niveau de la mer a augmenté d'environ 6 cm durant ces vingt dernières années et la hauteur de l'île est probablement stable ou diminue lentement.

Cette expansion de l'île au cours d'une période de montée du niveau de la mer montre que l'élévation du niveau de la mer n'est pas le principal facteur contrôlant les modifications du littoral. Ceci met en évidence le rôle clé des facteurs non climatiques des changements dans la zone de l'île, en particulier la disponibilité et le transport des sédiments.

Nous mettons également en évidence la rotation de l'île, ce qui souligne la nature hautement dynamique des îles récifales (TESTUT *et al*, 2015). Le réchauffement climatique engendre une augmentation des phénomènes paroxysmaux. Les touristes ont une compréhension prédéterminée des conditions climatiques locales. Les visiteurs de répétition basent leurs connaissances sur des expériences in situ antérieur. Les pluies fréquentes et intenses telles que vécues par les touristes pendant la période de l'enquête sont en grande partie en conflit avec les attentes de la météo, mais les perceptions (largement négatives) sont négociées par rapport à une série d'aspects, tels que les motifs de voyage, les informations explicatives sur les événements, et le changement climatique. Les résultats sont discutés à l'égard de leurs implications pour les réactions de la demande et du comportement de Voyage. L'augmentation probable des évènements de forte intensité en Martinique pourrait conduire à une diminution du tourisme (HÜBNER *et al*, 2012: II.J).

Tableau 1 : Conséquences potentielles du changement climatique sur le littoral

Vulnérabilité	Conséquences	Causes
Littoral	Submersion, inondation	Elévation du niveau de la mer
	Augmentation de l'érosion Côtière	
	Diminution surfacique des plages	
	Glissement/ mouvement de terrain	
	Phénomène de surcote marine	
	Augmentation du ruissellement lors de fortes pluies	Modification du régime des pluies

Source : (Schémas directeur d'aménagement et de gestion des eaux, 2016-2021)

Les auteurs comme PASKOFF, GUILCHER, CARTER, etc… ont tendance à s'accorder sur les causes naturelles de l'érosion. Nous allons maintenant approfondir l'étude de la dynamique littorale en nous attachant particulièrement aux agents naturels et au processus d'évolution de celle-ci.

Selon PASKOFF (2012) il y aurait plusieurs agents :

- les vagues,
- les courants littoraux,
- les eaux d'écoulements et d'infiltrations,
- les actions physico-chimiques (salinité),
- les actions biologiques (faunes et flores).

Pour comprendre l'impact de ces différents agents nous devons définir les différentes zones d'actions des vagues et les principaux courants pouvant agir près des côtes. Pour cela nous nous appuierons sur le schéma d'HÉQUETTE, A (figure 20)

Le littoral est composé de cinq zones d'actions pour les vagues. Ces différentes dynamiques participent à la morphodynamique des plages :

- La zone du large qui est influencée par : des courants océaniques et géostrophiques, et par des courants orbitaux sans influence sur le fonds.
- La zone de transformation des vagues : influencée par les courants orbitaux agissant sur le fond et les courants de downwelling (tempêtes).
- La zone de déferlement : zone où se déroule les déferlements de type volute, déversant.
- La zone de surf : espace où a lieu le courant d'undertow (de retour). C'est une courte zone où les vagues de surface des océans se rapprochent de la rive et où elles se brisent, formant l'écume).
- La zone de jet de rive ou « zone de swash » : est la zone de la dérive littorale, alternativement recouverte et découverte sous l'effet des vagues (MAURIET, S, 2009: III).

Figure 20 Les différentes zones d'actions des vagues et les principaux courants pouvant agir près des côtes (HÉQUETTE, 2001: III)

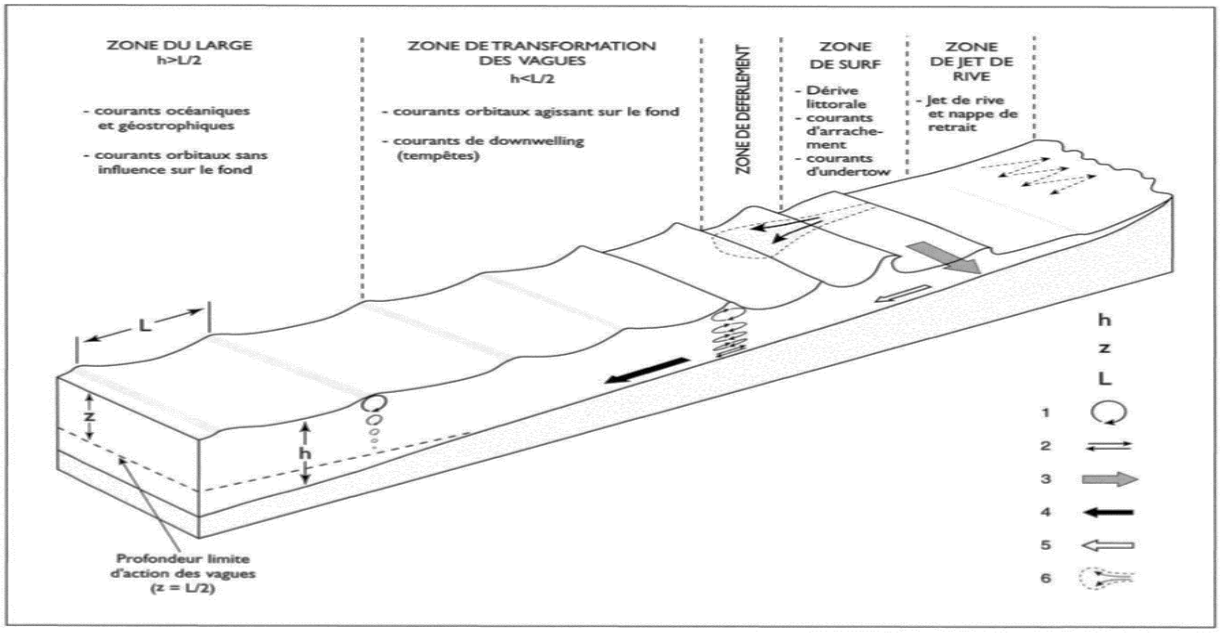


Figure 20 : Les différentes zones d'actions des vagues et les principaux courants pouvant agir près des côtes (modifié d'après Einsele, 1992). h : profondeur ; z : distance sous la surface ; L : longueur d'onde des vagues ; 1 : courant orbital ; 2 : courant oscillatoire (sur le fond) ; 3 : dérive littorale ; 4 : courant de downwelling; 5 : courant d'undertow ; 6 : courant d'arrachement

- **Les vagues**:

Les côtes connaissent une dynamique d'érosion et d'accrétion. Ces phénomène s'expliquent d'abord par des jeux de vagues, de marée et par des courants qu'elles engendrent (PASKOFF, 2012: III).

La vague est une ondulation de la surface de la mer sous l'effet du vent (SAFFACHE, 2003: I). Elle agit sur la surface de la mer calme et crée des oscillations. Cette oscillation se crée uniquement si le vent a au moins atteint une vitesse de 3 à 4 $m.s^{-1}$ (PASKOFF, 2007: III). Leurs caractéristiques, c'est-à-dire la longueur d'onde, la hauteur, la période, la célérité, dépendent de la vitesse du vent, de la durée pendant laquelle il souffle, de l'étendue d'eau qu'il affecte. Là où le vent souffle, l'agitation de l'eau est anarchique et désordonnée, mais elle peut s'étendre au-delà de son aire de génération. Cela permet la formation de houles qui sont caractérisées par des vagues régulières, prenant l'aspect d'ondulation parallèle entre elle (PASKOFF, 2012: III). Les vagues formées par le vent subissent une modification qui affecte leur direction et leurs caractéristiques à l'approche des côtes. Dès que le fond marin est inférieur à la moitié de la longueur d'onde (H< ½), un effet de freinage s'amorce et modifie simultanément toutes les valeurs caractéristiques des houles. La vitesse diminue en même temps la longueur d'onde, ce qui génère un rapprochement des houles, une augmentation de la hauteur des houles et leurs profils deviennent de plus en plus dissymétrique. Pour terminer, le basculement de la vague vers l'avant produit un déferlement quand la profondeur est inférieure au 3/4 de la hauteur de cette vague. Quand le déferlement est projeté sur la côte on parle de jet de rive (uprush) ; à l'inverse quand il y a un retrait sous forme de nappe on parle de backswash (MIOSSEC, 2012: I).

Figure 21 : Transformation par effet de fond des vagues (DUPUY)

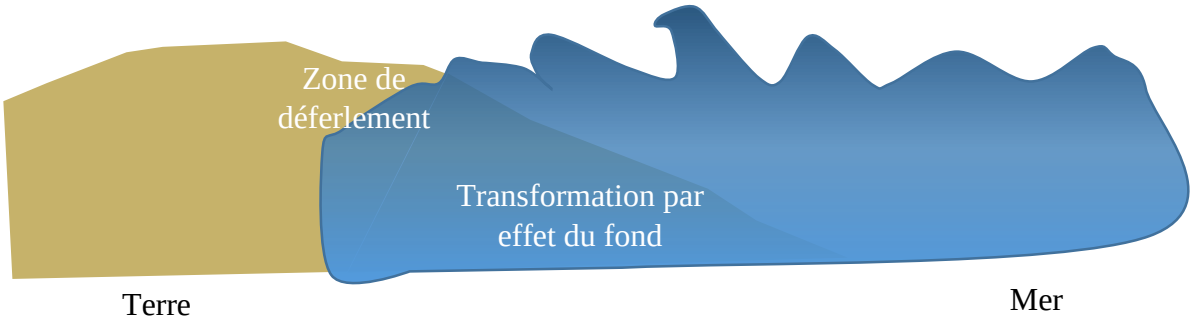
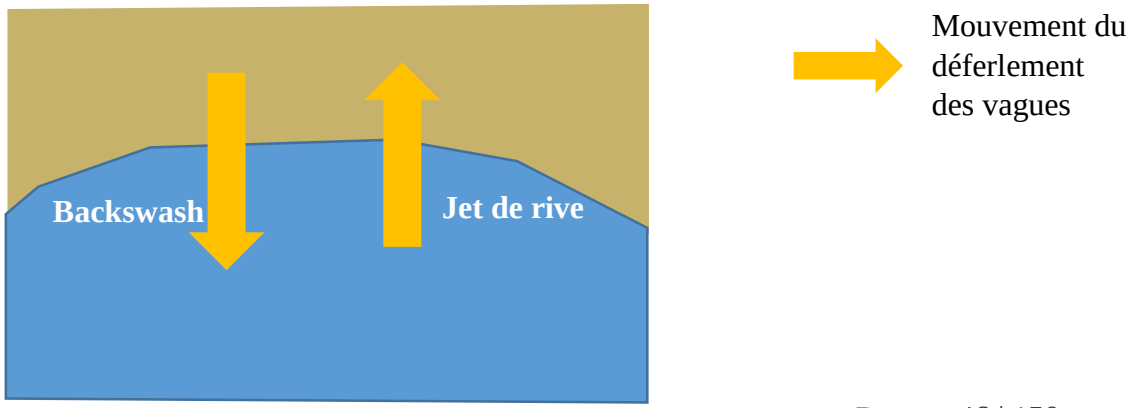


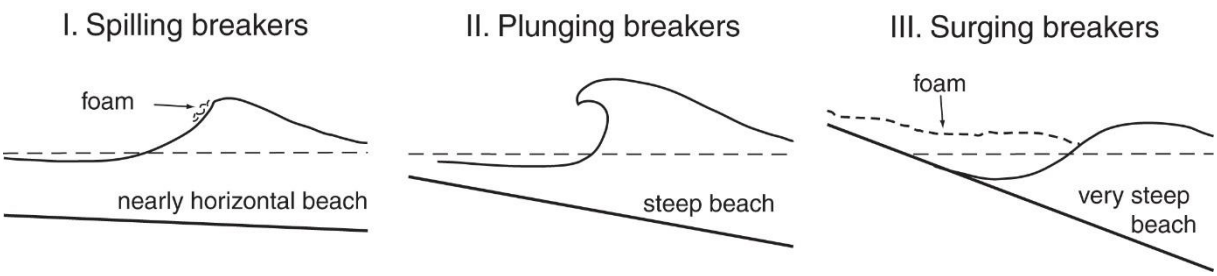
Figure 22 Jet de rive et backswash (DUPUY)



Le caractère d'une vague se compose de trois facteurs : la durée d'action du vent, sa force, la longueur de son action sur la surface de l'eau (fetch), (PASKOFF, 2007: III). Parmi ces paramètres, seule la période demeure inchangée. Sur le rivage, les vagues peuvent subir trois types de déformations :

- gonflement de la vague ou surging breaker (coefficient de déferlement > 0,003)
- déferlement en volute ou spilling breaker (coefficient de déferlement entre 0,003 et 0,068): la crête plonge en avant. C'est le type de déferlement le plus spectaculaire et le plus violent en raison de la libération d'énergie de la lame qui se fait rapidement sur un espace étroit (GUILCHER, 1954). En Martinique ce type de déferlement se situe essentiellement dans le Nord Atlantique de l'île. Il entraine un aplanissement de la couverture sableuse. Le retrait de la vague favorise une érosion laminaire.
- déferlement déversant ou plunging breaker (coefficient de déferlement <0,0068) : il est caractérisé par de hautes vagues dont les mouvements turbulents sont particulièrement appréciés par les surfeurs. Ces hautes vagues s'avancent sur des pentes relativement faibles (GUILCHER, 1954). Ce type de déferlement est caractéristique au Nord Caraïbe de la Martinique (SAFFACHE, 1998: III).
-

Figure 23 Types de vagues (source internet : pixgood.com, N.D)



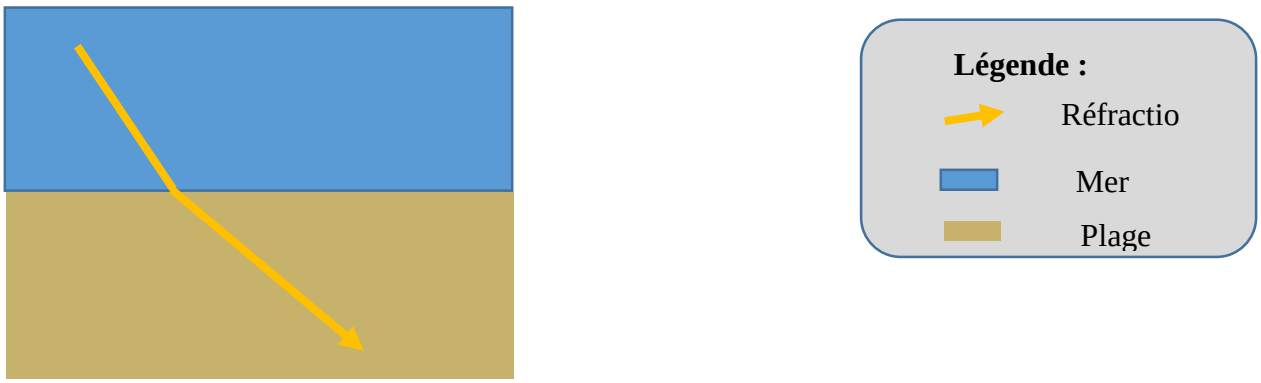
À l'approche de la côte, la houle subit deux catégories de déformations avant le déferlement (GUILCHER, 1954; CARTER, 1995: III ; PASKOFF, 2007: III ; PASKOFF, 2012: III): une déformation analogue à celle des rayons optiques (réfraction, réflexion, diffraction) et la dérive littorale qui résulte de l'arrivée de la vague en incidence oblique.
Dans le cas d'une déformation analogue des rayons optiques, nous avons trois types de difformité :

- réflexion : « *c'est le renvoi de la houle par un obstacle* » (GEORGE *et al*, 2006 :I). Elle se produit uniquement quand la vague rencontre des obstacles de grandes dimensions par rapport à la longueur d'onde. La houle est donc partiellement ou entièrement réfléchie de façon perpendiculaire à l'obstacle. Dans certains cas, la réflexion peut empêcher le déferlement et donc limiter l'érosion des côtes. C'est le cas par exemple avec les falaises (GUILCHER, 1954 ; PASKOFF, 2007).

Figure 24 Réflexion totale d'une houle (DUPUY)

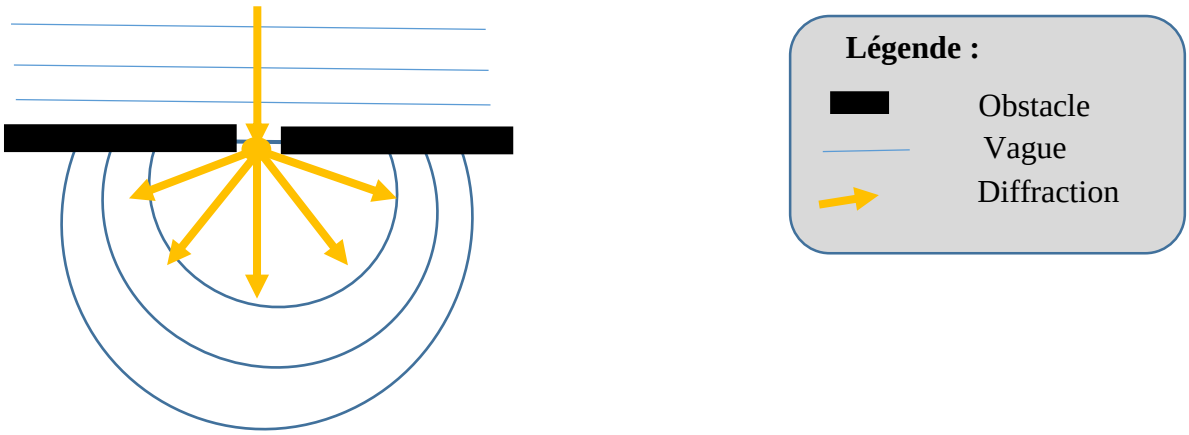
- la réfraction : c'est une « *modification de la direction de propagation des houles par frottement sur les fonds peu profonds* » (GEORGE *et al*, 2006:I). Elle dépend de la topographie sous-marine. Lorsque la profondeur de l'eau devient égale à ½, la longueur d'onde de la houle tend à se modifier et à se déformer parallèlement à la bathymétrie. Elle explique pourquoi l'énergie se concentre ou se dissipe à certains endroits à l'approche du rivage (PASKOFF, 2007: III).

Figure 25 Réfraction d'une vague (DUPUY)



- la diffraction : c'est la « *modification de la direction des crêtes de la houle contournant un obstacle* » (GEORGE *et al*, 2006:I). Elle se produit quand la houle heurte, au cours de sa propagation, l'extrémité d'un obstacle, ce qui entraine un changement de la direction des vagues qui pénètrent alors le plan d'eau abrité par l'obstacle, en s'amortissant rapidement par divergence (GUILCHER, 1954).

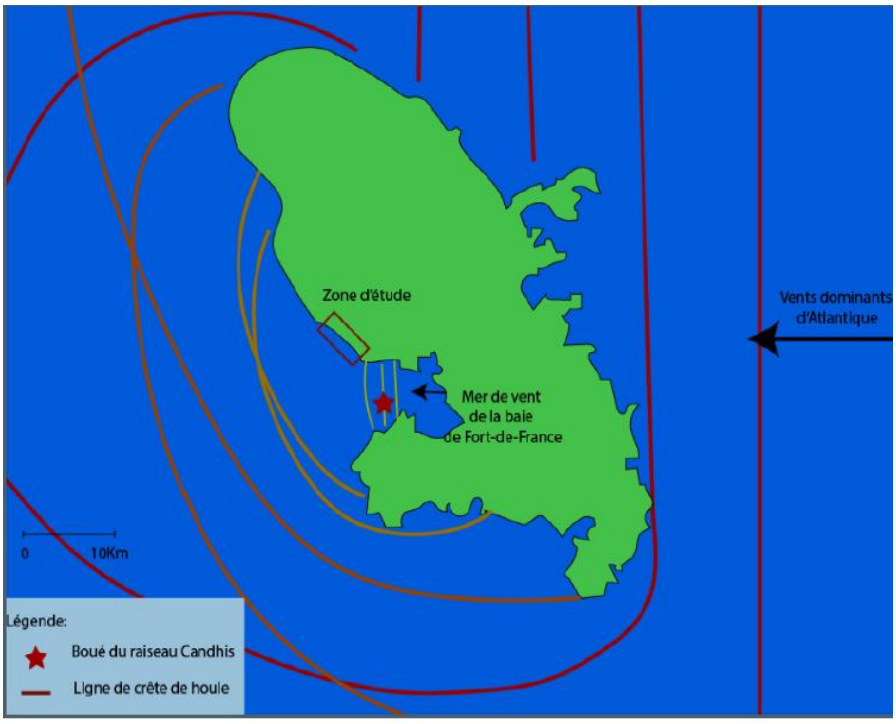
Figure 26 Diffraction des vagues générées par un obstacle (DUPUY)



- **Les courants littoraux:**

Avant de parler des courants littoraux, nous verrons les 2 zones de régime de houle martiniquaise. Il y a premièrement la côte Est exposée Atlantique qui fait régulièrement face à de fortes houles cycloniques au pouvoir très érosif, puis la côte Ouest exposée Caraïbes, beaucoup plus calme. Il ne fait face qu'à des houles d'Atlantique diffractées par les pointes nord et sud de l'île. Il existe une mer de vents dans la baie de Fort-de-France, provoquant de faibles houles (JOSSO, 2015: III).

Figure 27 Courantologie martiniquaise (JOSSO,2015: III)



Les courants littoraux concernent les mouvements de vagues près ou sur les côtes (GEORGE *et al*, 2006: I). Ils agissent à la fois comme agents d'érosions et de reconstitutions. La forme de l'anse varie selon le type de dérives. Les courants les plus importants sont les courants d'arrachements et d'entrainements. Il existe aussi d'autres courants: les courants de dérives littorales et de marées. Les courants sont liés aux différences de densités ou de températures de l'océan. L'eau chaude moins dense que l'eau froide se retrouvera au-dessus de cette dernière. La salinité joue également un rôle important. En effet, quand la salinité est forte, la densité est élevée, donc la couche d'eau fortement salée sera dans les profondeurs.

En Martinique les courants sont essentiellement influencés par les alizés. Les courants se font suivant la direction du vent (SAFFACHE, 2005: III). Les courants dus au vent constant entrainent les eaux superficielles. Ce déplacement s'annule par freinage selon la profondeur de frottement. La direction du courant résulte essentiellement de la force de Coriolis modifiée par le frottement. Les masses d'eau sont remplacées par des courants de compensation de surface : soit par des contre-courants circulant sous les courants d'impulsions soit par des montées des eaux issues des couches immédiatement inférieures ou upweling (GEORGE *et al*, 2006: I).

Il existe en Martinique deux courants en particulier:

- les courants de dérive littorale,
- les courants de marée (SAFFACHE, 2005: III).

La dérive littorale entraine une faible érosion. Sa capacité de transport reste néanmoins forte. C'est en réalité le déferlement des vagues qui provoque la mise en mouvement des sédiments (PASKOFF, 2012: III). Le courant longshore est un courant parallèle au rivage. Il est généré par un certain nombre de mécanisme incluant les approches de vagues obliques, les différences de niveaux d'eaux provoquées par une variation de la hauteur de la vague, le courant de marées, la diffraction des vagues ou le cisaillement du vent direct (CARTER, 1995: III). La dérive du littoral est créée par une certaine obliquité (angle d'incidence de 10°) des vagues sur le littoral. C'est un courant parallèle au littoral, où le transport des sédiments se fait en zigzag. Il joue un rôle important dans l'évolution de la morphologie d'une plage (HÉQUETTE, 2001: III). Ce courant joue un rôle important en ce qui concerne l'évolution des rivages, particulièrement pour les plages.

La vitesse de la dérive dépend de plusieurs facteurs dont :

- la période et l'angle d'incidence des vagues : l'angle d'incidence joue un rôle essentiel en ce qui concerne la vitesse. La vitesse est en moyenne de 0,3 à 0,6 $m.s^{-1}$ mais elle peut parfois atteindre 2 $m.s^{-1}$.
- la hauteur des vagues durant le déferlement : elle conditionne le volume de l'eau en mouvement.
- la pente, la rugosité de l'espace infralittoral.

Il existe 2 formules pour calculer la vitesse de la dérive, celle de LONGUET-HIGGINS (1970) (PASKOFF, 2012: III)

$$u = 20{,}7\sqrt{gH}\ p\ sin2\alpha$$

Et celle de PUTMAN, MUNK et TRAYLOR (1949) retouché par J. LARRAS (PASKOFF, 2012: III):

$$u = 2{,}53\sqrt[3]{\frac{gH^2}{T}p\ sin\ 2\ \alpha}$$

U= vitesse de la dérive en $m.s^{-1}$

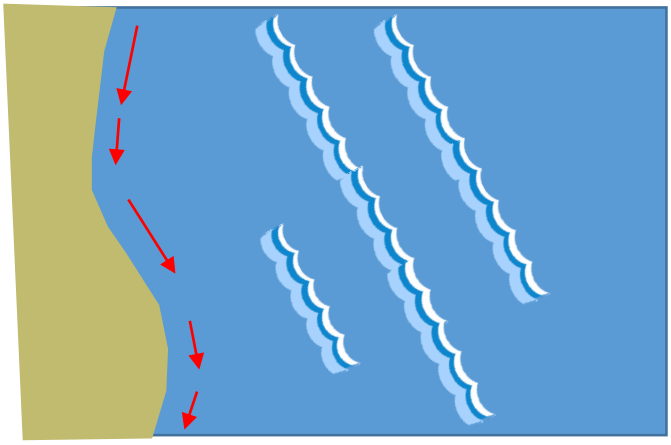
H= hauteur des vagues

α = angle d'incidence avec le rivage des vagues qui se brisent

T= période de houles en seconde

La dérive littorale peut parfois emporter de façon latérale les baigneurs lors de très mauvais temps. Elle est aussi capable de transporter d'importantes quantités de sédiments. Ce phénomène est responsable d'un transit sédimentaire parallèle aux côtes (PASKOFF, 2012: III).

Figure 28 Courant longshore (DUPUY)



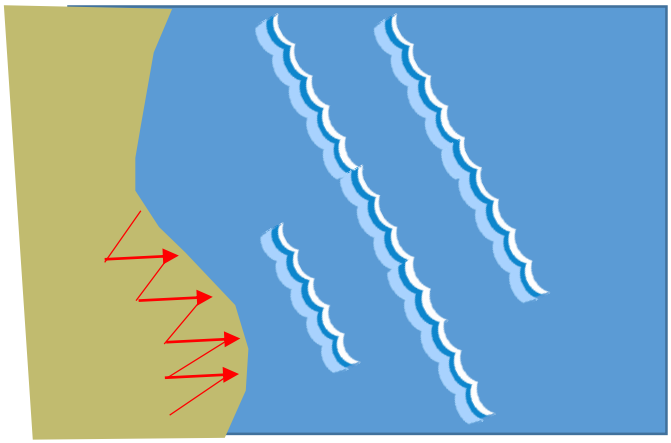
Exemple : En Martinique, à l'extrémité nord, c'est près de 30 000 à 90 000 m³ de sédiments sableux qui sont transportés en direction du port de Grand-Rivière (SAFFACHE, 2005: III). La dérive littorale entraine un transport latéral des sédiments. C'est pourquoi, sur une même plage, il peut y avoir un déséquilibre sédimentaire avec des zones d'accumulation et des zones d'érosion. Sa vitesse dépend de plusieurs facteurs dont :

- la période et l'incidence des vagues (avec une moyenne de l'ordre de 0,3 à 0,6 m.s¹),
- la hauteur des vagues durant le déferlement,
- de la pente,
- de la rugosité de l'anse (PASKOFF, 2012: III).

Durant les phases de perturbations, phases durant lesquelles le déferlement est plus puissant, la dérive littorale peut déplacer d'importantes quantités de sédiments. Le vent joue donc un rôle important sur la dérive littorale ; il peut amplifier et même freiner cette dérive. Il peut être également influencé par les marées (HÉQUETTE, 2001: III).

Le courant de retour (ou cross-shore/ downwelling) correspond au déferlement d'une vague (swash) sur le littoral, qui entraine naturellement un retour de cette vague (backswash). Ce courant de fond se fait en avant par de fortes houles, quand les vagues sont cambrées et que leurs crêtes sont parallèles aux tracées du rivage (HÉQUETTE, 2001: III).

Figure 29 Courant cross-shore (DUPUY)



«*Outre la formation des vagues, le vent est à l'origine de courants de surface dus à un transfert d'énergie à la couche superficielle de l'eau. Le vent exerce une contrainte de cisaillement à la surface de l'eau, ce qui provoque le déplacement de la masse d'eau superficielle dans la même*

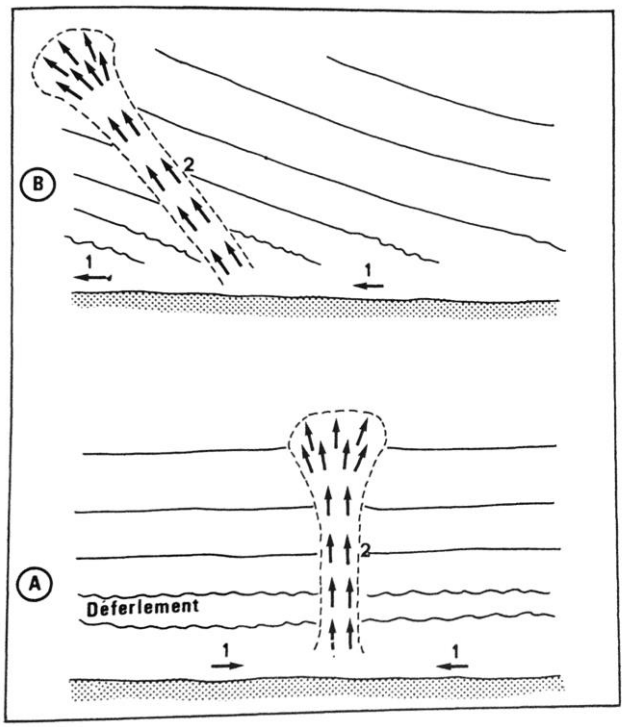
direction. Dans les petits fonds, ces courants peuvent entraîner les molécules d'eau jusqu'au fond en raison de la faible épaisseur de la tranche d'eau. » (HÉQUETTE, 2001: III)

Les courants de retour sont la réplique de l'afflux de l'eau vers les rivages et ils entraînent cette eau à la mer après le déferlement. Il existe 2 grands types de courants de retour :

-Le courant d'entrainement (undertow): il compense les eaux de déferlement qui n'intéressent que les fonds car il agit au ras du sol en faisant rouler les matériaux du fond marin (BOURGOU *et al*, 2010: III). Ce courant appelé aussi undertow a été mis en doute par de nombreux chercheurs. Ce courant de fond semble intervenir en avant des plages lors de forte houle, lorsque les vagues sont cambrées et que leurs crêtes sont parallèles aux tracées du rivage, donc que leur déferlement n'entraîne pas de dérive littoral appréciable (PASKOFF, 2012: III)

-Le courant d'arrachement ou de déchirure (Rip Current): il est le plus souvent perpendiculaire ou oblique au trait de côte et il résulte du mouvement de retour vers le large des eaux de déferlement (BOURGOU *et al*, 2010: III). C'est le courant qui le plus souvent compense l'apport d'eau par les vagues qui déferlent. Il est individualisé étroit (largeur entre 15 et 30m) et il intéresse toute la colonne d'eau. C'est un courant qui va au-delà des lignes de déferlement des vagues qu'il interrompt en les traversant (PASKOFF, 2012: III). Le courant d'arrachement est le courant de retour le plus dangereux. SHEPARD et INMAN (1951) sont les premiers à avoir reconnu l'importance du mouvement vers le large du courant d'arrachement, dans le maintien de la stabilité de la masse d'eau du littoral (CARTER, 1995: III)

Figure 30 Courant d'arrachement (PASKOFF, 2012: III).



A : Courant d'arrachement perpendiculaire au courant/ B : Courant d'arrachement oblique par rapport au courant. 1 : dérive littorale/ 2 : courant d'arrachement

- **Les courants de marées** :

Ils peuvent être provoqués par plusieurs facteurs : les astres, les tempêtes, les tremblements de terre, le volcanisme sous-marin...

Les marées peuvent entrainer des courants, dont l'amplitude varie selon l'importance du marnage. La marée descendante se prénomme "jusant" et la marée montante, "flot". C'est un mouvement horizontal de masse d'eau qui s'accompagne des marées et dont l'impact est réversible (PASKOFF, 2012: III).

En Martinique, le marnage provoqué par les astres est relativement faible (il ne dépasse quasiment jamais les 1 m). Toutefois, le rythme des marées se fait surtout en fonction du rythme lunaire. Ainsi, durant les quartiers lunaires, nous pouvons avoir à Fort-de-France des marées de morte-eau dont l'amplitude avoisine 0,35 m à 0,40 m et durant la pleine lune nous aurons plutôt des marées de vive-eau dont l'amplitude avoisine 0,70m sur la même commune.

Les marées de tempêtes se déroulent lors de passages d'ouragans et engendrent de fortes manifestations érosives. L'ouragan agit comme une ventouse en raison de l'action du vent violent et de la baisse progressive de la pression atmosphérique. Nous aurons donc une surcote (gonflement du niveau océanique) perceptible en fond de baie ou sur des côtes concaves. Il y a eu un cas de surcote en Martinique lors du passage du cyclone du 18 août 1891, de 2,70 m. Les surcotes changent selon la trajectoire du météore, de l'œil et la configuration de la côte. Ainsi plus l'œil est proche de l'île et plus la surcote sera forte (SAFFACHE, 2005: III). La forte érosion qu'entraine ce type de marée a pu se faire ressentir lors du passage du cyclone Allen sur la Martinique en 1980. En effet, l'Anse Bagasse de Grand-Rivière a connu un recul de 3 m en une demi-journée, (recul normal de 0,25 à 0,55 m/an) (SAFFACHE, 2005: III).

Enfin nous avons les Tsunamis, indépendants du vent : ils résultent de mouvements brusques sous-marins tels que les tremblements de terre de forte intensité, les éboulements ou des éruptions volcaniques sous-marines. Ils se déplacent très rapidement à environs 700 à 800 $km.h^1$ et forment des séries de vagues dont l'amplitude (5 à 40 m) et la période (5 mn à 2 heures) sont difficilement prévisibles sans matériels adaptés. Le 5 mai 1902, il y a eu un lahar, dont l'arrivée brutale en mer engendra un tsunami dans la rade de Saint-Pierre (SAFFACHE, 2005: III).

- La cellule sédimentaire ou cellule de dérive littorale ou encore hyprosédimentation **:**

Le littoral est composé de multiples éléments comme les falaises, les plages, les mangroves qui sont répartis spatialement de façon réguliere. On trouve :

- Des zones de recul comme les falaises,
- Des zones où le matériel transite en étant modifié,
- Des zones d'accumulation (ce sont des espaces où l'agitation est trop faible pour permettre un transport de matériaux).

Il est important de prendre en compte chaque élément qui compose la cellule sédimentaire pour comprendre l'évolution du littoral (REGNAULD, 1998: III).

La cellule sédimentaire implique la présence de plusieurs éléments mais elle fonctionne souvent de manière poreuse, selon la disposition des lieux. L'image qui en est donnée est celle d'un cercle ou d'une ellipse, une figure géométrique qui signale un mouvement constant de sédiments (majoritairement de la taille des sables) (MIOSSEC, 2012: I). «*Cette cellule imparfaite est conditionnée par le stock sédimentaire mobile, latéralement à l'accumulation*

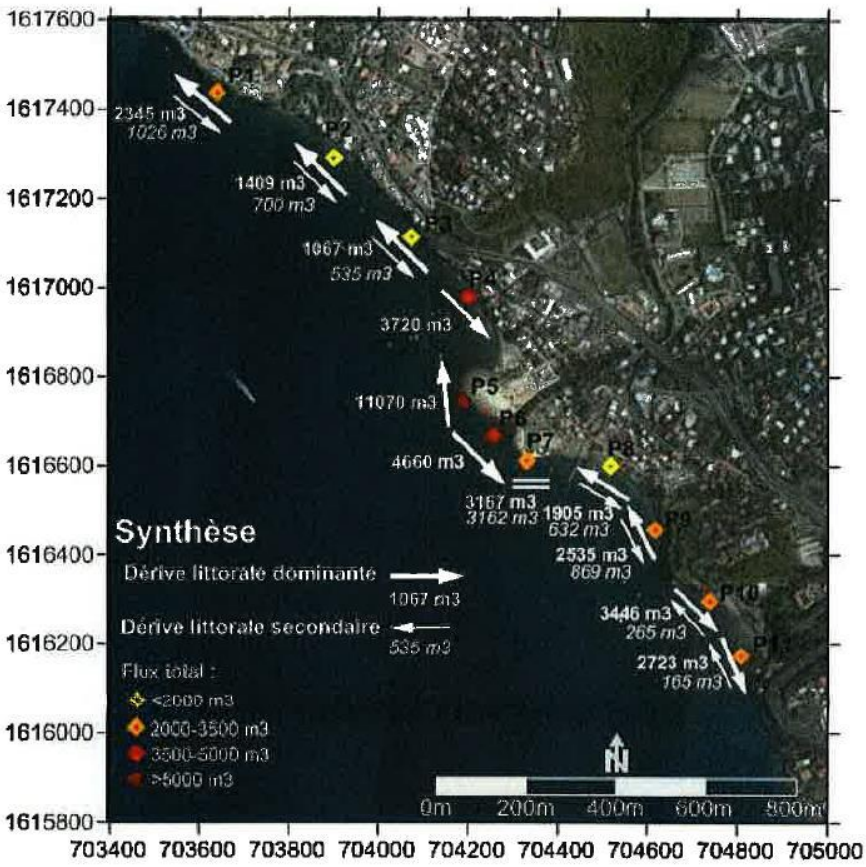
mais également dans le sens du profit de la plage. Elle est également liée à la géométrie des lieux, donc en fait à la structure géologique qui emprisonne en quelque sorte ce stock de sédiment » (MIOSSEC, 2012: I)

La cellule sédimentaire est une unité sédimentologique le long de laquelle circule des sédiments ; le plus souvent ces sédiments sont relativement homogènes (DOLIQUE, 2013). De nombreuses personnes débâtent sur les causes de l'évolution du trait de côte. Certains pensent que son évolution varie selon des événements de fortes intensités. En étudiant les variations de fortes intensités, leurs fréquences permettent d'expliquer le recul des anses, c'est ce qu'en tout cas certains auteurs comme COOPER (2002) ou MUSEREAU (2007) déduisent. Néanmoins, de nombreux autres auteurs pensent que ce qui détermine la morphologie s'appuie sur les houles dominantes, c'est le cas de J. DUBOIS, (1995) P. ROY et P. COWELL, (1996) J. DODD (2003).

