



GUIDE POUR LA
PROTECTION
ET LA
RÉHABILITATION
DES
PLAGES
DE LA
GRANDE
CARAÏBE



© Association of Caribbean States 2024
Publié par l'Association des États des Caraïbes
Secrétariat de l'AEC
5-7 Sweet Briar Road, Saint Clair,
Port of Spain,
Trinité, Indes occidentales.
WWW <http://www.acs-aec.org>
Téléphone: 1-868-622-9575

Tous droits réservés.

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, ni stockée dans un système de récupération électronique, ni transmise sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, électronique, mécanique, photocopie, enregistrement ou autre, sans l'autorisation préalable écrite de l'auteur et des éditeurs.

Si vous avez des questions concernant cette publication, écrivez-nous à :
mail@acs-aec.org

Des exemplaires supplémentaires sont disponibles auprès de :
Secrétariat de l'Association des États des Caraïbes | Communications
communications@acs-aec.org
Imprimé par Royards Publishing Company Limited
7A Macoya Industrial Estate, Macoya,
Trinité, Indes occidentales
Téléphone: 1-868-645-0423 / 663-6002
Fax: 1-868-663-3616
E-mail: royards@aol.com
Site Web: <http://www.royards.com>

Remerciements

Le groupe de rédaction de ce guide a été formé par:

Dr. Miguel Canals du Centre pour la Science Océanique Appliquée de l'UPRM à l'Université de Mayagüez, Porto Rico;

Dr. Ywenn de la Torre, Direction Régionale Guadeloupe du BRGM;

Dr. José Luis Juanes du Département des Processus Physiques, Institut des Sciences Marines (CIMAR), Cuba;

Dr. Constanza Ricaurte Villota de l'Institut de Recherche Marine et Côtière (INVEMAR), Colombie;

Dr. Carlos Valdes du Département de Sismologie, Institut de Géophysique de l'Université Nationale Autonome du Mexique.

Tous sont membres du Groupe Consultatif Technique du projet "Littoraux Sablonneux (SSP)". Avec la publication de ce guide, le SSP a terminé le COMPOSANT 5 et a atteint son Objectif 6.

Table Des Matieres

Remerciements	iii
Table Des Matieres.....	iv
Liste des tableaux.....	vii
Table des figures	viii
Preface	xiii

Chapitre 1

Introduction et objectif du guide	1
--	---

Chapitre 2

Définition de plage	3
2.1. Les Plages de la « Grande Caraïbe »	4
2.2. Délimitation physique d'un profil de plage dans le cas de la Grande Caraïbe	5
2.3. Types de plages de la Grande Caraïbe selon la morphologie de la côte et la composition du sable.	10
2.4. Comportement dynamique d'une plage. Outil pour l'interprétation correcte des causes de l'érosion des plages.....	14
2.5. La plage : composante des écosystèmes marins et côtiers de la Grande Caraïbe.....	19
Synthèse.....	20

Chapitre 3

L'érosion sur les plages de la Caraïbe	22
3.1. Progression et intensité de l'érosion.....	22
3.1.1 Vue d'ensemble de l'érosion côtière dans la Caraïbe.	22
3.1.2. Répartition géographique et variations	23
3.1.3. Impacts économiques et environnementaux de l'érosion.....	25
3.2. Erosion ou accrétion.....	25
3.3. Causes naturelles et anthropiques de l'érosion.....	27
3.3.1. Facteurs naturels d'érosion.	27
3.3.2. Les causes anthropiques de l'érosion	29
3.4. Identifier les cycles et les phénomènes d'érosion	31

Synthèse.....	34
---------------	----

Chapitre 4

Surveillance de l'érosion côtière	35
4.1. Indicateurs des processus d'érosion.	36
4.1.1. Indicateurs à observer	36
4.1.2. Indicateurs à mesurer.	39
4.2. Paramètre de la météo marine.	40
4.3. Actions anthropiques	42
4.4. Procédure de sélection des plages du réseau de surveillance.	42
4.5. Méthodes de mesure et d'échantillonnage sur le terrain.	43
4.5.1. Topographie	43
4.5.2. Bathymétrie.....	50
4.5.3. Sédimentologie.....	52
4.5.4. Hydrométéorologie.	53
4.5.5. Fréquence des observations.	56
4.5.6. Résumé des méthodes de terrain et exemple de protocole.	57
4.6. Outils numériques pour le traitement de l'information.....	59
4.7. Points clés pour les décideurs.....	64

Chapitre 5

Aperçu des modèles numériques et de leur rôle dans la compréhension et l'atténuation de l'érosion côtière.....	64
5.1. Introduction	64
5.2. Fonctionnement des modèles numériques.....	64
5.3. Modélisation numérique des ondes.....	69
5.4. Modélisation numérique des courants.....	70
5.5. Modélisation numérique du transport des sédiments et de l'érosion côtière.....	72
5.6. Modélisation numérique à l'appui de la conception de projets	74
Synthèse.....	76

Chapitre 6

Mesures de protection et de réhabilitation des plages de la Caraïbe	77
6.1. Procédure d'évaluation des causes de l'érosion et propositions de solutions....	77

6.2.	Considérations d'ordre juridique.....	79
6.3.	Solutions pour atténuer l'érosion côtière.....	79
6.3.1.	Solutions dures ou infrastructures grises.....	80
6.3.2.	Solutions douces ou solutions écologiques.....	83
6.3.3.	Ingénierie écologique.....	83
6.3.4.	Ecosystem restoration methods.....	86
6.3.5.	Stratégies de gestion du littoral.....	89
6.3.6.	Solutions hybrides.....	91
6.3.7.	Analyse coûts/bénéfices.....	92

Chapitre 7

Enseignements tirés du développement du projet Littoraux sablonneux <Sandy Shorelines>	94	
7.1.	Composante 1. Mise en place de points focaux pour les pays participants.....	94
7.2.	Composante 2. Renforcement des capacités institutionnelles et des ressources humaines.....	95
7.3.	Composante 3. Mise en place du réseau régional de surveillance de l'érosion.....	96
7.4.	Composante 4. Elaboration de 3 projets de réhabilitation de plages sous forme d' « études de cas ».....	97

Chapitre 8

Recommandations pour les décideurs	100
---	-----

ANNEXES: L'érosion sur les plages de la Caraïbe	107
--	-----

Annexe A: Sources de données océanographiques pour la réalisation d'études métocéaniques.....	107
--	-----

Annexe B: Modèles numériques océanographiques utilisés pour comprendre les processus d'érosion et concevoir des projets de protection des plages.....	110
---	-----

Références	114
-------------------------	-----

Liste des tableaux

Tableau 1: Tableau présentant les pays participants et les institutions points focaux. .xvi	
Tableau 2: Synthèse des méthodes et outils de surveillance	57
Tableau 3: Solutions contre l'érosion côtière par catégorie	79

Table des figures

Document 1: Terminologie du profil d'une plage, Shepard (1973).....	9
Document 2: Terminologie du profil d'une plage (adapté de <Shore Protection Manual, 1984>).	9
Document 3: Terminologie d'un profil de plage. Cours post-universitaire du projet « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022).....	10
Document 4: Illustration de la terminologie des profils de plage. Cours post-universitaire du « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022)	11
Document 5: Illustration de la terminologie des profils de plage. Cours post-universitaire du « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022)	11
Document 6: Plage accolée à une falaise. Plage d'El Holandés. Péninsule de Guahanacabibes, Cuba. Cours post-universitaire du projet « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022)	12
Document 7: Plage en pente douce avec des formations herbacées et arborescentes dans sa partie intérieure. Cours post-universitaire du projet « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022). Plage Sumidero de Batabanó, province d'Artemisa, Cuba	13
Document 8: Plage linéaire de la Caraïbe insulaire d'une longueur d'environ 20 km. Plage de Varadero sur la péninsule de Hicacos, Cuba.....	14
Document 9: Plage coincée entre deux corniches rocheuses. Plage de Las Cuevas, Trinité-et-Tobago.	15
Document 10: Plage soutenue par une structure artificielle. Punta Cancun. Plage de Cancun, Quintana Roo, Mexique	15
Document 11: Schéma simplifié du fonctionnement du système d'une plage. Cours post-universitaire du projet « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022)	18

Document 12: Une falaise sur la plage causée par une tempête occasionnelle sur la Gold Coast.....	19
Document 13: Déplacement vers la terre de la falaise active comme preuve claire de la tendance érosive d'une plage. Granville, Cedros, Trinité et Tobago	20
Document 14: Vue en plan de la séquence des changements de la morphologie de la plage et de sa zone submergée dans un processus d'accrétion (graphique de gauche) et dans un processus d'érosion (graphique de droite) (Short, (1999), basé sur Short, (1979); Wright et Short, (1984); Sunamura).	21
Document 15: Traverse avec courant de retour à côté pour rejoindre la côte et former un profil réfléchissant..	22
Document 16: Catastrophic erosion and infrastructure damage in Puerto Rico due to Hurricane María.....	26
Document 17: Certains composants d'un budget sédimentaire, tirés du Département de la conservation des terres et des eaux de Nouvelle-Galles du Sud en 2001, Gestion des dunes côtières : Un manuel de techniques de gestion et de réhabilitation des dunes côtières, Unité côtière, DLWC, Newcastle	29
Document 18: Facteurs influençant l'érosion côtière et le transport des sédiments, adapté de Splinter et Coco (2021).....	31
Document 19: Interruption du transport de sédiments littoraux causée par des structures côtières.....	33
Document 20: La relation entre les murs de protection côtiers et la perte de plage.....	34
Document 21: Cycle typique d'érosion et d'accrétion des plages dans un cas sans perte permanente de sable. Adapté de l'État de Nouvelle-Galles du Sud et du Bureau de l'environnement et du patrimoine 2018.	37
Document 22: Modèle typique d'érosion des plages où l'on observe une tendance à l'érosion à long terme. Adapté de l'État de Nouvelle-Galles du Sud et du Bureau de l'environnement et du patrimoine 2018.	38

Document 23: Profil de plage et caractéristiques morphologiques (adapté de Kraus, 2005)	41
Document 24: Contraintes météo-marines en fonction de leur échelle temporelle (adapté du BRGM)	44
Document 25: Différents niveaux de la mer tenant compte des contraintes atmosphériques et marines (Adapté du BRGM).....	45
Document 26: Antigua and Barbuda Monitored Sites (Sandy Shorelines Project)	47
Document 27: Basic equipment for profile monitoring: Handheld GPS	49
Document 28: Images of Beach profiling with GNSS systems: fixed and mobile stations	51
Document 29: Levé topographique utilisant la photogrammétrie par drone.	52
Document 30: Surveillance par caméra fixe : Jamaïque (Projet Littoraux Sablonneux).....	53
Document 31: Surveillance bathymétrique avancée à bord d'un bateau.....	55
Document 32: Différents types de sable : biodétritique, volcanique, alluvial (G-D)	56
Document 33: Surveillance des vagues : bouée fixe.....	57
Document 34: Exemple de plateforme publique de prévisions des vagues (capture d'écran de www.windy.com prise le 21 mars 2024).....	58
Document 35: Tide monitoring: tide gauge.....	59
Document 36: DSAS génère des transects qui sont projetés perpendiculairement à la ligne de base de référence avec un espacement spécifié par l'utilisateur le long de la côte. DSAS mesure la distance entre la ligne de base et chaque intersection de la ligne de côte le long d'un transect, et combine les informations de date et l'incertitude de position pour chaque ligne de côte.....	65
Document 37: Traitement des données relatives aux profils de plage : à partir d'un relevé sur le terrain (à gauche) ou d'une extraction de MNE (à droite)	66

Document 38: Analyse temporelle de la grille topographique : soustraction de l'élévation d'une date à l'autre pour obtenir l'érosion et l'accumulation pour chaque pixel (BRGM)	67
Document 39: Série temporelle avec superposition des positions du trait de côte (couleurs liées aux profils), du vent et des vagues (de haut en bas)	68
Document 40: Différences entre les grilles structurées et non structurées,, © 2001-2024 FVCOM @ MEDML. Conçu par Dr. Chen.....	72
Document 41: Exemple de modélisation numérique des vagues réalisée par Inversiones Gamma dans le cadre de l'exécution du projet exécutif de restauration de la plage de Bonasse Beach dans la baie de Cedros, à Trinité-et-Tobago. La hauteur des vagues (en bleu) et leu.....	76
Document 42: Exemple de la sortie d'un modèle de circulation côtière utilisé par Inversiones Gamma dans le cadre de son exécution du projet de restauration des plages exécutif à la plage de Bonasse à Cedros Bay, Trinidad et Tobago.	78
Document 43: Example of sediment transport and morphology change modelling carried out by Inversiones Gamma for the executive beach restoration project at Runaway Bay Beach in Antigua and Barbuda. Taken from the report by Morales Diaz et al. (2022).	81
Document 44: Méthodologie pour la réhabilitation et la protection des plages (Adapté de Torres-Hugues & Córdova-López (2010).....	85
Document 45: Exemple de épis côtiers.....	88
Document 46: Curved face retaining dike	89
Document 47: Brise-lames immergé	90
Document 48: Artificial breakwater.....	90
Document 49: Alimentation d'une plage par dragage.....	93
Document 50: Géotubes sur une plage.....	94
Document 51: Restauration de dune.....	95

Document 52: Un scientifique marin menant un projet de restauration des coraux dans un écosystème récifal endommagé.....	96
Document 53: Step-by-Step Guide to the Marine Spatial Planning Process (Adapted from Ehler and Douvere, 2013).....	98
Document 54: Cadre d'évaluation des impacts des alternatives de gestion de l'érosion (tiré de Porro et al., 2020).	100
Document 55: À gauche. Dune conçue pour protéger l'hôtel des événements érosifs extrêmes et de la montée du niveau de la mer. Hôtel IberoStar. Plage de Varadero, Cuba. Juillet 2015. À droite. Quelques jours après l'ouragan Irma en septembre 2017. (Juanes J. L. 2017).....	105
Document 56: Le modèle de vague WaveWatch 3 pour la Caraïbe est disponible à l'adresse suivante http://ww3.cimh.edu.bb	116

PREFACE

L'Association des États de la Caraïbe (AEC) a organisé le premier Symposium de la Commission de la mer des Caraïbes dans la ville de Port of Spain, République de Trinité-et-Tobago, les 23 et 24 novembre 2015. D'éminents experts de dix-huit pays de l'AEC et des représentants d'organisations internationales et régionales y ont participé.

L'événement a été conçu autour du slogan « Défis, dialogues et coopération pour la durabilité de la mer des Caraïbes » et s'est concentré sur trois problèmes de l'environnement marin ayant un impact négatif sur les communautés côtières et l'économie de la région : la croissance incontrôlée d'espèces invasives (en particulier le poisson-lion), l'arrivée des sargasses et l'érosion côtière.

Entre autres aspects, les participants à cette manifestation ont convenu qu'il était essentiel de disposer d'un financement international pour promouvoir une recherche plus large sur les thèmes du symposium et, dans ce sens, le Secrétariat de l'AEC a poursuivi ses actions pour l'identification et la réalisation d'accords avec les pays et les institutions qui ont exprimé leur volonté de contribuer au soutien financier de projets sur les thèmes abordés.

Afin d'analyser plusieurs propositions de projets, la Commission de la mer des Caraïbes a tenu la première réunion de sa sous-commission scientifique et technique en mai 2016, au cours de laquelle le projet « Évaluation de l'impact du changement climatique sur les littoraux sablonneux de la Caraïbe : alternatives pour son contrôle et sa résilience » a été accepté pour son état d'avancement. Il a été abrégé « Littoraux sablonneux » et a été approuvé lors du 7ème Sommet des Chefs d'Etat et de Gouvernement de l'AEC à La Havane, Cuba, en juin 2016.

En réponse à la volonté exprimée par le gouvernement de la République de Corée de coopérer au financement des projets de l'AEC, en septembre 2016, le projet « Littoraux sablonneux » a été présenté aux représentants de l'Agence coréenne de coopération internationale (KOICA) au siège de l'AEC à Port of Spain, ce qui a permis de lancer le processus de mise en œuvre du projet.

L'objectif général du projet reflète l'intérêt exprimé lors du premier Symposium de la Commission de la mer des Caraïbes : « améliorer la résilience des communautés côtières face au changement climatique et à l'élévation du niveau de la mer, grâce à

la mise en place d'un réseau de surveillance de l'érosion côtière et à l'application des meilleures pratiques en matière de conservation et de réhabilitation des plages ».

Les objectifs spécifiques suivants ont été inclus dans l'élaboration du projet :

1. Mettre à jour le diagnostic de l'intensité, de l'étendue et des causes de l'érosion dans la région Caraïbe.
2. Mettre en place un réseau régional de surveillance de l'érosion côtière.
3. Développer des projets de réhabilitation des plages dans les secteurs prioritaires d'intérêt économique et social.
4. Fournir des conseils et superviser l'exécution des projets de réhabilitation des plages.
5. Contribuer à la création de capacités institutionnelles et de ressources humaines pour assurer les meilleures pratiques juridiques et techniques en matière de lutte contre l'érosion.
6. Rédiger un manuel de réhabilitation des plages avec des critères scientifiques et techniques qui répondent aux caractéristiques particulières des plages tropicales de la région Caraïbe.
7. Élaborer des recommandations pour l'application des meilleures pratiques réglementaires et techniques de gestion du processus d'érosion.
8. Fournir un système amélioré de surveillance de l'érosion des plages pour des applications pratiques et futures dans la recherche pour la compréhension des causes de l'érosion.

Conformément aux objectifs proposés, les tâches du projet ont été réparties en six composantes :

COMPOSANTE 1. Mise en place de points focaux pour les pays participants.

COMPOSANTE 2. Renforcement des capacités institutionnelles et des ressources humaines.

COMPOSANTE 3. Mise en place d'un réseau régional de surveillance du processus d'érosion.

COMPOSANTE 4. Développement de 3 projets de réhabilitation de plages.

COMPOSANTE 5. Préparation du Manuel de réhabilitation des plages pour la région Caraïbe.

COMPOSANTE 6. Conférence régionale sur la préservation des plages.

Le premier résultat méthodologique du projet a été obtenu dans la COMPOSANTE 1 lorsque les Points Focaux ont été préparés et ont achevé la proposition du « Profil de Projet pour l'Elaboration du Plan National pour le Processus d'Erosion Côtière » qui reflète la procédure organisationnelle pour la conduite des tâches à l'échelle du pays (Annexe 1).

Les pays participants faisaient partie du projet « Évaluation de l'impact du changement climatique sur les littoraux sablonneux de la Caraïbe : alternatives pour leur contrôle et leur résilience » et les institutions nationales qui servent de points focaux dans chacun d'entre eux.

Tableau 1 Tableau présentant les pays participants et les institutions points focaux.

Pays participants	Institutions servant de points focaux
Antigua-et-Barbuda	Point Wharf Fisheries Division. Ministère
Costa Rica	Université nationale du Costa Rica
Cuba	Institut des Sciences marines (ICIMAR) Ministère des Sciences, de la Technologie et de l'Environnement
République Dominicaine	Ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles
Guatemala	Ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles
Haiti	Office national des Diagnostics environnementaux (BNEE)
Jamaïque	Agence nationale de l'Environnement et de la planification (NEPA)
Panama	Ministère de l'Environnement
Trinité-et-Tobago	Institut des Affaires maritimes (IMA)

Chapitre 1

INTRODUCTION ET OBJECTIF DU GUIDE

La région de la Grande Caraïbe (RGC), telle que définie dans la Convention pour la protection et la mise en valeur du milieu marin (PNUE 1983), s'étend de la côte nord-est du Brésil au Cap Hatteras, au large de la Caroline du Nord (États-Unis). Il s'agit de l'une des régions les plus complexes du monde sur le plan géopolitique, composée de 28 pays indépendants (entre les pays continentaux et les petits États insulaires en développement - PEID) et de 16 territoires d'outre-mer d'États métropolitains (Mahon et al., 2010), avec des différences en termes de taille et de niveau de développement socio-économique. L'héritage colonial des pays européens comprend cinq langues officielles dans la région (anglais, espagnol, français, néerlandais et portugais) (Fanning & Mahon, 2017), ainsi que des éléments culturels apportés par les autochtones et d'autres groupes humains en Amérique.

Une grande partie de l'économie de la région de la Grande Caraïbe est basée sur l'industrie du tourisme au sein de laquelle les plages sablonneuses jouent un rôle important car elles sont commercialisées comme un produit mer-sable-soleil attrayant. Cependant, ces plages sont potentiellement menacées par l'impact des activités anthropogéniques (Defeo et al., 2009) et le changement climatique qui induit l'élévation du niveau de la mer (Spencer et al., 2022), l'érosion côtière, l'augmentation des épisodes de vagues extrêmes, et les ouragans. L'érosion côtière, définie comme un processus par lequel le littoral s'adapte aux variations du niveau de la mer, des niveaux d'énergie, de l'apport en sédiments et de la topographie existante (Cooper et McKenna, 2007), est l'une des plus grandes menaces pour les zones côtières de la Grande Caraïbe. Des études montrent que 70 % des plages de la Caraïbe orientale ont enregistré un recul du trait de côte depuis les années 1980, avec des taux compris entre - 0,27 m / an et -1,06 m / an (PNUE, 2003).

Ce guide a pour but de proposer des critères scientifiques et techniques qui répondent aux caractéristiques particulières des plages tropicales de la région de la Grande Caraïbe, pour le suivi de l'érosion côtière de ces plages, ainsi que pour l'établissement de mesures d'atténuation du problème. Nous espérons que ce guide pourra être utilisé par la communauté scientifique en général, par les décideurs et par d'autres parties prenantes intéressées par la situation côtière de la région, que ce soit au niveau local ou international.