Au final nous avons pu déterminer que le recul de l'anse peut être causé par les deux facteurs, tout dépend de la fréquence des tempêtes. En ce sens, l'évolution du trait de côte est un cas d'école d'emboîtement d'échelles spatio-temporelles (DOLIQUE, 2013). Si les tempêtes sont très présentes, comme c'est relativement le cas aux Antilles, alors celles-ci joueront un rôle important sur la morphologie de la plage. A l'inverse, ce sera la houle dominante qui déterminera la morphologie de l'anse (REGNAULD *et al*, 2010: III).

En Martinique, il existe deux types de houles: les modales, qui entraînent une érosion des platures coralliennes et favorisent la régénération de la couverture sableuse des anses situées en aval, et les houles paroxysmales qui permettent de forts prélèvements des matériaux sableux, même sur des plages où il y avait une tendance à l'accumulation.

Figure 31 Cellule sédimentaire de Martinique (JOSSO, 2015: III)



- **Les eaux d'écoulement et d'infiltrations**

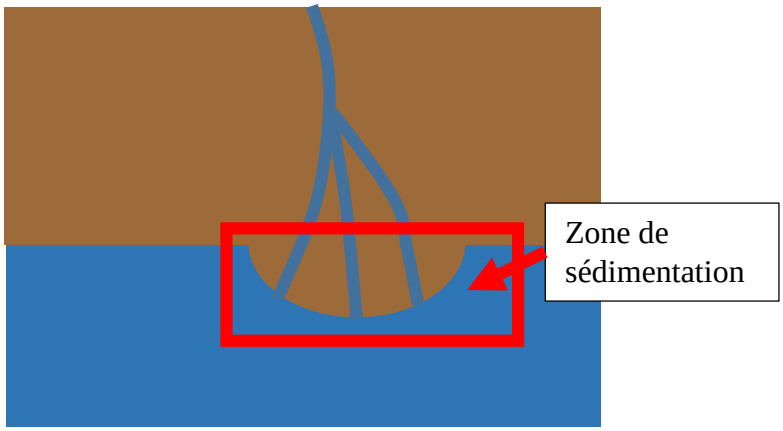
Les eaux qui ruissellent participent également dans la dynamique morphologique d'une plage (PASKOFF, 2012: III).

En Martinique, le nord et le sud sont caractérisés par des rivières qui prennent appui sur l'armature montagneuse et disposent de profils pentus favorables aux écoulements torrentiels. Au centre de l'île, les rivières prennent appui, en amont, sur des mornes vigoureux avant de s'écouler à travers la plaine du Lamentin. Ces rivières présentent donc des caractéristiques de type mixte : torrentielles en amont, de plaine en aval (SAFFACHE, 1998: III). Ces phénomènes d'écoulement superficiel sont plus puissants à proximité du littoral car nous avons en plus de l'eau de pluie, des paquets de la mer fournis durant les phases de perturbations, ainsi qu'un couvert végétal relativement faible (PASKOFF, 2012: III).

Les deltas sont des constructions sédimentaires élaborées aux embouchures de fleuves ou de rivières. Il y a une forte accrétion dans ces zones à chaque fois que les forces marines sont incapables d'évacuer les sédiments. Ils sont très sensibles à l'élévation du niveau de la mer en raison de la subsidence qui les affecte, l'élévation relative est trop importante, comparée à l'élévation eustatique. Cette subsidence est causée naturellement par la compaction des épaisses séquences sédimentaires qui supportent les deltas. Elle est souvent amplifiée par les activités humaines (MIOSSEC, 2012: I).

Les deltas et deltas contrariés sont plutôt situés dans la partie centrale de l'île. Les deltas sont des embouchures dans lesquels les alluvions s'accumulent dans le lieu même de la rencontre avec la mer, réalisant ainsi une avancée de la terre sur la mer (exemple : Rivière Lézarde). Les embouchures des rivières centres participent totalement à la dynamique littorale car la formation résulte de l'interface terre- mer (SAFFACHE, 1998: III). Ainsi, au niveau des embouchures des deltas, nous constatons une accumulation des alluvions qui sont par la suite distribuées par les vagues, dérives et vents.

Figure 32 Delta et sédimentation (DUPUY)



- ## Les actions physico-chimiques

La salinité de l'eau agit de manière agressive sur les roches du littoral. Si leurs compositions chimiques sont hétérogènes et plus perméables (l'effet de l'érosion est plus importante sur ce type de composition). La variation de la température joue également un rôle important durant la journée ainsi que l'alternance d'humidification et de dessiccation. L'ensemble de ces facteurs est plus important dans les régions tempérées avec de forts marnages (PASKOFF, 2012: III).

La mer agit de trois façons :

- L'hydrolyse : C'est la destruction d'une substance par l'eau (LAROUSSE, ND). Exemple: il s'exerce aux dépens de certains minéraux fragiles comme des roches plutoniques pour les transformer en argiles.
- L'hydratation : affecte les roches constituées de cristaux susceptibles de fixer des molécules. Exemple : sur l'argile l'eau entraînera un phénomène de gonflement suivi d'un assèchement qui favorise l'apparition de fente qui sur le long terme aboutira à un glissement de terrain (falaise).
- L'haloclastie : c'est l'attaque des roches par la cristallisation du sel en solution dans les pores et fissures. Les roches les plus sensibles à cela sont le granite, le grès.

Ces actions jouent un rôle érosif important sur les falaises et sont redistribuées par la suite sur les anses (PASKOFF, 2012: III)

- ## Les actions biologiques (faunes et flores)

La faune et la flore peuvent jouer un rôle qui peut soit favoriser l'érosion ou l'accumulation. PASKOFF parle de l'action érosive biologique des animaux comme le rongement, broutage, perforation etc. Certains organismes peuvent agir mécaniquement par usure du substrat avec leurs coquilles (mouvement de va et vient)... Les organismes peuvent également diminuer l'érosion, en entravant les vagues ; c'est le cas des herbiers (PASKOFF, 2012: III).

En Martinique nous avons une flore psammophile et endémique. Sa présence permet la sauvegarde du littoral ; en raison de leurs importants réseaux racinaires, ils permettent la fixation du sable. C'est le cas du Catalpa, de la patate bord de mer, de l'olivier bord de mer ou encore du raisinier bord de mer (Atelier EUCC France, 2015: III).

❖ **Conclusion**

Ainsi nous pouvons dire que le système littoral martiniquais est un système complexe. Il fait l'objet de plus en plus d'études en raison de l'importance de l'érosion qu'il peut y avoir sur une plage.

Néanmoins, les particularités des plages les rendent le plus souvent uniques, c'est pourquoi il est important de les étudier de manière précise.

C/ Le littoral de Schoelcher et ses problèmes d'érosion

La documentation concernant le littoral de Schœlcher est relativement pauvre. La plupart des documents sont très récents. Néanmoins nous avons quelques données concernant ses problèmes d'érosions.

Le territoire de Schœlcher s'étend depuis les pitons du Carbet jusqu'à la mer. Son altitude maximale est de 1200 mètres. Le relief est beaucoup plus important au niveau des Pitons du Carbet (1200 m), cependant cette altitude décroit au fur et à mesure que l'on se rapproche du littoral. En raison de cela la population est plus dense sur le littoral. Ces reliefs sont marqués par des vallées fluviales très encaissées qui favorisent le déplacement de sédiments volcaniques vers les plaines alluviales (ADUAM, 2013: III).

L'une des premières références du littoral de Schœlcher, anciennement nommé Case-Navire, s'est faite à travers les descriptions de MONNIER en 1825 : « …*le bourg de Case Navire, placé sur une pointe basse devant laquelle s'étend le mouillage précédent. La plage du nord, dont la longueur est de près d'un demi-mille, est bordée de falaises peu élevées ; celles du sud terminent un petit vallon orné de la plus belle végétation, et bien cultivé* ». Un demi-mille soit 0,5 mille correspond à environ 804,5 m. Ce texte nous prouve que de 1825 à aujourd'hui il y a eu une très forte érosion. En effet les plages actuelles n'atteignent même pas pour la plupart 50 m. MONNIER fait la description de deux plages, alors qu'aujourd'hui il y en a 4, on peut supposer qu'à l'époque les plages se rejoignaient. Enfin la verdure est aujourd'hui totalement remplacée par une urbanisation littorale. Le paysage n'a donc rien à voir avec les anciennes descriptions.

La ville de Schœlcher cherche aujourd'hui à valoriser son littoral en mettant en place une gestion environnementale durable. La ville est partenaire du contrat de baie portée par la CACEM[26].

Anse Madame est la plage la plus fréquentée. Il y a une forte érosion qui expose les riverains à des risques durant les phases de perturbations. À l'embouchure de la rivière Case Navire, des curages réguliers ont été réalisés pour protéger les riverains des inondations. De plus, cette plage est composée d'un club nautique qui a permis à la ville d'obtenir le label de « France station nautique ». C'est pour des raisons à la fois économique et humaine que la protection du littoral est devenue une des priorités communales (REINE DIT REINETTE, 2014: III).

Après une réunion entre la mairie, l'IRD et L'université des Antilles, en 2011, qui a eu lieu pour recueillir des informations sur l'évolution physique des milieux littoraux en outre-mer, il en est ressorti que l'amélioration du littoral dépendait des choses suivantes :

- l'analyse granulométrique complétée par la proportion des minéraux lourds (influence sur la mobilité des sédiments),
- l'utilisation de piège à sédiment cross-shore couplé à un courantomètre de type aquadopp pour caractériser les courants de fonds,
- la réalisation d'un suivi du profil de la plage et de l'avant plage pour une modélisation. (LE MOIGNE, 2011: III).

[26] CACEM : Communauté d'Agglomération du Centre de la Martinique

- **Présentation brève de chaque plage**

❖ **Anse Madame**

Figure 33 Localisation et photo d'Anse Madame (Dupuy)

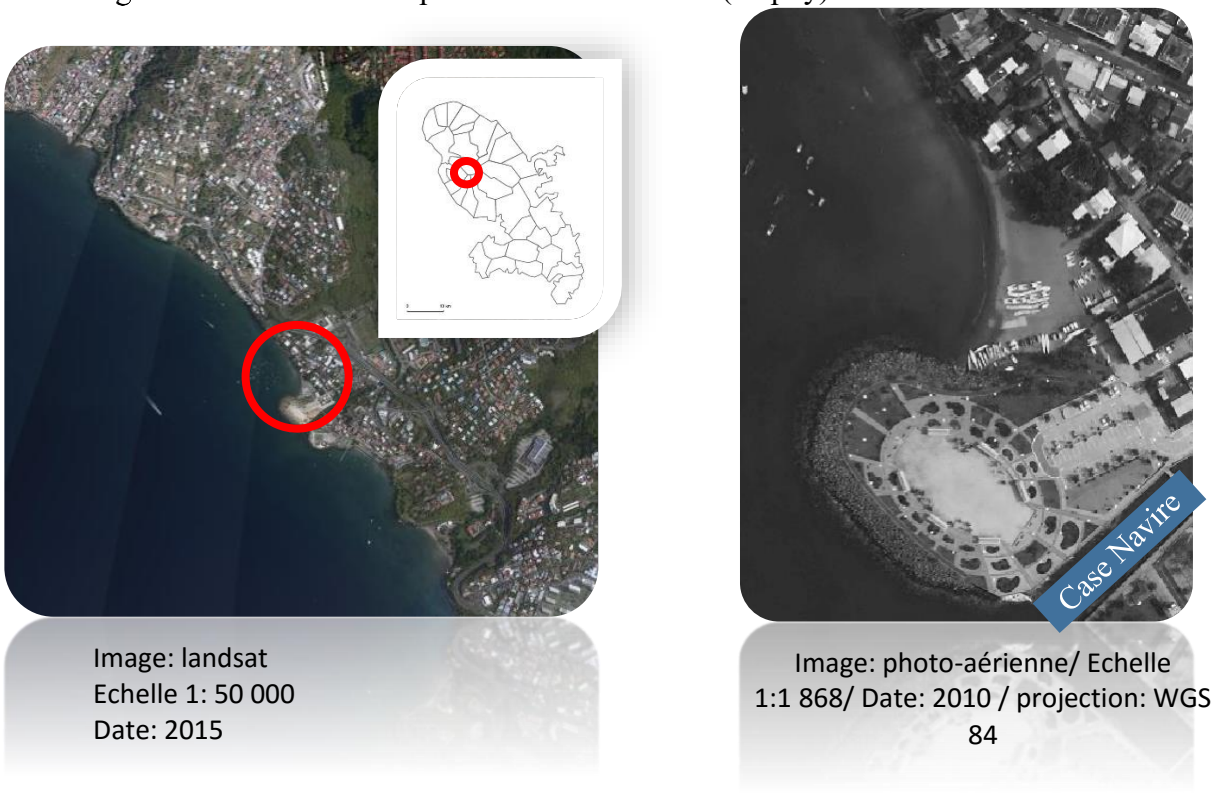


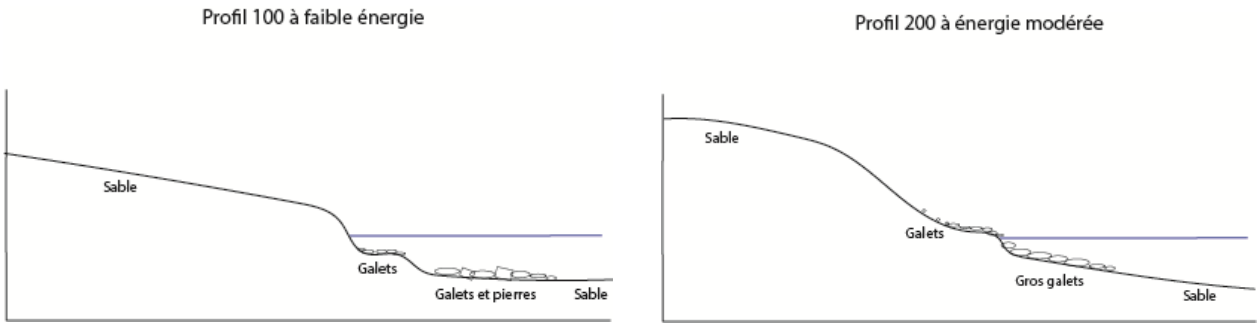
Image: landsat
Echelle 1: 50 000
Date: 2015

Image: photo-aérienne/ Echelle 1:1 868/ Date: 2010 / projection: WGS 84

Anse Madame est une plage très active. Elle se situe à proximité de l'embouchure Case Navire. Il y a une base nautique et d'autre activité économique comme des cours de natation, des restaurants etc. L'enjeu est donc très important dans cette zone économique et touristique. La mise en place de la place Arawak entre 2004 et 2010 a eu un impact très négatif sur l'anse. En effet, il bouche la rivière et entraîne des inondations en amont lors de fortes pluies, il bloque l'apport sédimentaire des plages alentours, dont l'Anse Madame et enfin il modifie la dynamique sédimentaire du site (JOSSO, 2015: III).

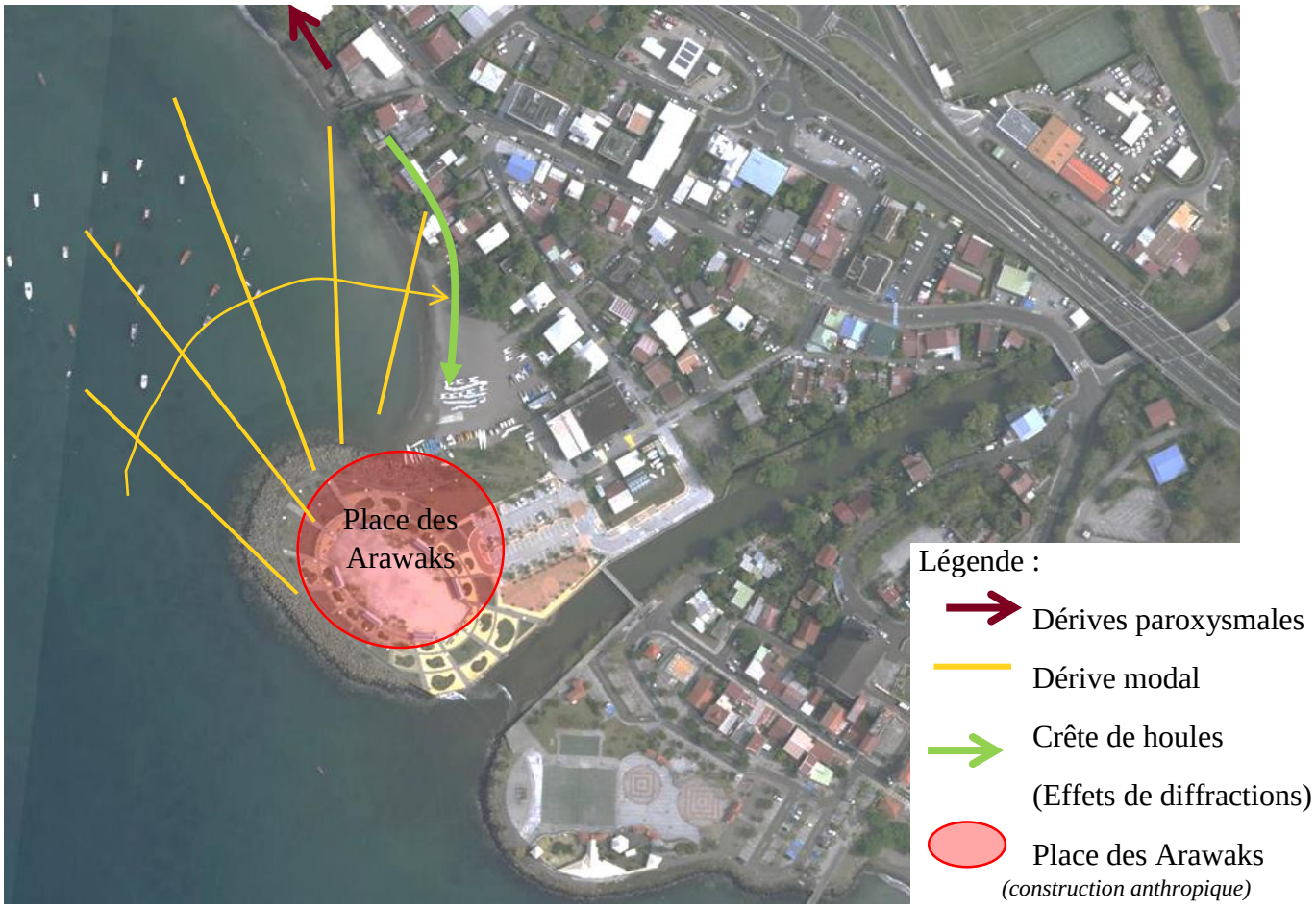
La plage d'anse madame est caractérisée par une partie sud peu énergétique au profil faiblement réflectif avec plusieurs « marches » (Figure 34 ; profil 100) et une partie nord modérément énergétique au profil plus réflectif (Figure 34 ; profil 200) (JOSSO, 2015: III). Les houles ne dépassent que très rarement les 60 cm mais peuvent avoir une origine nord ou sud entraînant un angle d'incidence avec la plage variant de plusieurs dizaines de degrés (BRGM, 2014: III).

Figure 34 Profil 100 = sud de la plage/ profil 200= nord de l'anse



JOSSO, Q a réalisé un stage au sein de l'IRD, en 2015 sur la plage d'Anse Madame. Il a réalisé des MNT (différentiels de modèles numériques de terrain) et des profils de plage.
D'après ces observations photographiques, il a pu déterminer qu'il y a une pression anthropique dans cette zone du à la mise en place de la Place ARAWAK. Sur cette plage la dérive littorale est inversée.

Figure 35 Lecture des évolutions longshore et cross-shore de l'Anse-Madame (DUPUY, 2015)

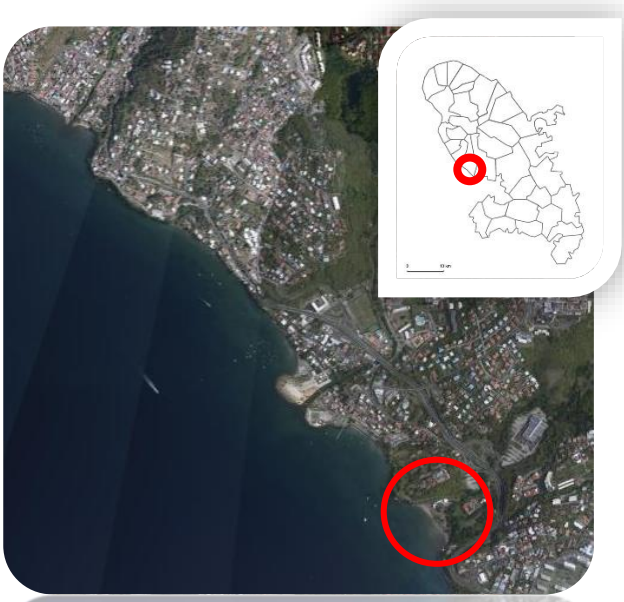


Une étude plus localisée à moyen et court termes permet de compléter les connaissances morphodynamiques de la zone. Une étude à moyen terme a été réalisée. Elle a permis de réaliser un suivi hebdomadaire de l'évolution de l'ensemble de la plage. Une évolution rapide prenant place autour d'un pivot dynamique a été mis en évidence. Durant des phases de faible intensité hydrodynamique la plage a tendance à s'éroder alors que durant les fortes phases hydrodynamiques nous constatons le phénomène inverse. L'installation de la Place ARAWAK crée une zone de calme et empêche une accrétion lors de fortes houles de sud.

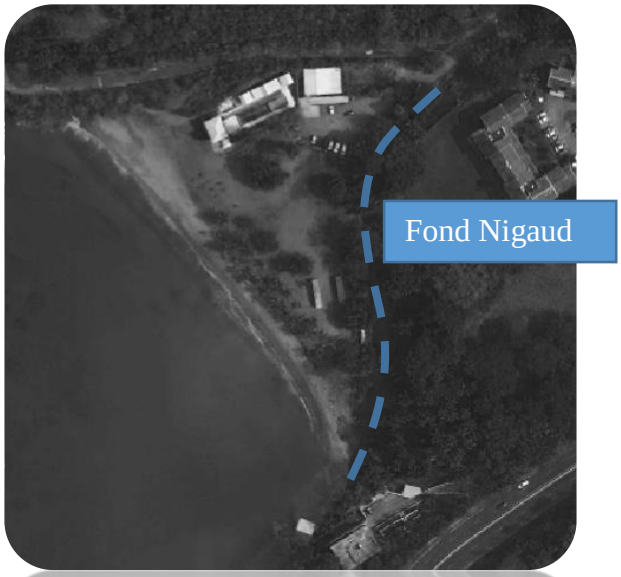
Sur le court terme des MNT ont été réalisés pour déterminer la valeur du pivot dynamique. La hauteur significative est de 55 cm à plus ou moins 10 cm. En dessous de cette hauteur le uprush est moins puissant que la backswach et fait glisser le sédiment vers la partie plane du profil, permettant la formation d'une marche. Au-dessus du palier, le uprush est plus énergétique que le backswash, ce qui remonte le sédiment sur le haut du profil. Selon lui les houles causent directement les courants de surfaces proches. Ces courants sont très sensibles à la présence d'obstacles, tandis que ceux, plus au large, sont induits par le vent et sont peu sensibles aux obstacles.

❖ Madiana

Figure 36 Localisation et photo de Madiana (Dupuy)



Titre: **localisation Madiana**
Image: landsat
Echelle 1: 50 000
Date: 2015



Titre: plage de Madiana
Image: photo-aérienne/ Echelle 1:1 868/
Date: 2010 / projection: WGS 84

La plage de Madiana est une plage de sable gris relativement petite (170m de long), c'est une plage de poche (170m de long). Elle est alimentée par une petite rivière : la rivière Fond Nigaud. La rivière est formée par la confluence de trois rivières :

- la ravine Touza,
- la Petite Ravine Touza
- la ravine La Pirogue.

L'ensemble de ce bassin versant prend vie au niveau de Balata et son embouchure se situe à

l'extrémité sud de la plage de Madiana. Les caractéristiques du bassin versant de la rivière Fond Nigaud sont listées dans le tableau ci-dessous (COICAUD,2015).
Tableau 2 : caractéristiques de la rivière de Fond Nigaud (COICAUD, 2015).

Superficie	Périmètre	Longueur	Pente moyenne	Altitude maximale
3.27 km²	10.29 km	5.35 km	5.05 %	270NGF

COICAUD a réalisé un stage au sein de l'IRD en 2015 sur la plage de Madiana. Elle a réalisé des MNT (différentiels de modèles numériques de terrain) et des profils de plage qu'elle a corrélés avec les données fournies par le marégraphe de Fort de France. Elle a tenté d'établir une corrélation entre la houle et la tendance morphodynamique sédimentaire de la plage. Néanmoins il faut savoir que les mesures houlographiques doivent être prises avec prudence car la bouée est relativement éloignée de Schœlcher. Elle est dans la Baie de Fort de France. D'après COICAUD, l'érosion serait dirigée par la provenance des houles. En effet, les houles de provenance sud/sud-est auront tendance à générer l'érosion au sud de la plage, et une accrétion au nord de la plage. Les houles en provenance nord-est auront tendance à favoriser une accrétion au sud de la plage et une érosion au nord. Enfin les houles de provenance sud-ouest engendrent une érosion au sud de la plage, et une l'accrétion au nord de la plage.

La hauteur des houles jouerait également un rôle décisif sur la dynamique de la plage. Les petites houles seront plutôt destructrices avec une érosion du haut de plage et certainement une redistribution en avant-côte selon un transport cross-shore. Les houles avec une énergie moyenne seront plutôt constructrices. Il y aura une accrétion dans le secteur nord du bas de plage et une rupture de pente. On constatera le même phénomène dans le secteur sud en haut de plage (COICAUD, 2015).

La plage de Madiana serait donc à la fois gouvernée par des transports cross-shore et long-shore (COICAUD, 2015)

❖ Anse Collat

Figure 37 Localisation et photo de d'anse Collat (Dupuy)

Image: landsat /Echelle 1: 50 000 /Date: 2015

Source: Arc Gis/ Image: photo-aérienne/ Echelle 1:1 868/ Date: 2010 / projection: WGS 84

BIGOT tout comme JOSSO et COICAUD a réalisé un stage au sein de l'IRD en 2015. Il a fait à peu près les mêmes études que COICAUD. Son terrain d'étude a porté sur la plage d'Anse Collat. Tout d'abord, il faut savoir que cette plage est un peu plus au nord par rapport à la plage d'Anse-Madame. A ses abords ont été construites de nombreuses maisons. C'est une plage de sable gris relativement étroite.

Grâce au MNT, il a pu observer que les houles (causées par des vents d'ouest à sud-ouest) de faible intensité (de 0.2 à 0.3 m) sont destructrices. Le sable se trouvant entre la marche de rupture de déferlement et le haut du foreshore glisse peu à peu vers l'avant-côte. Les houles de moyenne intensité (hauteur significative de 0.3 à 0.4 m voire 0.5 m) sont reconstructrices.
En utilisant la technique du DSAS[27], il a déduit que l'évolution de la plage à court terme MNT est différente de son évolution sur le long terme. En effet, les évolutions à court terme sont dues notamment à la provenance de la houle et à la hauteur significative de la houle, cependant à long terme (DSAS de 1951 à 2012), la dérive littorale joue son rôle dans le transport sédimentaire.

- ## Etude approfondie de la dynamique des plages de Schœlcher

❖ Profil topographique de Madiana, Anse Collat et Anse Madame

Aujourd'hui, sous la demande de la CACEM, un suivi topographique fait par l'association DELTA[28] mandatée par le BRGM, a été réalisé pour comprendre l'évolution des plages de Schœlcher durant l'année 2013 (DELTA-BRGM, 2014).

Les plages concernées par l'étude sont les plages de Madiana et Collat (ou Lido), car ils ont une longueur et une largeur suffisantes pour distinguer une mécanique naturelle longitudinale et transversale significative.
Madiana possède une alimentation sédimentaire directe grâce à l'embouchure de la rivière fond Nigaud (DELTA-BRGM, 2014)..
Et enfin, il y a la plage de l'Anse Madame, en raison de la forte érosion du côté Nord-Ouest, mais également à cause de sa dérive littorale inversée par rapport aux autres plages et sa proximité par rapport au bouchon vaseux de la rivière Case-Navire.

Ces observations ont été faites à l'aide d'un tachéomètre avec lequel ils ont réalisé des profils topographiques transversaux à la plage. Ces profils montrent la morphologie de la plage en y indiquant le dessin des pentes élémentaires et les ruptures de pentes de la plage. Les profils se font à l'aide de points fixes (sur l'avant-plage) localisé par une tête de station géoréférencée. Les mesures doivent être réitérées régulièrement pour permettre d'observer les irrégularités sur une année. Pour la plupart des plages, il y a trois profils sauf pour Anse-Madame où deux profils suffisent largement (la forte érosion limite la mise en place d'une troisième tête de station fiable) (DELTA-BRGM, 2014).
Ensuite, les mesures brutes réalisées sont traitées sur le logiciel PROFILER ® qui restitue le profil en deux dimensions. La multiplication des profils permet une comparaison des données et d'identifier les variations dans une dynamique transverse.
Durant l'année 2013 ils ont fait l'observation suivante :
L'anse de Madiana tout comme l'Anse Collat (ou Lido) connait une dérive du littoral modale

[27] DSAS: Digital Shoreline Analysis System
[28] DELTA: Dynamique et Ecodéveloppement des Littoraux Tropicaux Association

orientée vers le Sud-Est Nord-ouest. Madiana durant les phases paroxysmales courtes a des transferts sableux de type transversaux. Alors qu'à l'anse Collat (ou Lido) il y a une forte érosion et un glissement du sable vers l'avant-côte provoquée par des évènements météo-marins de plus fortes intensités. Cependant, les saisons agitées lui sont bénéfiques car une meilleure redistribution du sable est faite (DELTA-BRGM, 2014).
Anse Madame est une anse particulière puisque que c'est la seul à avoir une dérive littorale dominante modale orientée Nord-ouest / Sud-Est. Cela est provoqué par la mise en place de l'esplanade des Arawaks. Cet ouvrage entraine un effet de diffraction. Néanmoins, en phase paroxysmique, le transit reprend son cours Sud- Est / Nord-Ouest.

En définitive nous pouvons dire que les périodes de perturbations modifient l'évolution des anses et déterminent souvent la morphologie de ces plages (DELTA-BRGM, 2014).

Les plages de Schœlcher connaissent une saisonnalité des flux, il y a :

- La saison sèche (accrétion): nous avons une reconstruction sableuse des anses en raison des faibles alizés. Le transport des sédiments est orienté vers la côte et la plage reconstitue son stock de sable à partir de l'immédiate avant-côte.
- La saison des alizés où en situation paroxysmique nous avons un gonflement des houles et un déferlement énergétique favorisant des courants orbitaux négatifs avec un fort transport sableux vers l'avant côte. Il y a donc érosion. L'érosion est liée à des évènements météo-marins courts, mais de fortes intensités (les saisons des alizés et périodes cycloniques).

Les plages de Schœlcher connaissent alors des alternances transversales de transits sédimentaires (érosion/accumulation). La dérive littorale Sud-Est / Nord-Ouest est marquée par des phases alternatives (érosion / accrétion) en fonction de l'orientation saisonnière des houles. Sur le long terme il y a une dérive Sud-Est Nord-Ouest, les houles d'alizés subissent encore la diffraction au sud de l'île par le canal de Sainte Lucie et la réfraction se fait au niveau de la baie de Fort-de-France (REINE DIT REINETTE, 2014: III).

❖ Etude hydrosédimentaire

Pour mieux comprendre la dynamique du littoral schoelchérois, un rapport très récent a été réalisé par le BRGM en 2014. C'est une étude hydro-sédimentaire du littoral. Dans la partie suivante nous tenterons de vous faire une synthèse de ce document.
Ils ont acquis des données hydrodynamiques dont :

- des mesures de vagues et de courants faits à partir d'acquisition *in situ,*
- une classification statistique des états de la mer attendus au large,
- une modélisation des états de mers.

Les mesures *in situ* ont été réalisées durant une période de 5 mois (du 4 décembre au 7 mai 2013) à l'aide de trois instruments : deux AQUADOPPS[29] et un ACDP[30]. On constate que dans l'ensemble de la période de mesures, les vagues sont caractérisées par une faible voire très faible énergie. En effet, en observant les mesures de l'ACDP (plus précis) on constate que la hauteur de la vague se situe entre 0,11 et 0,38 m.

La mesure du courant intègre plusieurs éléments dont la marée, le vent et les vagues. Les courants sont de très faible intensité (> 0,1m/s), ils peuvent atteindre ponctuellement des valeurs supérieures à 0,3 m/s. Le courant est caractérisé par deux modes ; durant la période de mesures, les courants se sont aisément dirigés vers le nord (provenance 180°). Quand ils viennent du sud nous avons un deuxième mode (provenance 340°). Cette différence est due à

[29] AQUADOPPS : courantomètre ponctuelle
[30] ACDP: courantomètre horizontal

la forte influence du vent et des vagues. Les données de la bouée de Fort-de-France (97204) a permis de déceler la présence de trois régimes aux directions fortement marquées :

- *Un régime d'ouest/nord d'ouest issu de vagues contournant le nord de la Martinique par le canal de la Dominique,*
- *Un régime sud- ouest issu de vagues contournant l'île par le sud,*
- *Un régime de Nord- Est provoqué par des vents qui circulent au-dessus de la Martinique et qu'on appelle « mer de vent »* (BRGM, 2014: III*)*

Les vagues au large de la côte sont caractérisées par cinq types de situations de vagues :

S1 : Sur la frontière nord du domaine d'études la mer de vent génère des vagues de courtes durées (3 à 4 s) et sur la frontière sud, il y a des houles qui proviennent du canal de Sainte-Lucie.
S2: Des houles sur la frontière nord qui proviennent du nord et qui ont des conditions de mer du vent générées localement au sud.
S3 : C'est la rencontre au niveau du secteur d'étude de houles provenant de directions opposées et contournant l'île par le nord.
S4 : les vagues proviennent du nord, ce sont des houles ayant contourné l'île par le canal de Dominique. De plus, les vagues qui proviennent du sud sont très faibles et issues de l'action de la mer du vent.
S5 : les houles proviennent du nord et dominent l'ensemble de la façade ouest de la Martinique. Au sud de la zone d'étude les caractéristiques sont proches de celles du nord.

Les situations S1 et S2 sont présentes tout au cours de l'année, mais encore plus durant les périodes cycloniques. La situation S3 est une caractéristique de l'hivernage. Tandis que la S5 correspond au carême, les vagues sont influencées par les différentes saisons martiniquaises (hivernage/ carême). Durant le Carême, il y a la présence de houles du nord alors que durant l'hivernage nous avons une mer de vent (Est).

L'observation des données PRIMEVER et de tests de sensibilité a permis de déterminer le flux de sédiment longshore. On observe que le littoral est dominé par l'influence provenant du sud-est (influence des houles de l'Atlantique ayant contourné l'île par le canal de Sainte-Lucie) et que les vagues provenant du nord ont peu d'effet. En revanche, si les vagues de la frontière sud proviennent du nord/nord-ouest, alors les vagues de la limite nord domineront l'ensemble du secteur schoelcherois. Ils ont également établi une quantification de la dynamique hydro-sédimentaire.

Au large, on découvre qu'au final, bien que les mouvements sédimentaires restent faibles, ils sont essentiellement mis en mouvement par les courants. En l'alliant aux vagues, ils permettent à eux deux la mise en mouvement de sédiments de plus grandes tailles (<0,063 mm). Au large de Schoelcher (10-14 m de fond), entre décembre 2012 et mai 2015, les conditions hydrodynamiques sont faibles et permettent une dynamique ponctuelle des sédiments. Les grains de plus grandes tailles (0,84mm) peuvent uniquement être déplacés durant les phases paroxysmales. Cela sous-entend que les sédiments déposés à plus de 100 m ne pourront être déplacés vers la côte, la mise en mouvement des sédiments étant plus aisée à proximité du rivage.
Au niveau de la côte, les mouvements sédimentaires se font à l'aide des dynamiques cross-shore et longshore. Malheureusement, les connaissances scientifiques ne permettent pas d'estimer de manière convenable la dynamique longshore.