Le guide a été préparé conformément au contenu des cours et des conférences donnés pendant les actions de formation de la COMPOSANTE 2, ainsi qu'aux procédures et protocoles appliqués dans la mise en place du réseau régional de surveillance du processus d'érosion, COMPOSANTE 3, et aux concepts et méthodologies appliqués dans les trois projets exécutifs de réhabilitation des plages qui relèvent de la COMPOSANTE 4.

Les thèmes développés dans chaque chapitre intègrent les résultats d'un examen minutieux de la littérature qui conduit à une mise à jour des connaissances actuelles, mais toujours dans le cadre d'une évaluation critique de ce qui est réellement applicable et pratique dans le contexte des caractéristiques environnementales et socio-économiques de la région de la Grande Caraïbe. Dans ce sens, une attention particulière est accordée aux contributions faites dans ce domaine par l'éminent spécialiste de la région, le Dr. Guillian Cambers, avec son travail reconnu sur l'érosion des plages des petites îles de la Caraïbe. Compte tenu du fait que de nombreux sujets abordés dans le guide sont développés de manière plus approfondie dans des manuels et ouvrages spécialisés, il a été décidé d'inclure des références commentées à ces textes afin de limiter la longueur du guide.

Chapitre 6. Leçons tirées du développement du projet des littoraux sablonneux, est conçu pour mettre en évidence tous les éléments qui, dans le développement du projet, ont servi à identifier les limites et les insuffisances dans la conception des règlements et la conception des actions d'ingénierie pour le contrôle de l'érosion et l'adaptation aux effets du changement climatique, et qui devraient faire l'objet d'une attention particulière dans les actions côtières à venir.

Pour terminer, le Chapitre 7. Recommandations pour les décideurs, une procédure méthodologique est proposée avec l'ordre logique des actions de recherche et de surveillance, la définition des solutions, la conception des actions, la supervision de l'exécution des travaux et l'évaluation de leur efficacité, de sorte qu'un cycle est complété dans l'action côtière, en suivant les préceptes de la gestion côtière intégrée.

Chapitre 2

DÉFINITION DE PLAGE

Le mot plage est né de la nécessité pour l'homme de différencier dans la zone côtière les espaces formés par l'accumulation de matières friables, dont la faible pente et la faible consistance du sol facilitent les mouvements vers et depuis la mer.

En plus de devenir les lieux d'embarquement et de débarquement des premiers navigateurs et pêcheurs, les plages étaient des zones propices à la collecte de nourriture et d'objets d'origine marine aux usages multiples.

Plus récemment, les plages ont été reconnues comme le lieu de récréation et de loisirs préféré de nombreuses personnes, devenant ainsi une ressource naturelle de grande valeur pour l'industrie du tourisme, qui se distingue de manière particulière dans la région de la Grande Caraïbe.

Au fil des années, le concept technique de plage a subi peu de changements et, dans la littérature spécialisée, on le désigne comme la bande de contact entre la terre et la mer dans laquelle se produit le dépôt de matières friables de différentes origines, où le sable prédomine avec des particules qui, en raison de leur taille, se situent entre 1,0 mm et 0,062 mm, selon la classification de Wentworth, Shore Protection Manual, (1984), largement utilisée dans le monde entier. Les dépôts de sable qui se forment sur les rives des rivières et des lacs sont également considérés comme des plages et sont utilisés par l'homme pour diverses activités économiques et sociales, bien que ce guide ne fasse référence qu'aux côtes marines sablonneuses.

A titre de données intéressantes, on estime que les littoraux sableux représentent entre 34% et 40% (170 000 km) de la longueur totale des côtes, (Hardisty, 1990) et (Bird, 1996), bien qu'ils couvrent essentiellement 100% des côtes de la Hollande, 60% de celles de l'Australie et 33% de celles des Etats-Unis. (Short, 1999, in Shwartz, 2005), pour ne citer que quelques exemples de pays possédant de vastes littoraux sablonneux.

2.1. Les Plages de la « Grande Caraïbe »

Dans la définition de la « Grande Caraïbe » de juillet 2023 qui figure sur le site web de l'Association des États de la Caraïbe (AEC), il est clairement indiqué qu'il s'agit d'un concept politique qui inclut les territoires bordant la mer des Caraïbes et d'autres États insulaires présentant des caractéristiques historiques, sociales et culturelles similaires, reliant les Antilles aux pays d'Amérique centrale, d'Amérique du Nord et d'Amérique du Sud.

Selon ce concept, la « Grande Caraïbe » est composée de 25 États membres et de 12 États associés pour un total de 37 États qui, ensemble, ont une longueur de côte estimée à 25 738 km, ce qui représente seulement 1,6% des côtes du monde, selon les données fournies par The World Factbook, (<https://www.cia.gov/the-world-factbook/field/coastline/>).

Malgré la petite étendue des côtes de la “Grande Caraïbe” par rapport au reste du monde, la région est internationalement reconnue pour les centaines de plages qu'elle possède avec des conditions naturelles exceptionnelles pour l'activité touristique. Il est à noter qu'avec seulement 1,6% des littoraux mondiaux, 6 des 20 meilleures plages (soit 30%) se trouvent dans la région selon une sélection des “Traveler's Choice Awards” organisés par TripAdvisor en 2023.

Le rapport « Diagnostic des processus d'érosion sur les plages sablonneuses de la Caraïbe » (UNEP/ROLAC. GPA. 2003) signalait déjà que « contrairement à l'expansion du tourisme sur les plages, les processus d'érosion sont plus fréquents et causent de graves dommages aux installations hôtelières et à la détérioration environnementale de la côte ». Le rapport susmentionné fait référence à des enquêtes sur le processus d'érosion dans plusieurs pays de la région, lancées dans les années 80, au cours desquelles les premiers inventaires des plages de la région ont été élaborés.

En 1996, dans le cadre du projet « Stabilité des côtes et des plages dans les îles de la Caraïbe » (COSALC) parrainé par le Sea Grant College de l'Université de Porto Rico (UPR-SGCP) et avec le soutien de l'UNESCO, le Dr Guillian Cambers a mis en place un programme de surveillance des plages des petits États insulaires des Caraïbes orientales qui a permis d'enregistrer des dizaines de plages et d'évaluer le comportement du processus d'érosion sur ces plages (Cambers, 2005, dans Shwartz, 2005). Les résultats de cette surveillance ont été essentiels pour démontrer l'ampleur et l'étendue de l'effet érosif des ouragans entre 1990 et 1999 dans la région.

La préparation du réseau de surveillance des variations morphologiques et sédimentologiques des plages dans le cadre du présent projet « Littoraux sablonneux » a nécessité la mise à jour et l'expansion des stations de surveillance des pays participants qui, dans le cas des petites îles, ont utilisé comme référence les réseaux précédents constitués par le Dr. Cambers.

Dans le cas de la République dominicaine, de la Jamaïque, du Costa Rica et de Cuba, les réseaux de surveillance qu'ils avaient établis pour des projets lancés dans les années 80 du siècle dernier ont également été utilisés, suivant un processus continu de mise à jour et d'expansion. Par exemple, à Cuba seulement, avec une longueur de côte de 5735 km, l'inventaire atteint déjà 500 plages avec une grande diversité tant du point de vue morphologique que sédimentologique.

En réalité, la détermination du nombre de plages est conditionnée par les critères utilisés pour leur délimitation physique. Par exemple, il n'y a pas de limite de longueur minimale pour classer un secteur côtier sablonneux en tant que plage.

Il est courant de trouver dans la Grande Caraïbe des plages de moins de 100 m de long qui sont bien reconnues par la population pour leur utilisation traditionnelle en tant que sites de baignade et de loisirs. Cependant, dans les nombreuses îles inhabitées de la région, il y a des centaines de petites zones sablonneuses avec les mêmes caractéristiques qui ne présentent aucun usage ou qui ne sont reconnues comme plage dans aucun document.

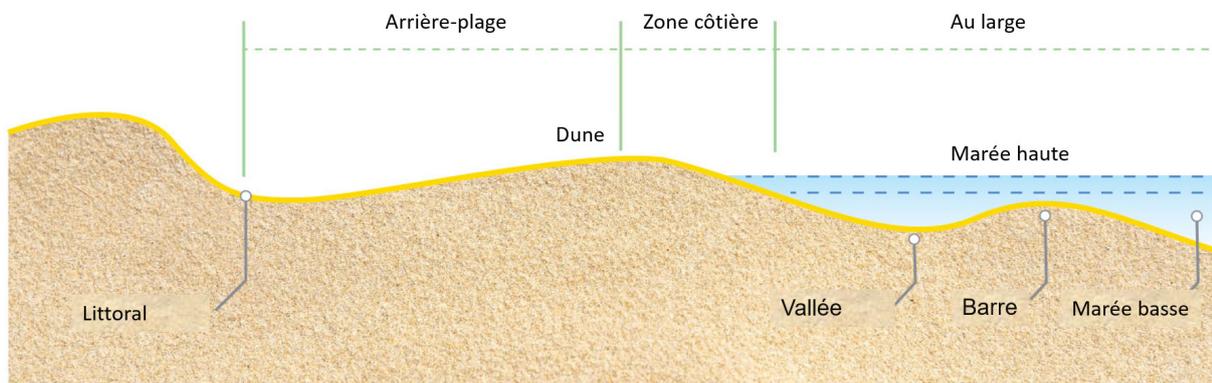
Combien y a-t-il donc de plages dans la Grande Caraïbe

Sans aucun doute, elles sont nombreuses et très bonnes pour le développement d'activités récréatives et de loisirs, mais pour parvenir à une utilisation durable des plages de la Grande Caraïbe, il est nécessaire de connaître les particularités qui les caractérisent du point de vue physique et environnemental et qui sont expliquées dans les sections suivantes du présent chapitre.

2.2. Délimitation physique d'un profil de plage dans le cas de la Grande Caraïbe

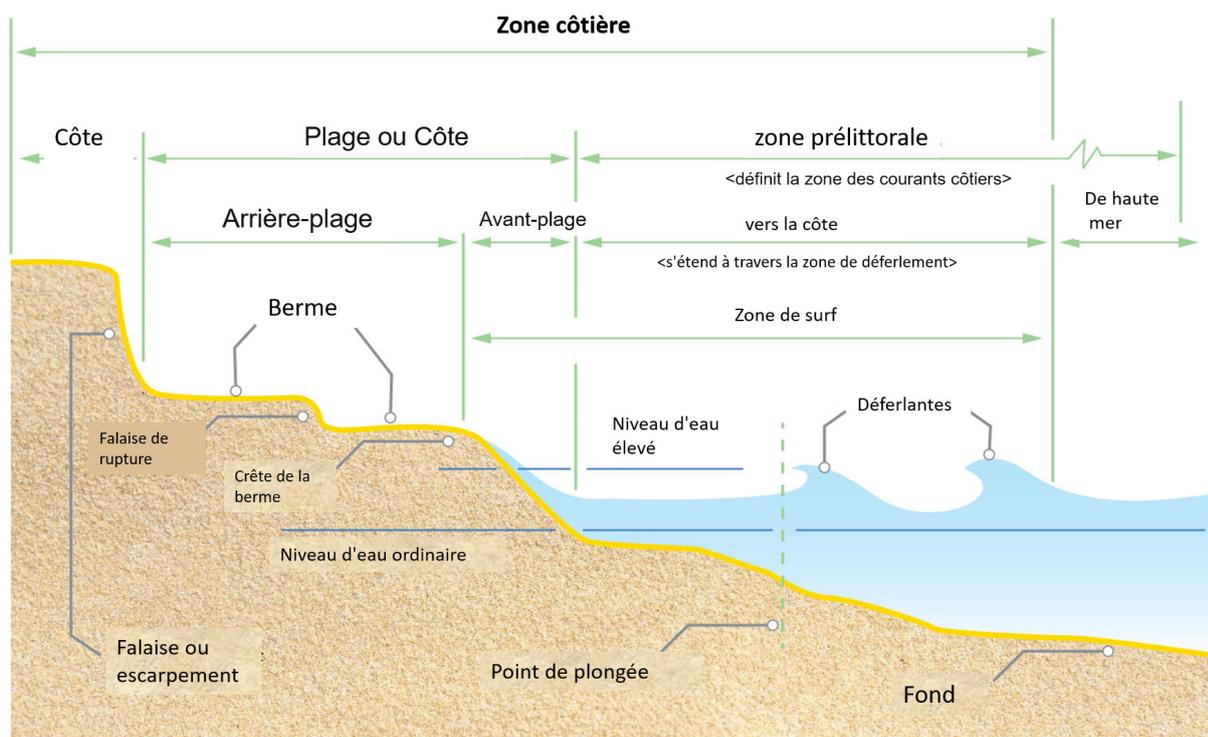
Dans la littérature spécialisée, il est possible de trouver différentes façons de concevoir les limites et le découpage du profil d'une plage, mais les éléments de base sont traités

avec une grande similitude dans tous les cas. Le Document 1 montre la classification proposée par Shepard (1973), qui se limite à exposer les éléments du profil de manière simple et qui est largement utilisée par de nombreux auteurs.



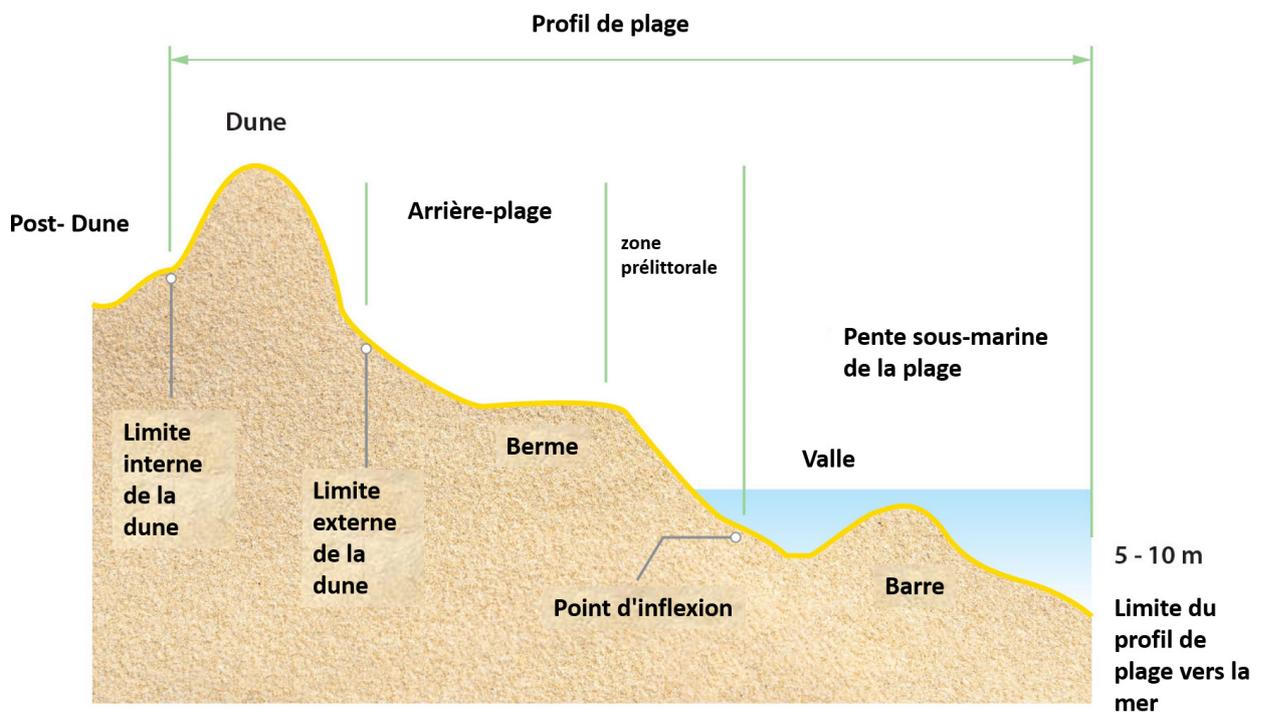
Document 1 Terminologie du profil d'une plage, Shepard (1973).

Dans le cas du Document 2 Terminologie du profil d'une plage (Shore Protection Manual, 1984). Document 2, la classification proposée dans le Manuel de Protection du Rivage (1984) est représentée, ce qui donne plus de détails sur les différentes parties du profil en fonction de leur morphologie et de l'influence des vagues et des marées. On observe également que la partie intérieure de la plage est limitée dans un escarpement où la limite de la plage avec la côte est fixée.

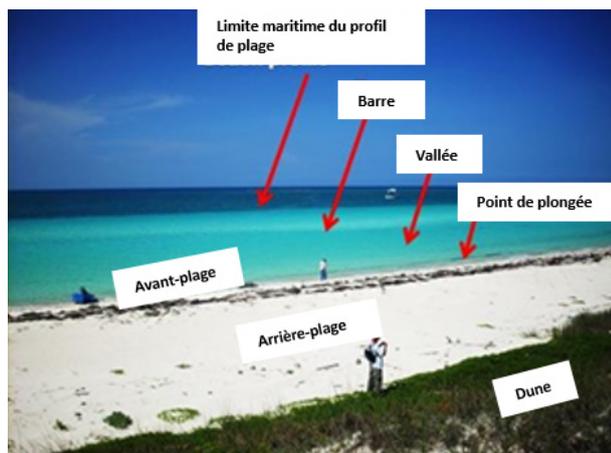


Document 2 Terminologie du profil d'une plage (Shore Protection Manual, 1984).

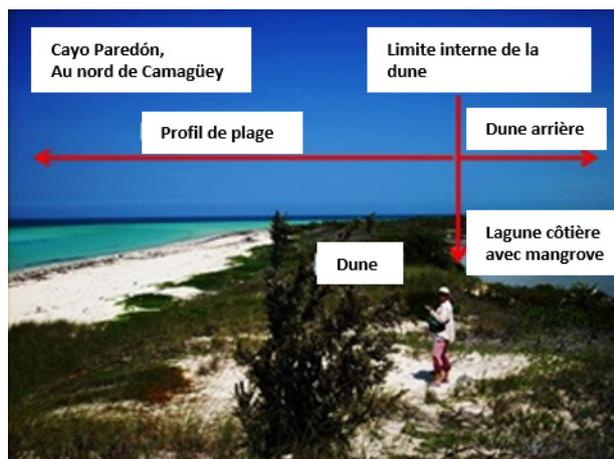
Il convient de noter que dans les deux classifications, il n'y a aucune référence au cas où la partie intérieure de la plage constitue une dune active participant aux processus d'érosion et d'accumulation typiques de la dynamique du profil de la plage. Étant donné que le processus d'érosion affecte les dunes sur de nombreuses plages des Caraïbes (GPA, UNEP, 2003), le cours de troisième cycle intitulé "Processus côtiers et critères méthodologiques pour la récupération des plages", dispensé dans le cadre de la composante de formation du projet "Littoraux sablonneux" (Juanes, 2018, 2021 et 2022), propose la terminologie du profil de plage illustrée dans le Document 3. Cette proposition défend l'idée d'inclure la dune dans la terminologie du profil dynamique de la plage, en valorisant également le rôle joué par la végétation en tant qu'élément dissipateur d'énergie lors des vagues extrêmes et en tant que barrière de retenue pour le sable transporté par le vent, phénomènes très bien observés dans la Grande Caraïbe. Comme on peut le voir dans le Document 3, la limite terrestre du profil se situe au pied de la face interne de la dune. La limite vers la mer est définie à l'endroit où le transport de matériau de plage est pratiquement nul, ce qui se produit régulièrement à des profondeurs comprises entre 5 mètres et 10 mètres.



Document 3 Terminologie d'un profil de plage. Cours post-universitaire du projet « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022).



Document 4 Illustration de la terminologie des profils de plage. Cours post-universitaire du « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022)



Document 5 Illustration de la terminologie des profils de plage. Cours post-universitaire du « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022)

Dans la Grande Caraïbe, en plus des plages avec des dunes dans leur partie intérieure, on observe fréquemment des plages soutenues par des falaises qui marquent la limite naturelle du profil vers la terre (Document 6).



Document 6: Plage accolée à une falaise. Plage d'El Holandés. Péninsule de Guahanacabibes, Cuba. Cours post-universitaire du projet « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022)

Il existe également de nombreuses plages en pente douce dont la partie intérieure est couverte de formations herbacées et arborescentes qui s'étendent vers la mer en fonction des mouvements des vagues et du vent (Document 7).



Document 7 Plage en pente douce avec des formations herbacées et arborescentes dans sa partie intérieure. Cours post-universitaire du projet « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022). Plage Sumidero de Batabanó, province d'Artemisa, Cuba.

L'importance pratique d'une définition des limites de la plage tenant compte des particularités morpho dynamiques des différents types de profils, répond à la nécessité d'avoir des critères techniques qui assurent une gestion correcte des plages. Très souvent, on constate que dans les pays de la région de la Grande Caraïbe, les instruments juridiques de gestion côtière ne comportent pas de définitions précises de la limite de la plage et, lorsqu'elles existent, elles ont été établies davantage en fonction de critères de propriété du terrain que des caractéristiques morpho dynamiques du profil. Les pays de la région doivent travailler à l'élaboration et à l'application d'une norme efficace pour la protection du profil morpho dynamique des plages, une question qui sera abordée dans ce chapitre.

2.3. Types de plages de la Grande Caraïbe selon la morphologie de la côte et la composition du sable.

La littérature spécialisée explique que la morphologie des littoraux sablonneux est le résultat de la combinaison de processus géologiques et hydrodynamiques, et du transport de sédiments qui produisent des plages linéaires, encastrées et soutenues à l'une de leurs extrémités. Les plages linéaires peuvent s'étendre sur des dizaines de kilomètres et se forment sur les plaines côtières où la roche sous-jacente n'a pas d'influence sur leur formation. Ces plages sont le résultat du transport de sédiments qui pénètrent dans la côte depuis la terre ou la mer et se forment principalement sur les continents.