Anse Madame est caractérisée par une dérive littorale inversée par rapport aux autres anses (Nord-ouest Sud-Est) car il y a une réfraction derrière l'aménagement (Esplanade des Arawaks), (DOLIQUE et all, 2014: II.k).
Au niveau de l'embouchure, les transits sédimentaires sont les plus importants. Au sud de l'embouchure, le bourg et Madiana est influencé par la dérive Sud-Est / Nord-ouest. Ceci peut s'expliquer par l'exposition de chaque segment de plage.

Maintenant nous verrons le suivi topographique des plages schelcheroises. Nous avons constaté une variabilité de la morphologie des plages selon les saisons. Nous avons établi un transit transversal plus irrégulier (les causes étant liées aux phases de perturbations).
Il existe enfin des dysfonctionnements sédimentaires causés par la présence d'aménagements anthropiques. En effet ces aménagements peuvent bloquer le transit sédimentaire longshore et modifier la dérive par réfraction des vagues (Anse-Madame).

En raisons de cette anthropisation nous avons déduit qu'il avait probablement causé plusieurs choses dont:

- Une concavité de la plage en rive droite du terrain central et une tendance à l'érosion au sud de l'anse à Fond Bernier,
- À fond Bellemare il y a une accumulation au nord et une érosion au sud,
- À Fond-Lahaye nous avons au sud une érosion et au nord une concavité de l'anse.

Les zones d'érosions semblent être causées par la dérive littorale.

Nous observons la création de bouchons sableux dans la quasi-totalité des embouchures. À partir de là les sédiments sont répartis sur les anses grâce à la dérive littorale. La position du bouchon dépend des vagues et des transports cross-shore. À Case-Navire pendant l'hivernage le débit fluvial est suffisant pour permettre l'évacuation des sédiments, alors que durant le Carême le débit fluvial est moindre, ce qui impose de réaliser couramment des curages de l'embouchure.

❖ **Conclusion**

L'ensemble de ces documents montre à quel point la documentation scientifique est récente et que de nombreuses découvertes sont encore à faire pour comprendre et établir des méthodes de lutte contre l'érosion.

Il est par exemple important de faire un suivi topographique sur un temps beaucoup plus long.

D/ les perspectives de rechargement de plages à Schoelcher (Méthodes, efficacités...)

Cette partie sera essentiellement basée sur la dernière recherche faite par le BRGM en 2014, car c'est le document qui demeure le plus approfondi sur le sujet aujourd'hui.

Selon CREOCEAN[31], les avancées successives à l'embouchure de la ville de Case-Navire ont en effet entrainé certaines modifications du trait de côte. Pour remédier à la problématique de l'Anse Madame, CREOCEAN préconise le rechargement périodique du nord de la plage avec éventuellement les sédiments rejetés par la rivière de Case-Navire (REINE DIT REINETTE, 2014: III).

Selon le BRGM, la gestion des stocks doit se faire à l'échelle des cellules sédimentaires, car chacune de ces cellules possède des spécificités qui lui sont propres. Il recommande un espace de liberté (sans impacts anthropiques tel que des bâtis) particulièrement au niveau des hauts de plages, afin que les phénomènes d'oscillations saisonnières puissent se faire sans que l'érosion ne soit amplifiée par la main de l'Homme. Pour restaurer cet espace de liberté, ils proposent deux choses :

- les déplacements des enjeux présents,
- l'utilisation de techniques douces telles que le rechargement des plages.

Le rechargement semblerait être la technique la plus adaptée en ce qui concerne l'environnement. Mais comme nous l'avons vu précédemment, le rechargement doit être précédé par une étude technique qui permettrait d'évaluer la compatibilité granulométrique et chimique du sable entre l'anse et le sable prélevé. Il faut faire aussi une demande à la police de l'eau, suivie d'une étude de l'impact du rechargement de l'apport au niveau local sur le reste du littoral et l'impact sur la faune et la flore ; Il faut impérativement évaluer les stocks disponibles à proximité (DOLIQUE *et al*, 2014: II.k)

Les zones qui constituent un véritable risque (fort enjeux) non seulement au niveau de l'apport sédimentaire, mais aussi au niveau des activités anthropiques sont :

- La plage de Fond Bourlet :

C'est une plage qui connaît une relative stabilité sur le long terme ; toutefois il y a des signes d'érosions à l'extrémité Est de l'anse. La mise en place du mur du centre Vetiver peut favoriser l'érosion de la plage (la cause étant la réflexion des vagues que génère ce mur). La dérive littorale a engendré un déplacement de l'embouchure vers l'avant et un risque de fermeture temporaire (BRGM, 2014: III).

Pour faire face à l'érosion le BRGM propose les solutions suivantes :

- un déplacement des enjeux,
- un rechargement pour augmenter la largeur de la plage et ainsi diminuer l'impact de la houle.

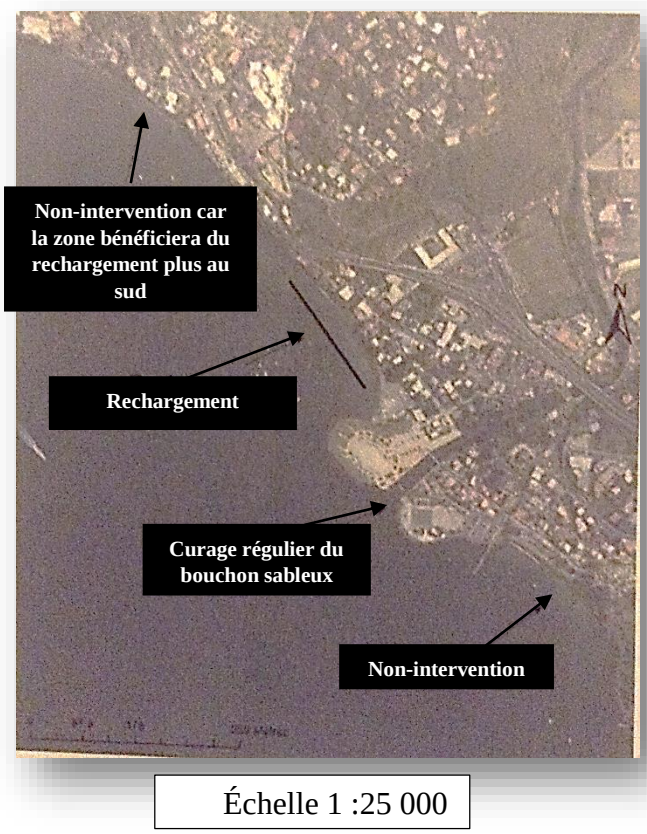
[31] CREOCEAN : bureau d'étude spécialisé en océanographie et en aménagement du littoral

- Anse Madame (cellule qui va de l'anse Lido-Collat à la plage du bourg)

Dans cette situation, l'érosion est provoquée par la récurrence d'ensablement de l'embouchure de Case-Navire. Comme nous l'avons vu précédemment, la place Arawak a accentué l'érosion au nord de l'anse et une accumulation au sud car elle entraine une réfraction de la houle sur les endiguements et un remblai au nord de l'embouchure Case-Navire. Le changement de la dérive sur la plage d'Anse-Madame pourrait menacer l'Anse Collat qui jusque-là ne connaissait aucune véritable érosion (BRGM, 2014: III).

Pour sauvegarder les différents enjeux que menace l'érosion, il est important dans ce cas de faire un rechargement régulier ce qui pourrait réduire la réfraction sur le remblai et renforcera également le transit vers le nord, pour permettre, sur le long terme, de relier l'Anse-Collat et Anse-Madame. Toutefois, il faudrait s'appuyer sur une étude granulométrique, qui est en cours, pour confirmer que la granulométrie de l'embouchure et l'Anse correspondent (BRGM, 2014: III).

Figure 38 Possibilité technique pour lutter contre l'érosion dans la cellule bourg de Schoelcher (source : BRGM, 2014: III)



Néanmoins bien que cette étude ait favorisé l'utilisation du rechargement, il n'est pas la seule solution que l'on pourrait préconiser. Il y a la technique du géotextile qui favorise l'accrétion et respect l'environnement et est à moindre coût (SHIN *et al*., 2007: II.G.o; LEE *et al*., 2012: II.G.o). Malheureusement, encore aujourd'hui, aucune étude n'a été réalisée sur des plages de type microtidal. Nous pensons qu'il serait intéressant d'étudier la question.

❖ **Conclusion**

Après observation des études réalisées sur le rechargement et l'érosion de Schœlcher, Nous pouvons maintenant percevoir que l'importance de mon étude se situe dans l'approfondissement de l'observation topographique.
En effet, pour comprendre véritablement le fonctionnement d'une plage il est important de faire une étude sur le long terme. C'est pourquoi mes observations topographiques entre 2015 et 2016 pourront infirmer ou confirmer la dynamique littorale de Schœlcher. De plus, aucune étude quantitative n'a encore été faite sur la plage de Fond-Lahaye ; il serait donc important de faire une étude topographique sur cette plage. En effet, les décideurs prévoient de développer une activité portuaire sur cette anse.

2/ METHODOLOGIE : ESSAIS DE CARACTERISATION MULTISCALAIRE

A/ Cartographie du trait de côte : approche à long terme

Dans le monde actuel, nous avons pris conscience de l'importance qu'il y a de protéger notre milieu. En effet, la prise conscience et la connaissance environnementale ne cessent de s'accroître. Elles touchent aujourd'hui les secteurs privés et publics. La protection environnementale est souvent intégrée dans l'aide à la décision politique.

Pour comprendre notre milieu littoral et son fonctionnement, nous avons besoin d'établir une surveillance. Il est donc indispensable de cartographier le milieu. Sa méthodologie requiert une précision, réalisée dans notre cas à l'aide d'images aériennes et satellitaires.

L'intérêt d'une étude cartographique est de comprendre l'évolution littorale et ce, d'autant plus que la zone littorale est un milieu labile. Les échanges sédimentaires entre l'île et l'océan peuvent se faire à différentes échelles de temps et d'espace. C'est pourquoi l'étude sur le long terme est important (HÉNAFF *et al*, 2014: III). À L'aide des différentes images satellites, nous pouvons observer la dynamique littorale d'une cellule sédimentaire sur le long terme. L'avantage de cette technique est qu'il est relativement aisé d'en réaliser une. En effet, il suffit d'aller sur différents sites tels que le Geoportail, de prendre les images de la zone concernée, de les géoréférencer à l'aide de logiciels adaptés tels que ArcMap (® ESRI), de réaliser un tracé du trait de côte de chaque carte et enfin de superposer les tracés du trait de côte. Toutefois, il est préférable de récupérer les images d'origine car souvent l'orthorectification est fossée sur les sites de Géoportail (marge d'erreur beaucoup plus forte). Il est à noter que ertaines cartes, surtout les plus anciennes, ne sont pas accessibles gratuitement.

Nous pouvons analyser l'évolution du littoral à l'aide de l'outil DSAS[32]. C'est un outil facile d'utilisation. Il permet de réaliser des calculs statistiques des taux d'évolutions à partir des différents traits de côte. Il s'effectue à l'aide du logiciel SIG[33] ArcMap (® ESRI).

L'outil nécessite de :

- réaliser manuellement une ligne de base se trouvant en mer ou sur terre,
- définir une longueur pour les transects,
- disposer de traits de côte projetés dans un même système géographique,

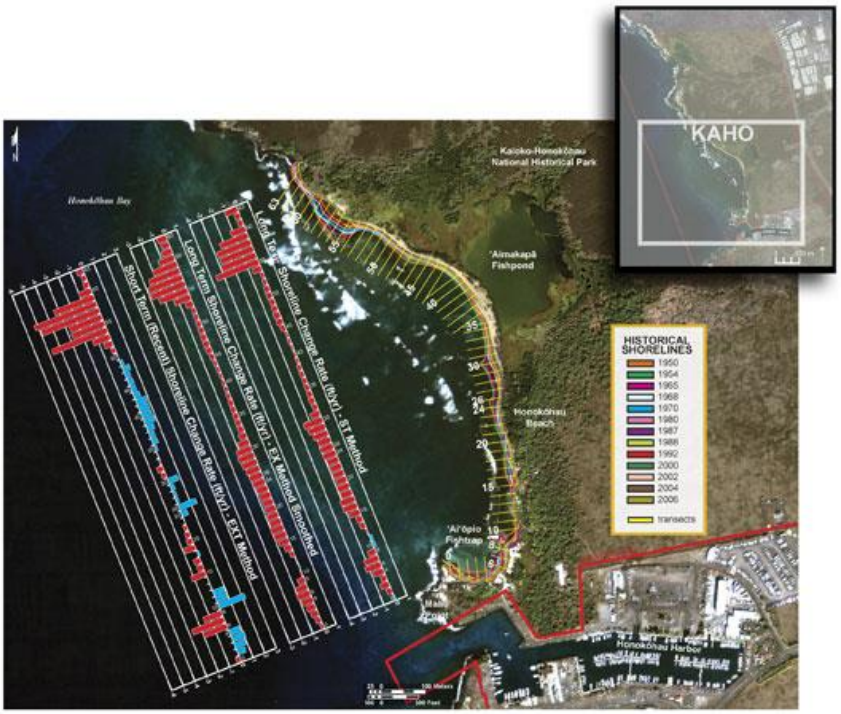
Il conçoit mécaniquement, (selon le pas de mesure défini par l'utilisateur):

- des transects perpendiculaires aux linéaires côtiers,
- mesure les distances entre les traits de côte,
- calcule les taux moyens de déplacement le long de chaque transect.

[32] SIG : système d'information géographique

Grâce à l'analyse automatique, nous pouvons définir des secteurs d'évolution type et calculer les valeurs moyennes. Cette méthode s'applique plus ou moins bien selon les secteurs et nécessite la correction d'un opérateur expert du littoral étudié. (MALLET *et al*, 2012: III).

Figure 39 Exemple de DSAS sur la plage de Kaho (source : USGS, ND)



Pour étudier l'évolution à moyen et long terme de la côte martiniquaise, il est nécessaire de cibler un marqueur physique ; proche de la ligne des plus hautes eaux et connaissant notamment une faible variabilité saisonnière ou infra-annuelle. Ce marqueur doit être perceptible sur photographies aériennes.

Pour définir le trait de côte Schelcherois, j'ai fait le choix d'utiliser la définition morphologique de celle-ci. Elle nous permet de ne pas prendre en compte le marnage. En Martinique nous avons de faibles marnages (< 1), (BRGM, 2013: III). Les limites du rivage sont définis comme un « Lieu de discontinuité morphologique caractéristique de la limite probable atteintes par la mer sur la côte. Exemples : talus d'érosion, pied de dune, limite de végétation de la plage, laisse des pleines mers de vives eaux exceptionnelles, bermes de tempête… Cette limite morphologique présentant un intérêt pour le suivi de l'évolution physique des côtes. » (CNIG, 2003).

La limitation morphologique est un marqueur efficace pour notre étude sur le long et moyen termes. Il présente un certain nombre d'avantage tels que (GARCIN et *al.*, 2007):

- facile perception de l'évolution,
- facilement identifiable sur photographies aériennes,
- position relativement stable à court terme. Les variations saisonnières de cette limite sont faibles en l'absence de phase de perturbation (ouragans, orages tropicaux),
- marque convenablement l'évolution morphologique côtière sur plusieurs décennies,

- représente souvent le marqueur morphologique de cordons dunaires qui constituent la première défense naturelle contre la mer lors d'évènements climatiques majeurs. (BRGM, 2013: III)

Pour les différentes anses, notre limite sera celle des lignes d'humectations (Jet de rive), des végétaux et/ou des maisons en avant-côte.

Le suivi de la topographie peut être réalisé selon deux types d'indicateurs morphologiques qui sont le profil topographique et les modèles numériques de terrain (MNT) (HÉNAFF *et al*, 2014: III). L'une des différences entre ces deux indicateurs est celle de l'échelle de temps. Le MNT permet une approche à court terme tandis que la surveillance topographique permet une approche à moyen terme. Dans cette partie nous verrons la méthodologie du profil topographique et dans le suivant, celui du MNT.

B/ La surveillance topographique des plages : approche à moyen terme

Réaliser un suivi topographique se fait selon une technique en semis de point : ce sont des ensembles de points décrits selon des coordonnées en X, Y (coordonnées planaires) et Z (altitude). Ces points peuvent s'organiser spatialement le long d'un profil où il peut constituer un semi de points répartis de façon hétérogène (HÉNAFF *et al*, 2014: III). Il est important de bien matérialiser le profil et notamment le point de départ, ainsi que l'orientation de celui-ci par rapport au rivage. Pour cela nous devons implanter un point fixe pérenne appelé tête de station. Les mesures peuvent être répétées dans le temps de façon régulière.

Une étude topographique (sur Madiana, Anse-Madame, Anse Collat) a déjà été réalisée en 2013 par DOLIQUE, F et CHARPENTIER, J (DELTA, 2014). Nous ne ferons que poursuivre l'étude durant l'année 2014-2015 et j'élargirai l'étude à Fond Lahaye et au bourg. Dans notre cas, les mesures seront mensuelles. N'ayant pas encore la position de toutes les têtes de profils pour le moment, nous nous contenterons de vous présenter celles déjà existantes. À noter qu'une tête de station à Madiana a été détruite et qu'il sera impossible de comparer mes analyses avec celles de 2013 (cf figure 40).

Figure 40 Tête de Station (DOLIQUE *et* al,2013)

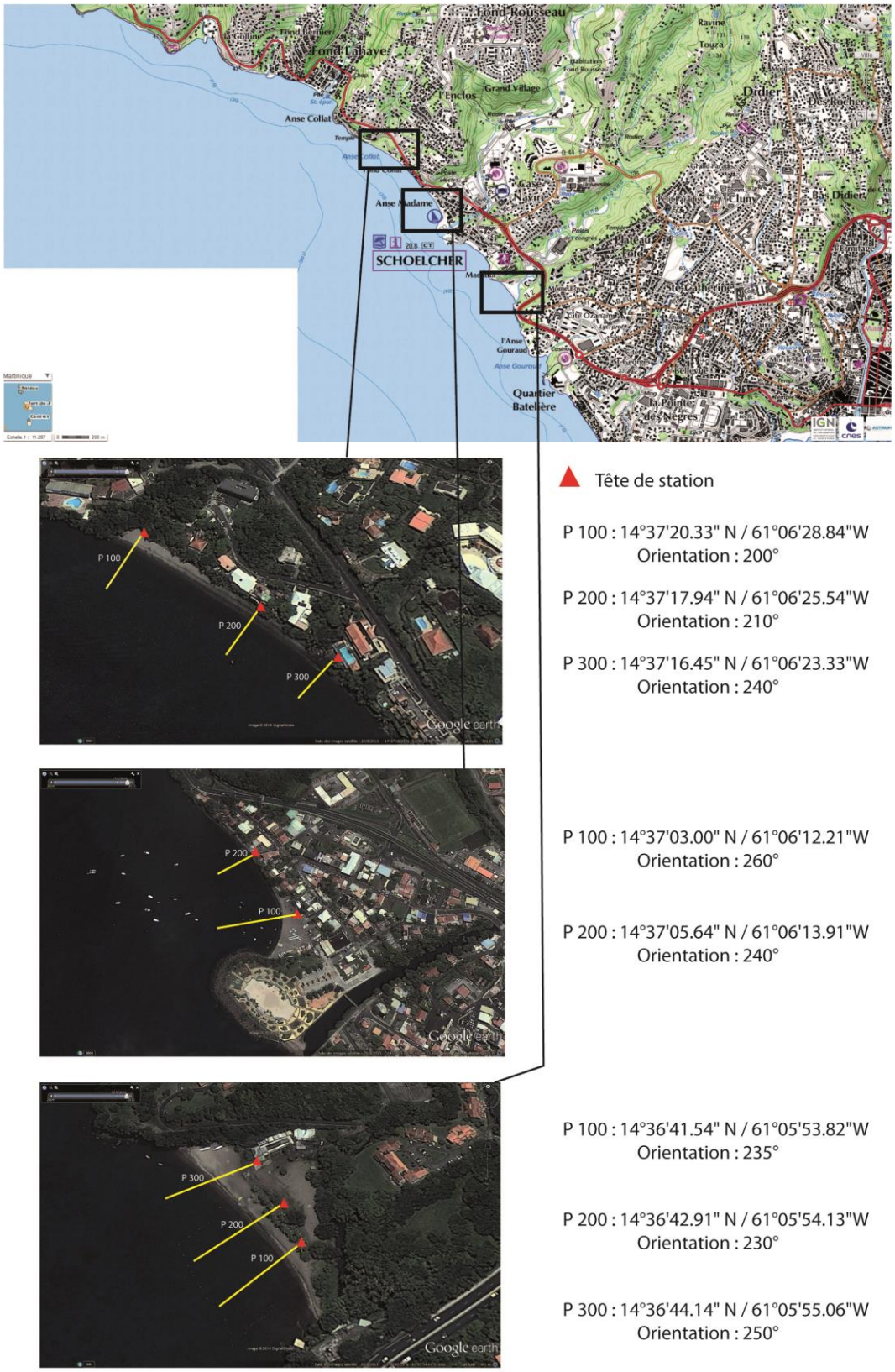


Figure 1 : Localisation des têtes de station et des profils

Pour réaliser les mesures topographiques, nous pouvons utiliser un tachéomètre avec un GPS (Global Positionning System) et ou un DGPS (Differencial Global Positionning System). Les différences entre ces deux méthodes sont représentées sur ce tableau :

Tableau 3 : Différence entre DGPS et Tachéomètre (Hénnaff *et* al, 2014)

Méthode de suivie	Degré de technicité	Précision (environs)	Surface couverte (environs)	Résolution (environs)	Compétence nécessaire	coût
DGPS	+++	5 cm	Dépend du terrain et du temps consacré à la collecte de données	200 à 300 m	opérateurs non spécialisé pour les mesures de terrain. Opérateurs spécialisés pour le traitement (bureau d'étude universitaires)	Élevé → 10 k€ + coût du traiteme nt
Tachéomètre	++	5 à 10 cm		Quelques hectares	Deux opérateurs non spécialistes	Entre 4000 et 5000€

- **Le Tachéomètre et GPS (Global Positionning System)**

Le GPS est un système de géolocalisation par satellite fonctionnant par triangulation grâce aux satellites placés en orbite par le département de la défense des États-Unis en 1958. Ils sont au nombre de 36 et sont répartis sur six orbites (sur une longueur 20000 km). Pour que la triangulation soit correcte, il nous faut aux moins trois satellites visibles, nous avons une constante locale de 10 à 4 satellites. Un GPS comme son nom l'indique, nous permet de nous positionner par triangulation, donc plus il y aura de satellites présents et plus l'analyse sera précise. Le GPS que j'utiliserai fonctionne sur le système géodésique WGS 84 et convertit sa position en UTM. (CHARPENTIER, 2010: III).

Le Tacheomètre est un instrument de mesure optique de distance et d'angles. Il permet de mesurer des angles dans des plans horizontaux et verticaux, les pentes et les distances. Il nécessite l'emploi de deux opérateurs : l'un travaille sur le tachéomètre (il vise la mire composée d'un prisme réflecteur à l'aide du tachéomètre) pendant que l'autre arpente la zone avec une mire (HÉNAFF *et al*, 2014: III). Une fois l'ensemble des mesures réalisées, il nous faut traiter les données. Pour cela, nous allons décharger le tachéomètre et utiliser le logiciel Profiler qui va restituer le profil en coupe en deux dimensions (DOLIQUE *et al*, 2014: II.k).

- **Le DGPS (Differencial Global Positionning System)**

C'est en réalité une amélioration du GPS. En effet, il favorise grandement la précision. Elle peut être centimétrique (cela dépend du degré de précision de dilution du signal satellite : GDOP).
Le DGPS fonctionne de la manière suivante :

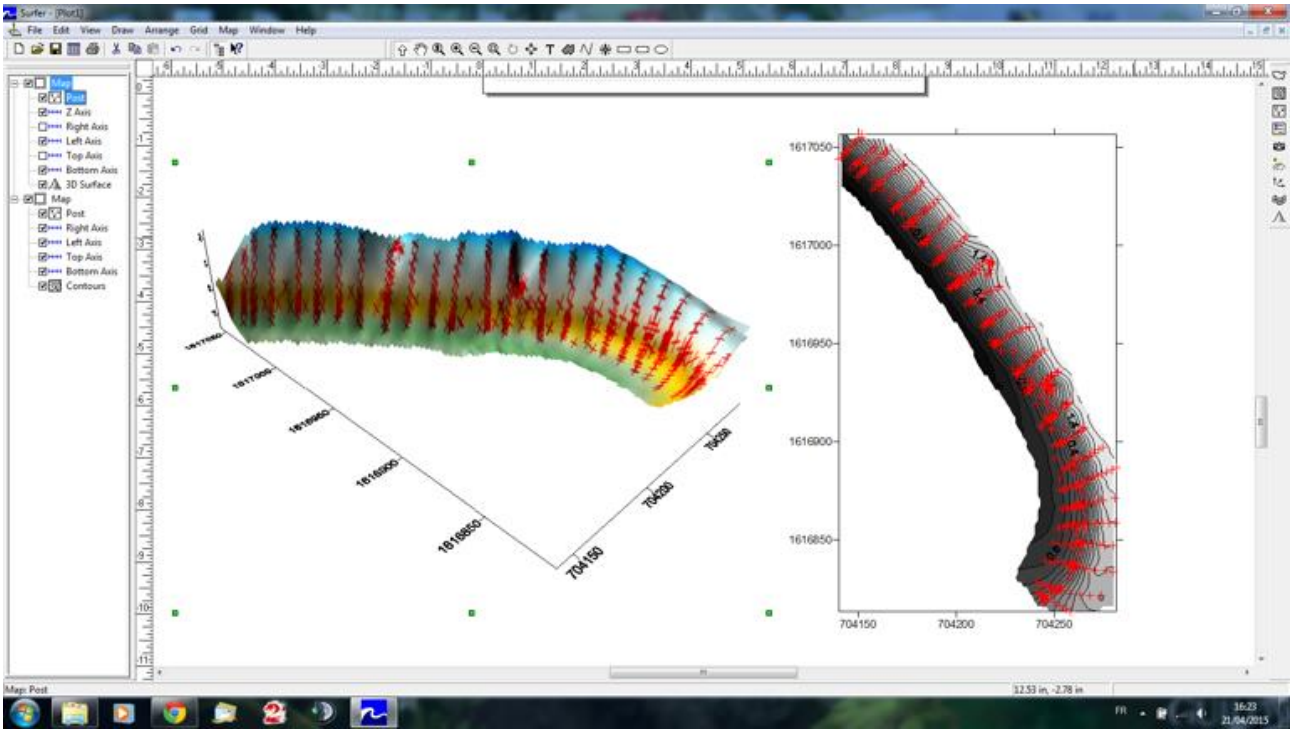
- Nous n'avons besoin que d'un opérateur,

- Une station de référence DGPS avec une coordonnée IGN[34] précise doit être positionnée sur un point pérenne. Pendant ce temps, le récepteur mobile va trianguler sa position sur un point déjà connu de l'appareil ; il pourra ainsi être capable de résoudre l'équation du temps de parcours réel et du temps de parcours théorique de chaque signal des satellites et pourra estimer les erreurs locales en comparant la position calculée à la position réelle (Garde Côtière, 2000).

C/ mise en place des protocoles MNT

Un modèle numérique de terrain (MNT), est une carte indiquant la forme brute du terrain, sans construction ni végétation. Sa particularité est qu'il modélise l'espace en trois dimensions. Nous pouvons élaborer un MNT à l'aide d'un DGPS ou encore un tachéomètre (définition au chapitre précédent). À l'aide de l'une de ces deux méthodes, nous devons faire des mesures en n'oubliant pas de nous référer en X, Y, Z (3D). Par la suite nous allons extraire les données sur EXCEL, puis faire un copier-coller sur SURFER 9. Ce logiciel va nous permettre de relier les différents points et ainsi nous allons refaire la topographie de la plage.

Figure 41 MNT en 2D et 3D sous SURFER.9 (JOSSO, 2015 : III)



Si vous avez une multitude de points organisés de manière semi-irrégulière, il faut utiliser la technique « d'interpolation » pour réaliser un MNT. Cette technique (souvent le

[34] IGN: Institut national de l'information géographique et forestière

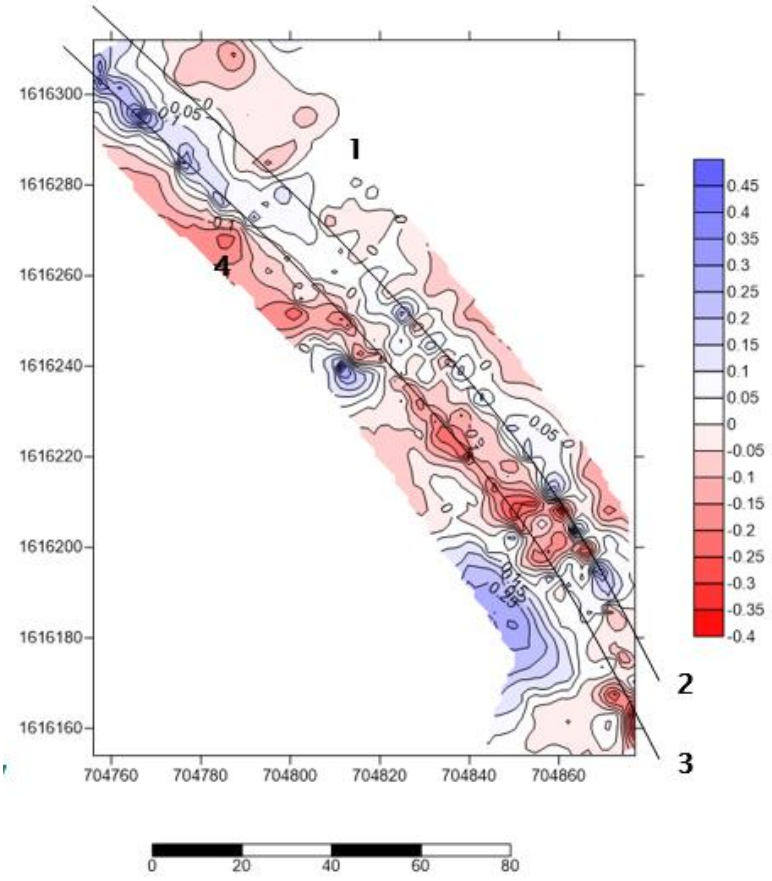
krigeage) nous permet de réaliser un maillage de points topographiques réguliers à partir d'un levé de points répartis de façon aléatoire sur le terrain. Plus le nombre de points est important et plus la véracité et la complexité de l'anse sera exprimée de façon précise. Une fois l'ensemble des points réalisés, nous allons décharger les données et les traiter par informatique. Nous pourrons construire de diagramme en 3D (mode maillé) ou des cartes topographiques isolignes (lignes d'égales altitudes).

Après la réalisation de plusieurs MNT, nous pourrons comparer deux MNT (il est impossible d'en utiliser plus de deux à la fois) ce qui nous permettra de voir où se situent les zones d'accrétions et les zones d'érosions. Cette comparaison est dénommée « MNT différentiel » (HÉNAFF *et al*, 2014: III).

Nous ferons la description en séparant les MNT en 4 parties :

- Haut de plage,
- Berme d'arrière plage,
- Rupture ou ligne de déferlement,
- Bas de plage.

Figure 42 MNT séparé en 4 parties pour faciliter les descriptions (Source : COICAUD,2015)



Pour terminer nous comparerons nos données avec les flux moyen d'énergie en joules durant notre période d'étude. Pour cela nous utiliserons la formule d'Hardisty de 1990 :

$$P = \frac{1}{8}\rho_w \ gH_s^2\left(\frac{L}{T}\right)\left[0{,}5\left(1+\frac{4\frac{\pi}{L}h}{\sin h\ \left(4\frac{\pi}{L}h\right)}\right)\right]$$

P = Flux moyen d'énergie en joules par seconde, J_s^{-2}

ρ_w = La masse volumique de l'eau de mer (1027 km m^{-3})

g= accélération de la pesanteur (9,81 m.s^{-2})

H_s= Hauteur significative de la houle en mètre

L= Longueur d'onde de la houle en mètre

T= période de houles en seconde

h= hauteur d'eau en mètre

Nous réaliserons des graphiques dont la base de données concerne l'énergie des houles J/s. Grâce à cela nous pourrons connaître l'impact de l'énergie des houles sur les plages.

Il est important de préciser que les calculs ont été réalisés à partir de données houlographiques Candhis. Ces données sont prélevées sur la bouée de Ford-de-France. Elle est plutôt éloignée de Schœlcher. Il faut relativiser les données.

D/ Suivi par photographie fixes

Cette méthode est facile à réaliser. Elle m'a permis d'avoir une idée visuelle de l'impact des tempêtes sur les plages schoelcheroise. Pour la mettre en place, il faut photographier avant et après un événement météorologique extrême une plage ou une portion de celle-ci depuis le même point de vue. Ainsi nous pourrons visualiser qualitativement les variations morphologiques qui se produisent au cours de cette période.

Figure 43 Les points de vue choisis pour les photos-> Echelle: 1: 2133/ image: géoportail/ (Source: DUPUY)

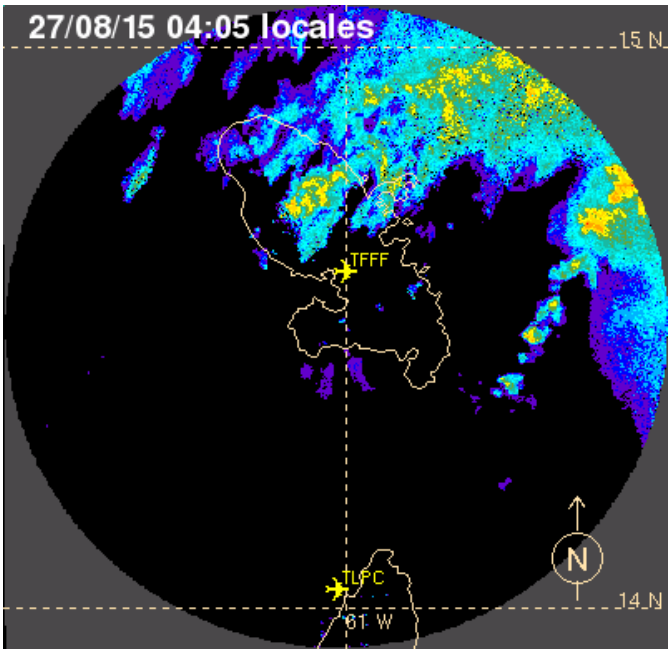
3/ RESULTATS

A / Analyses photographiques

- **Impact de la tempête Ericka**

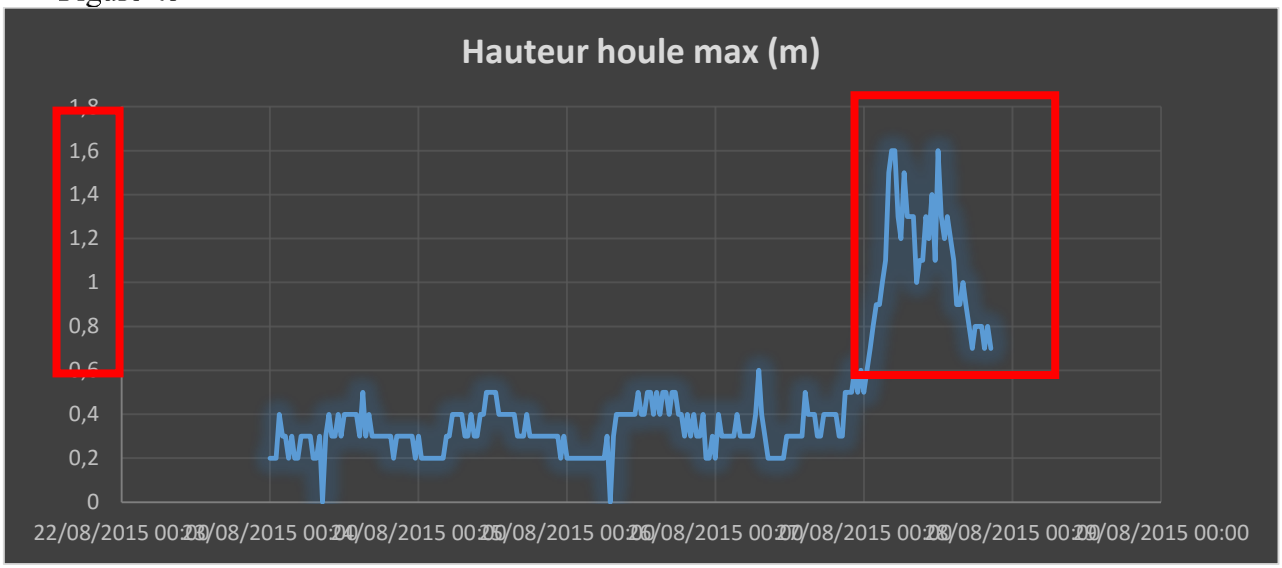
Ericka une tempête tropicale qui a généré des pluies orageuses en Guadeloupe et en Martinique le matin du 27 août 2015. En Martinique, les rafales de sud atteignaient 70 km/h à la Caravelle avec des lames d'eau de 30 à 40 mm sur le sud-ouest de l'île (http://www.keraunos.org/).