Dans la Grande Caraïbe continentale, on peut reconnaître ces caractéristiques dans un long secteur de littoraux sablonneux de la Riviera Maya, dans l'État de Quintana Roo, au Mexique, d'une longueur d'environ 300 km. Bien que dans la Caraïbe insulaire il y ait peu de plages linéaires qui atteignent plusieurs kilomètres de long, l'exemple de la plage de Varadero à Cuba avec 20 km d'extension peut être souligné (Document 8).

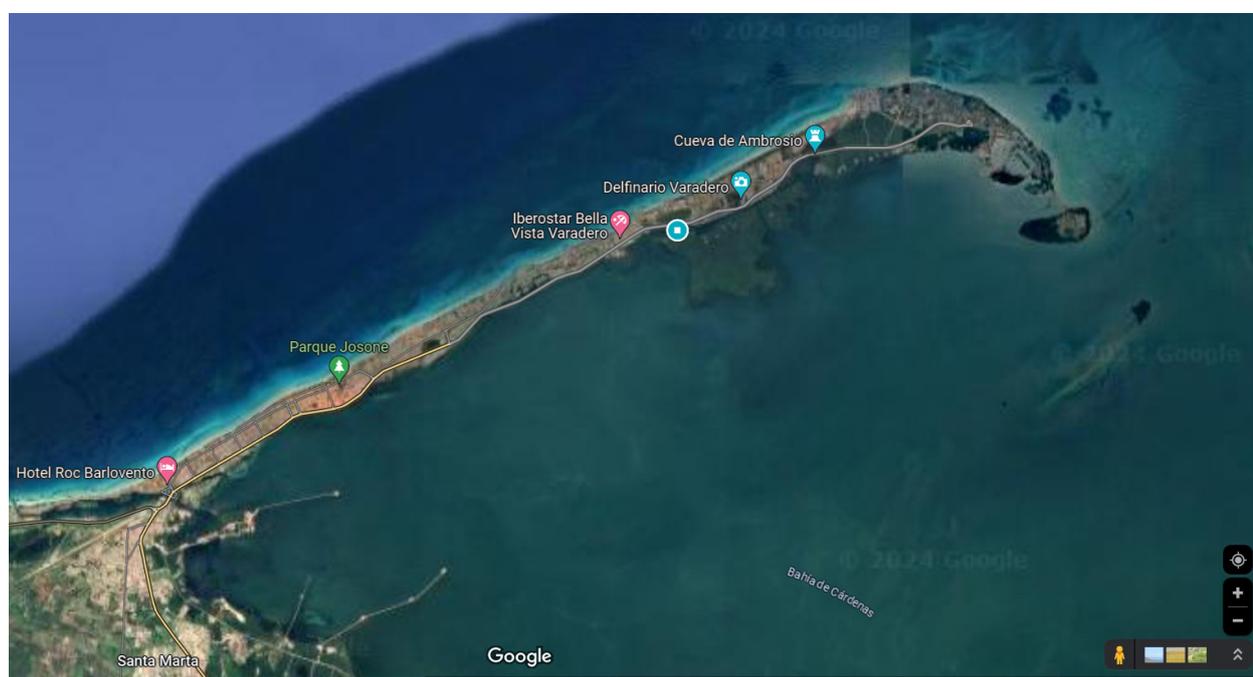
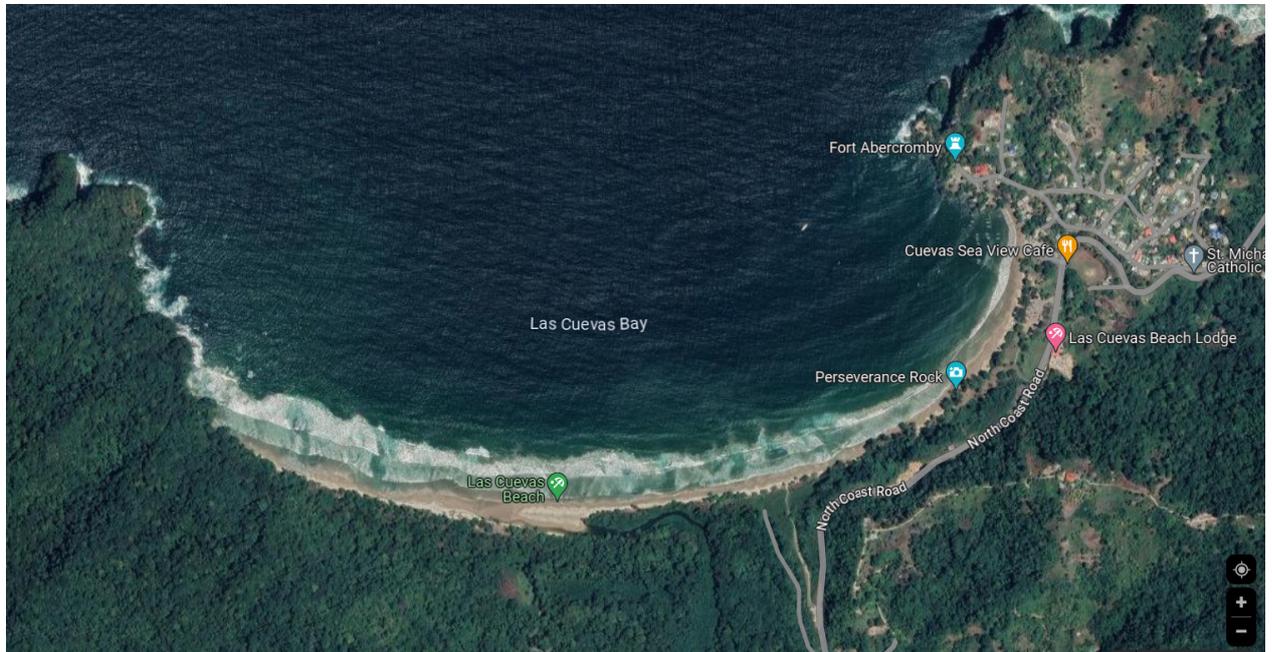


Figura 8 Playa lineal del Caribe insular con unos 20 km de longitud. Playa de Varadero en la Península de Hicacos, Cuba.

Cependant, la genèse géologique complexe des côtes continentales et des îles d'origine volcanique de l'arc antillais, provoque une morphologie accidentée qui facilite la formation de nombreuses plages coincées entre deux corniches rocheuses avec une

configuration en plan de coquille ou d'anse. La plage de Las Cuevas à Trinité-et-Tobago est un bon exemple de ce type de plage (Document 9).



Document 9 Plage coincée entre deux corniches rocheuses. Plage de Las Cuevas, Trinité-et-Tobago.

Les plages soutenues ont un support à une extrémité, qui est généralement une corniche rocheuse, bien que le support puisse être produit par l'existence de structures artificielles (Document 10).



Document 10 Plage soutenue par une structure artificielle. Punta Cancun. Plage de Cancun, Quintana Roo, Mexique

En revanche, la classification des plages selon la composition du sable se fait à la fois en fonction de leur granulométrie et de la genèse du matériau.

Les plages formées de sédiments de la taille du sable (2-0,062 mm) sont les plus abondantes au monde, bien qu'il existe également des plages de graviers (4-2 mm), de petits cailloux (64-4 mm), de gros cailloux (256-64 mm) et de blocs (1 024-256 mm), selon la classification de Wentworth mentionnée ci-dessus.

Les évaluations présentées par différents auteurs sur les indices volumétriques qui accompagnent chacune des sources d'entrée des sédiments dans l'océan mondial, montrent que les fleuves fournissent le plus grand apport de sable aux côtes.

D'autres contributions telles que l'abrasion de la pente sous-marine, les glaciers, le transport éolien, les éruptions volcaniques et la production biogénique et chimique de carbonates, présentent des volumes globaux significativement inférieurs bien que pour certaines zones de la planète ils constituent les principaux apports.

La situation de la Grande Caraïbe dans la bande humide de la planète fait que les taux élevés de précipitations sur les côtes continentales produisent d'importants apports de sédiments terrigènes par les fleuves et par conséquent la formation de deltas, de barres et de plages de sable. Dans le cas de la Caraïbe insulaire, les débits des fleuves sont plus faibles en raison de la faible extension des bassins, mais en période torrentielle, il peut y avoir des apports de sable, voire de gravier, de galets et de rochers. D'autre part, le relief accidenté des îles a provoqué la formation de secteurs de côtes abruptes dont l'abrasion génère également des apports de matériel sableux terrigène.

Le sable terrigène est abondant dans le monde entier parce que le granite est la principale roche qui forme le noyau des continents et comme les minéraux plus faibles et moins résistants tels que le feldspath sont érodés, ils se désintègrent en sédiments fins laissant derrière eux des grains plus durs de quartz (ou de silice) de la taille du sable ainsi que des pourcentages plus faibles de minéraux lourds plus résistants à l'abrasion.

Les autres sources terrigènes sont les roches sédimentaires et métamorphiques, qui contiennent des pourcentages variables de matériaux de la taille du sable. L'érosion et l'altération de toutes ces roches fournissent des sédiments allant des blocs rocheux à la boue. Cependant, les processus d'érosion et de transport se produisent de manière sélective de sorte que les particules fines sont plus facilement transportées en suspension, les sables se déplacent par entraînement et salage le long du fond et les

graviers plus grossiers, les galets et les blocs se déplacent sous l'effet des écoulements fluviaux associés aux pluies torrentielles.

Le sable, une fois arrivé sur la côte, se dépose rapidement en formant des barres et des deltas à l'embouchure des fleuves. Dans le cas du sable quartzeux, la grande dureté de ses grains lui permet d'être transporté sous l'effet du courant longitudinal sans modification majeure de ses propriétés mécaniques, formant des plages de plusieurs dizaines de kilomètres de long.

Une autre source importante de sable pour les côtes est constituée par les restes squelettiques carbonatés des organismes marins qui vivent depuis les eaux peu profondes jusqu'au plateau intérieur. Alors que les débris carbonatés sont plus facilement fragmentés et érodés par des processus physiques, l'emplacement des écosystèmes producteurs de sable garantit un approvisionnement continu, les vagues et les courants de marée transportant le sable et les matériaux plus grossiers jusqu'au rivage. En fait, les littoraux formés de sable carbonaté dominant de vastes zones des côtes tropicales et tempérées du monde (Short, 2002), y compris la Grande Caraïbe, où les apports de sable carbonaté marin associés aux barrières de récifs coralliens et aux herbiers marins sont significatifs.

Une autre source de sable intéressante dans les eaux tropicales de la Caraïbe est celle d'origine chimique, produit de la précipitation du carbonate de calcium dans la colonne d'eau, formant des particules sphéroïdes de moins de 2 mm de diamètre et d'un haut degré de pureté, connues sous le nom d'oolithe.

La formation de l'oolithe se produit lorsque les eaux plus froides de la haute mer, chargées de carbonate de calcium en solution, pénètrent dans les eaux chaudes et peu profondes du plateau continental, provoquant la précipitation de carbonate.

Le Grand Banc des Bahamas est la plus grande réserve de sable oolithique au monde et la Caraïbe possède également une vaste zone de formation oolithique sur le plateau sud-est du golfe de Batabanó à Cuba, et bien que dans une moindre mesure, la formation oolithique a également été identifiée dans d'autres littoraux de la région.

L'accumulation de sable oolithique est à l'origine de la formation des magnifiques plages de sable blanc des Bahamas et de celles qui s'étendent le long de la côte méridionale de l'archipel de Los Canarreos à Cuba.

En général, on peut constater que la Grande Caraïbe possède une variété de plages avec des particularités morpho-dynamiques et sédimentologiques qui les rendent très différentes les unes des autres, et qui constituent la principale ressource naturelle pour le développement de l'industrie du tourisme.

Il faut comprendre que la préservation adéquate des plages de la Caraïbe est, en plus d'être une action pour la protection de l'environnement, est également une action pour la durabilité du tourisme dans la région.

2.4. Comportement dynamique d'une plage. Outil pour l'interprétation correcte des causes de l'érosion des plages.

Les plages constituent un système dynamique caractérisé par l'échange permanent de sable entre les dépôts accumulés dans sa partie émergée (berme et dune) et les barres de sable de la pente submergée, en fonction des mouvements des vagues.

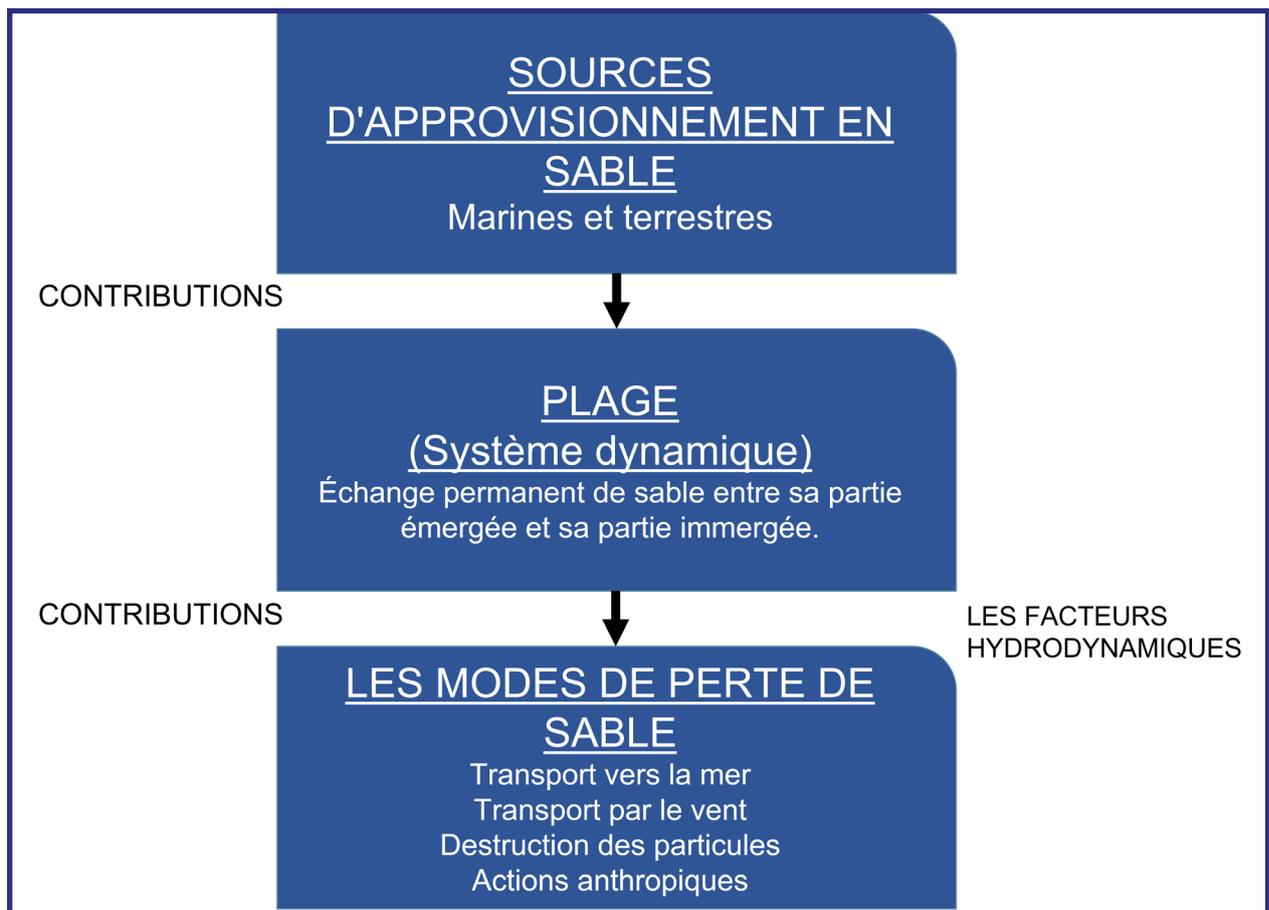
Parallèlement, le système de la plage fonctionne dans la recherche permanente d'un équilibre entre le sable qui y pénètre par les différentes voies terrigènes et marines et le sable qui quitte le système par le transport longitudinal, le transport en mer, le transport éolien, la destruction des particules et même par l'activité minière de l'homme.

Les entrées et les sorties sont conditionnées par le comportement des facteurs hydrodynamiques qui conditionnent le transport du sable, principalement les vagues, les marées et les courants induits. Un schéma simplifié du fonctionnement du système de la plage est présenté dans le Document 11.

Si, sur une période de plusieurs années, l'ampleur des entrées dans le système est la même que celle des sorties, cela signifie que le système conserve son équilibre sédimentaire et que le profil de la plage maintient un équilibre dynamique.

Lorsque l'équilibre du système est altéré par des causes naturelles ou anthropiques avec l'augmentation disproportionnée des rejets, la perte de sable dans le profil se produit et les signes d'érosion apparaissent marquant ainsi la tendance érosive de la plage à moyen et long terme.

Des signes d'érosion tels que des escarpements dans le profil de la plage peuvent apparaître à la suite de vagues causées par des tempêtes occasionnelles sans



Document 11 Schéma simplifié du fonctionnement du système d'une plage. Cours post-universitaire du projet « Littoraux sablonneux ». Juanes (2018, 2021 et 2022)

nécessairement signifier que la plage présente une tendance érosive à moyen et long terme (Document 12). Cependant, le déplacement continu vers la terre de l'escarpement actif à l'avant de la dune et la chute des formations arborescentes avec des décennies d'existence, est une preuve évidente de la tendance érosive d'une plage (Document 13).

De nombreuses recherches sur les processus dynamiques des plages ont proposé une modélisation de la séquence du comportement du profil et de la disposition en plan de la morphologie de la plage pour une vague dominante d'érosion ou d'accrétion et avec une amplitude de marée ne dépassant pas 2m. Short (1999), en se basant sur Short (1979), Wright et Short (1984), Sunamura (1988) et Lippmann et Holman (1990), propose la séquence illustrée dans le Document 14.

Le modèle de Short (1999) montre les différentes étapes par lesquelles la plage passe d'un profil dissipatif de faible énergie de vague à un profil réfléchissant de forte énergie. Comme le montre le haut de la colonne de gauche du Document 14, le processus de

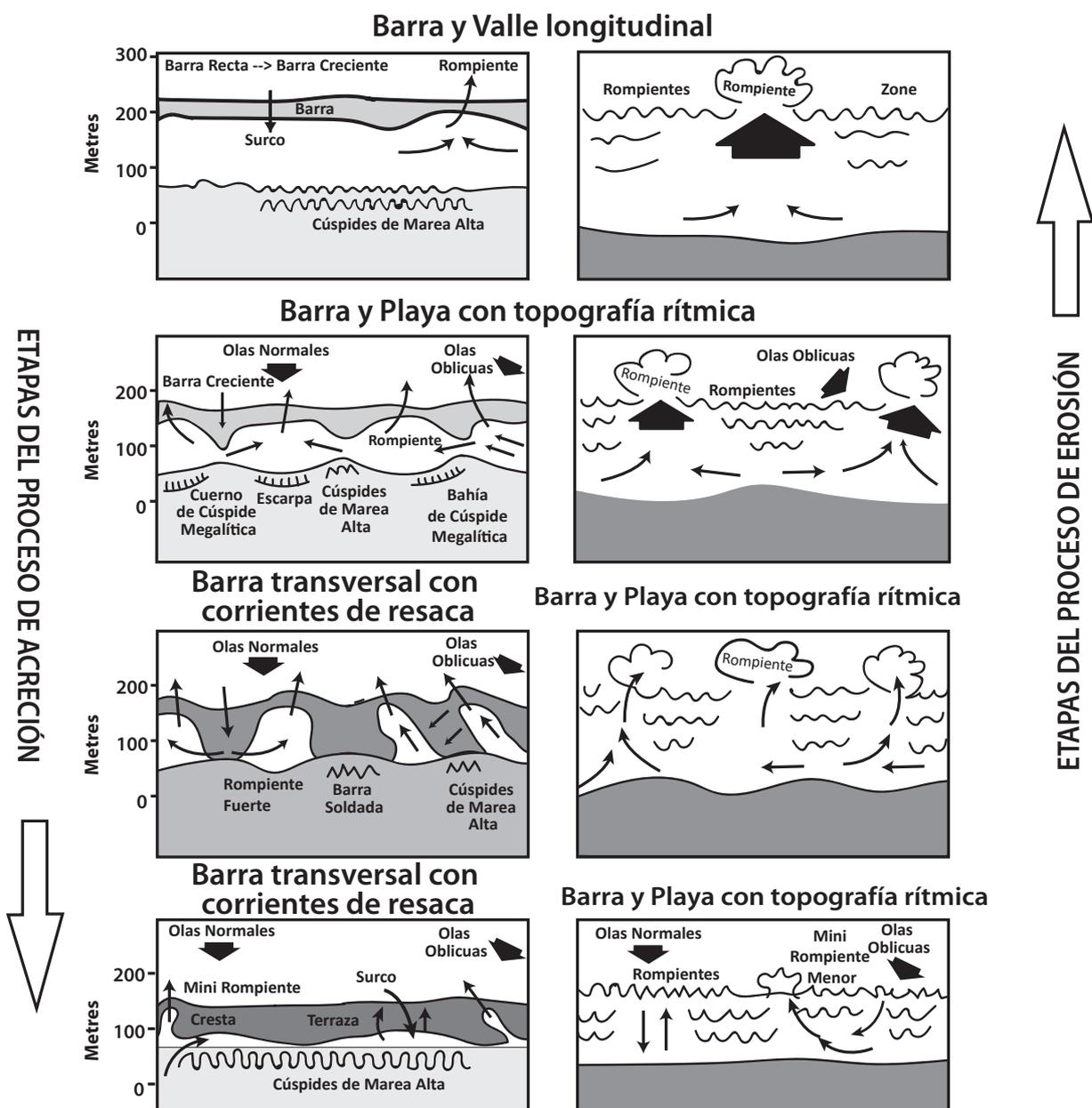


Document 12 Une falaise sur la plage causée par une tempête occasionnelle sur la Gold Coast (David J. Morgan)



Document 13 Déplacement vers la terre de la falaise active comme preuve claire de la tendance érosive d'une plage. Granville, Cedros, Trinité et Tobago

transformation commence par un profil dissipatif où la plage présente une zone de déferlement et un trait de côte et une barre bien définis dans toute son extension. Avec l'augmentation de l'énergie des vagues, quatre étapes intermédiaires se produisent avec le déplacement de la barre vers le rivage.