Figure 44 L'imagerie radar de l'impact d'Ericka le 27/08/15



Durant cette phase, les houles ont été très importantes. D'après les relevés houlographiques, fournis par la bouée de Fort de France entre le 27 et le 28 Aout 2015, les houles ont été importantes puisqu'elles variaient entre 0,6 et 1,6 mètre.

Figure 45 Hauteur des houles durant Ericka



Pour voir l'impact de la tempête sur ces plages, j'ai réalisé une série de photographie le 19/08/2015 et le 28/08/2015 (Cf ; ANNEXE I).

Grâce à cette étude nous avons pu remarquer la chose suivante : lors des tempêtes avec de fortes houles (0,6 à 1,6) nous avons une tendance à l'érosion des anses. Dans l'annexe vous pourrez voir les photos prises.

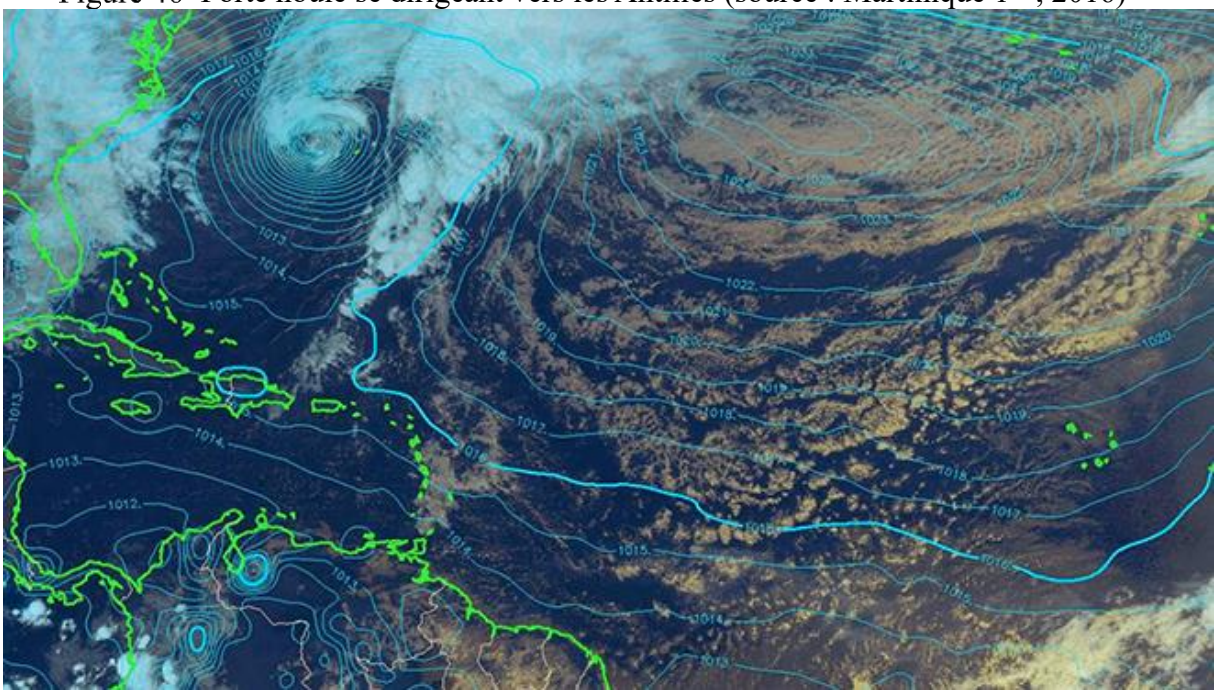
Figure 44 : Les zones d'impacts de la tempête Ericka

A Anse-Madame nous avons surtout une accentuation de l'érosion du côté nord de l'anse. A Anse-Collat (Lido) le recul c'est fait sur toute la plage. Cela est surement dû à l'accentuation de la dérive littorale. Madiana a connu une forte érosion au sud de l'anse. Le nord de l'anse a été protégé par la falaise.

- **Forte houle entre le 12 et le 16 /01/2016**

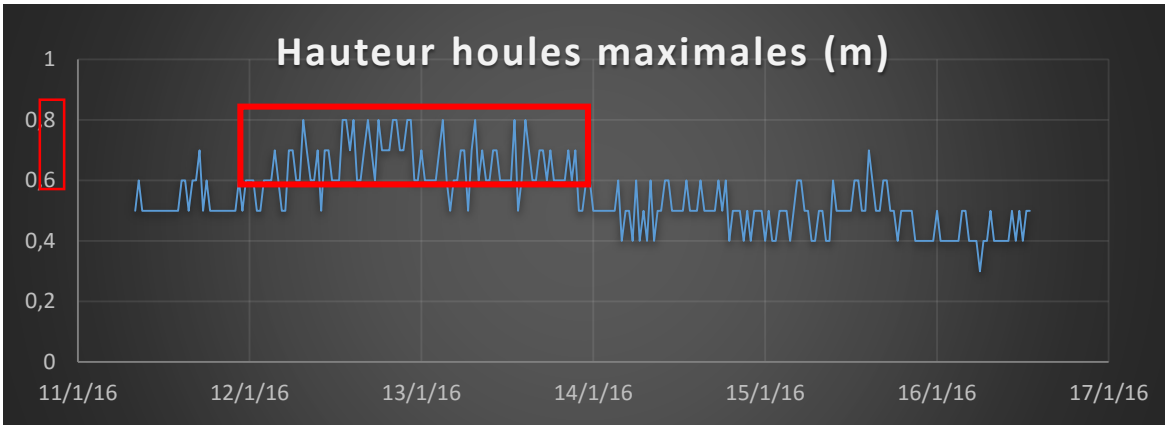
Il y a eu un épisode de forte houle de Nord sur tout l'arc Antillais à partir du dimanche soir 10 janvier. Une large et forte dépression extra-tropicale, au large de la Floride et à plus de 1200km au Nord de l'arc Antillais, a eu lieu. Elle se déplaçait globalement vers l'Est en engendrant des vents forts (force 8 voire localement 9, soit 60 à 90km/h) sur une région très vaste. Ces vents forts et durables ont levé de très fortes vagues qui se sont propagés progressivement vers le Sud. Ils ont engendré une très forte houle de Nord qui a intéressé pendant plusieurs jours tout l'arc.

Figure 46 Forte houle se dirigeant vers les Antilles (source : Martinique 1ère, 2016)



Les données houlographiques de la bouée de Fort de France ont démontré que les zones situées à proximité de celle-ci ont été touchées à partir du 12 janvier. Les vagues les plus hautes se sont fait ressentir entre le 12 et le 13 janvier 2016. Les houles maximales avaient une hauteur entre 0.5 et 0.8 cm. A partir du 13, les vagues se sont fait moins ressentir (la majorité des houles entre 0.4 et 0.6 cm). Enfin, dès le 16 les houles étaient inférieures à 0.5cm.

Figure 47 Hauteur des houles maximales du 11 au 16 janvier 2016



Après réalisation des photographies fixes, nous avons pu remarquer que l'érosion s'est concentrée sur certaines zones des plages schoelcheroises. Nous pourrons regarder ces photographies dans l'ANNEXE II.

- Madiana : a connu une érosion sur l'ensemble de la plage. Néanmoins, c'est au nord de l'anse que l'érosion est la plus importante. Au sud de l'anse, il y a eu de forte houle qui a généré d'importants déplacements de détritus.
- Anse-Madame : Cette plage a connu une érosion à partir du restaurant, qui se situe aux environs du centre de la plage, jusqu'au nord. Le sud de la plage est resté relativement stable. Cela est sûrement dû à la dérive Nord-ouest Sud-Est spécifique à celle-ci.
- Anse-Collat: La zone la plus touchée se situe à l'extrême sud de l'anse. La dérive Sud-est Nord-ouest a favorisé se recul.

Figure 48 Les zones des fortes houles du mois de janvier 2016

B / Les tendances dynamiques identifiables à la travers la technique du DSAS

Dans cette partie nous allons étudier la dynamique des plages sur le long terme. Pour cela j'ai utilisé la technique du DSAS (voir p68).

- **Anse-Madame**

Figure 49 Evolution du trait de côte d'Anse Madame entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY)

Source des images satellites:

- 1951 : BDORTHO HISTORIQUE 1951 ©IGN - DEAL Martinique
- 2000, 2004 : BDORTHO® 2000 ©IGN- DEAL Martinique
- 2010 : ORTHOHR972 ©IGN – GéoMartinique
- PLEIADES : PELIADES 2012 GEOSUD- GéoMartinique

Le fond de carte utilisé sur cette image date de 2010

Figure 50 Evolution du trait de côte d'Anse Madame entre 1951 et 2004 (Source : DUPUY)

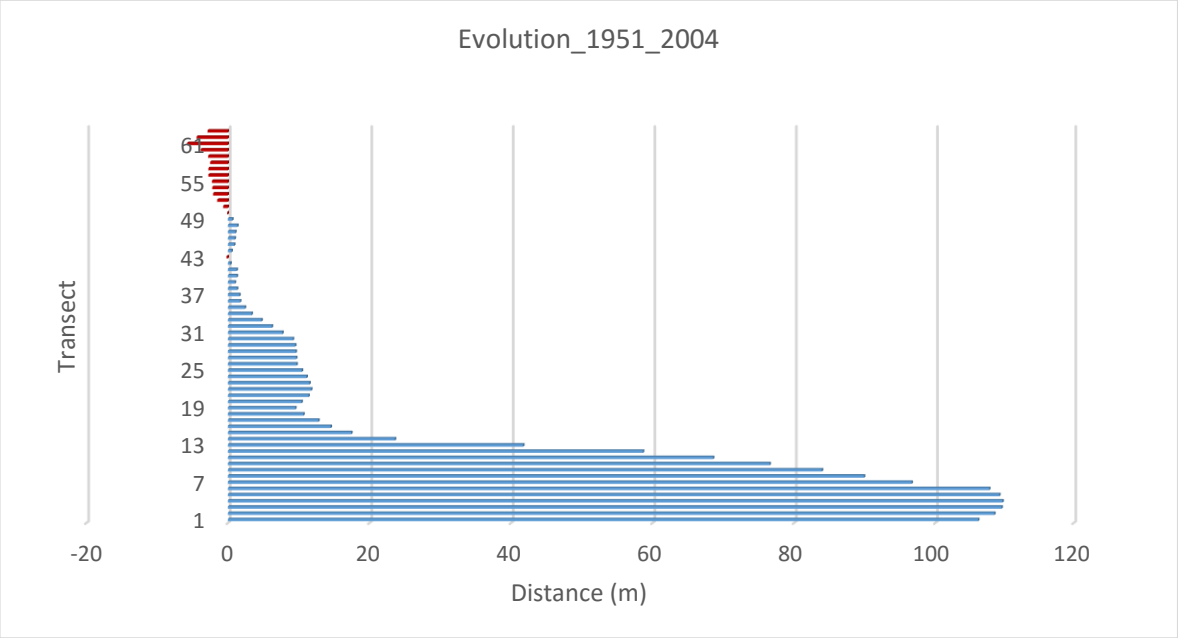


Figure 51 Evolution du trait de côte d'Anse Madame entre 2004 et 2010 (Source : DUPUY)

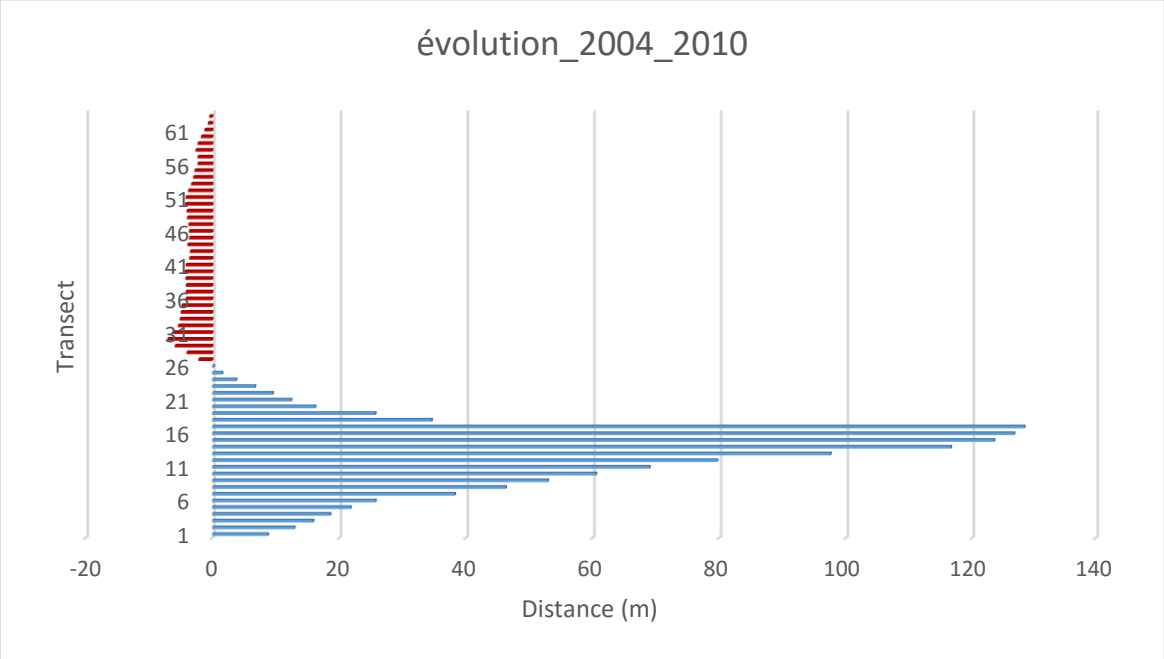


Figure 52 Evolution du trait de côte d'Anse Madame entre 2010 et 2012 (Source : DUPUY)

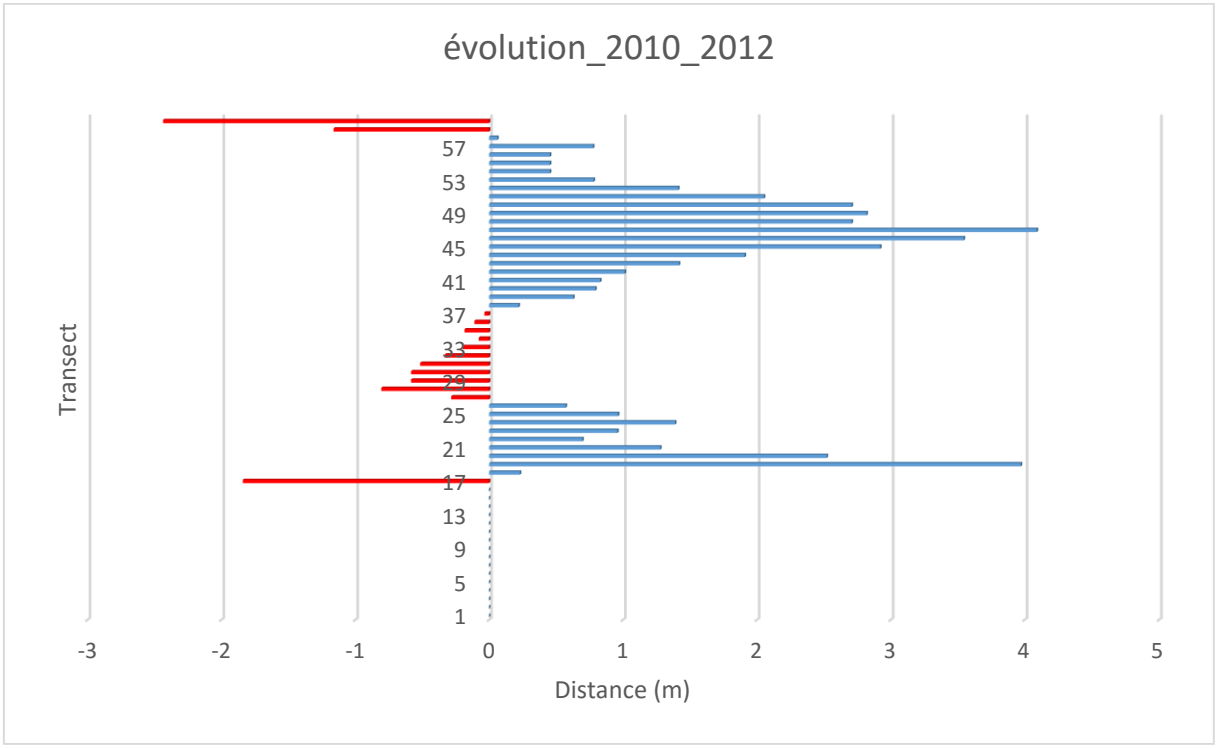
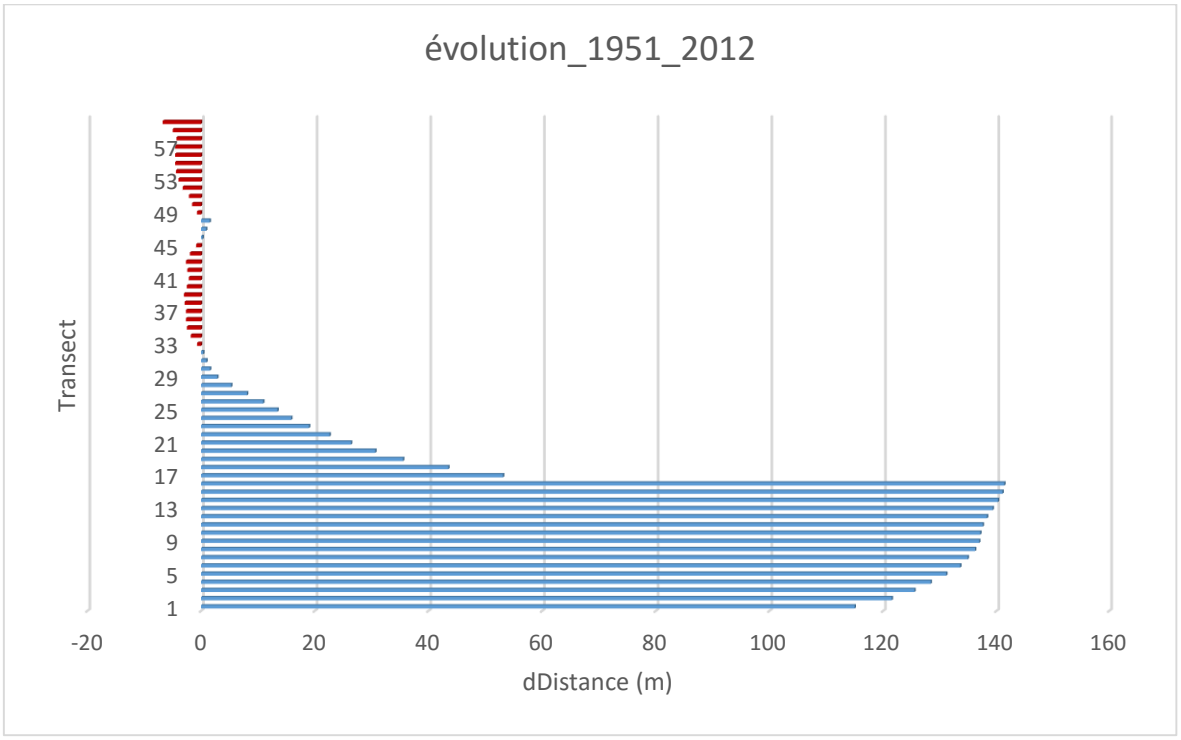


Figure 53 Trait de côte d'Anse Madame entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY)



Avant de commencer nos observations il est important de rappeler qu'à proximité d'Anse Madame, il y a la place Arawak qui a été construite après les années 2004. Cet aménagement a inversé la dérive modale. A l'origine, la dérive Sud-Est/ Nord-Ouest devient Nord-Ouest/ Sud-Est.

De 1951 à 2012, il y a eu une très forte accumulation au sud. En effet, depuis 1951 la plage a pu par endroit s'accroître jusqu'à ≈ 140m. Au nord, il y a eu plutôt une tendance à l'érosion. En raison de l'inversion de la dérive modale générée par la construction de la place ARAWAK, nous avons la preuve qu'un aménagement peut modifier la dynamique d'une plage. Néanmoins, la dynamique de 1951 à 2012 n'a pas toujours été constante.

Entre 1951 et 2004, l'accrétion de la plage se fait surtout au niveau de l'embouchure de Case Navire au sud de L'anse. Cette avancée pouvait atteindre jusqu'à 110m. A l'extrême Nord il y a eu une légère érosion. Elle n'a pas reculé à plus de -10m.

Entre 2004 et 2010, la zone d'érosion s'est étendue jusqu'au centre de la plage. Et la dynamique positive au sud est largement due à l'aménagement de la place ARAWAK.

De 2010 à 2012, la dynamique est moins évidente. Toutefois on constate une accrétion au sud et au nord de l'anse. Alors qu'au centre il y a une faible érosion du 27ème au 38ème transect.

Ainsi, nous pouvons dire que sur le long terme, c'est la dérive modale qui dessine la morphologie de l'anse.

- ## Anse Collat

Figure 54 Evolution du trait de côte d'Anse Collat entre 1951 et 2010 (Source : DUPUY)

Source des images satellites:

- 1951 : BDORTHO HISTORIQUE 1951 ©IGN - DEAL Martinique
- 2000, 2004 : BDORTHO® 2000 ©IGN- DEAL Martinique
- 2010 : ORTHOHR972 ©IGN – GéoMartinique
- PLEIADES : PELIADES 2012 GEOSUD- GéoMartinique

Le fond de carte utilisé sur cette image date de 2010

Figure 55 Evolution du trait de côte d'Anse Collat entre 1951 et 2004 (Source : DUPUY)

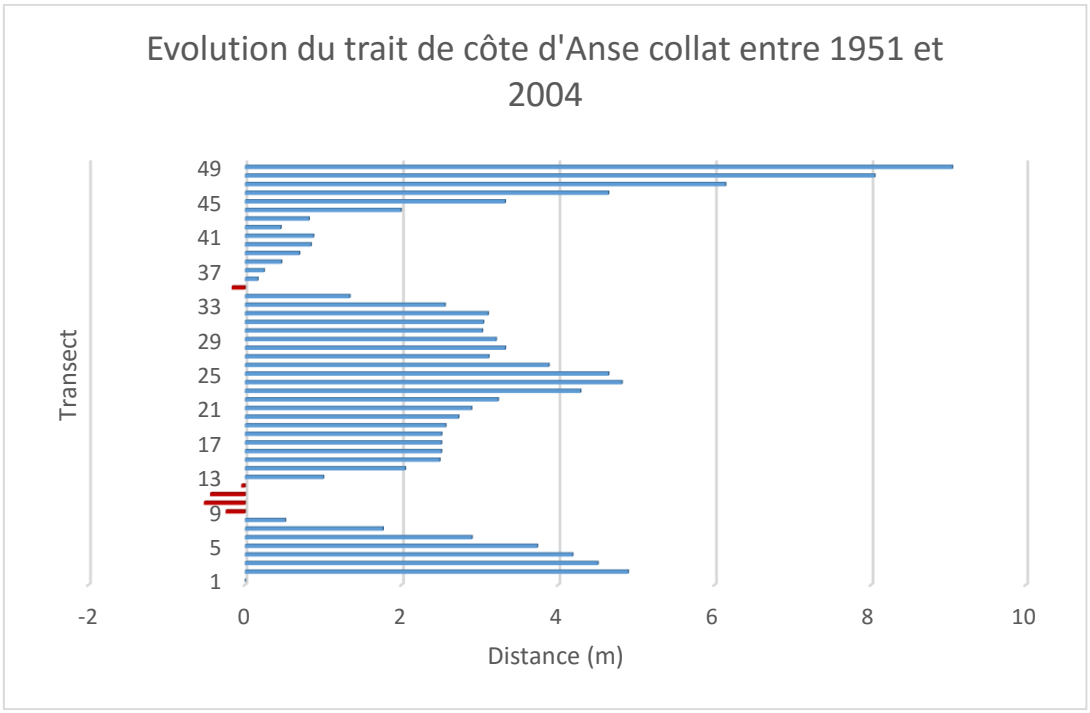


Figure 56 Evolution du trait de côte d'Anse Collat entre 2004 et 2010 (Source : DUPUY)

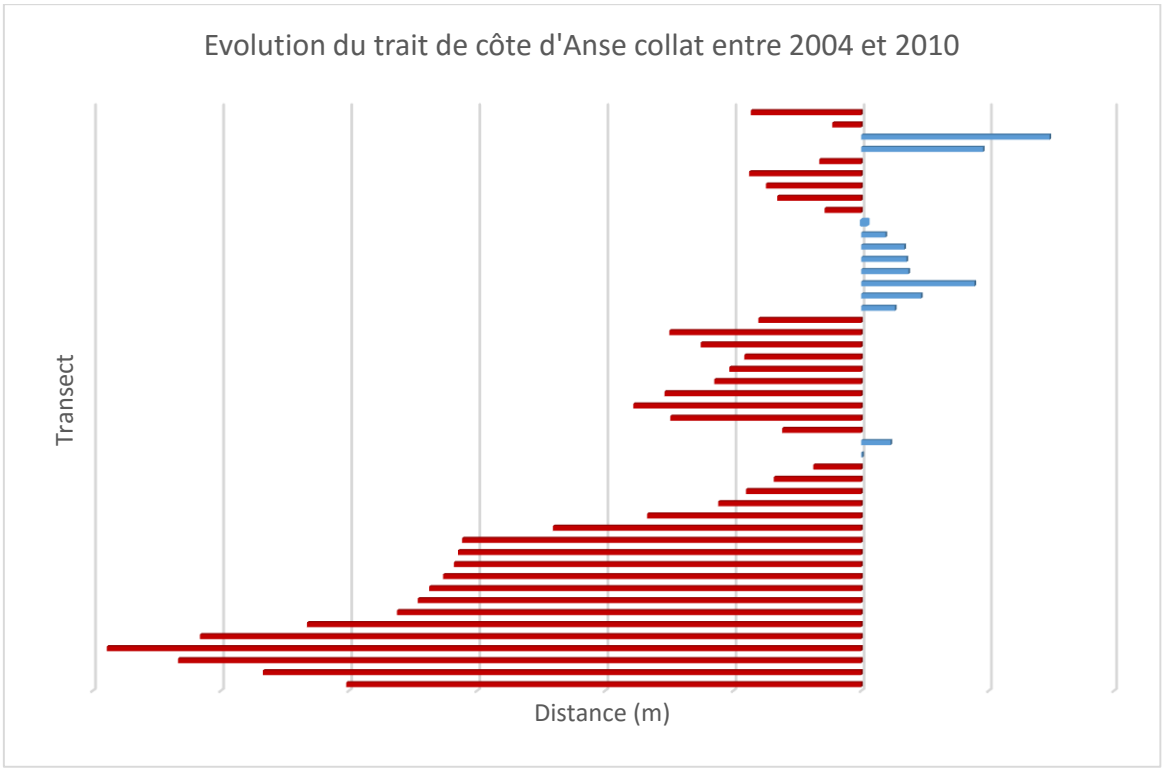
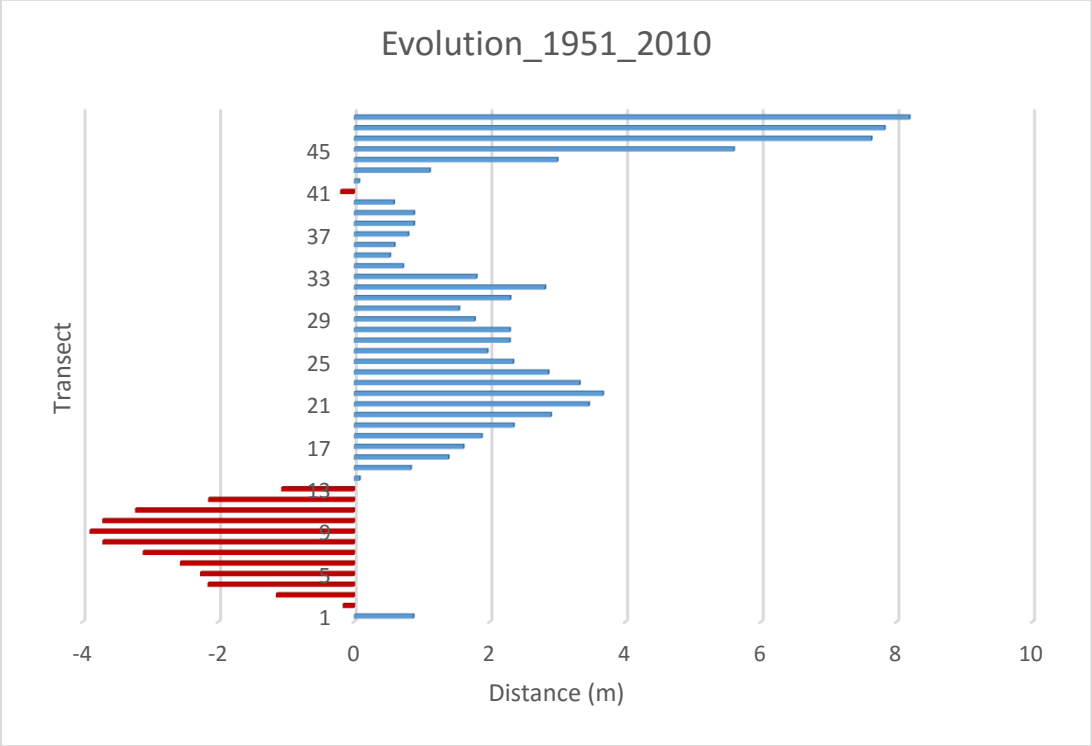


Figure 57 Trait de côte d'Anse Collat entre 1951 et 2010 (Source : DUPUY)



De 1951 à 2010, on constate une accrétion au nord de la plage et une érosion au sud. Sur le long terme la dérive modale permet de dessiner la morphologie de la plage.

Entre 1951 et 2004, Collat a connu essentiellement une accrétion. L'accumulation la plus importante a été au nord de la plage avec une avancée de 9m. A l'extrême nord, il y a eu la plus importante avancée (de 6 à 9m). Cette croissance s'est amoindrie jusqu'à avoir une légère érosion au 35ème transect. Une accumulation moyenne de 1 à presque 5 m s'est fait ressentir au centre de l'anse. Il y a eu une légère érosion entre le 8ème et le 12ème transect. Enfin, au sud de la plage nous avons une avancée.

Entre 2004 et 2010, nous avons un schéma totalement inverse. Nous avons une forte tendance à l'érosion. Elle est essentiellement située au sud de la plage.

Les causes de ces changements ont pu être provoquées par une croissance de la population sur le littoral schoelcherois. Sur la plage d'Anse Collat, il y a eu l'installation de logements en avant-dune qui ont pu vraisemblablement bloquer les transferts Cross-shore. L'une des causes les plus évidentes du recul du littoral est l'élévation du niveau de la mer.

En Martinique, entre 993 et 2011, cette élévation est de l'ordre de 0 à 3 mm/ an.

- **Fond Lahaye**

Figure 58 Evolution du trait de côte de Fond Lahaye entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY)

Source des images satellites:

- 1951 : BDORTHO HISTORIQUE 1951 ©IGN - DEAL Martinique
- 2000, 2004 : BDORTHO® 2000 ©IGN- DEAL Martinique
- 2010 : ORTHOHR972 ©IGN – GéoMartinique
- PLEIADES : PELIADES 2012 GEOSUD- GéoMartinique

Le fond de carte utilisé sur cette image date de 2010

Figure 59 Evolution du trait de côte de Fond Lahaye entre 1951 et 2004 (Source : DUPUY)

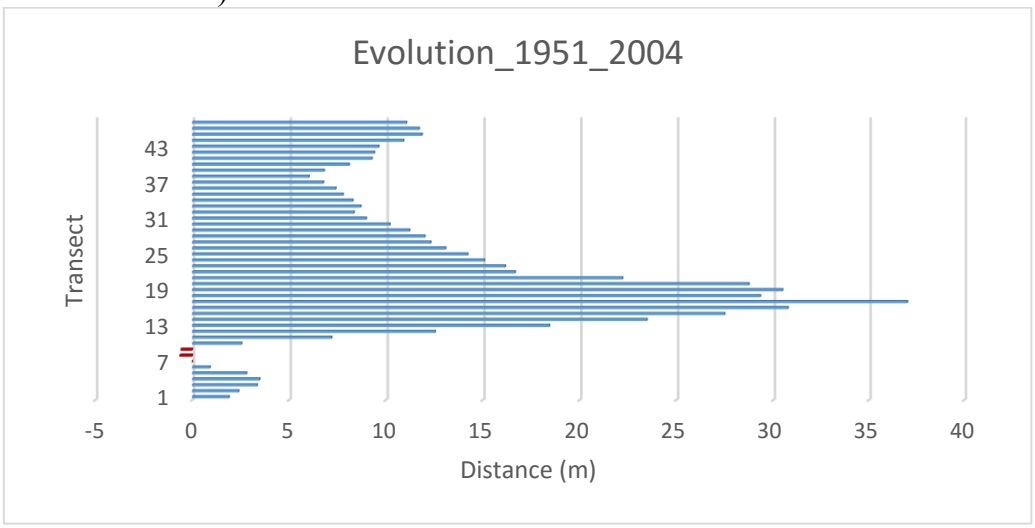


Figure 60 Evolution du trait de côte de Fond Lahaye entre 2004 et 2010 (Source : DUPUY)

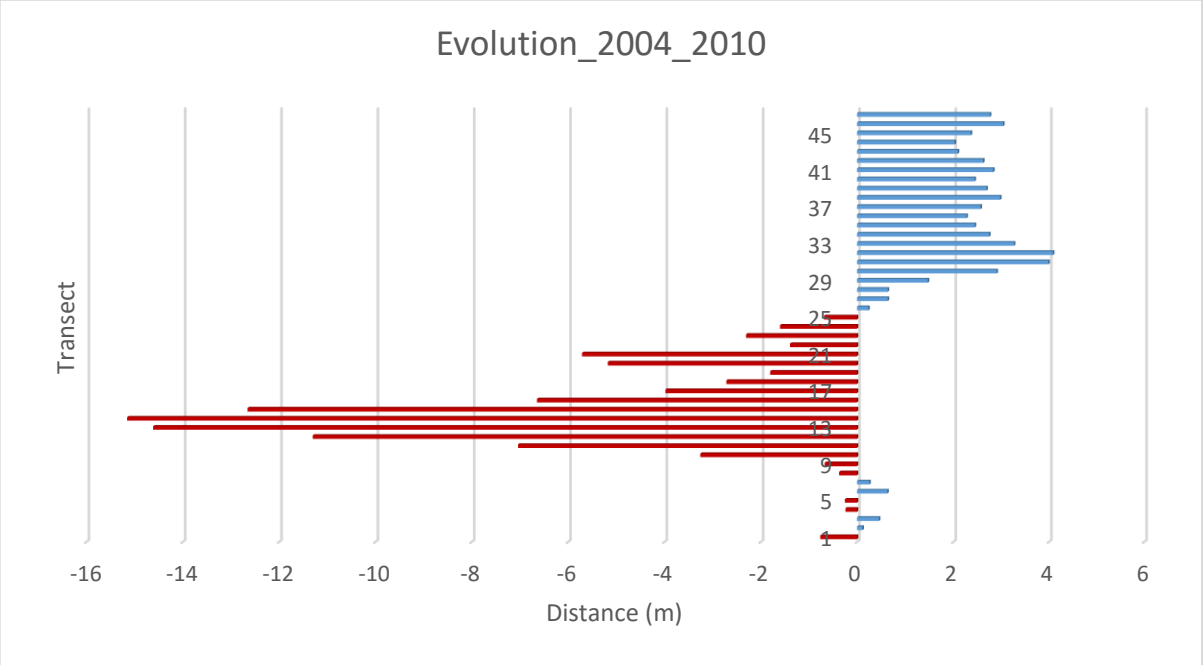


Figure 61 Evolution du trait de côte de Fond Lahaye entre 2010 et 2012 (Source : DUPUY)

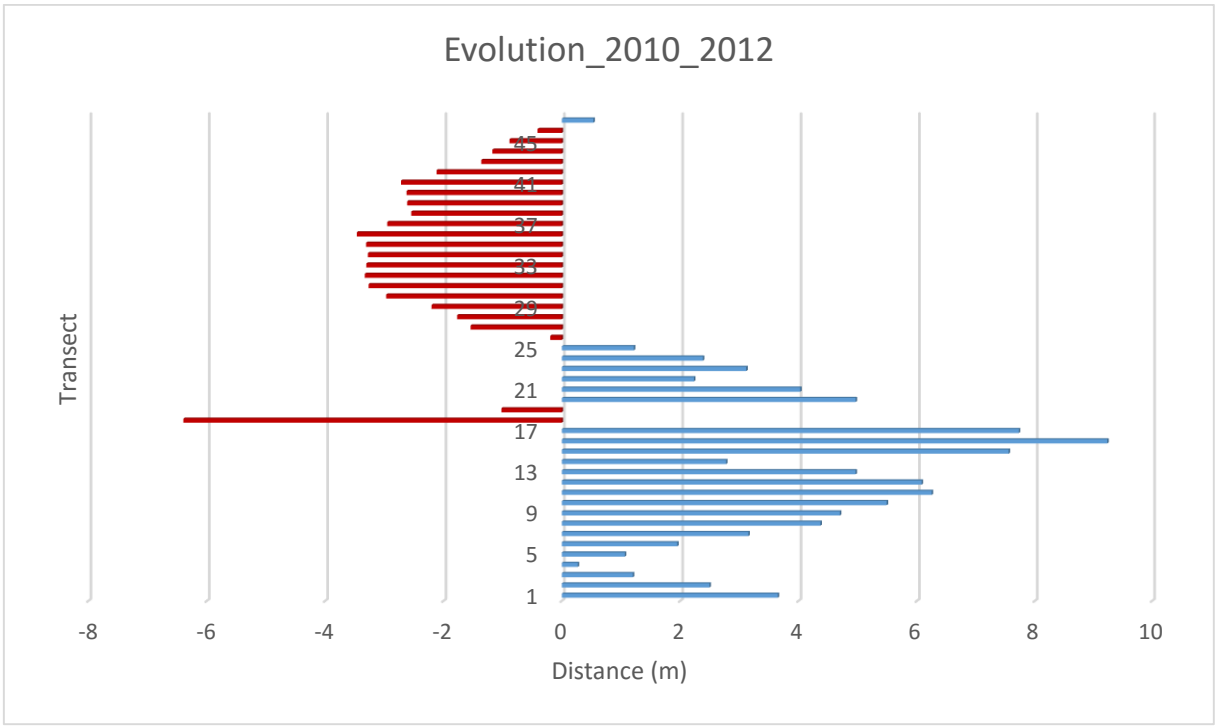
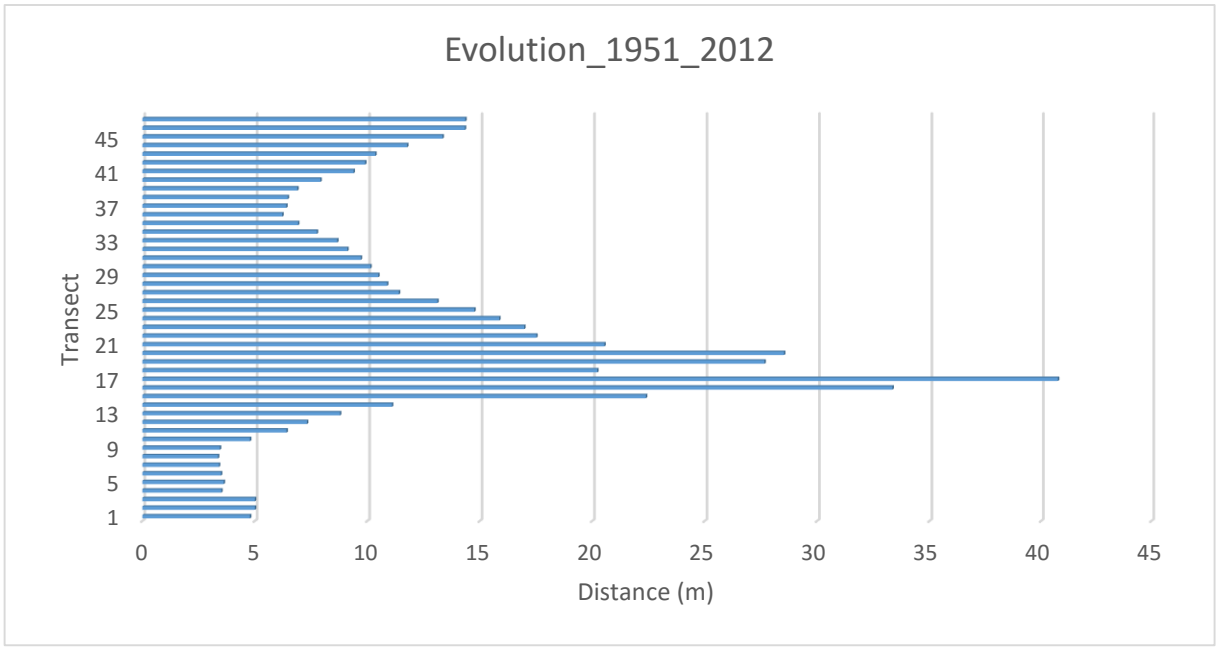


Figure 62 Trait de côte de Fond Lahaye entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY)



De 1951 à 2012 Fond Lahaye a connu une croissance globale de son anse. Cette plage se situe entre l'embouchure d'une rivière (la rivière Fond Lahaye). Cette proximité a favorisé une

construction sédimentaire des plages. En effet, l'embouchure constitue une ressource sédimentaire. C'est pourquoi à proximité de l'embouchure, il y a une forte accumulation.