Document 14 Vue en plan de la séquence des changements de la morphologie de la plage et de sa zone submergée dans un processus d'accrétion (graphique de gauche) et dans un processus d'érosion (graphique de droite) (Short, (1999), basé sur Short, (1979); Wright et Short, (1984); Sunamura).



Document 15 *Traverse avec courant de retour à côté pour rejoindre la côte et former un profil réfléchissant.*

Il convient également de noter qu'en tenant compte de la hauteur et de la période de la vague, de la pente de la plage et des caractéristiques granulométriques du sable, Short (1999) a proposé un nomogramme qui permet d'évaluer numériquement la tendance de la plage à adopter une morphologie dissipative, intermédiaire ou réfléchissante.

Dans le cas de la Grande Caraïbe, l'abondance des plages avec des apports de sédiments biogéniques rend difficile l'évaluation des causes qui peuvent causer des déficits d'apports au système ou augmenter leurs pertes.

Il n'est pas habituel, dans les projets traditionnels d'ingénierie côtière, de rechercher les causes de l'érosion dans les facteurs qui affectent la production de sable biogénique. Par exemple, lors du passage d'un événement météorologique, le sable perdu sur la plage est quantifié pour connaître le volume nécessaire à son remplacement au moyen du rechargement artificiel de la plage, mais on ne cherche pas à savoir dans quelle mesure les nouveaux apports naturels diminueront en raison des effets sur l'écosystème producteur de sable.

De même, il est courant de signaler l'élévation du niveau de la mer associée au changement climatique comme une cause d'érosion en tenant compte de ce qu'elle implique dans l'augmentation de l'énergie des vagues, mais on sait peu de choses sur

les effets que peuvent avoir l'élévation de la température et l'acidification des eaux sur les organismes marins qui produisent du sable.

D'autres effets introduits par l'activité humaine dans l'environnement marin, tels que la pollution de l'eau, l'utilisation d'engins de chalutage et les dommages causés aux récifs coralliens, sont également mal évalués en tant que causes des déficits d'apport naturel de sable sur les plages biogéniques.

2.5. La plage : composante des écosystèmes marins et côtiers de la Grande Caraïbe..

En ce qui concerne la recherche sur les écosystèmes marins et côtiers (en particulier dans la Grande Caraïbe), les récifs coralliens, les herbiers marins et les mangroves retiennent beaucoup plus l'attention que les plages de sable ; cela s'explique par la prise en compte de l'extension, de la biodiversité et des services offerts à l'homme par ces autres écosystèmes.

Dans la mesure où les plages ont fait l'objet d'une plus grande attention pour leurs services environnementaux en tant que ressource pour le développement du tourisme, au-delà de l'exploitation minière irrationnelle ou de la fonction historique de cale sèche pour les bateaux de pêcheurs, l'intérêt pour la connaissance de leurs fonctions en tant qu'éléments des écosystèmes côtiers s'est également accru.

Brown et McLachlan (1984) expliquent que les études de l'écosystème des plages ont commencé beaucoup plus tard que celles qui avaient été menées dans d'autres écosystèmes, même sur les côtes rocheuses.

Déjà à l'heure actuelle, de nombreuses espèces de flore et de faune qui parviennent à survivre dans cet environnement dynamique ont été décrites grâce aux mécanismes d'adaptation qu'elles possèdent, tant dans la zone de rupture du talus sous-marin que sur la plage émergée elle-même. Il convient également de noter que les biologistes considèrent que la dune, avec sa végétation et sa faune terrestres, fait partie de l'écosystème de la plage.

Mais l'objectif de ce guide n'est pas d'entrer dans une description des particularités de l'écosystème de la plage à travers l'étude des espèces qui y vivent ou des mécanismes de la chaîne trophique ou des flux d'énergie.

Comme indiqué dans la section 2, de nombreuses plages de la région sont constituées de sables biogènes, formés par la destruction mécanique de restes calcaires d'algues, de mollusques, de foraminifères et de coraux, entre autres organismes.

Dans ce cas, il est particulièrement intéressant de souligner l'interdépendance qui existe entre les écosystèmes marins et côtiers en tant que système unique, afin que leur contribution au processus de formation des plages biogènes devienne plus visible.

Selon les résultats de Chave, et, al, (1972) cités par Zafianov (1978), le calcul de la production potentielle de la plupart des types de coraux, des algues vertes *Halimeda* et *Penicillus*, des algues rouges, des micros et macros mollusques et des foraminifères, est très similaire, ce qui permet de conclure que son ordre de grandeur est de l'ordre de 104 g de CaCO_3 / m^2 / an, (10 kg / m^2 / an).

Il est frappant de constater que ces organismes présentent des différences dans la durée de leur cycle de vie de l'ordre de deux magnitudes et une différence de masse entre eux de l'ordre de cinq fois, et il est surprenant de constater que malgré ces différences, leur production potentielle de CaCO_3 est très similaire. Seul le corail *Acropora* est supérieur, avec une valeur de 105g/ m^2 /an.

Bien que des méthodes aient été établies pour les sources terrigènes qui garantissent la quantification des volumes d'entrée dans l'équilibre sédimentaire, dans le cas des sources biogènes, les estimations sont obtenues dans un cadre expérimental et ne figurent pas dans les manuels de procédures spécifiques pour leur calcul..

Synthèse

Considérant que le processus d'érosion de nombreuses plages de la Caraïbe affecte les dunes (GPA, UNEP, 2003), le projet « Littoraux sablonneux » propose la terminologie du profil de plage illustré dans le Document 3 de la section 1. Cette proposition soutient l'idée d'inclure la dune dans la terminologie du profil dynamique de plage, en valorisant également le rôle joué par la végétation en tant qu'élément dissipateur d'énergie lors de vagues extrêmes et en tant que barrière de rétention pour le sable transporté par le vent, des phénomènes très bien observés dans la Grande Caraïbe. L'importance pratique d'avoir une définition des limites de la plage en fonction de ses particularités morphodynamiques répond à la nécessité d'avoir des critères techniques qui garantissent la gestion adéquate des plages.

En fonction de ses caractéristiques morpho-dynamiques et sédimentologiques, la Grande Caraïbe présente une grande variété de plages. Dans les zones continentales, les plages de sable terrigène prédominent, principalement apportées par les rivières et les falaises avec une localisation précise des sites d'entrée des sédiments de la terre à la côte. Les îles sont dominées par des plages formées de sables carbonatés biogènes apportés par les herbiers marins et les barrières récifales dont l'emplacement est dispersé sur le plateau sous-marin avec une localisation imprécise de l'entrée des sédiments de la mer vers la côte. Cette particularité des plages biogènes devrait être particulièrement étudiée lors de l'évaluation des alternatives d'ingénierie pour le contrôle de l'érosion.

Les centres de recherche en sciences de la mer de la Grande Caraïbe ont pour mission d'approfondir les recherches sur les taux de production de sable des écosystèmes marins et sur les processus de formation des plages biogéniques.

Chapitre 3

L'ÉROSION SUR LES PLAGES DE LA CARAÏBE

L'érosion et l'accrétion côtières sont des processus dynamiques et naturels qui façonnent les littoraux des océans et des mers du monde entier. Dans la région Caraïbe, ces processus revêtent une importance particulière en raison de la dépendance au tourisme et de la biodiversité unique présente dans les écosystèmes côtiers. L'objectif de ce chapitre est de fournir une compréhension complète des processus fondamentaux d'érosion et d'accrétion qui se produisent sur les plages de la Caraïbe. Une analyse approfondie de ces processus permettra d'élucider les facteurs contribuant aux changements observés dans les environnements côtiers, ouvrant ainsi la voie à des stratégies efficaces d'atténuation et de gestion.

La Caraïbe, avec ses plages magnifiques, ses écosystèmes marins diversifiés et ses cultures vivantes, est une région qui capte l'imagination de beaucoup de gens. Cependant, ces mêmes caractéristiques les rendent particulièrement vulnérables aux impacts de l'érosion et de l'accrétion côtières. Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur la complexité des causes naturelles et anthropiques à l'origine de ces processus, ainsi que sur les cycles d'érosion saisonniers qui influencent encore davantage la dynamique des littoraux de la région. Cette connaissance est cruciale pour le développement et la mise en œuvre de solutions durables visant à préserver l'environnement côtier de la Caraïbe et les moyens de subsistance qui en dépendent.

3.1. Progression et intensité de l'érosion.

3.1.1. Vue d'ensemble de l'érosion côtière dans la Caraïbe.

L'érosion côtière est un problème important qui touche la région Caraïbe et qui a déjà causé des dommages environnementaux et économiques considérables. La région Caraïbe est vulnérable à l'érosion côtière en raison d'une série de facteurs naturels et anthropogéniques. Les facteurs naturels comprennent l'énergie des vagues, le vent et les variations du niveau de l'eau, tandis que les facteurs anthropiques comprennent l'aménagement du littoral, l'extraction de sable et les activités de dragage. Ces activités peuvent causer des dommages importants à l'environnement côtier naturel et avoir un impact négatif sur les communautés locales (Document 16).



Document 16: Catastrophic erosion and infrastructure damage in Puerto Rico due to Hurricane María.

3.1.2. Répartition géographique et variations

La distribution spatiale de l'érosion côtière dans la mer des Caraïbes n'est pas uniforme, car elle est influencée par divers facteurs tels que la géologie, l'énergie des vagues, l'élévation du niveau de la mer, l'activité humaine et les tempêtes. L'érosion côtière dans la Caraïbe peut être caractérisée par les éléments suivants :

- Les Grandes Antilles, qui comprennent des îles telles que Cuba, Hispaniola, la Jamaïque et Porto Rico, connaissent des degrés variables d'érosion côtière. Les côtes nord et est sont plus exposées à l'océan Atlantique et sont donc plus sujettes à l'érosion causée par l'action des vagues et les ondes de tempête.
- Les Petites Antilles, une chaîne d'îles plus petites s'étendant des îles Vierges à Trinité-et-Tobago, sont également touchées par l'érosion côtière. Les côtes orientales, exposées à l'océan Atlantique, sont plus sensibles à l'érosion due à l'action des vagues et aux tempêtes.

- Le littoral d'Amérique centrale : Les côtes caribéennes des pays d'Amérique centrale comme Belize, le Costa Rica et le Panama sont également confrontées à l'érosion côtière, en particulier dans les zones où les plaines côtières sont basses et les plages sablonneuses.
- Le littoral sud-américain : Les côtes caribéennes des pays d'Amérique du Sud, comme la Colombie et le Venezuela, subissent également une érosion côtière, avec une intensité variable en fonction des conditions géologiques et océanographiques locales.