Entre 1951 et 2012, cette dynamique n'a pas toujours été constante. De 1951 à 2004 il y a eu une accrétion sur l'ensemble de la plage. Cette dynamique a été plus importante au centre de la plage. Il y a eu une avancée de près de 37m.

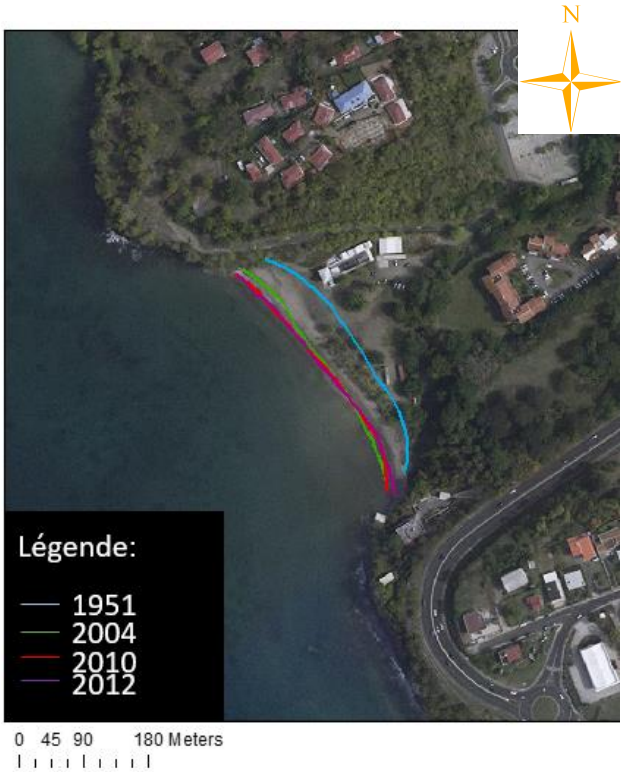
Entre 2004 et 2010, il y a eu essentiellement une accrétion au nord de 2 à 4m. Nous avons constaté un phénomène de recul allant jusqu'à -15m au sud de l'anse.

Entre 2010 et 2012, la dynamique de la plage s'inverse. En effet, le nord de la plage s'érode jusqu'à 3m alors que le sud s'accrète fortement (maximum : 9m).

Cette dynamique pourrait avoir été partiellement engendrée par l'Homme. La présence d'une forte concentration de la population sur le littoral, les importants prélèvements dans l'embouchure et sur la plage de Fond Lahaye pourraient être des causes à ce phénomène. Il y a également des causes naturelles dont l'élévation du niveau de la mer.

- **Madiana**

Figure 63 Evolution du trait de côte de Madiana entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY)



Source des images satellites:

- 1951 : BDORTHO HISTORIQUE 1951 ©IGN - DEAL Martinique
- 2000, 2004 : BDORTHO® 2000 ©IGN- DEAL Martinique
- 2010 : ORTHOHR972 ©IGN – GéoMartinique
- PLEIADES : PELIADES 2012 GEOSUD- GéoMartinique

Le fond de carte utilisé sur cette image date de 2010

Figure 64 Evolution du trait de côte de Madiana entre 1951 et 2004 (Source : DUPUY)

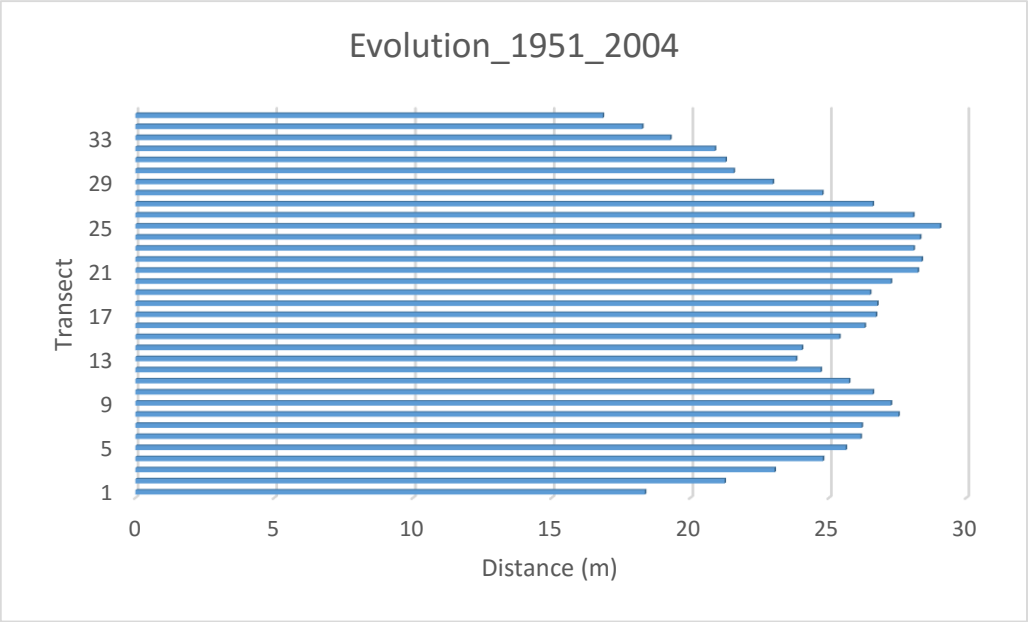


Figure 65 Evolution du trait de côte de Madiana entre 2004 à 2010 (Source : DUPUY)

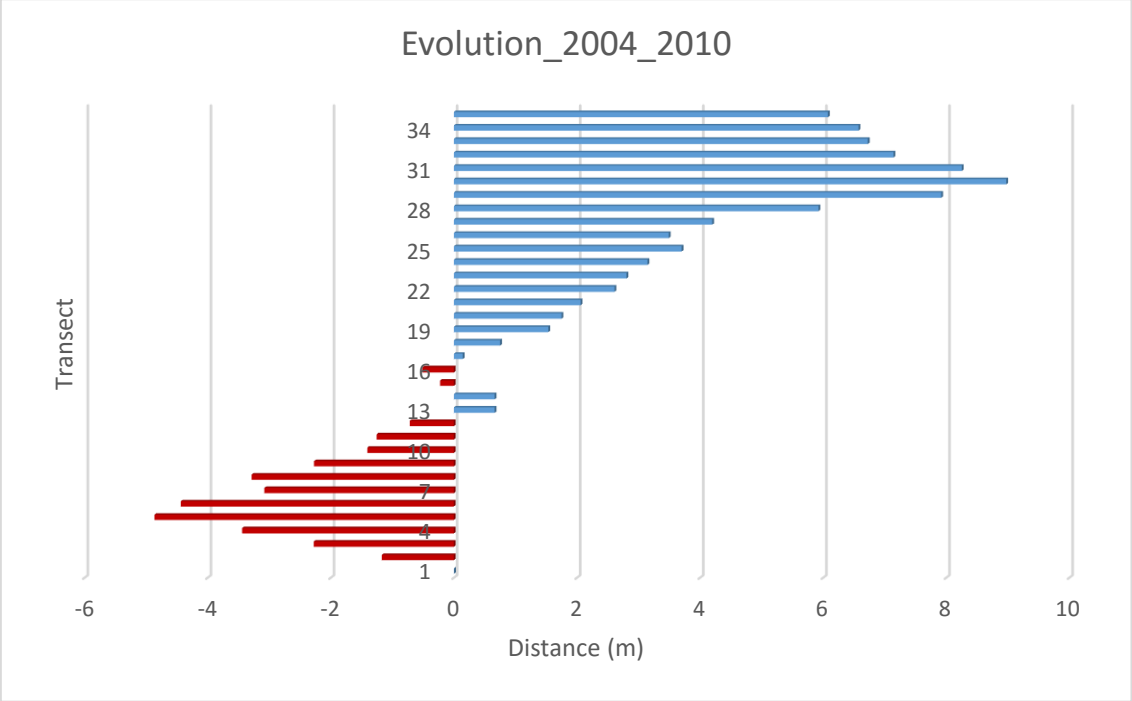


Figure 66 Evolution du trait de côte de Madiana entre 2010 à 2012 (Source : DUPUY)

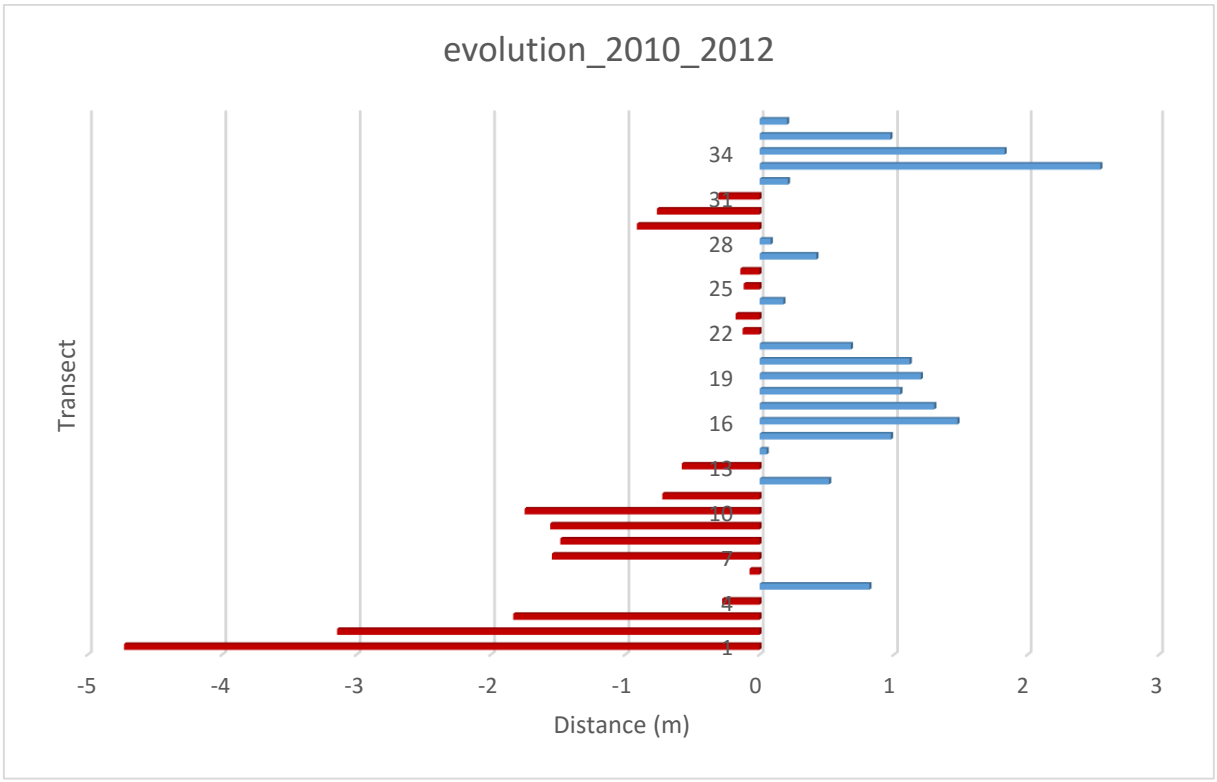
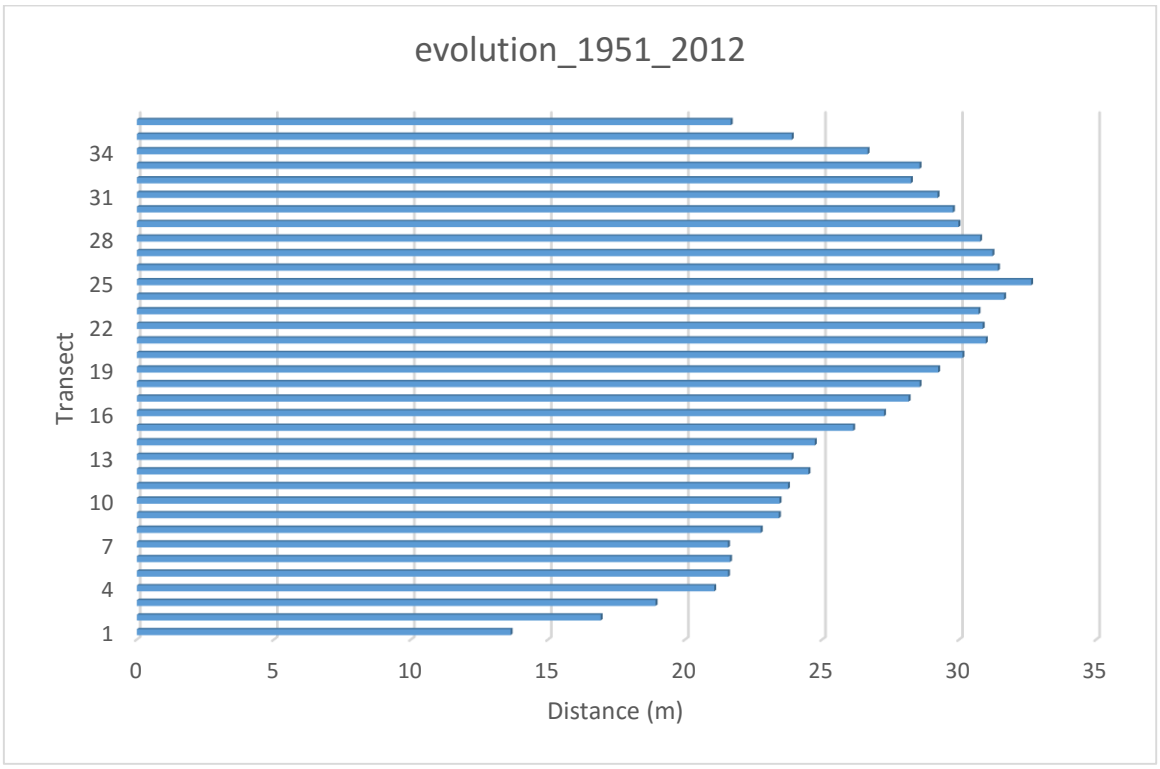


Figure 67 Trait de côte de Madiana entre 1951 à 2012 (Source : DUPUY)



Sur l'ensemble des plages étudiées, Madiana est la plage qui connaît l'accrétion la plus importante. En effet, l'avancée va de 14 à 33 m de 1951 à 2012. Toutefois, on constate que l'accumulation est plus importante au nord. On peut dire que sur le long terme la dérive littorale

Sud-est/ Nord- ouest dessine la morphologie de la plage. Cette dynamique n'est pas constante entre 1951 et 2012.

De 1951 à 2004, nous avons une accrétion très importante (de 18 à 38 m). De 2004 à 2010 nous constatons une large tendance à l'accrétion au nord de l'anse. Dans cette zone la plage s'élargit au maximum à 9m. Au sud, la plage s'érode au maximum à -5m. Entre 2010 et 2012, la dynamique semble moins évidente. Néanmoins on constate une tendance à l'accrétion au nord et une érosion au sud.

- **Conclusion**

Un certain nombre de points communs existent entre les plages de Schoelcher. En effet, une dynamique commune existe.

Entre 1951 et 2004, elles ont toutes tendance à s'accrêter. A partir de 2004, des dynamiques érosives apparaissent. Les zones d'érosion sont souvent à corréler avec la dynamique modale respective à chaque plage.

Certains éléments peuvent être les causes de l'érosion du littoral Schoelcherois. Sur les photographies aériennes nous constatons qu'à partir de 2004, il y a eu une concentration de la population sur le littoral. De plus nous savons, grâce à certains témoignages, qu'il y a eu beaucoup de prélèvements de sable à l'embouchure des rivières de Schoelcher. Enfin, nous savons que l'élévation du niveau de la mer de 0 à 3mm/an joue également un rôle érosif.

Sur une dizaine d'années, on constate que la dérive du littoral est plutôt Nord - Sud. Le prisme de sable de la plage de Madiana vient barrer la rivière, ce sable c'est donc redirigé vers le sud.
Sur l'année 2013, on constate une dérive modale sur l'ensemble de l'année qui va du sud vers le nord. Toutefois, il existe deux saisons qui peuvent complexifier cette dérive :

- la saison sèche,
- la saison des Alizés où il y a des périodes cycloniques.

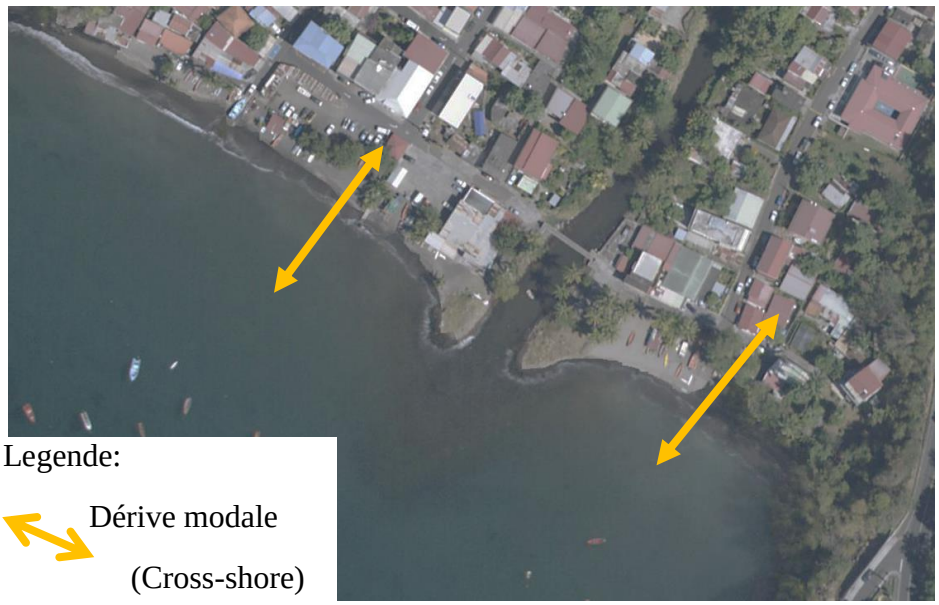
Ces saisons permettent des régimes de houles qui sont différents durant l'année. Il y a une répercussion sur les plages. Durant les saisons cycloniques, les plages ne bougent pas trop en raison des houles de moyenne intensité, cependant lors d'un passage d'une tempête (cyclones, ondes tropicales...) il y a un mouvement des houles beaucoup plus fortes. Lors de la saison des Alizés (entre décembre et mars), le littoral va beaucoup plus évoluer car les houles du Nord-est sont beaucoup plus fortes ; Elles vont contourner l'île de part et d'autre ce qui entraine une autre dérive du littoral dynamique sur le long terme.

- ## Dynamique de la plage de Fond Lahaye

Il n'y a pas de véritables dérives longitudinales, elles sont plutôt transversales. C'est-à-dire que le sable va descendre puis remonter durant les événements de fortes intensités ; les vagues vont emporter le sable vers l'avant-côte puis lorsque le temps est plus clément le sable remonte. Néanmoins, il y a de plus en plus d'aménagements qui brisent cet équilibre.

Les deux plages de Fond Lahaye ont une évolution de type transversale. Ce sont des plages plutôt équilibrées.

Figure 68 Lecture des évolutions longshore et cross-shore Fond-Lahaye (DUPUY, 2014)



Source: Arc Gis/ Image: photo-aérienne/ Echelle 1:1 868/ Date: 2010 / projection: WGS 84

- **Dynamique de la plage d'Anse Collat-Lido**

On a un transit qui va du sud vers le Nord. C'est une plage déséquilibrée (dérive longitudinale).

Figure 69 Lecture des évolutions longshore et cross-shore de l'Anse- Collat (DUPUY, 2014)

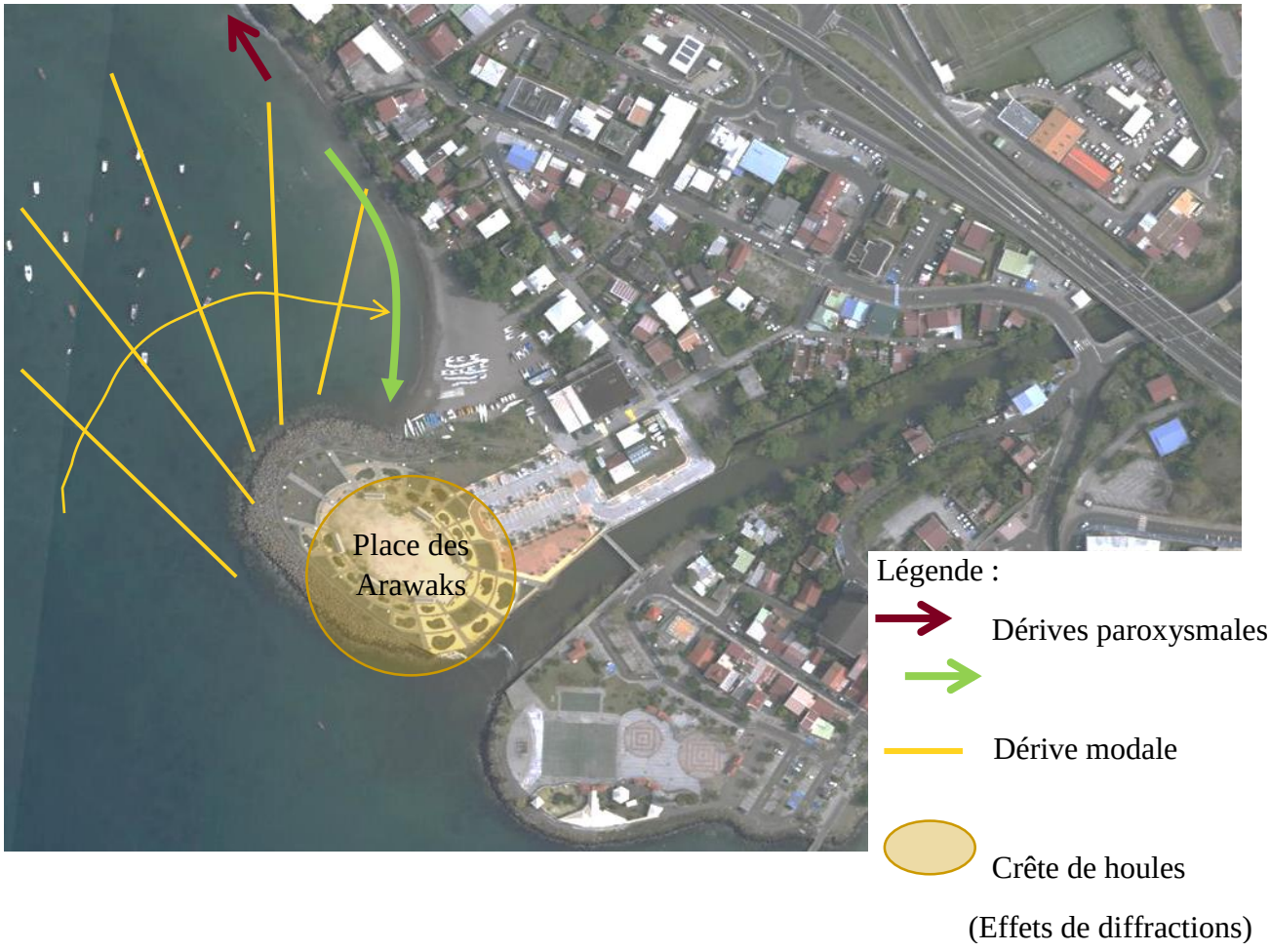
Source: Arc Gis/ Image: photo-aérienne/ Echelle 1:1 868/ Date: 2010 / projection: WGS 84

L'érosion est certainement amplifiée par la rivière durant les fortes pluies car la rivière va emporter de nombreux sédiments. Les patates bord de mer (*Ipomea*) retiennent le sable, c'est un bon indicateur de ce que l'on peut définir comme étant un trait de côte. Dès que la côte est en accrétion, les racines vont continuer à progresser et inversement quand il y a érosion, la plante va griller et déterminer la limite de la petite falaise (le trait de côte).

- **Dynamique de la plage d'Anse-Madame**

La Place Arawak modifie la propagation des houles. Elles sont réfléchies. Cette construction entraine également une dérive inversée Nord-Ouest Sud-est. En cas de tempête le transit est Sud-est Nord-Ouest.

Figure 70 Lecture des évolutions longshore et cross-shore de l'Anse-Madame (DUPUY, 2014)



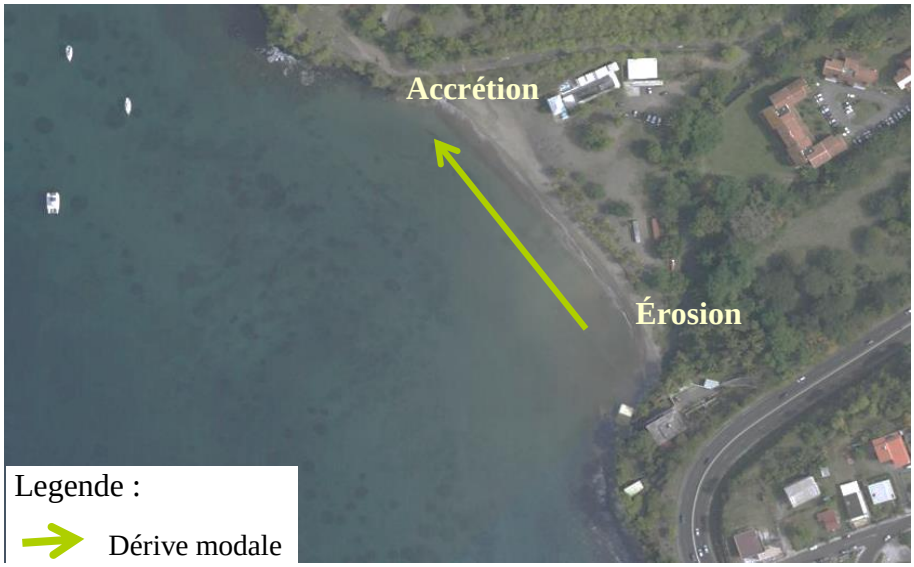
Source: Arc Gis/ Image: photo-aérienne/ Echelle 1:1 868/ Date: 2010 / projection: WGS 84

- **Dynamique de la plage de Madiana**

C'est une plage déséquilibrée avec une dérive de type longitudinale. Elle connaît deux schémas d'évolutions :

- transferts sableux transversaux lors de phases paroxysmales courtes,
- Dérive littorale modale orientée Sud-Est Nord-Ouest avec une possibilité de variante selon les houles.

Figure 71 Lecture des évolutions longshore et cross-shore de Madiana (DUPUY, 2014)



Source: Arc Gis/ Image: photo-aérienne/ Echelle 1:1 868/ Date: 2010 / projection: WGS 84

Après avoir expliqué le fonctionnement longshore et crosshore, nous pouvons maintenant étudier les profils de plage réalisés à Madiana, Anse-Madame et Anse-Collat.

Par la suite nous pourrons comparer nos profils avec ceux réalisés par DOLIQUE. F et CHARPENTIER J. Les profils de ces auteurs ont été publiés dans un article en 2014 « *Suivi topographique de l'évolution des plages de Schoelcher ».* J'ai travaillé sur les mêmes têtes de station. Toutefois il faut savoir que sur la plage de Madiana, une des têtes a été détruite lors de constructions.

Figure 72 les têtes de stations des plages de Schoelcher utilisées pour l'année 2015/2016 (source : DUPUY)

Source: Arc Gis/ Image: photo-aérienne/ Echelle 1:1 868/ Date: 2010 / projection: WGS 84

- **Anse Collat**

Figure 73 : Profil 100 au nord d'Anse Collat (source : DUPUY)

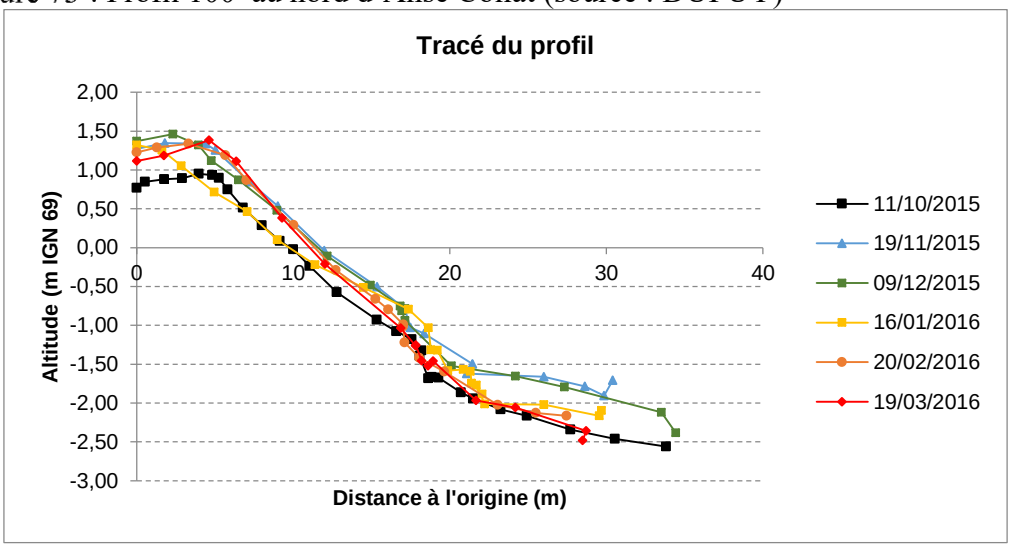


Tableau 4: Dynamique du nord de la plage d'Anse Collat (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation

Mois	Octobre/ novembre	Novembre/ décembre	Décembre/ janvier	Janvier/ février		Février/ mars	
P100 nord	+	=	-	Haut estran: +	Bas estran: -	Haut estran: -	Bas estran: +

Figure 74 profil 200 au centre de d'anse Collat (source : DUPUY)

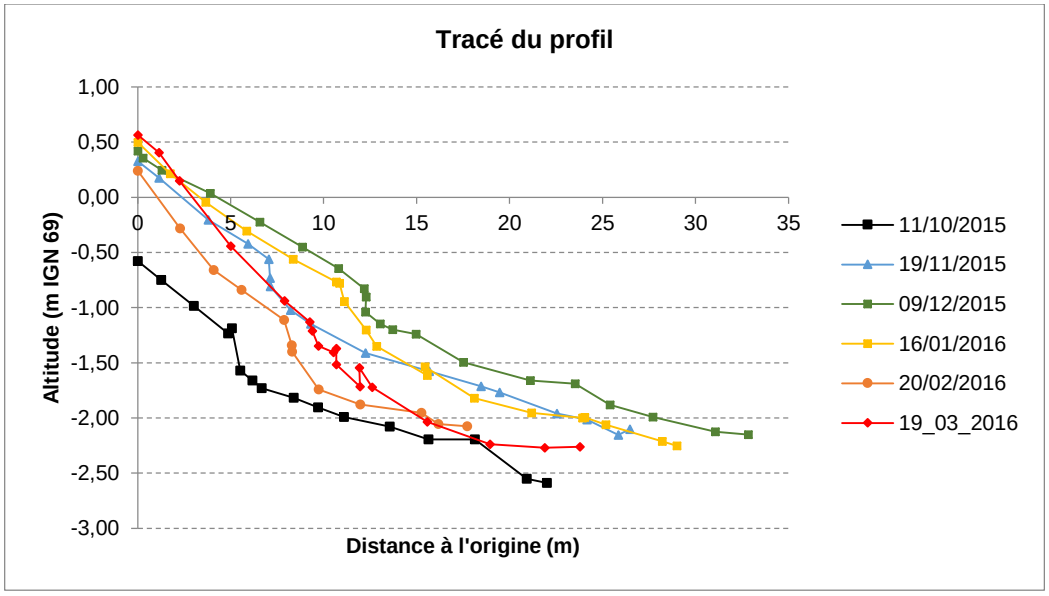


Tableau 5: Dynamique du centre de la plage d'Anse Collat (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation

Mois	Octobre/ novembre	Novembre/ décembre	Décembre/ janvier	Janvier/ février	Février/ mars
P200 (centre)	+	+	-	-	+

Figure 75 Profil 300 au sud de la plage d'Anse-Collat (source : DUPUY)

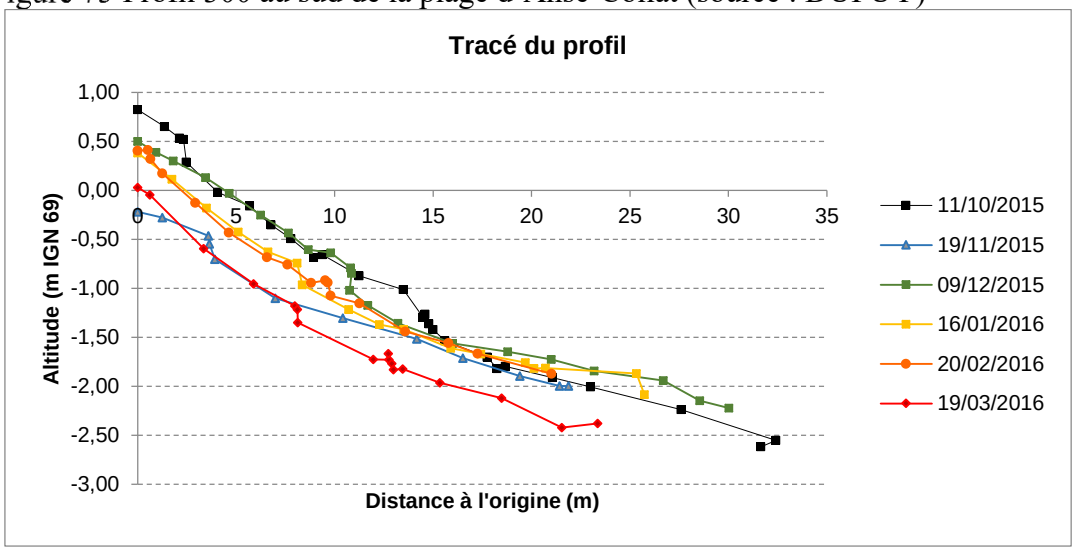


Tableau 6: Dynamique du sud de la plage d'Anse Collat (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation

Mois	Octobre/ novembre	Novembre/ décembre	Décembre/ janvier	Janvier/ février	Février/ mars
P300 (sud)	-	+	-	=	-

Du mois d'octobre à décembre, les profils 100 (nord de l'anse) et 200 (au centre) connaissent une forte accumulation. Au centre de la plage l'accrétion est beaucoup plus importante tandis qu'au nord, entre novembre et décembre, il y a une stabilisation. De décembre à février, pour les profils 100 et 200, nous constatons le phénomène inverse. Toutefois au nord, le haut de l'estran connait une accrétion durant le mois de février. En mars, nous avons une accrétion au centre de la plage. Au nord de la plage nous avons en haut de l'estran une érosion et en bas de l'estran une accrétion.

Le Sud de l'anse (P300) connaît une dynamique presque inverse. En effet, d'octobre à novembre, nous avons une érosion, durant le mois de décembre nous avons une accrétion. Alors que de janvier à février, nous avons une stabilisation et une érosion en mars.

- **Madiana**

Figure 76 Profil 100 au sud de la plage (source : DUPUY)

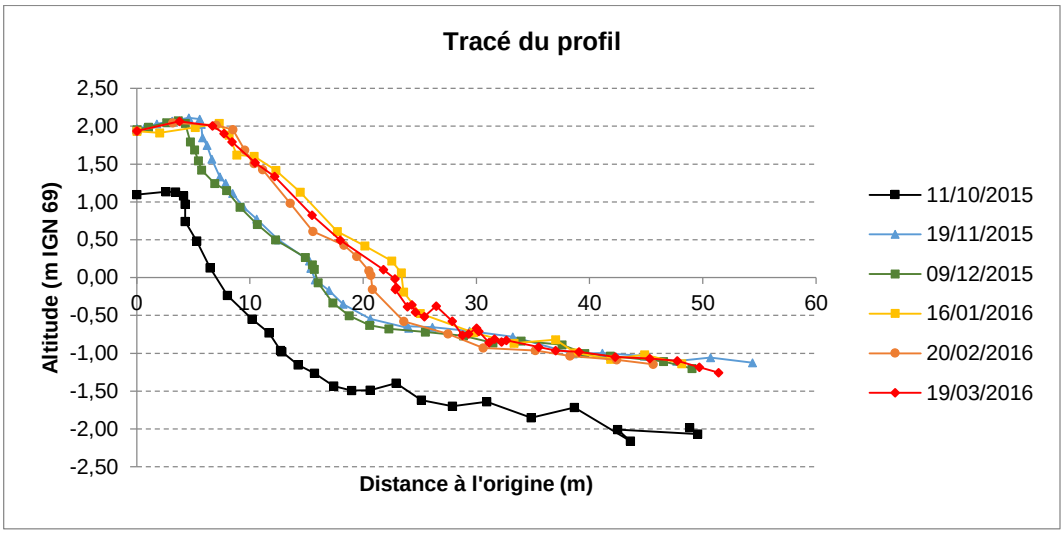


Tableau 7 : Dynamique du nord de Madiana (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation

Mois	Octobre/ novembre	Novembre/ décembre	Décembre/ janvier	Janvier/ février	Février/ mars
P200 sud	+	+	+	-	+

Figure 77 Profil 300 au nord de la plage (source : DUPUY)

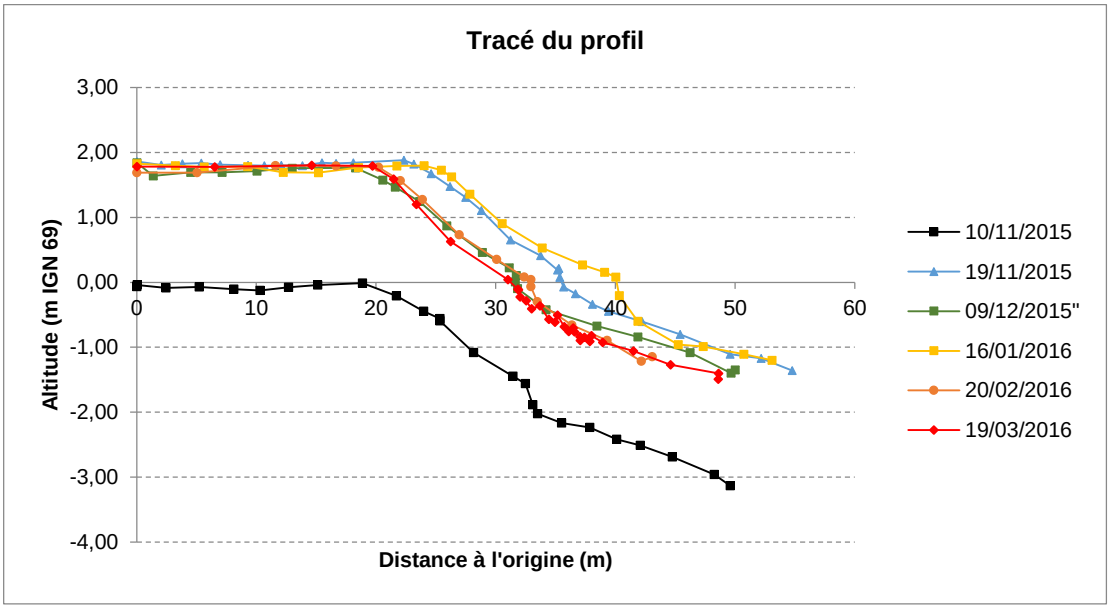


Tableau 8 : Dynamique du Sud de la plage de Madiana (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation

Mois	Octobre/ novembre	Novembre/ décembre	Décembre/ janvier	Janvier/ février	Février/ mars
P300 nord	+	-	+	-	-

Entre octobre et novembre, qui sont 2 mois appartenant à la période cyclonique, nous constatons au nord et au sud que nous avons une accrétion. De novembre à janvier, le nord connaît une accumulation alors qu'au sud nous avons au cours du mois de décembre une érosion et en janvier une accrétion. A partir de janvier, nous avons une érosion sur l'anse sauf au nord de l'anse en mars où nous avons une accumulation.

- **Anse-Madame**

Figure 78 Profil 100 au sud de la plage (source : DUPUY)

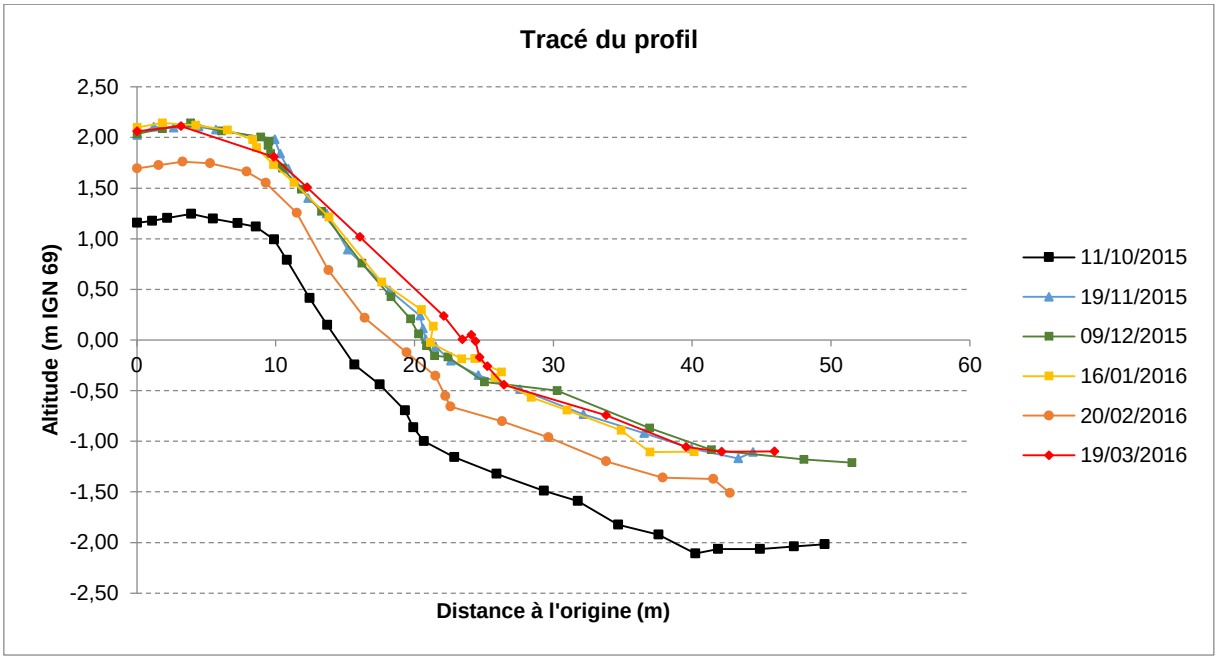


Tableau 9: Dynamique au sud de la plage (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation

Mois	Octobre/ novembre	Novembre/ décembre	Décembre/ janvier	Janvier/ février	Février/ mars
P100	+	=	=	-	+

Figure 79 Profil 200 au centre de la plage (source : DUPUY)

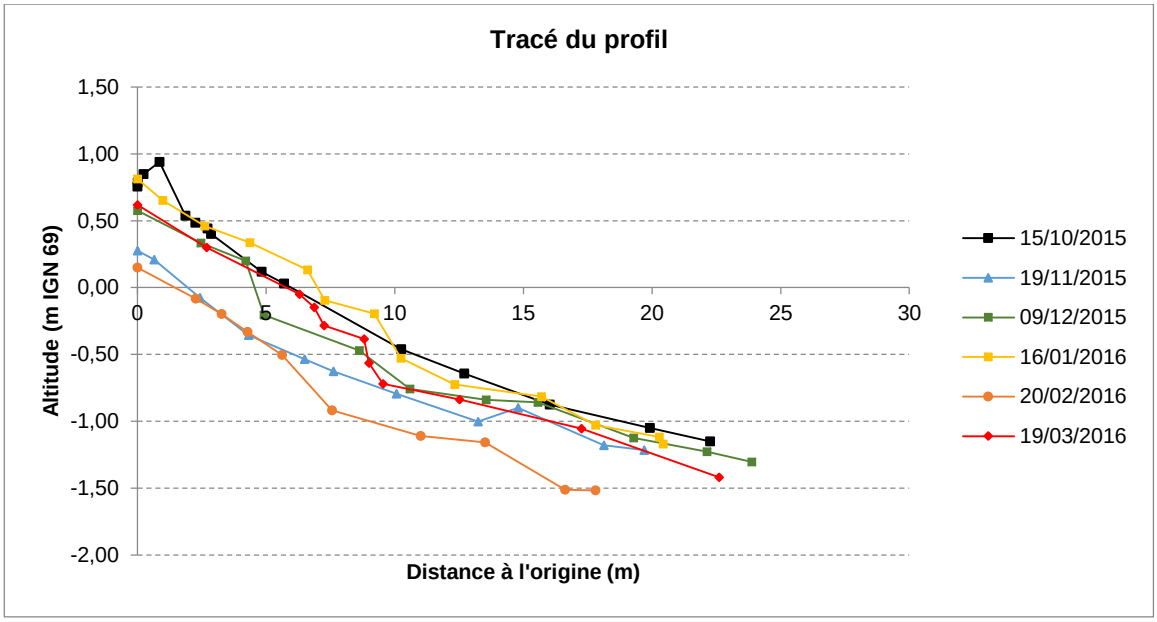


Tableau 10 : Dynamique au centre de la plage (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation

Mois	Octobre/ novembre	Novembre/ décembre	Décembre/ janvier	Janvier/ février	Février/ mars
P200	-	+	+	-	+

Le centre de l'anse a une tendance à la croissance durant le mois d'octobre (saison cyclonique). Le sud s'érode durant ce mois. De novembre à décembre, nous avons sur cette plage une dynamique plutôt positive. En effet au sud de l'anse, nous avons une accrétion et le nord reste plutôt stable. Mais à partir de janvier, nous constatons le phénomène inverse jusqu'au mois de mars, où l'accumulation reprend sa place.

- **Conclusion**

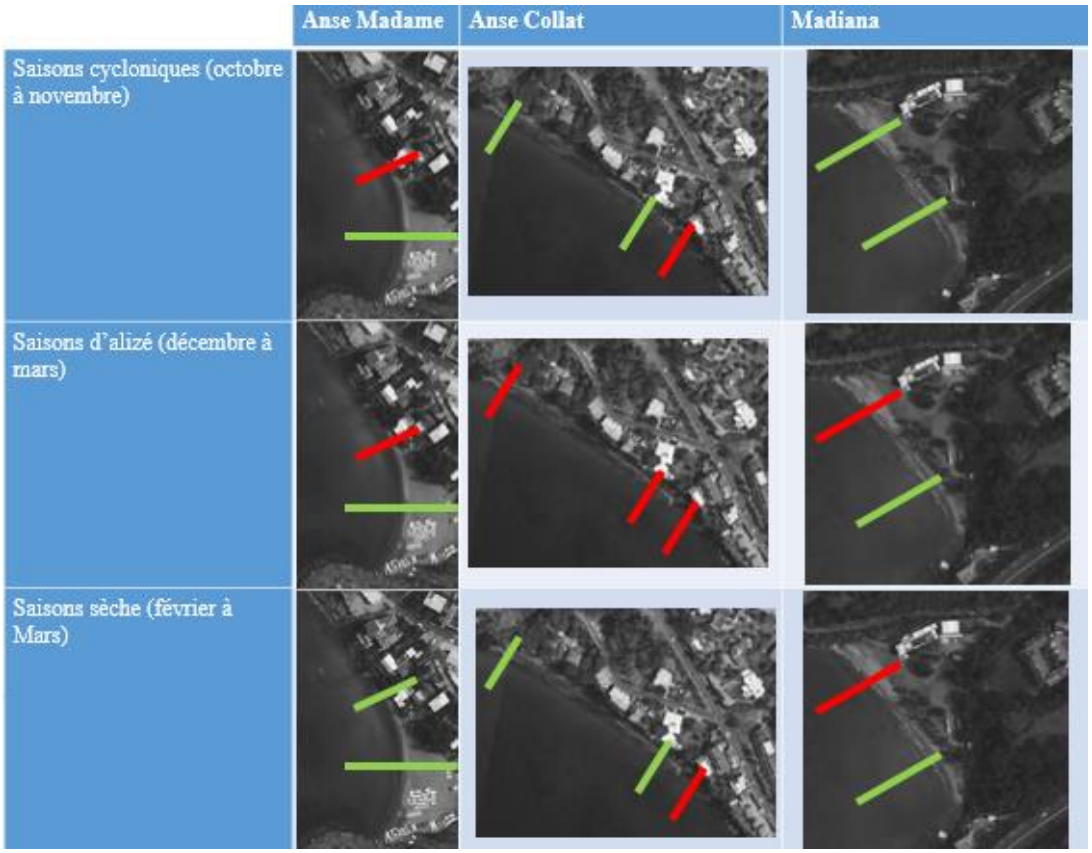
Après ces observations, nous pouvons confirmer la théorie de M.DOLIQUE et Mme CHARPENTIER. Ces auteurs ont démontré qu'à court terme les plages peuvent évoluer très rapidement. A moyen terme, on ressent l'impact de la dérive modale.

L'évolution des plages est dirigée soit par des variations stochastiques, saisonnière, ou par des phénomènes paroxysmales. Les plages connaissent des dynamiques d'érosions et d'accrétions. Les phénomènes météo-marins de forte intensité engendre l'érosion côtière. On a pu le prouver précédemment avec la tempête Ericka et les fortes houles de Janvier (p78). Les phénomènes de moyennes intensités favorisent la reconstruction sédimentaire des anses.

A moyen terme, la dynamique varie aussi selon les saisons. J'ai pu observer la dynamique suivante :

- Durant les saisons cycloniques les plages s'accrêtent,
- Pendant les saisons d'Alizé, les anses shoelcheroise ont tendance à s'éroder. Seul le sud d'Anse Madame et de Madiana connaissent une tendance inverse.
- En phase de saison sèche, la dérive littorale devient le facteur dominant de la morphologie des plages. Nous avons une érosion au sud et une accrétion au nord de Madiana et Collat. Anse Madame n'a de profil qu'au sud et au centre de la plage mais l'impact de la dérive modale sur cette plage pourra sûrement être confirmé par la suite.

Figure 80 Dynamique des plages selon les saisons (Dupuy) -> vert = accrétion ; Rouge= érosion

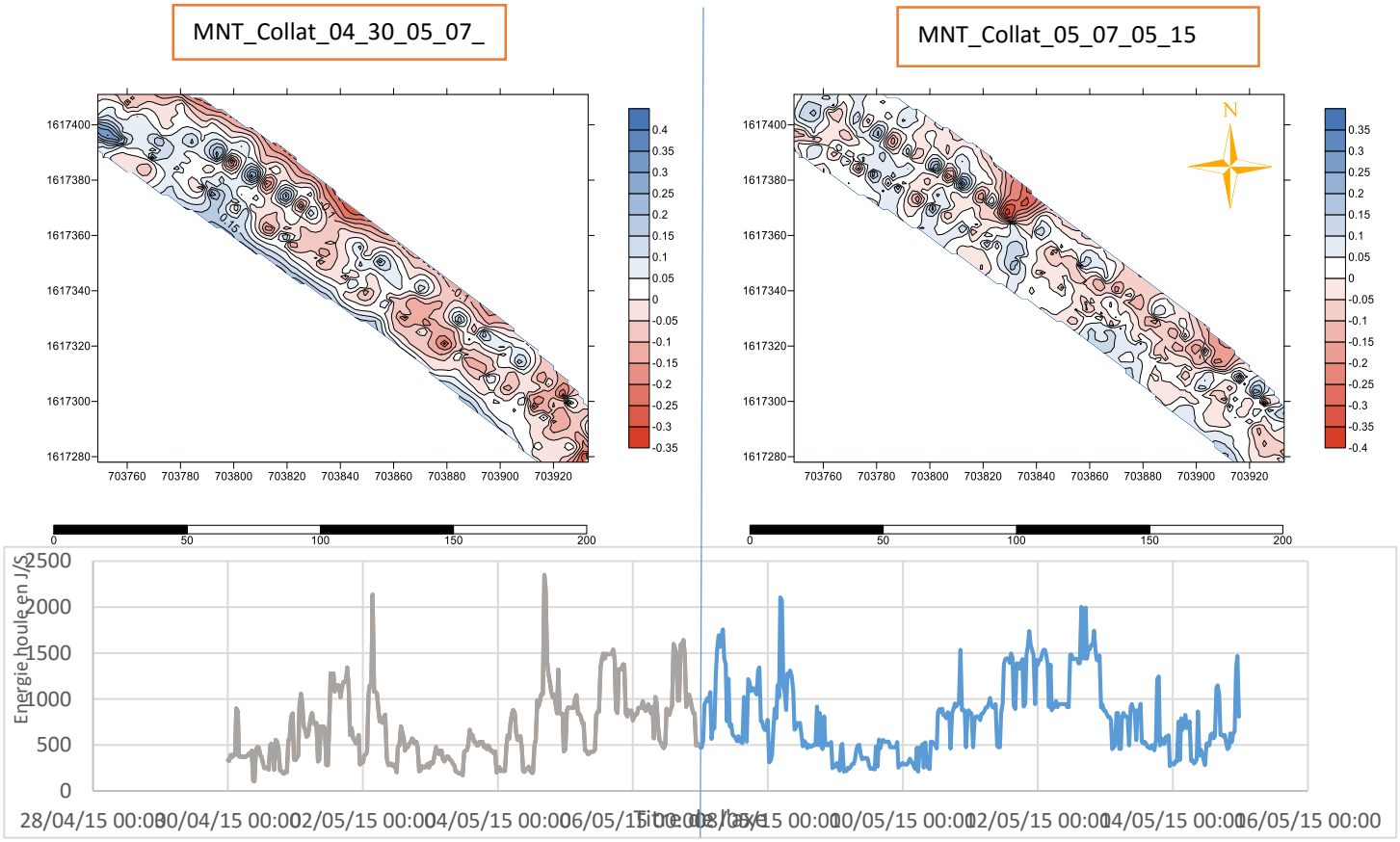


Source: Arc Gis/ Image: photo-aérienne/ Echelle 1:1 868/ Date: 2010 / projection: WGS 84

Au cours de l'année 2015, j'ai réalisé des MNT[35] sur les plages d'Anse Collat, d'Anse Madame et Madiana sous la direction de stagiaires de l'IRD qui sont BIGOT. A., (Anse-Collat) JOSSO.Q (Anse Madame) et COICAUD. A. (Madiana). Ils ont réalisé ces mesures pour leurs mémoires professionnels de première année. Anse Collat et Madiana ont été étudiés entre le 27 avril et le 28 mai. Anse Madame a été étudiée du 17 avril au 26 mai.

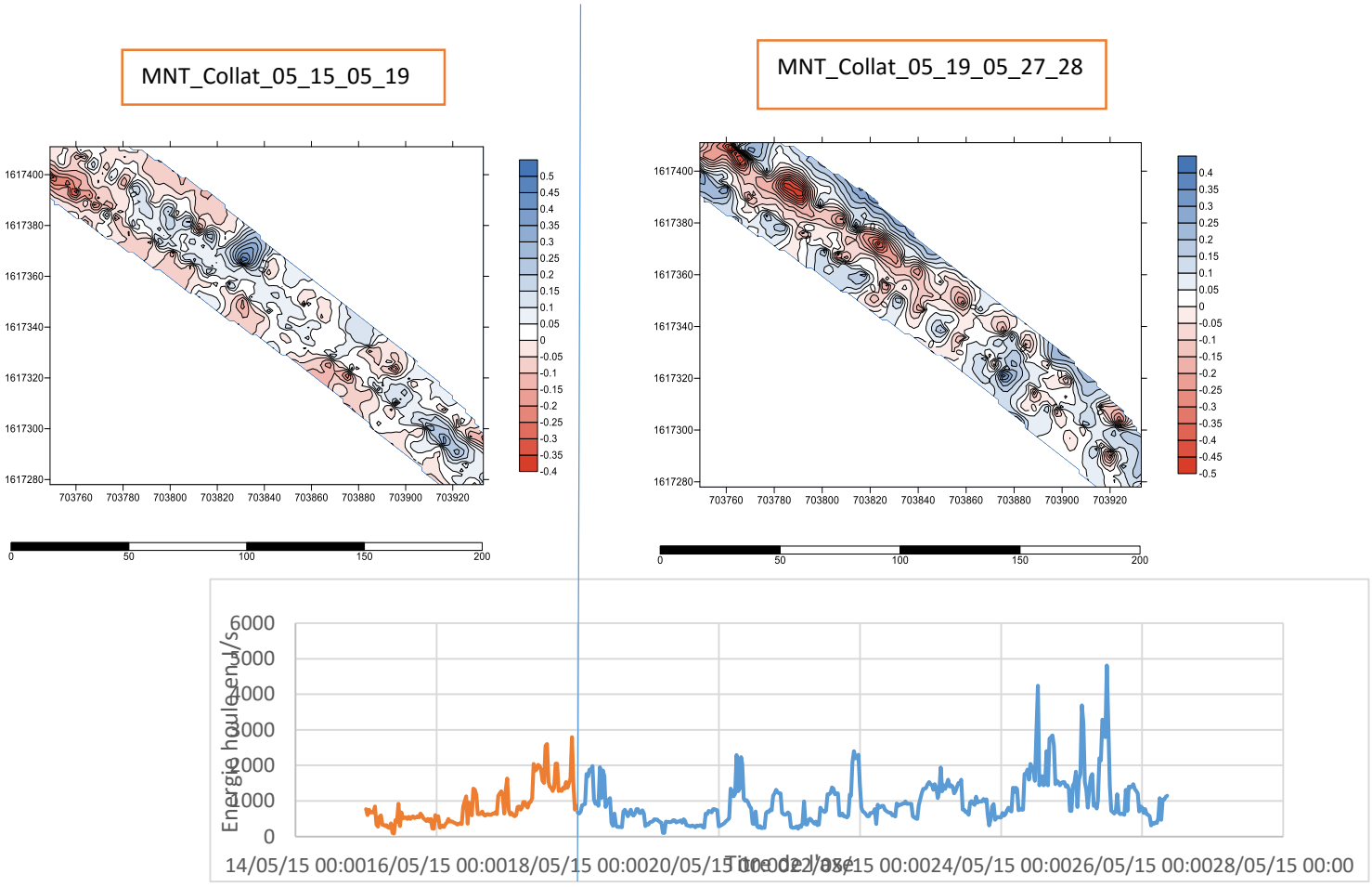
- **Anse Collat**

Figure 81 MNT différentiel entre le 30 avril et le 15 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 30 avril et le 15 mai



[35] MNT: modèle numérique de terrain

Figure 82 MNT différentiel entre du 15 au 27-28 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 15 au 27-28 mai



Durant notre période d'étude, on constate que sur la plage d'Anse Collat l'énergie journalière des houles connaitssent une force exponentielle :

- 30 avril au 06 mai : 58679093,28 Joules
- Du 07 au 14 mai : 68282126,27 Joules
- Du 15 au 17 mai : 71985253,44 Joules
- Du 18 au 26 mai : 78289791,08 Joules

Du 30 avril au 06 mai, les flux moyen d'énergie en joules sont de 58679093,28 J. C'est la période où l'énergie des houles a été la moins importante. On remarque durant cette phase une accumulation en bas de plage et une érosion sur presque la totalité du reste de la plage.

Il est intéressant de voir qu'il y a une phase intermédiaire. En effet au passage des houles de faible intensité (68282126,27 Joules du 07 au 14 mai) à celle de moyenne intensité (71985253,44 Joules du 15 au 17 mai) on constate que le bas de plage arrête son avancée pour tendre vers l'érosion. Les houles de moyenne intensité favorisent l'érosion.

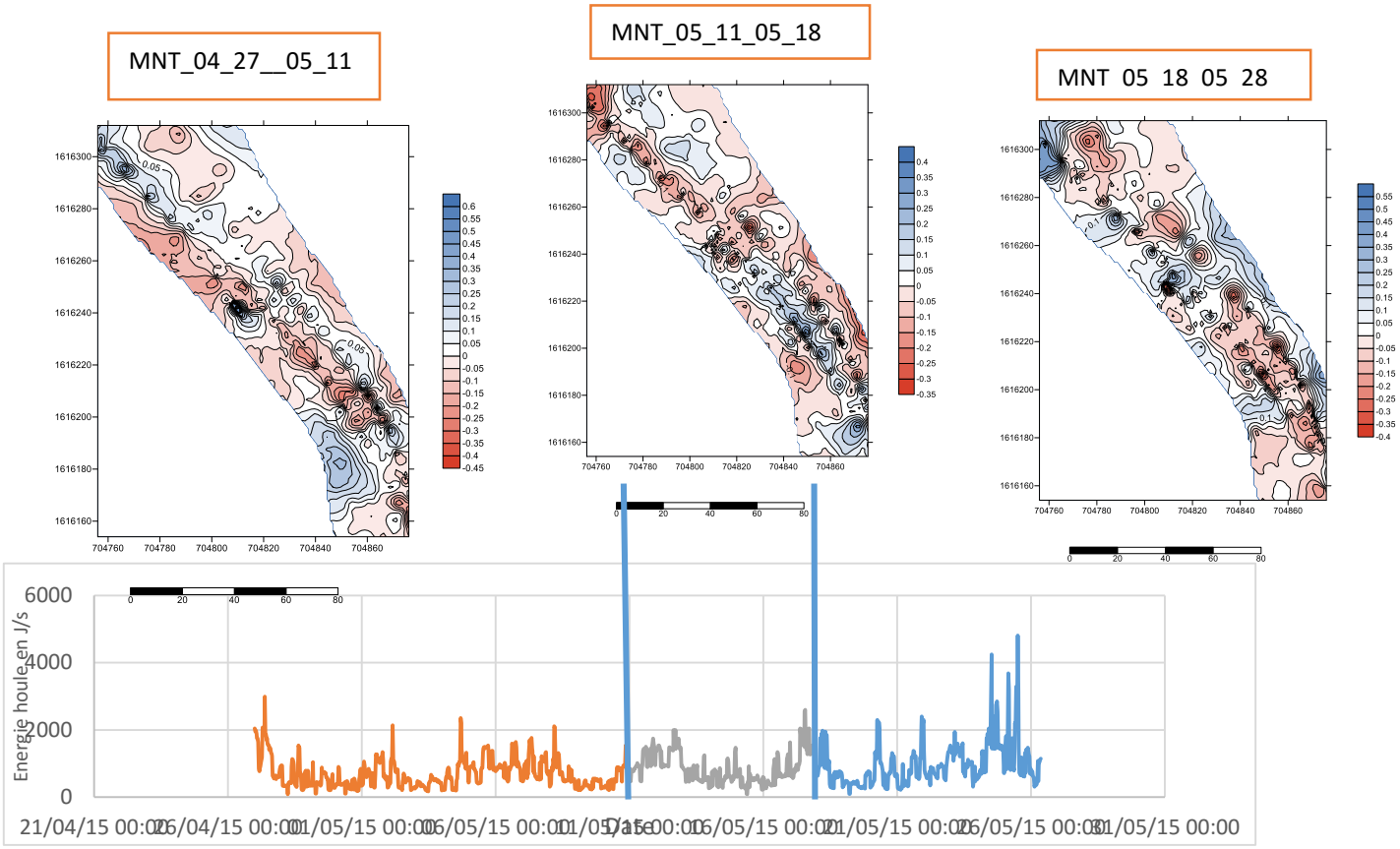
A court terme les houles de fortes énergies favorisent l'accrétion sur la plage d'anse Collat. On le voit à travers le MNT du 18 au 26 mai où l'énergie des houles était de 78289791,08 Joules

Tableau 11 : récapitulatif des dynamiques de plage d'Anse Collat

	04/30 -05/07	05/07-05/15	05/15-05/19	05/19-05/27_28
Haut de plage	Erosion globale jusqu'à -0,35m	- Érosion sur la majorité de l'anse 0,35m. Sauf au deus extrémité nord et sud où il y a une légère accrétion	- Tendance à l'accretion au sud - Érosion au nord avec un maximum de -0,15m	- Accumulation sur l'ensemble du haut de plage avec un maximum de 0,35m
Berme d'arrière plage	- Tendance à l'accrétion avec un maximum de 0,2m sauf au centre et au sud où nous avons une tendance contraire	Tendance à l'érosion au sud et à l'accrétion au nord	Tendance à l'accumulation avec un maximum de 0,5m au centre	- Tendance à l'érosion au nord avec un maximum de -0,5m - tendance à l'accumulation au sud plutôt faible
Rupture ou ligne de déferlement	- Erosion au sud allant jusqu'à 0,15m - Accrétion au nord d'un maximum de 0,25m	- Tendance au nord difficile à déterminer car il y a à la fois érosion et accrétion mais il semblerait tender plutôt vers l'accrétion - . Le sud tend vers l'érosion (max: -0,15m).	- Tendance à l'accrétion avec une avancé maximale de 0,5m au centre. - légère érosion à l'extrême nord	érosion: elle est la plus importante au nord avec un maximum de -0,5m
Bas de plage	- Accrétion sur l'essentiel de la plage sauf au nord où il y a une petite érosion de-0,1m	Tendance à l'accrétion avec un maximum de 0,15m	- Érosion avec un maximum de -0,15m	- tendance à l'accrétion avec un maximum de 0,2m

- **Madiana**

Figure 83 MNT différentiel entre le 27 avril et le 28 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 04 avril et le 15 mai



Durant la période d'étude, l'énergie journalière des houles croît au fil des jours. Il n'y a pas de houle de faible intensité durant la période d'étude sur la plage de Madiana :

- Du 27 avril au 10 mai : 64824119,88 Joules
- Du 11 au 17 mai : 75867045,08 Joules
- Du 18 au 28 mai : 78289791,08 Joules

Nous constatons que durant la période du 27 au 10 mai où les houles sont de moyenne intensité, l'érosion est assez importante en bas de plage (sauf au sud de l'anse, où il y a accumulation) et sur le reste de l'anse. Du 11 - 17 mai au 18-28 mai, nous constatons une gradation. En effet nous pouvons observer que plus on avance dans le temps et plus la plage temps vers l'accrétion.

Nous constatons que la dynamique de la plage de Madiana à court terme est dirigée par l'énergie des houles. Les houles de moyenne énergie favorisent l'érosion alors que celles de forte intensité génèrent une reconstruction sédimentaire.

Tableau 12 : Récapitulatif des dynamiques de plage de Madiana

	04/27 -05/11	05/11-05/18	05/18-05/28
Haut de plage	- Érosion sur presque la totalité de l'anse avec un maximum de -0,2m. - Légère accrétion sur l'extrême nord	- Érosion sur l'ensemble de la plage et surtout au sud avec un maximum de -0,35m	- accrétion sur presque la totalité de l'anse - - légère érosion au nord de -0,1m
Berme d'arrière plage	- Érosion au nord - Tendance à accretion au sud	- Érosion au sud avec un maximum de -0,2m - Légère accrétion au nord allant jusqu'à 0,2m	- Tendance globale à l'érosion avec un maximum de - 0,4m
Rupture ou ligne de déferlement	- Nord : accrétion avec un point culminant à 0,5m - Sud : erosion (max:-0,35)	- Nord= érosion avec un maximum de -0,35m - Sud: accrétion avec des points culminants à 0,4m	- - tendance à l'érosion (max -0,4m) sauf au centre où il y a une légère accrétion de 0,45m
Bas de plage	- Nord érosion avec un point culminant de -0,25m - Sud : accumulation avec un maximum de 0,5m	- Érosion avec un maximum de -0,2m - Légère accrétion au centre et au nord de 0,1m	- Accrétion maximal de 0,5m - Érosion à l'extrême sud et au centre

- **Anse Madame**

Figure 84 MNT différentiel entre le 17 avril et le 06 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 17 avril et le 06 mai

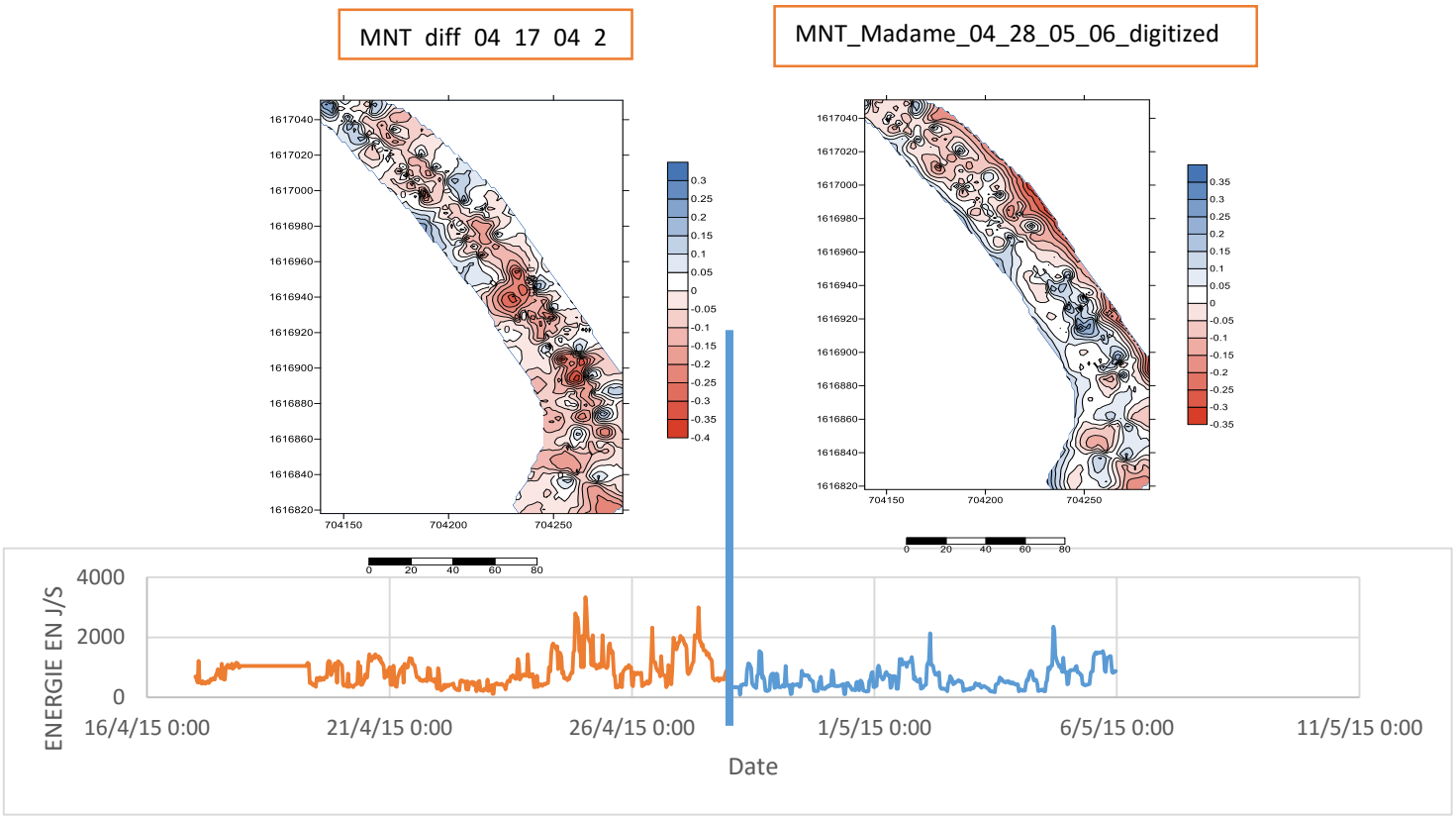
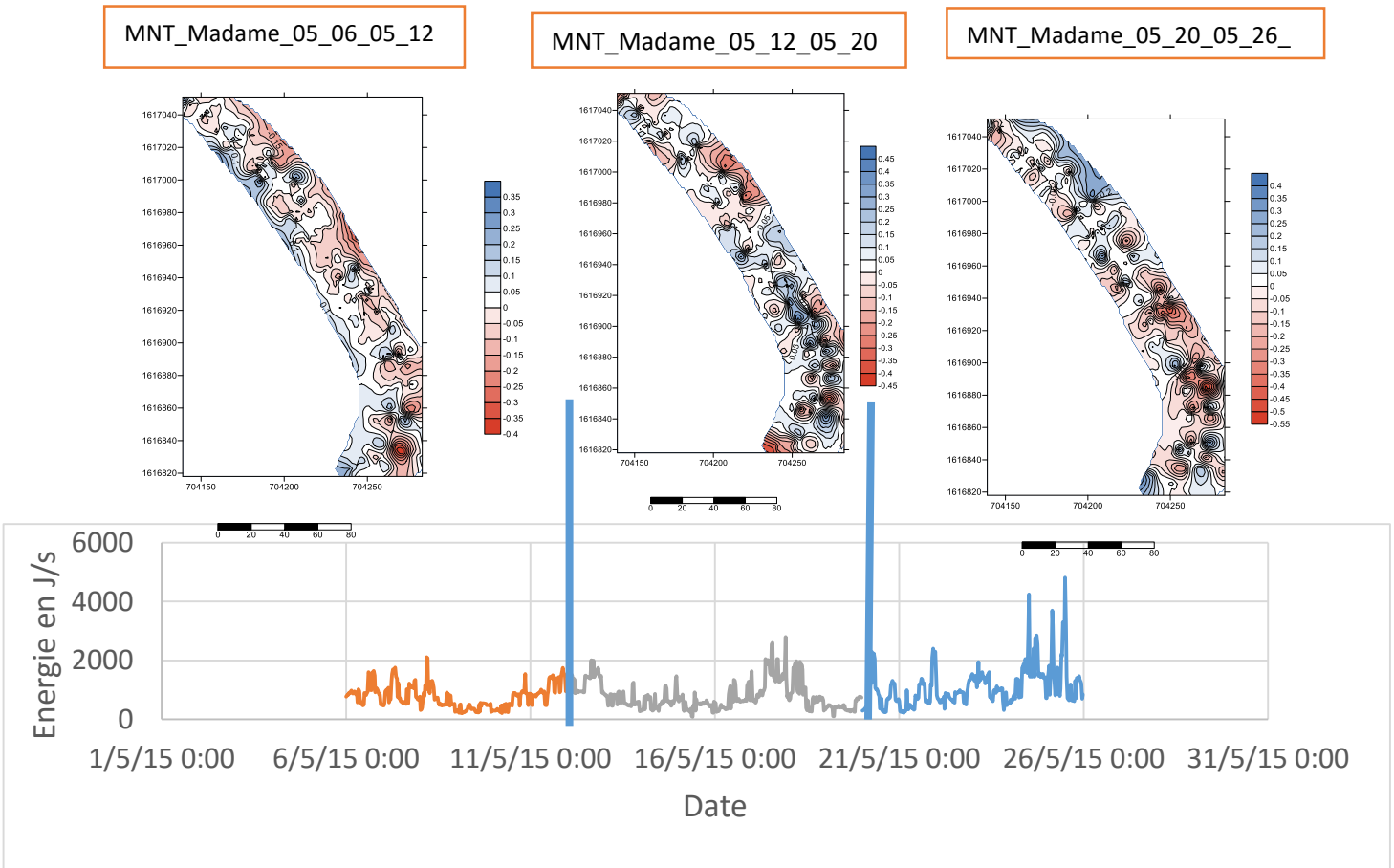


Figure 85 MNT différentiel entre le 17 avril et le 06 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 17 avril et le 06 mai



Durant notre période d'étude (du 17 avril au 26 mai), Nous avons constaté que sur la plage d'Anse Madame l'énergie journalière des houles varie de la façon suivante :

- Du 17 au 28 avril : 65497272,27 Joules
- Du 28 avril au 06 mai : 52650793,16 Joules
- Du 06 au 12 mai : 67360472,07 Joules
- Du 12 au 20 mai : 68785262,35 Joules
- Du 20 au 26 mai : 95010961,04 Joules

Du 17 au 28 avril nous avons des houles de moyenne intensité et la plage tend vers l'érosion. Après cette période l'énergie de la houle diminue et le bas de la plage tend vers une reconstruction sédimentaire, tandis que le haut de plage s'érode fortement.

Après une période de faible énergie de houle, l'énergie s'intensifie du 06 au 12 mai. La plage s'érode en haut de plage et croit en bas de plage. Du 12 au 20 mai l'énergie des houles s'accroît de nouveau. Une aussi longue période, où la plage subit des houles de moyennes énergies, favorise une reconstruction sédimentaire au sud et une légère érosion en haut de plage au nord.

Pour les houles de très fortes intensités, du 20 au 26 mai, on constate que le MNT[36] tend vers l'érosion au sud et s'accrête au nord de la plage par rapport au MNT du 12 au 20 mai.

La dynamique de la plage d'anse Madame n'est pas la même que les autres plages. On constate que les houles de faible intensité génèrent une reconstruction sédimentaire en bas de plage tandis que le haut de plage s'érode énormément. Les houles de moyennes intensités tendent vers l'accrétion sur un temps plus ou moins long (ex : les MNT du 06 au 20 mai de la figure 83). Les houles de fortes énergies favorisent une érosion.

Cette différence de dynamique est sûrement dûe à la mise en plage de la place Arawak.

[36] MNT: modèle numérique de terrain

Tableau 13 : Récapitulatif des dynamiques de plage d'Anse Madame

	04/17 -04/28	04/28- 05/06	05/06-05/12	05/12-05/20	05/20-05/26
Haut de plage	Légère érosion d'un maximum de -0,15m sauf au nord où il y a une petite accretion 0,05 à 0,1m	Érosion jusquà -0,35m	Tendance à l'érosion	Érosion au nord et au sud d'un maximum de -0,2m et une accretion au centre qui culmine à 0,25m	Accrétion au nord (maximum=0,4 m) et une tendance erosive au sud.
Berme d'arrière plage	Érosion d'un maximum de -0,2m	Tendance erosive au nord Tendance à l'accumulation au sud qui culmine à	Tendance à l'erosion avec une maximum de -0,4m au sud.	Tendance à l'erosion avec un maximum de -0,25m	Tendance à l'erosion au sud (max:-0,5m) Tendance à l'accretion à l'extreme nord (max: 0,3m)
Rupture ou ligne de déferlement	Érosion avec un point culminant au sud de -0,4 Légère accrétion à l'éxtrême nord (max: 0,25m)	Légère erosion au nord et une tendance à la stabilité et à l'accumulation au sud	Tendance à l'erosion. Elle est très légère avec un maximum-0,2m	Tendance à l'accretion. Ce phénomène se resent surtout au centre avec un point culminant de 0,45m	Érosion : elle est plus importante au sud avec un maximum de -0,3. Accrétion au centre. (max:0,4m)
Bas de plage	Érosion au sud avec un maximum de -0,15m Tendance à la reconstructi on au centre et à l'extreme nord avec un maximum de 0,3m	Accrétion sur l'ensemble du bas de plage mais surtout au sud.	Accrétion homogène avec un maximum de 0,25m	Tendance à l'érosion au nord tendance à l'accumulati on et a à la stabilisation	Tendance à l'erosion avec un maximum de 0,2m

Nous avons également réalisé Trois Bandes MNT sur la plage d'Anse Madame pour connaitre son évolution sur un an. Une a été réalisée en mai 2015 l'autre en mars 2016.

Figure 86 position des bandes MNT

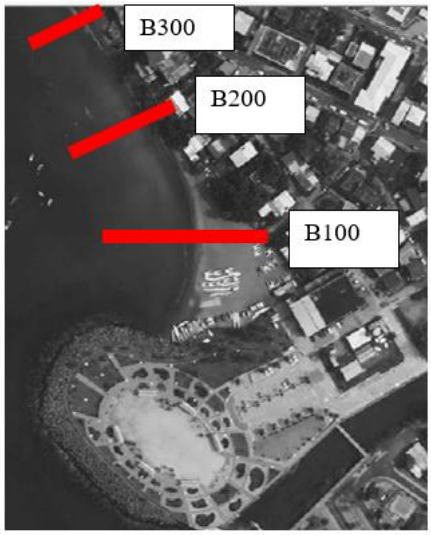


Figure 87 Bande 100 (au sud de l'anse)

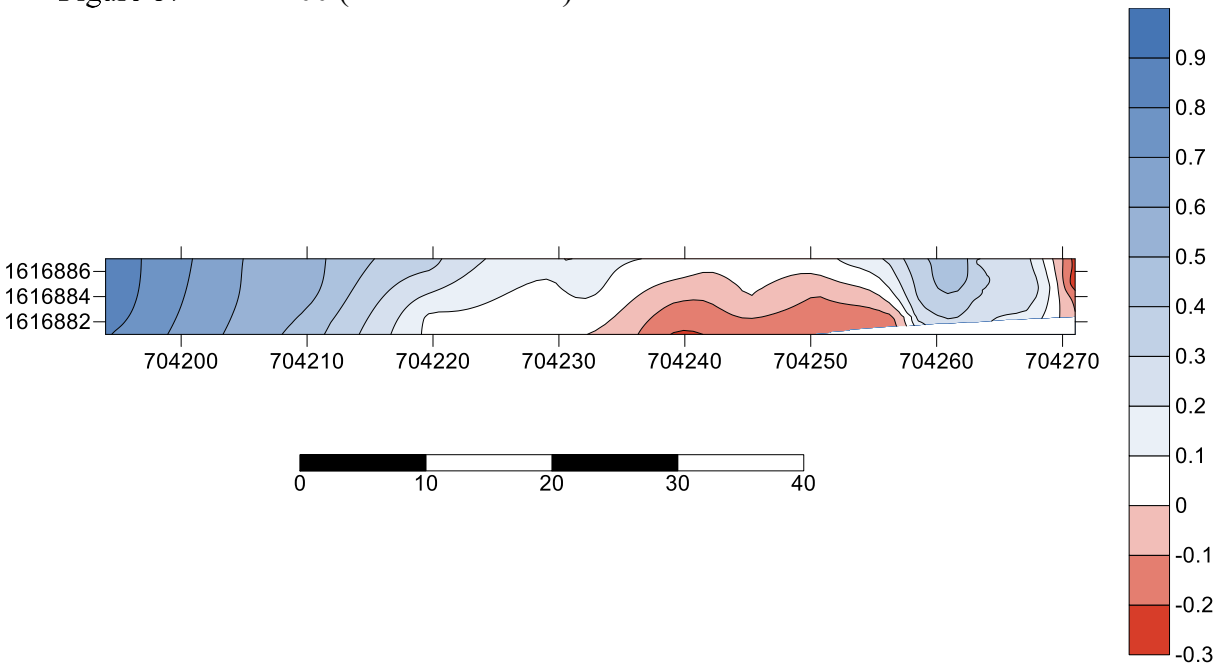


Figure 88 Bande 200 (au centre de l'anse)

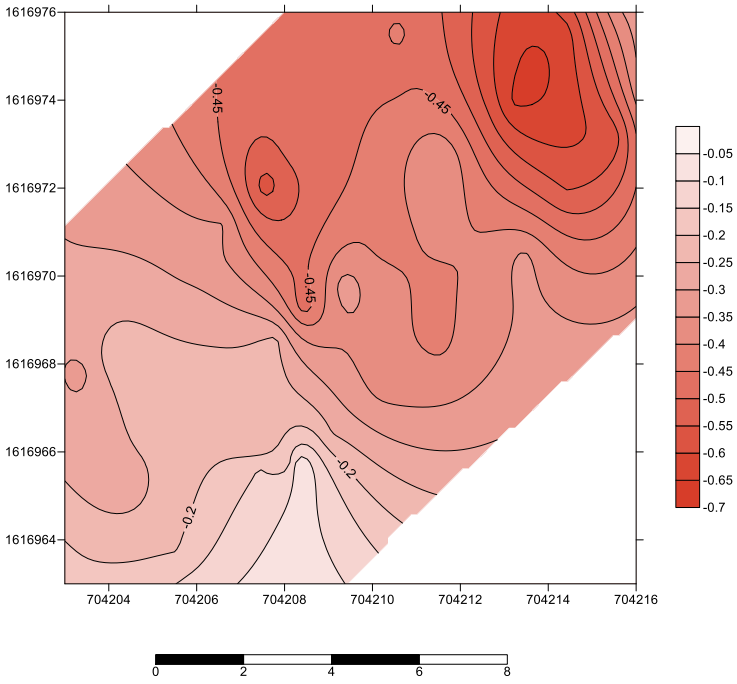
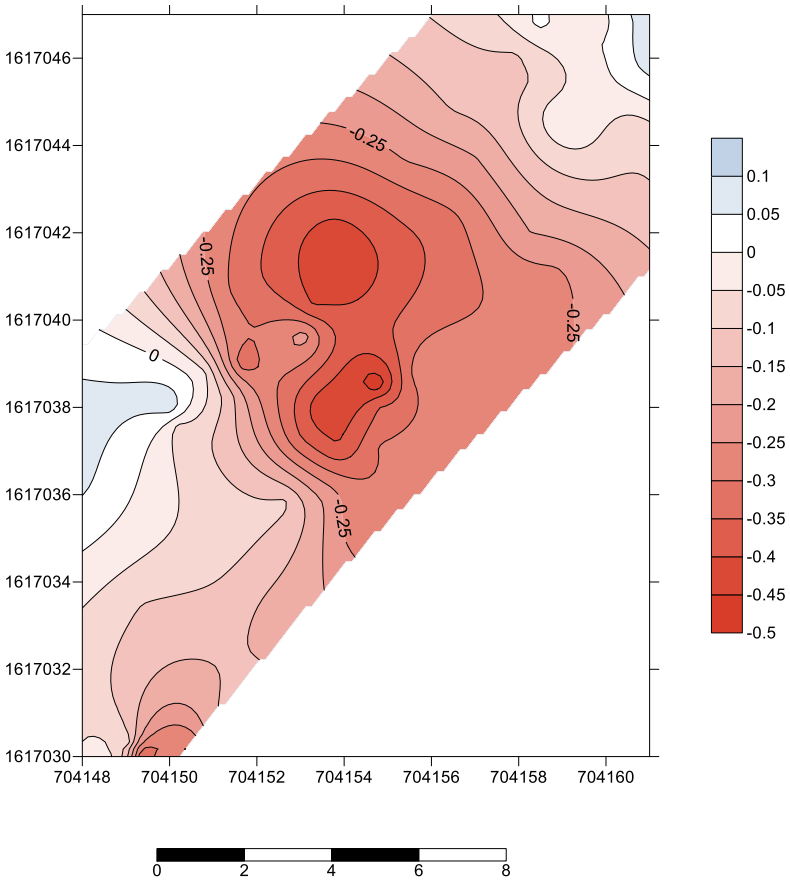


Figure 89 : Bande 300 (au nord de l'anse)



Ces bande nous permettent de confimer l'impact de la dérive modale, à long terme, sur la plage d'Anse Madame. En effet, le dérive modale Nord-Ouest / Sud-Est permet une accrétion au nord avec un maximum de 0.9m en bas de plage. Puis nous avons une érosion au centre avec un point culminant de 0.7m au niveau de la ligne de déferlement. Enfin, nous avons également une érosion assez importante au nord de l'anse. Il y a un recul important au niveau de la ligne de rupture de -5m).

- **Conclusion**

Nous constatons que la dynamique de la plage de Madiana et d'Anse Collat à court terme est dirigée par l'énergie des houles. Les houles de faible intensité favorisent une accrétion pour Anse Collat. Les houles de moyenne énergie favorisent l'érosion alors que celles de forte intensité génèrent une reconstruction sédimentaire.

Anse Madame a une dynamique légèrement différente On constate que les houles de faible intensité génèrent une reconstruction sédimentaire en bas de plage tandis que le haut de plage s'érode énormément. Les houles de moyennes intensités tendent vers l'accrétion sur un temps plus ou moins long. Les houles de fortes énergies favorisent une érosion.

Schœlcher fait partie des villes du centre de la Martinique. C'est une commune fortement peuplé avec environs 20 103 en 2012. En raison du relief la population est concentrée sur le littoral. C'est donc pour des questions de nécessité que cette étude a été réalisée. Une approche à plusieurs échelles de temps nous permet de mieux comprendre les dynamiques du littoral.

A long terme la dérive se fait en fonction de la dérive modale. A moyen terme c'est la saisonnalité ou les évènements paroxysmaux qui redessinent les anses. A court terme l'énergie des houles est prédominante.

Chaque plage à ces spécificités c'est pourquoi il est important de faire une étude sur chaque plage.

Tableau 14 : Les tendances dynamiques à chaque échelle de temps

	Impact de la dérive modale	Saisons et évènement paroxysmaux	Energie houles
Madiana	De 1951 à 2004 on a une accrétion. A partir de 2004 on a une érosion au sud et accumulation au nord	- les saisons des alizés et sèches = érosion au nord et l'accrétion au sud - saisons cycloniques génèrent une accrétion	Les houles de moyenne énergie favorisent l'érosion alors que celles de forte intensité génèrent une reconstruction sédimentaire
Anse-Madame	Entre 1951 et 2004, l'accrétion de la plage se fait surtout au niveau de l'embouchure de Case Navire au sud de L'anse. Entre 2004 et 2010, la zone d'érosion s'est étendue jusqu'au centre de la plage. De 2010 à 2012, la dynamique est moins évidente. Toutefois on constate une accrétion au sud et au nord de l'anse. Alors qu'au centre il y a une faible érosion	-saisons cycloniques et d'alizés : on a une érosion au centre et une accumulation au sud -saisons sèches = accumulation	les houles de faibles intensités génèrent une reconstruction sédimentaire en bas de plage tandis que le haut de plage s'érode énormément. Les houles de moyennes intensités tendent vers l'accrétion sur un temps plus ou moins long. Les houles de fortes énergies favorisent une érosion

Anse-Collat	Entre 1951 et 2004, Collat a connu essentiellement une accrétion. Entre 2004 et 2010, nous avons un schéma totalement inverse. Nous avons une forte tendance à l'érosion	-les saisons des alizés = érosion - durant les saisons cycloniques et sèches on a une accrétion au nord et au centre. Au sud nous avons une érosion	Les houles de faibles intensités favorisent une accumulation en bas de plage et une érosion sur presque la totalité du reste de la plage. Les houles de moyennes intensités favorisent l'érosion. Enfin, les houles de fortes énergies favorisent l'accrétion

Ainsi nous constatons que selon l'échelle de temps la dynamique littoral varie selon l'échelle de temps. Il est donc important de corréler les données pour choisir une technique adapté.

De nombreuses solutions existent dans le monde pour faire face à l'érosion. Dans la partie suivante nous étudierons leurs intérêts sur les plages de Schœlcher.

Le géotextile est une technique récente qui peut être mise en place rapidement et qui a peu d'impact environnemental. Mais elle a une durée de vie courte ce qui sous-entend qu'il faut régulièrement en réinstaller. De plus, il faut réaliser de nombreuses études préalables concernant la profondeur et l'alignement du géotextile, les sédiments etc.

A plusieurs reprises, cette technique a su démontrer sa nécessité sur les plages. Toutefois, Très peu d'études ont été réalisé sur les sables de types microtidaux qui sont caractéristique des plages martiniquaises. On ne peut déterminer à l'avance l'impact que cela pourra avoir sur les plages. Cette technique, à mon sens garde un intérêt certain. On pourrait faire une étude à ce sujet.

Les récifs coralliens favorisent et améliorent tel que le surf, la pêche ou encore la plongé. Elle permet de recréer un milieu pour la faune et la flore donc favorise l'apparition de zone de pêches. Elle limite l'impact des houles. Mais il faut faire de nombreuses études préalables pour connaître le type de matériel qui serait le plus adapté, le choix de la profondeur, de l'emplacement, le but etc. De plus les scientifiques on tendances à se concentrer sur l'impact positif qu'ils ont sur le biotope.

Bien qu'elle puisse générer un certain nombre d'avantage, on ne peut prévoir l'impact qu'ils pourraient générer sur les plages.

La revégétalisation a l'avantage d'être peu coûteux. Elle limite l'érosion. En insérant des plantes avec un réseau racinaire important comme l'Ipomoea pes-caprae (patate bord de mer). Cela permet une stabilisation du sable et une limitation des dégâts liés aux piétinements.

Toutefois, il faut savoir que l'extension des couvertures végétales est limitée. Elle est impossible en forte pente. De plus, il faut une surveillance périodique pour s'assurer que la croissance végétale se déroule bien.

C'est donc une technique qui aurait pu être intéressante sur les plages schoelcheroise. Néanmoins, en raison des limites cité précédemment la revégétalisation s'avérerait fortement limiter au nord et au centre d'Anse Madame. Le faible espace et les constructions à proximité de l'Anse risqueraient d'empêcher la mise en place de cette technique. De plus sur Anse Madame il y a de nombreuses activités nautiques qui la rende impossible.

Ce qui nous conduit au rechargement. Il a l'avantage de compenser les déséquilibres. Bien qu'il faille une étude préalable concernant par exemple les sédiments qui doivent être le plus proche possible des sédiments originels de la plage. Que ces sédiments doivent être proches pour limiter les frais de transport. Que le rechargement doit être régulier. Je pense que c'est la technique à privilégier. Toutefois, il ne faut surtout pas négliger son impact sur la faune la flore et son milieu. Il étude à ce sujet devra être réalisé.

Nous pouvons confirmer l'hypothèse du BRGM selon laquelle le rechargement aura un impact positif. En effet, le curage de l'embouchure de Case Navire pourrait inverser la dynamique originelle généré par la place ARAWAK. La dérive modale risque fortement d'être inversée. Elle pourrait devenir Sud-est/Nord-ouest. Cette inversion favorisera très certainement une accrétion sur Anse-Madame mais aussi au sud d'Anse-Collat. Il ne faut pas oublier que sur Anse-Collat c'est le sud qui subit l'érosion la plus importante. Ce rechargement pourra peut-être, sur le long terme transformer ces deux plages en une seule. Peut-être que l'impact des houles sera également inversé. Cela sous entendrais une accrétion durant les fortes houles, une érosion durant les houles de moyennes énergies.

Figure 90 : Impact du rechargement sur Anse Madame (inspiré du BRGM. Source: Dupuy)

Mon étude est essentiellement basée sur des données fournis par la bouée de Fort-de-France. Celle-ci n'est pas assez proche de notre terrain d'étude pour être véritablement représentative. Il serait intéressant d'installer un courantomètre à proximité de chaque anse schoelcheroise. Ceci nous permettra d'avoir une véritable idée de la dynamique des plages. Nous devrions également poursuivre les profils car le passage du tachéométre au DGPS révèle des données dont la précision est variable d'un appareil à l'autre.

CONCLUSION

Après cette étude, nous pouvons dire qu'il est véritablement important d'étudier la dynamique d'une plage à différentes échelles de temps. Selon l'échelle de temps nous aurons un facteur prédominant qui dessinera la morphologie de la plage.

Sur le long terme, la dérive modale est prédominante. Ainsi, sur les plages dont la dynamique est Sud-est/Nord-ouest, le sud de l'anse s'érode et le Nord s'accrête. Fond Lahaye se situe à proximité d'une embouchure donc c'est le centre qui s'accrête, alors que les extrémités Nord et Sud s'érodent. La morphologie de la plage d'Anse Madame est aussi contrôlée par la dérive modale. Il ne faut pas oublier que sur cette dernière plage la dérive est inversée à cause de la construction de la place Arawak qui favorise une diffraction des houles.

A moyen terme, la dynamique des plages est surtout contrôlée par la saisonnalité :

- Durant les saisons cycloniques les plages s'accrètent,
- Pendant les saisons d'Alizé les anses shoelcheroises ont tendance à s'éroder. Seul le sud d'Anse Madame et de Madiana connaissent une tendance inverse,
- En phase de saison sèche, la dérive littorale devient le facteur dominant de la morphologie des plages. Nous avons une érosion au sud et une accrétion au nord de Madiana et Collat.

A court terme, c'est l'énergie des houles qui redessine les plages. Sur Madiana et Anse Collat, les houles de faible intensité favorisent une reconstruction sédimentaire. Les houles de moyenne énergie favorisent l'érosion alors que celles de forte intensité génèrent une reconstruction sédimentaire. Anse Madame a une dynamique légèrement différente. On constate que les houles de faible intensité génèrent une reconstruction sédimentaire en bas de plage tandis que le haut de plage s'érode énormément. Les houles de moyennes intensités tendent vers l'accrétion sur un temps plus ou moins long. Les houles de fortes énergies favorisent une érosion.

Ainsi nous pouvons, grâce à nos observations, confirmer que la meilleure façon d'étudier notre milieu c'est de travailler à plusieurs échelles de temps. Nous pourrons ainsi déterminer les techniques les plus viables pour protéger le littoral Schoelcherois. Nous confirmons l'intérêt d'un rechargement sur la plage d'Anse Madame. Le recul important au nord de cette plage, son intérêt touristique, sa proximité avec l'embouchure de Case Navire… confirment l'importance de recharger cette plage.
Pour terminer, il est important de faire une étude sur la biodiversité de cette plage.

ANNEXE

Annexe I : Photos de l'impact de la tempête ERICKA

Annexe II : Photos de l'impact des fortes houles en janvier sur l'Arc Antillais

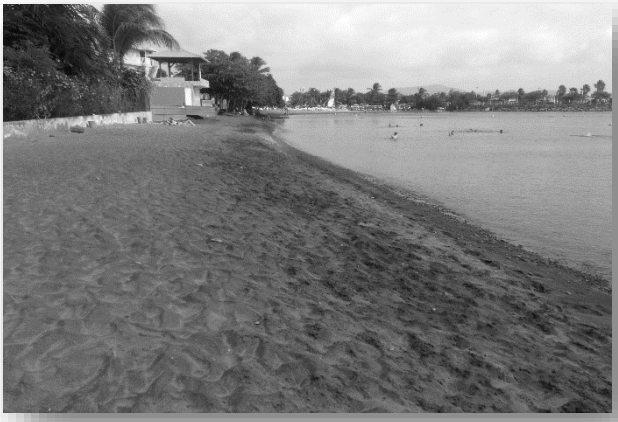
Tempête ERICKA :

Les photos en noir et blanc (à gauche) sont prises le 19/08/2015 et les photos prises le 28/08/2015 sont en couleur (à droite).

- **Anse Collat**

❖ **Madiana**

❖ **Anse Madame**



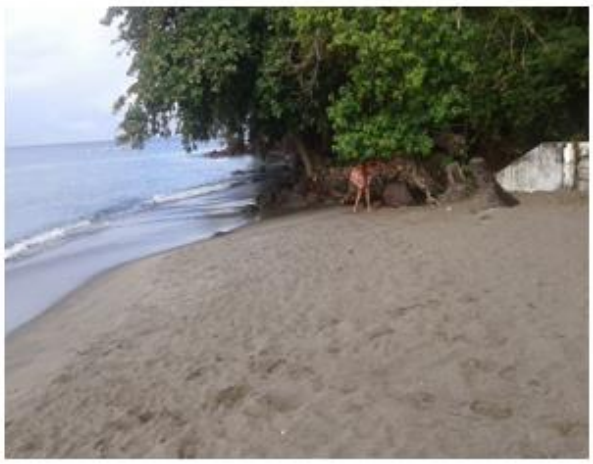
Fortes houles en janvier sur l'Arc Antillais

Les photos en noir et blanc sont prises le 09/01/2016 (gauche) et les photos prises le 16/01/2016 (droite) sont en couleur

- **Madiana**

❖ **Anse Madame**

❖ **Anse Collat**



LES SIGLES

- ACDP: courantomètre horizontal
- AEP : activité des écosystèmes aquatiques
- AMP : aires marines protégée
- AQUADOPPS : courantomètre ponctuelle
- BRGM: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- CACEM : Communauté d'Agglomération du Centre de la Martinique
- CRAE : Commission Régionale Agri- Environnement
- CREOCEAN : bureau d'étude spécialisé en océanographie et en aménagement du littoral
- DEAL: Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
- DELTA: Dynamique et Ecodéveloppement des Littoraux Tropicaux Association
- DGPS : Differencial Global Positionning System
- DSAS : Digital Shoreline Analysis System
- FEMA: Federal Emergency Management Agency ou L'Agence fédérale des situations d'urgence
- GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- IGN: Institut national de l'information géographique et forestière
- IRD : Institut de recherche et de développement
- ISC : Ile de San Andres
- LCB: Low Crested Breakwaters
- LCS : Low-Crested coastal defence
- LCS: Low crested and submerged structures ou Digues à moindre impact écologique
- MFAR: les Récifs Artificiels Multifonctions
- MNT: modèle numérique de terrain
- OMM : Organisation m étéorologique Mondial
- PSE : Paiements pour Services Environnementaux
- RTR : gammes de marées relatives
- SIG : système d'information géographique
- SMPA : Seaflower Marine Protect Area

BIBLIOGRAPHIE

I) Dictionnaires :

1. BRUNET, R., FERRAS, R., & THERY, H. (1993). Les mots de la géographie: dictionnaire critique.
2. LAROUSSE DE LA LANGUE FRANÇAISE, 1977. Vol. 2. *Librairie Larousse. Paris*.
3. ROBERT, P., & REY, A. (1986). *Le grand Robert de la langue française: dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française. 1. A-Bio*. Le Robert.
4. SAFFACHE, P., 2003. Dictionnaire de la géographie de la mer et des littoraux. Martinique: Ibis rouge Edition, presse universitaires créoles. 101 p
5. GEORGE, P., Verger, F., 2006. Dictionnaire de la géographie. Paris : Quadrige, presse universitaire de France. NP
6. MIOSSEC. A., 2012.Dictionnaire de la mer et des côtes. Renne : presse universitaire de renne. 550p.

II) Articles et Revues :

A) Définition

7. BOUSQUET, B. (1990). Définition et identification du littoral contemporain. *Revue juridique de l'environnement*, *15*(4), 451-468.
8. NATESAN, U., PARTHASARATHY, A., VISHNUNATH, R., KUMAR, G. E. J., & FERRER, V. A. (2015). Monitoring Longterm Shoreline Changes along Tamil Nadu, India Using Geospatial Techniques. *Aquatic Procedia*, *4*, 325-332.

B) Cause de l'érosion

9. DE ALEGRIA-ARZABURU, A. R., MARIÑO-TAPIA, I., ENRIQUEZ, C., SILVA, R., & GONZALEZ-LEIJA, M. (2013). The role of fringing coral reefs on beach morphodynamics. *Geomorphology*, *198*, 69-83.
10. LARROUDE, P., OUDART, T., DAOU, M., ROBIN, N., & CERTAIN, R. (2014). Three simple indicators of vulnerability to climate change on a Mediterranean beach: A modeling approach. *Ocean Engineering*, *76*, 172-182.
11. RUGGIERO, P., BUIJSMAN, M., KAMINSKY, G. M., & GELFENBAUM, G. (2010). Modeling the effects of wave climate and sediment supply variability on large-scale shoreline change. *Marine Geology*, *273*(1), 127-140.

C) Méthodologie pour étudier la dynamique des plages :

a. Analyse cartographique et ou analyse de données climatiques

12. KILIBARDA, Z., & SHILLINGLAW, C. (2014). A 70year history of coastal dune migration and beach erosion along the southern shore of Lake Michigan.*Aeolian Research*
13. PATRICK L. BARNARD, JEFF E. HANSEN, LI H. ERIKSON,2011. Synthesis Study of an Erosion Hot Spot, Ocean Beach, California. Journal of Coastal Research, 28(4):903-922

b. Surveillance topographique + interprétation de l'imagerie numérique

14. MUNSCH, S. H., CORDELL, J. R., & TOFT, J. D. (2015). Effects of shoreline engineering on shallow subtidal fish and crab communities in an urban estuary: A comparison of armored shorelines and nourished beaches. *Ecological Engineering*, *81*, 312-320.
15. STEPANIAN, A., & LEVOY, F. (2003). Séquences d'évolution morphodynamique des barres intertidales d'une plage macrotidale: l'exemple d'Omaha beach (Normandie, France). *Oceanologica acta*, *26*(2), 167-177.

c. Profil

16. BRUTSCHÉ, K. E., WANG, P., BECK, T. M., ROSATI, J. D., & LEGAULT, K. R. (2014). Morphological evolution of a submerged artificial nearshore berm along a low-wave microtidal coast, Fort Myers Beach, west-central Florida, USA. *Coastal Engineering*, *91*, 29-44.

d. Logiciel ARCGIS-> DSAS

17. FORD, M. (2013). Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands.*Remote Sensing of Environment*, *135*, 130-140.
18. JONAH, F. E. (2015). Managing coastal erosion hotspots along the Elmina, Cape Coast and Moree area of Ghana. *Ocean & Coastal Management*, *109*, 9-16.
19. KELLEY, J. T. (2013). Popham Beach, Maine: An example of engineering activity that saved beach property without harming the beach. *Geomorphology*, *199*, 171-178.
20. RESTREPO, J. C., OTERO, L., CASAS, A. C., HENAO, A., & GUTIÉRREZ, J. (2012). Shoreline changes between 1954 and 2007 in the marine protected area of the Rosario Island Archipelago (Caribbean of Colombia). *Ocean & Coastal Management*, *69*, 133-142.
21. SAFFACHE, P. (2000). Un engraissement côtier résultant de l'érosion des bassins-versants cultivés: exemple de la baie du Galion à la Martinique.*Oceanologica acta*, *23*(2), 159-166.

e. Télédétection

22. ALEMAN, N., ROBIN, N., CERTAIN, R., ANTHONY, E. J., & BARUSSEAU, J. P. (2015). Longshore variability of beach states and bar types in a microtidal, storm-influenced, low-energy environment. *Geomorphology*, *241*, 175-191.

23. YANG, B., MADDEN, M., KIM, J., & JORDAN, T. R. (2012). Geospatial analysis of Barrier Island beach availability to tourists. *Tourism Management*, *33*(4), 840-854

f. Observations morphologiques et ou analyses des sédiments

24. ARMAROLI, C., GROTTOLI, E., HARLEY, M. D., & CIAVOLA, P. (2013). Beach morphodynamics and types of foredune erosion generated by storms along the Emilia-Romagna coastline, Italy. *Geomorphology*, *199*, 22-35.
25. BALDOCK, T. E., MANOONVORAVONG, P., & PHAM, K. S. (2010). Sediment transport and beach morphodynamics induced by free long waves, bound long waves and wave groups. *Coastal Engineering*, *57*(10), 898-916.
26. CARTIER, A., & HÉQUETTE, A. (2015). Vertical distribution of longshore sediment transport on barred macrotidal beaches, northern France. *Continental Shelf Research*, *93*, 1-16.
27. CHANG, F. J., & LAI, H. C. (2014). Adaptive neuro-fuzzy inference system for the prediction of monthly shoreline changes in northeastern Taiwan. *Ocean Engineering*, *84*, 145-156.
28. DE VRIES, S., ARENS, S. M., DE SCHIPPER, M. A., & RANASINGHE, R. (2014). Aeolian sediment transport on a beach with a varying sediment supply. *Aeolian Research*, *15*, 235-244.
29. DISSANAYAKE, P., BROWN, J., WISSE, P., & KARUNARATHNA, H. (2015). Comparison of storm cluster vs isolated event impacts on beach/dune morphodynamics.*Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *164*, 301-312.
30. DISSANAYAKE, P., BROWN, J., WISSE, P., & KARUNARATHNA, H. (2015). Effects of storm clustering on beach/dune evolution. *Marine Geology*, *370*, 63-75.
31. DORA, G. U., KUMAR, V. S., VINAYARAJ, P., PHILIP, C. S., & JOHNSON, G. (2014). Quantitative estimation of sediment erosion and accretion processes in a micro-tidal coast. *International Journal of Sediment Research*, *29*(2), 218-231.
32. EL MRINI, A., MAANAN, M., ANTHONY, E. J., & TAAOUATI, M. (2012). An integrated approach to characterize the interaction between coastal morphodynamics, geomorphological setting and human interventions on the Mediterranean beaches of northwestern Morocco. *Applied Geography*, *35*(1), 334-344.
33. ERGIN, M., KARAKAS, Z. S., SÖZERI, K., ESER-DOGDU, B., KADIOGU, Y. K., & YIGIT-FARIDFATHI, F. (2013). Morphological, drainage and eolian controls on the microtidal Patara Beach sediments (eastern Mediterranean): Textural, geochemical and mineralogical investigations. *Quaternary International*, *302*, 135-153.
34. KAERGAARD, K., & FREDSOE, J. (2013). Numerical modeling of shoreline undulations part 1: Constant wave climate. *Coastal Engineering*, *75*, 64-76.
35. LARSON, M., CAPOBIANCO, M., JANSEN, H., RÓZYŃSKI, G., SOUTHGATE, H. N., STIVE, M., ... & HULSCHER, S. (2003). Analysis and modeling of field

data on coastal morphological evolution over yearly and decadal time scales. Part 1: Background and linear techniques. *Journal of Coastal Research*, 760-775
36. LÓPEZ,I ., ARAGO NÉS . L., VILLACAMPA, Y., P.COMPAÑ , R.SATORRE, 2015. Morphological classification of microtidal sand and gravel beaches. Ocean engineering 109, p 309–319.
37. MILES, J., & THORPE, A. (2015). Bedform contributions to cross-shore sediment transport on a dissipative beach. *Coastal Engineering*, *98*, 65-77.
38. QUARTEL, S., KROON, A., & RUESSINK, B. G. (2008). Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach. *Marine Geology*, *250*(1), 19-33.
39. VAN GAALEN, J. F., KRUSE, S. E., COCO, G., COLLINS, L., & DOERING, T. (2011). Observations of beach cusp evolution at Melbourne Beach, Florida, USA.*Geomorphology*, *129*(1), 131-140.
40. VOUSDOUKAS, M. I., VELEGRAKIS, A. F., & KARAMBAS, T. V. (2009). Morphology and sedimentology of a microtidal beach with beachrocks: Vatera, Lesbos, NE Mediterranean. *Continental Shelf Research*, *29*(16), 1937-1947.
41. VOUSDOUKAS, M. I., VELEGRAKIS, A. F., DIMOU, K., ZERVAKIS, V., & CONLEY, D. C. (2009). Wave run-up observations in microtidal, sediment-starved pocket beaches of the Eastern Mediterranean. *Journal of Marine Systems*, *78*, S37-S47.

g. Approche multidisciplinaire

42. ALEXANDRAKIS, G., MANASAKIS, C., & KAMPANIS, N. A. (2015). Valuating the effects of beach erosion to tourism revenue. A management perspective.*Ocean & Coastal*
43. *Price, T. D., & Ruessink, B. G. (2008). Morphodynamic zone variability on a microtidal barred beach. Marine Geology, 251(1), 98-109.Management, 111*, 1-11.
44. RODIL, I. F., FERNANDES, J. P., & MUCHA, A. P. (2015). Disentangling the effects of solar radiation, wrack macroalgae and beach macrofauna on associated bacterial assemblages. *Marine environmental research*.
45. SAENGSUPAVANICH, C., SEENPRACHAWONG, U., GALLARDO, W. G., & SHIVAKOTI, G. P. (2008). Port-induced erosion prediction and valuation of a local recreational beach. *Ecological economics*, *67*(1), 93-103.

h. Étude multiscalaire

46. JARA, M. S., GONZÁLEZ, M., & MEDINA, R. (2015). Shoreline evolution model from a dynamic equilibrium beach profile. *Coastal Engineering*, *99*, 1-14.
47. KARUNARATHNA, H., & REEVE, D. E. (2013). A hybrid approach to model shoreline change at multiple timescales. *Continental Shelf Research*, *66*, 29-35.
48. VAN RIJN, L. C., TONNON, P. K., SANCHEZ-ARCILLA, A., CACERES, I., & GRÜNE, J. (2011). Scaling laws for beach and dune erosion processes. *Coastal Engineering*, *58*(7), 623-636.

i. Etude statistiques

49. AEDLA, R., DWARAKISH, G. S., & REDDY, D. V. (2015). Automatic Shoreline Detection and Change Detection Analysis of Netravati-GurpurRivermouth Using

Histogram Equalization and Adaptive Thresholding Techniques. *Aquatic Procedia*, *4*, 563-570.
50. CALLAGHAN, D. P., & WAINWRIGHT, D. (2013). The impact of various methods of wave transfers from deep water to nearshore when determining extreme beach erosion. *Coastal Engineering*, *74*, 50-58.
51. CALLAGHAN, D. P., NIELSEN, P., SHORT, A., & RANASINGHE, R. (2008). Statistical simulation of wave climate and extreme beach erosion. *Coastal Engineering*,*55*(5), 375-390.
52. KULKARNI, S. J., DESHBHANDARI, P. G., & JAYAPPA, K. S. (2015). Seasonal Variation in Textural Characteristics and Sedimentary Environments of Beach Sediments, Karnataka Coast, India. *Aquatic Procedia*, *4*, 117-124.

j. Formules : transports sédimentaires

53. STEETZEL, H. J. (1990). Cross-shore transport during storm surges. *Coastal Engineering Proceedings*, *1*(22).

D) Elévation du niveau de la mer

54. BALDOCK, T. E., GOLSHANI, A., ATKINSON, A., SHIMAMOTO, T., WU, S., CALLAGHAN, D. P., & MUMBY, P. J. (2015). Impact of sea-level rise on cross-shore sediment transport on fetch-limited barrier reef island beaches under modal and cyclonic conditions. *Marine pollution bulletin*, *97*(1), 188-198.
55. BELL, J., SAUNDERS, M. I., LEON, J. X., MILLS, M., KYTHREOTIS, A., PHINN, S., ... & MORRISON, T. H. (2014). Maps, laws and planning policy: Working with biophysical and spatial uncertainty in the case of sea level rise. *Environmental Science & Policy*, *44*, 247-257.
56. HINKEL, J., NICHOLLS, R. J., TOL, R. S., WANG, Z. B., HAMILTON, J. M., BOOT, G., ... & KLEIN, R. J. (2013). A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA. *Global and Planetary Change*, *111*, 150-158.
57. PASSERI, D. L., HAGEN, S. C., MEDEIROS, S. C., & BILSKIE, M. V. (2015). Impacts of historic morphology and sea level rise on tidal hydrodynamics in a microtidal estuary (Grand Bay, Mississippi). *Continental Shelf Research*, CSR3698.
58. TABORDA, R., & RIBEIRO, M. A. (2015). A simple model to estimate the impact of sea-level rise on platform beaches. *Geomorphology*, *234*, 204-210.
59. ZHANG, K., DOUGLAS, B. C., & LEATHERMAN, S. P. (2004). Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, *64*(1-2), 41-58.

E) Resilience écosystème:

k. synthèse des recherches existantes +intégrer la résilience de la plage

60. BERRY, A. J., FAHEY, S., & MEYERS, N. (2014). Boulderdash and beachwalls–The erosion of sandy beach ecosystem resilience. *Ocean & Coastal Management*,*96*, 104-111.

F) Impact anthropique

l. Extraction de sable

61. SA, C. (2014). Sand, rarer than one thinks.

m. Erosion engender par l'Homme

62. AMYOT, J., & GRANT, J. (2014). Environmental Function Analysis: A decision support tool for integrated sandy beach planning. *Ocean & Coastal Management*, *102*, 317-327.

G) Solution contre l'érosion

63. CHARLIER, R. H., & DE MEYER, C. P. (1989). Coastal defense and beach renovation. *Ocean and Shoreline Management*, *12*(5), 525-543.
64. MCCALL, R. T., MASSELINK, G., POATE, T. G., ROELVINK, J. A., & ALMEIDA, L. P. (2015). Modelling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G. *Coastal Engineering*, *103*, 52-66.
65. NORDSTROM, K. F. (2014). Living with shore protection structures: A review.*Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *150*, 11-23.
66. NORDSTROM, K. F. (2014). Living with shore protection structures: A review.*Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *150*, 11-23.
67. ZANUTTIGH, B., MARTINELLI, L., LAMBERTI, A., MOSCHELLA, P., HAWKINS, S., MARZETTI, S., & CECCHERELLI, V. U. (2005). Environmental design of coastal defence in Lido di Dante, Italy. *Coastal Engineering*, *52*(10), 1089-1125.

n. Le rechargement

68. ARAGONES, L., GARCIA-BARBA, J., GARCIA-BLEDA, E., LOPEZ, I., & SERRA, J. C. (2015). Beach nourishment impact on Posidonia oceanica: Case study of Poniente Beach (Benidorm, Spain). *Ocean Engineering*, *107*, 1-12.
69. BIGONGIARI, N., CIPRIANI, L. E., PRANZINI, E., RENZI, M., & VITALE, G. (2015). Assessing shelf aggregate environmental compatibility and suitability for beach nourishment: A case study for Tuscany (Italy). *Marine pollution bulletin*, *93*(1), 183-193.
70. GARES, P. A., WANG, Y., & WHITE, S. A. (2006). Using LIDAR to monitor a beach nourishment project at Wrightsville Beach, North Carolina, USA. *Journal of Coastal Research*, 1206-1219.
71. CHU, M. L., GUZMAN, J. A., MUÑOZ-CARPENA, R., KIKER, G. A., & LINKOV, I. (2014). A simplified approach for simulating changes in beach habitat due to the combined effects of long-term sea level rise, storm erosion, and nourishment. *Environmental Modelling & Software*, *52*, 111-120.

72. JONES, S. R., & MANGUN, W. R. (2001). Beach nourishment and public policy after Hurricane Floyd: where do we go from here?. *Ocean & coastal management*, *44*(3), 207-220.
73. KARAMBAS, T. V., & SAMARAS, A. G. (2014). Soft shore protection methods: The use of advanced numerical models in the evaluation of beach nourishment.*Ocean Engineering*, *92*, 129-136.
74. MUNSCH, S. H., CORDELL, J. R., & TOFT, J. D. (2015). Effects of shoreline engineering on shallow subtidal fish and crab communities in an urban estuary: A comparison of armored shorelines and nourished beaches. *Ecological Engineering*, *81*, 312-320**.**
75. SCHLACHER, T. A., NORIEGA, R., JONES, A., & DYE, T. (2012). The effects of beach nourishment on benthic invertebrates in eastern Australia: Impacts and variable recovery. *Science of the Total Environment*, *435*, 411-417.
76. Speybroeck, J., Bonte, D., Courtens, W., Gheskiere, T., Grootaert, P., Maelfait, J. P., ... & Degraer, S. (2006). Beach nourishment: an ecologically sound coastal defence alternative? A review. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *16*(4), 419-435.
77. TIMMONS, E. A., RODRIGUEZ, A. B., MATTHEUS, C. R., & DEWITT, R. (2010). Transition of a regressive to a transgressive barrier island due to back-barrier erosion, increased storminess, and low sediment supply: Bogue Banks, North Carolina, USA. *Marine Geology*, *278*(1), 100-114.

o. Geotextile

78. LEE, E. C., & DOUGLAS, R. S. (2012). Geotextile tubes as submerged dykes for shoreline management in Malaysia. *Geotextiles and Geomembranes*, *30*, 8-15.
79. SHIN, E. C., & OH, Y. I. (2007). Coastal erosion prevention by geotextile tube technology. *Geotextiles and Geomembranes*, *25*(4), 264-277.
80. SUBAIDA, E. A., CHANDRAKARAN, S., & SANKAR, N. (2008). Experimental investigations on tensile and pullout behaviour of woven coir geotextiles.*Geotextiles and Geomembranes*, *26*(5), 384-392.
81. SULAIMAN, D. M., BACHTIAR, H., & TAUFIQ, A. (2015). Beach Profile Changes Due to Low Crested Breakwaters at Sigandu Beach, Central Java. *Procedia Engineering*, *116*, 510-519.
82. TAYADE, B. R., MAHALINGAIAH, A. V., GOKHALE, N. V., & KUDALE, M. D. (2015). Importance of Location & Alignment of Geotextile Tubes for the Coastal Protection Measures. *Aquatic Procedia*, *4*, 190-197.

p. Revégétalisation :

83. C.B. CRAFT., J. BERTRAM., S. BROOME., 2008. Coastal Zone Restoration. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences Encyclopedia of Ecology. Pages 637–644
84. DAHL, B. E., FALL, B. A., & OTTENI, L. C. (1975). Vegetation for creation and stabilization of foredunes, Texas coast. *Estuarine research.*, *2*.

q. Les récifs artificiels multifonction

85. NG, K., PHILLIPS, M. R., CALADO, H., BORGES, P., & VELOSO-GOMES, F. (2013). Seeking harmony in coastal development for small islands: Exploring multifunctional artificial reefs for São Miguel Island, the Azores. *Applied Geography*, *44*, 99-111.

r. Méthodes dures

86. JIN, D., HOAGLAND, P., AU, D. K., & QIU, J. (2015). Shoreline change, seawalls, and coastal property values. *Ocean & Coastal Management*, *114*, 185-193.
87. LAMBERTI, A., ARCHETTI, R., KRAMER, M., PAPHITIS, D., MOSSO, C., & DI RISIO, M. (2005). European experience of low crested structures for coastal management. *Coastal Engineering*, *52*(10), 841-866.
88. LUO, S., CAI, F., LIU, H., LEI, G., QI, H., & SU, X. (2015). Adaptive measures adopted for risk reduction of coastal erosion in the People's Republic of China.*Ocean & Coastal Management*, *103*, 134-145.
89. SEINO, S., UDA, T., OHTANI, Y., & OHKI, Y. (2015). Essential Aspects of Beach Erosion-Lessons from Devastation of Ichinomiya Coast, Japan. *Procedia Engineering*, *116*, 446-453.
90. SHETTY, A., JAYAPPA, K. S., & MITRA, D. (2015). Shoreline Change Analysis of Mangalore Coast and Morphometric Analysis of Netravathi-Gurupur and Mulky-pavanje Spits. *Aquatic Procedia*, *4*, 182-189.

-

H) Stratégies de gestion

91. BALOUIN, Y., REY-VALETTE, H., & PICAND, P. A. (2014). Automatic assessment and analysis of beach attendance using video images at the Lido of Sète beach, France. *Ocean & Coastal Management*, *102*, 114-122
92. HANLEY, M. E., HOGGART, S. P. G., SIMMONDS, D. J., BICHOT, A., COLANGELO, M. A., BOZZEDA, F., ... & THOMPSON, R. C. (2014). Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes. *Coastal Engineering*, *87*, 136-146.
93. LOZOYA, J. P., SARDA, R., & JIMENEZ, J. A. (2011). A methodological framework for multi-hazard risk assessment in beaches. *Environmental science & policy*,*14*(6), 685-696.
94. MEUR-FeREC, C.; DEBOUDT, P., and MOREL, V., 2008. Coastal risks in France: an integrated method for evaluating vulnerability. Journal of Coastal Research, 24(2B), 178-189. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
95. PRATI, G., ALBANESI, C., PIETRANTONI, L., & AIROLDI, L. (2016). Public perceptions of beach nourishment and conflict management strategies: A case study of Portonovo Bay in the Adriatic Italian Coast. *Land Use Policy*, *50*, 422-428.

I) Caraïbe

96. CAMBERS, G. (2009). Caribbean beach changes and climate change adaptation.*Aquatic Ecosystem Health & Management*, *12*(2), 168-176.
97. CASTAÑO-ISAZA, J., NEWBALL, R., ROACH, B., & LAU, W. W. (2015). Valuing beaches to develop payment for ecosystem services schemes in Colombia's Seaflower marine protected area. *Ecosystem Services*, *11*, 22-31.

J) Martinique

98. FAILLER, P., PETRE, É., BINET, T., & MARECHAL, J. P. (2015). Valuation of marine and coastal ecosystem services as a tool for conservation: The case of Martinique in the Caribbean. *Ecosystem Services*, *11*, 67-75.
99. GONZALEZ, M. P. J. L., & PONS, J. C. CIRCULATION DES EAUX SUR LES PLATEAUX INSULAIRES DE MARTINIQUE ET GUADELOUPE.
100. HÜBNER, A., & GÖSSLING, S. (2012). Tourist perceptions of extreme weather events in Martinique. *Journal of Destination Marketing & Management*, *1*(1), 47-55.
101. SAFFACHE, P. (2000). Érosion des bassins-versants et engraissement côtier: le cas de la baie du Galion (Martinique). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, *330*(6), 423-428
102. SAFFACHE,P., M. DESSE., 1999. évolution contrastée du littoral de l'île de la Martinique. Mappemonde 55 (1999.3), p 24 à 27.
103. SCHEMAS DIRECTEUR D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX 2016-2021, district hydrographique de la Martinique, 2014. L'impact du changement climatique dans le domaine de l'eau sur le bassin Martinique. P 29 à 35.
104. SCHLEUPNER, C. (2008). Evaluation of coastal squeeze and its consequences for the Caribbean island Martinique. *Ocean & Coastal Management*, *51*(5), 383-390.

K) Schoelcher

105. DOLIQUE F., CHARPENTIER J., 2014. *Suivi topographique de l'évolution des plages de Schoelcher (Anse Madiana ; Anse Madame ; Anse Collat)*. Delta-BRGM, 18p

III) Ouvrages :

106. ADUAM, 2013.*Ville de Schoelcher : révision du plan local d'urbanisme, Rapport de présentation*. 281P
107. ATELIER EUCC-FRANCE, 2015. *Les risques littoraux et les impacts du changement climatique : pourquoi et comment anticiper et s'adapter*. SI : SN, 72p
108. BECET, J. M. (1991). Le droit du littoral et la mer côtière.
109. BOURGOU, M ; MIOSSEC, J ., 2010. *Les littoraux : enjeux et dynamiques*. Paris : presses universitaires de France, 295p.
110. BRGM, 2011. *Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du*

trait de côte, rapport final. SI : SN, 156p
111. BRGM, 2013. *Établissement d'un état de référence du trait de côte de la Martinique : situation en 2010 et évolution historique depuis 1951 Rapport final* .88p
112. BRGM, 2014. *Étude hydrosédimentaire du littoral de Schoelcher (Martinique), Rapport final.* 136p
113. CARTER, R.W.G., 1995, *Coastal environments : an introduction to the physical, écological and cultural systems of coastlines*. United States : Academic Press INC, 617p.
114. CATALIOTTI,D ; Michel,P., 1997. *La défense des côtes contre l'érosion marine : Pour une approche global et environnementale.* France:BCECM, 142p.
115. CHARPENTIER, J, 2010. *Le sud- Caraïbe de la Martinique, étude de l'évolution du trait de côte.* SI:SN, 120p.
116. COICAUD, A., 2015. *RAPPORT DE STAGE M1 : Suivi de l'évolution morphodynamique du trait de côte de la Plage de Madiana (Schœlcher)*. 30p
117. DESSE, M. ; SAFFACHE, P., 2005. *Les littoraux antillais : des enjeux de l'aménagement à la gestion durable.* Matoury : Ibis Rouge Édition, 116p.
118. DOLIQUE ,F., 2013, *Articulations morphodynamiques : exemples en milieux littoraux tempérés et tropicaux*. Presse académiques francophones, 253p.
119. DOLIQUE F., CHARPENTIER J., 2014. *Suivi topographique de l'évolution des plages de Schoelcher (Anse Madiana ; Anse Madame ; Anse Collat)*. Delta-BRGM, 18p
120. EVERARD, C, 2012. *Pourquoi le littoral disparaît petit à petit*. Martinique : France- Antille
121. GARDE COTIERE, 2000. Introduction au GPS et au DGPS. Canada : SN. 28p
122. GUILCHER, A., 1954, *Morphologie Littorale et sous-marine*. Paris : Presse universitaires de France, Coll. Orbis, 216p.
123. HÉNAFF,A., PHILIPPE, M., 2014. *Gestion des risques d'érosion et de submersion marine, guide méthodologique*. Projet Cocorisco. 156p
124. HÉQUETTE, A, 2001. Courants et transports sédimentaires dans la zone littorale : le rôle des courants orbitaux et de downwelling / Currents and sediment transport in the coastal zone: the role of orbital and downwelling currents. In: *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. Janvier-mars, vol. 7, n°1. pp. 5-16
125. JOSSO, Q., 2015. *Caractérisation des processus de mise en mouvements sédimentaires : Le cas de l'Anse Madame, Schoelcher, Martinique*. 31p
126. JOUZEL, J., mars2015. *Rapport « Le climat de la France au XXIe siècle,* par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. - Volume 5 p.40
127. LE MOIGNE, B, 2011. *COMTE-RENDU DE REUNION/ SGR Martinique*. 2p
128. MALLET, C., MICHOT A., DE LA TORRE, Y., LAFON, V., ROBIN, M., PREVOTEAUX, B, 2012 .*Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte - Rapport BRGM/RP-60616-FR*, 162 p
129. MAURIET,S, 2009. *Simulation d'un écoulement de jet de rive par une méthode VOF*. Engineering Sciences : Université de Pau et des Pays de l'Adour, 154p
130. MEDD, 2010. *La gestion du traît de côte*. France : edition QUAE. 290P
131. MONNIER, P., 1825, *Description nautique des côtes de la Martinique : Précédée d'un mémoire sur les opérations hydrographiques et géodésiques exécutées dans cette ile en 1824-1825*. Paris : Imprimerie royale, 182p.
132. PASKOFF, R. ; CLUS-AUBY, C., 2007, *L'érosion des plages : les causes, les remèdes*. Paris, Monaco : Institut océanographique, 184p
133. PASKOFF, R., 1992, *Côtes en danger.* Paris : L'Harmattan, 250p.

134. PASKOFF, R., 2012, *Les Littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*. Paris : Armand Colin, coll. U, 260p.
135. PERRIN.C, L. AÏCHI et É. GIRAUD (fait au nom de la commission des affaires étrangères, de la défense et des forces armées), 6 octobre 2015. Climat : vers un dérèglement géopolitique. Rapport d'information n° 14 (2015-2016). 193p
136. R. D. G. (1974). November 1973 (the Piquard report). Le Littoral Français .*Paris: La Documentation Française*.
137. REGNAULD, H., 1998. Synthèse : Les littoraux. Paris : Armand colin/ Masson. 95p
138. REGNAULD, H., MAHMOUD, H ., OSWALD, J., PLANCHON, O., et MUSEREAU, J., 2010. Tempêtes, rythme de fonctionnement d'une cellule sédimentaire et « espace d'accueil » : exemple sur l'Anse du Verger, Bretagne Nord. *Norois/215*, P133-136
139. REINE DIT REINETTE, R, 2014. *Gestion durable de la commune de Schoelcher : le rechargement de plage*. SI:SN , 68p
140. REVERT, E, 1949. *La Martinique études géographiques et humaines*. Paris: Nouvelles Éditions latines, Collection : Bibliothèque de l'Union française, 559 pp.
141. SAFFACHE, P., 1998. *Le littoral martiniquais : milieu, dynamique et gestion des risques.* SI:SN, 369p
142. SAFFACHE, P., 2005. *Manuel de géographie de la mer et des littoraux : essaie de compréhension du milieu littoral martiniquais*. Guyane : édition IBIS ROUGE, 53p
143. SAFFACHE, P., DESSE M. 1999. L'évolution contrastée du littoral de l'île de la Martinique, *Mappemonde, 55*. p24-27

IV) Site internet

144. USGS, 2008 : http://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/DSAS/version4/
145. After D. Harper, 1983 : http://www.fao.org/docrep/003/t0355e/t0355e04.htm
146. Suivi par photographie fixe: http://www.risques-cotiers.fr/fr/boite-a-outils/comment-suivre-levolution-de-la-topographie-et-de-la-bathymetrie-de-la-zone-littorale/les-differentes-techniques-de-suivi/mesures-par-tacheometre-1/fr/boite-a-outils/comment-suivre-levolution-de-la-topographie-et-de-la-bathymetrie-de-la-zone-littorale/les-differentes-techniques-de-suivi/fr/boite-a-outils/comment-suivre-levolution-de-la-topographie-et-de-la-bathymetrie-de-la-zone-littorale/les-differentes-techniques-de-suivi/suivi-par-photographies-fixes-1/suivi-par-photographies-fixes
147. Manuelle Philippe et Sébastien Hervé., Principes d'un levé au tachéomètre le long d'un profil : http://www.risques-cotiers.fr/fr/boite-a-outils/comment-suivre-levolution-de-la-topographie-et-de-la-bathymetrie-de-la-zone-littorale/les-differentes-techniques-de-suivi/suivi-par-photographies-fixes-1/fr/boite-a-outils/comment-suivre-levolution-de-la-topographie-et-de-la-bathymetrie-de-la-zone-littorale/les-differentes-techniques-de-suivi/fr/boite-a-outils/comment-suivre-levolution-de-la-topographie-et-de-la-bathymetrie-de-la-zone-littorale/les-differentes-techniques-de-suivi/mesures-par-tacheometre-1/mesures-par-tacheometre
148. Allain, M (ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable)., 2009. La gestion du trait de côte : http://www.onml.fr/articles/la-gestion-du-trait-de-cote/
149. Région réunion, 2015. Revégétalisation : http://museesreunion.re/sciences-savoirs/revegetalisation-des-plages

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Répartition de la population dans le monde (source : JOUZEL, 2015: III ; Réalisé par DUPUY) 8

Figure 2: L'érosion est un phénomène récurrent sur la terre (source : PASKOFF, 2015: III ; Réalisé par DUPUY) 10

Figure 03 : Le relief Schoelcherois 12

Source: Geoportail (image MNT) 12

Figure 04 : Localisation de la ville de Schœlcher 12

Figure 5 Réfraction des houles générées par la place ARAWAK 14

Figure 6 Localisations de la zone d'étude sur la partie nord du Lido de Sète. 17

Figure 7 Le LiDAR bathymétrique (source: AFTER *et al*, 1983) 19

Figure 8 Technique du DSAS sur l'île de Nantucket Island, Massachusetts (source : USGS, 2008)……..... 23

Figure 9 Principes d'un levé au tachéomètre le long d'un profil (PHILLIPE *et al*, ND)..... 23

Figure 10 Digue de mer classique (source : http://medias.larousse.fr/archives/img/grande-encyclopedie/full/digue_et_jetee_002.jpg) 29

Figure 11 Mur de protection (PASKOFF, 2012: III) 30

Figure 12 Epis (PASKOFF, 2012: III) 31

Figure 13 Impact du brise – lames (PASKOFF, 2012: III) 32

Figure 14 Méthode de rechargement d'une plage par extraction et importation de sable du large (ALLAIN, 2009) 34

Figure 15 Atelier de revégétalisation des plages organisé à St Leu par l'Ecole du Jardin Planétaire et Kélonia le 27 juin 2015 (source : Région Réunion) 35

Figure 16 Géotextile utilisé contre l'érosion côtière sur une plage de Malaisie à l'est de Terengganu (source : LEE *et* al: II.G.o) 36

Figure 17 Accumulation de la plage après installation du géotextile sur une plage de Malaisie à l'est de Terengganu (source : LEE *et al*: II.G.n*)* 37

Figure 18 Exemple d'habitat situé sur les 50 pas géométriques à Anse-Madame, Schœlcher (source : AIHP-GEODE WebSIG/ Image:Openstreetmap /Echelle 1 : 2 257/Date: 2014)……..……..40

Figure 19 Impact de la tempête Erika-> les photos en noir et blanc sont prises avant la tempête le 19/08/2015 et les photos de couleur ont été réalisées après la tempête le 28/08/2015…..... 43

Figure 20 Les différentes zones d'actions des vagues et les principaux courants pouvant agir près des côtes (HÉQUETTE, 2001: III) 45

Figure 21 : Transformation par effet de fond des vagues (DUPUY)..... 46

Figure 22 Jet de rive et backswash (DUPUY) 46
Figure 23 Types de vagues (source internet : pixgood.com, N.D) 47
Figure 24 Réflexion totale d'une houle (DUPUY) 47
Figure 25 Réfraction d'une vague (DUPUY) 48
Figure 26 Diffraction des vagues générées par un obstacle (DUPUY) 48
Figure 27 Courantologie martiniquaise (JOSSO,2015: III) 49
Figure 28 Courant longshore (DUPUY) 51
Figure 29 Courant cross-shore (DUPUY) 51
Figure 30 Courant d'arrachement (PASKOFF, 2012: III) 52
Figure 31 Cellule sédimentaire de Martinique (JOSSO, 2015: III) 54
Figure 32 Delta et sédimentation (DUPUY) 55
Figure 33 Localisation et photo d'Anse Madame (Dupuy) 58
Figure 34 Profil 100 = sud de la plage/ profil 200= nord de l'anse 59
Figure 35 Lecture des évolutions longshore et cross-shore de l'Anse-Madame (DUPUY, 2015)…… 59
Figure 36 Localisation et photo de Madiana (Dupuy) 60
Figure 37 Localisation et photo de d'anse Collat (Dupuy) 61
Figure 38 Possibilité technique pour lutter contre l'érosion dans la cellule bourg de Schoelcher (source : BRGM, 2014: III) 67
Figure 39 Exemple de DSAS sur la plage de Kaho (source : USGS, ND) 70
Figure 40 Tête de Station (DOLIQUE *et* al,2013) 72
Tableau 3 : 73
Figure 41 MNT en 2D et 3D sous SURFER.9 (JOSSO, 2015 : III) 74
Figure 42 MNT séparé en 4 parties pour faciliter les descriptions (Source : COICAUD,2015) 75
Figure 43 Les points de vue choisis pour les photos-> Echelle: 1: 2133/ image: géoportail/ (Source: DUPUY) 77
Figure 44 L'imagerie radar de l'impact d'Ericka le 27/08/15 78
Figure 45 Hauteur des houles durant Ericka 79
Figure 46 Forte houle se dirigeant vers les Antilles (source : Martinique 1ère, 2016) 80
Figure 47 Hauteur des houles maximales du 11 au 16 janvier 2016 81
Figure 48 Les zones des fortes houles du mois de janvier 2016 81
Figure 49 Evolution du trait de côte d'Anse Madame entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY)…… 82
Figure 50 Evolution du trait de côte d'Anse Madame entre 1951 et 2004 (Source : DUPUY)…… 83

Figure 51 Evolution du trait de côte d'Anse Madame entre 2004 et 2010 (Source : DUPUY) 83
Figure 52 Evolution du trait de côte d'Anse Madame entre 2010 et 2012 (Source : DUPUY) 84
Figure 53 Trait de côte d'Anse Madame entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY)..... 84
Figure 54 Evolution du trait de côte d'Anse Collat entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY) 85
Figure 55 Evolution du trait de côte d'Anse Collat entre 1951 et 2004 (Source : DUPUY) 86
Figure 56 Evolution du trait de côte d'Anse Collat entre 2004 et 2010 (Source : DUPUY) 86
Figure 57 Trait de côte d'Anse Collat entre 1951 et 2010 (Source : DUPUY)..... 87
Figure 58 Evolution du trait de côte de Fond Lahaye entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY) 88
Figure 59 Evolution du trait de côte de Fond Lahaye entre 1951 et 2004 (Source : DUPUY) 88
Figure 60 Evolution du trait de côte de Fond Lahaye entre 2004 et 2010 (Source : DUPUY) 89
Figure 61 Evolution du trait de côte de Fond Lahaye entre 2010 et 2012 (Source : DUPUY) 89
Figure 62 Trait de côte de Fond Lahaye entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY) 90
Figure 63 Evolution du trait de côte de Madiana entre 1951 et 2012 (Source : DUPUY)91
Figure 64 Evolution du trait de côte de Madiana entre 1951 et 2004 (Source : DUPUY)91
Figure 65 Evolution du trait de côte de Madiana entre 2004 à 2010 (Source : DUPUY)92
Figure 66 Evolution du trait de côte de Madiana entre 2010 à 2012 (Source : DUPUY) 92
Figure 67 Trait de côte de Madiana entre 1951 à 2012 (Source : DUPUY) 93
Figure 68 Lecture des évolutions longshore et cross-shore Fond-Lahaye (DUPUY, 2014) 95
Figure 69 Lecture des évolutions longshore et cross-shore de l'Anse- Collat (DUPUY, 2014) 96
Figure 70 Lecture des évolutions longshore et cross-shore de l'Anse-Madame (DUPUY, 2014) 97
Figure 71 Lecture des évolutions longshore et cross-shore de Madiana (DUPUY, 2014). 98
Figure 72 les têtes de stations des plages de Schoelcher utilisées pour l'année 2015/2016 (source : DUPUY)..... 98
Figure 73 : Profil 100 au nord d'Anse Collat (source : DUPUY) 99
Figure 74 profil 200 au centre de d'anse Collat (source : DUPUY) 99
Figure 75 Profil 300 au sud de la plage d'Anse-Collat (source : DUPUY)..... 100

Figure 76 Profil 100 au sud de la plage (source : DUPUY) 101
Figure 77 Profil 300 au nord de la plage (source : DUPUY) 101
Figure 78 Profil 100 au sud de la plage (source : DUPUY) 102
Figure 79 Profil 200 au centre de la plage (source : DUPUY) 103
Figure 80 Dynamique des plages selon les saisons (Dupuy) -> vert = accrétion ; Rouge= érosion…….. 104
Figure 81 MNT différentiel entre le 30 avril et le 15 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 30 avril et le 15 mai 105
..... 105
Figure 82 MNT différentiel entre du 15 au 27-28 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 15 au 27-28 mai 106
Figure 83 MNT différentiel entre le 27 avril et le 28 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 04 avril et le 15 mai 108
Figure 84 MNT différentiel entre le 17 avril et le 06 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 17 avril et le 06 mai 110
Figure 85 MNT différentiel entre le 17 avril et le 06 mai et flux moyen d'énergie en joules par seconde du 17 avril et le 06 mai 110
Figure 86 position des bandes MNT 113
Figure 87 Bande 100 (au sud de l'anse) 113
Figure 88 Bande 200 (au centre de l'anse) 114
Figure 89 : Bande 300 (au nord de l'anse) 114
Figure 90 : Impact du rechargement sur Anse Madame (inspiré du BRGM. Source: Dupuy)……..... 118

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Conséquences potentielles du changement climatique sur le littoral 44

Tableau 2 : caractéristiques de la rivière de Fond Nigaud (COICAUD, 2015). 61

Tableau 3 : Différence entre DGPS et Tachéomètre (Hénnaff *et* al, 2014) 73

Tableau 4: Dynamique du nord de la plage d'Anse Collat (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation..... 99

Tableau 5: Dynamique du centre de la plage d'Anse Collat (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation..... 100

Tableau 6: Dynamique du sud de la plage d'Anse Collat (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation..... 100

Tableau 7 : Dynamique du nord de Madiana (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation..... 101

Tableau 8 : Dynamique du Sud de la plage de Madiana (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation..... 102

Tableau 9: Dynamique au centre de la plage (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation..... 103

Tableau 10 : Dynamique au centre de la plage (Source : DUPUY) -> + : accumulation/ - : érosion/ = : Stabilisation..... 103

Tableau 11 : récapitulatif des dynamiques de plage d'Anse Collat 107

Tableau 12 : Récapitulatif des dynamiques de plage de Madiana 109

Tableau 13 : Récapitulatif des dynamiques de plage d'Anse Madame..... 112

Tableau 14 : Les tendances dynamiques à chaque échelle de temps 116

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS 5
REMERCIEMENTS 6
SOMMAIRE 7
INTRODUCTION 8
ETAT DE L'ART 15
A/ Gestion environnementale 15
- Les politiques environnementales 15
- Les études préalables 18
- Méthode de lutte rigides/ souples 28

B/ La dynamique des littoraux martiniquais 39
- Causes Anthropiques : 41
- Causes Naturelles : 42
- Les vagues 46
- Les courants littoraux 49
- Les courants de marées 53
- La cellule sédimentaire ou cellule de dérive littorale ou encore hyprosédimentation : 53
- Les eaux d'écoulement et d'infiltrations 55
- Les actions physico-chimiques 56
- Les actions biologiques (faunes et flores) 56

C/ Le littoral de Schoelcher et ses problèmes d'érosion 57
- Présentation brève de chaque plage 58
- Etude approfondie de la dynamique des plages de Schœlcher 62

D/ les perspectives de rechargement de plages à Schoelcher (Méthodes, efficacités...) 66
2/ METHODOLOGIE : ESSAIS DE CARACTERISATION MULTISCALAIRE 69
A/ Cartographie du trait de côte : approche à long terme 69
B/ La surveillance topographique des plages : approche à moyen terme 71
- Le Tachéomètre et GPS (Global Positionning System) 73
- Le DGPS (Differencial Global Positionning System) 73

C/ mise en place des protocoles MNT 74
D/ Suivi par photographie fixes 77

3/ RESULTATS 78
A / Analyses photographiques 78
- Impact de la tempête Ericka 78
- Forte houle entre le 12 et le 16 /01/2016 80

B / Les tendances dynamiques identifiables à la travers la technique du DSAS 82
- Anse-Madame 82
- Anse Collat 85
- Fond Lahaye 88
- Madiana 91

C/ Etude du littoral schoelcherois à l'aide des profils de plage 95
- Dynamique de la plage de Fond Lahaye 95
- Dynamique de la plage d'Anse Collat-Lido 96
- Dynamique de la plage d'Anse-Madame 96
- Dynamique de la plage de Madiana 97
- Anse Collat 99
- Madiana 101
- Anse-Madame 102

D / MNT différentiel 105
- Anse Collat 105
- Madiana 108
- Anse Madame 110

DISCUSSION 116
CONCLUSION 120
LES SIGLES 132
BIBLIOGRAPHIE 133
LISTE DES ILLUSTRATIONS 144
LISTE DES TABLEAUX 148
TABLE DES MATIERES 149