Lorsque l'on compare l'érosion côtière dans la mer des Caraïbes à d'autres régions du monde, il est important de prendre en compte les facteurs qui contribuent à l'érosion, tels que :

- L'élévation du niveau de la mer. L'élévation globale du niveau de la mer affecte toutes les zones côtières, mais la Caraïbe est particulièrement vulnérable en raison de ses îles de faible altitude et de ses plaines côtières.
- Les tempêtes. La Caraïbe est sujette aux ouragans et aux tempêtes tropicales, qui provoquent une érosion importante en raison des ondes de tempête, des fortes précipitations et de l'action des vagues. D'autres régions, comme les côtes américaines de l'Atlantique et du Golfe, l'Asie du Sud-Est et les îles du Pacifique, sont également confrontées à l'érosion côtière due aux tempêtes.
- L'activité humaine. Le développement côtier et les changements d'utilisation des sols peuvent exacerber l'érosion côtière. Cela est vrai non seulement pour la Caraïbe, mais aussi pour d'autres régions comme la Méditerranée, la côte européenne de la mer du Nord et les côtes américaines de l'Atlantique et du golfe du Mexique.
- La géologie. La géologie sous-jacente d'une région joue un rôle important dans la détermination de la sensibilité des côtes à l'érosion. Par exemple, les côtes rocheuses comme celles que l'on trouve dans certaines parties de la Méditerranée et de l'Australie peuvent être plus résistantes à l'érosion par rapport aux côtes sableuses ou vaseuses comme celles que l'on trouve dans la Caraïbe et en Asie du Sud-Est.

En résumé, l'érosion côtière dans la mer des Caraïbes est spatialement diversifiée et

influencée par une série de facteurs. Bien qu'il existe des similitudes avec d'autres régions du monde, l'intensité et l'étendue de l'érosion côtière peuvent varier en fonction des conditions locales et régionales.

3.1.3. Impacts économiques et environnementaux de l'érosion.

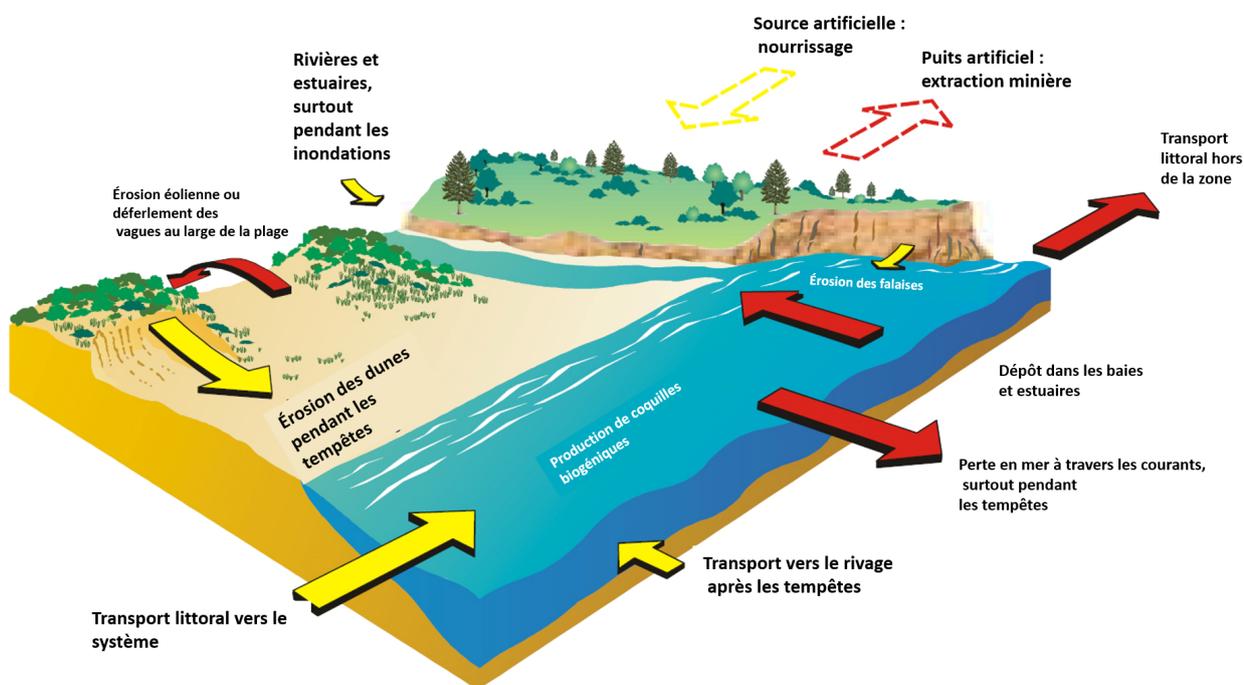
L'érosion côtière sur les plages de la Caraïbe pose d'importants problèmes économiques et environnementaux (Cambers, 1998 ; Cambers, 2009). Sur le plan économique, la Caraïbe est fortement tributaire du tourisme, les plages vierges constituant un attrait majeur pour les visiteurs. À mesure que l'érosion côtière dégrade ces plages, l'industrie du tourisme est confrontée à une baisse potentielle de ses revenus, ce qui affecte les économies locales et les opportunités d'emploi. En outre, la perte de terres côtières due à l'érosion peut avoir un impact sur les infrastructures, notamment les transports, les communications et les logements, ce qui entraîne des coûts de reconstruction et de réinstallation considérables. Sur le plan environnemental, l'érosion côtière perturbe des écosystèmes fragiles, en particulier les systèmes dunaires côtiers et les forêts de mangroves, qui constituent des habitats essentiels pour diverses espèces et agissent comme des barrières naturelles contre les tempêtes et les inondations. En outre, l'érosion des zones côtières peut entraîner l'intrusion d'eau salée dans les sources d'eau douce, ce qui nuit à la qualité et à la disponibilité de l'eau pour la consommation humaine et l'agriculture.

3.2. Erosion ou accrétion.

L'érosion côtière et l'accrétion de sable sont deux processus naturels opposés qui peuvent se produire sur les plages de la mer des Caraïbes. L'érosion côtière désigne la perte progressive de sédiments de la plage due à des facteurs naturels et/ou anthropogéniques. Au fil du temps, la plage peut se rétrécir, voire disparaître. D'autre part, le phénomène d'accrétion du sable désigne l'accumulation progressive de sédiments sur une plage. Ce phénomène peut se produire naturellement par le dépôt de sable en provenance du large ou par des interventions humaines telles que des projets de remblayage des plages. L'accumulation de sable peut contribuer à atténuer l'impact de l'érosion côtière et peut même conduire à l'expansion de la plage au fil du temps. Bien que les deux processus puissent se produire sur les plages de la mer des Caraïbes, l'érosion côtière est généralement beaucoup plus fréquente et peut entraîner des pertes économiques, en particulier pour les communautés dont le tourisme est la

principale source de revenus. En revanche, les accrétions de sable peuvent avoir un impact positif sur l'environnement de la plage et sur la communauté environnante.

Le bilan sédimentaire (Document 17) est un concept important qui permet de mieux comprendre les processus d'érosion côtière. Dans le contexte des systèmes côtiers, le bilan sédimentaire fait référence à l'équilibre entre les entrées (apport de sédiments) et les sorties (enlèvement de sédiments) de sable et d'autres sédiments le long d'un littoral. Cet équilibre est déterminé par des processus naturels tels que l'action des vagues, les courants littoraux, les marées et le débit des rivières, ainsi que par des activités humaines telles que le remblayage des plages, l'extraction de sable et la construction. Il est important de souligner que le sable ne disparaît pas simplement d'un système côtier, à moins qu'il ne soit extrait à des fins de construction, par exemple, ou perdu en eau profonde où l'action des vagues ne peut plus le transporter jusqu'à la plage submergée. Lorsque le sable est enlevé ou piégé en eaux profondes, le bilan sédimentaire devient négatif, ce qui entraîne un déficit susceptible d'aggraver l'érosion côtière. Il est donc essentiel de maintenir un bilan sédimentaire équilibré pour préserver la stabilité et la résilience des environnements côtiers et atténuer les effets de l'érosion côtière. Toutes les causes d'érosion affectent d'une manière ou d'une autre le bilan sédimentaire, créant un déficit de sable à un endroit donné pendant une période donnée.



Document 17 Certains composants d'un budget sédimentaire, tirés du Département de la conservation des terres et des eaux de Nouvelle-Galles du Sud en 2001, *Gestion des dunes côtières : Un manuel de techniques de gestion et de réhabilitation des dunes côtières*, Unité côtière, DLWC, Newcastle

3.3. Causes naturelles et anthropiques de l'érosion.

L'érosion côtière est un processus naturel qui se produit sous l'effet de divers facteurs géologiques et environnementaux. Cependant, les activités humaines ont considérablement accéléré l'érosion côtière au cours des dernières années, causant des dommages environnementaux et économiques importants. Les causes naturelles et anthropiques de l'érosion côtière (Document 18) doivent être prises en compte afin d'en atténuer les effets. Dans la mer des Caraïbes, les fluctuations du niveau des marées sont relativement faibles et le transport des sédiments est généralement dominé par les vagues générées par le vent. Dans les pages suivantes, nous passerons en revue certaines causes naturelles et anthropogéniques de l'érosion.

3.3.1. Facteurs naturels d'érosion.

Les causes naturelles de l'érosion côtière comprennent la migration à long terme des sédiments, les phénomènes météorologiques extrêmes tels que les ouragans et la variabilité à long terme du climat des vagues. Ces facteurs naturels peuvent provoquer des fluctuations dans la quantité de sédiments déposés ou enlevés des plages, entraînant une érosion dans certaines zones.

Les vagues et les courants sont des causes naturelles importantes de l'érosion côtière dans la Caraïbe. L'action des vagues remodèle constamment le littoral en transportant du sable et des sédiments le long de la côte, un processus connu sous le nom de dérive littorale. Les courants forts peuvent enlever de grands volumes de sédiments des plages, ce qui entraîne l'érosion. Les plages de la Caraïbe exposées à l'océan Atlantique sont soumises à une plus grande énergie des vagues, ce qui peut augmenter le taux d'érosion.

La région de la Caraïbe est sujette aux ouragans et aux tempêtes tropicales, qui provoquent des vents intenses, de fortes précipitations et des ondes de tempête. Les ondes de tempête résultent de la combinaison d'une faible pression atmosphérique et de vents forts, provoquant une élévation du niveau de la mer qui peut inonder les zones côtières, éroder les plages et déstabiliser les reliefs côtiers. Les ouragans peuvent également générer de grandes vagues qui contribuent à une érosion importante et au transport de sédiments le long du littoral.

À plus long terme, la dynamique du relief côtier affecte également les processus naturels

1



• Water Levels

- Astronomical Tides
- storm Surge
- Annual to Inter-annual variability (e.g. ENSO)
- Sea Level Rise

2



• Waves

- Storms
- Seasonal Variability
- Annual to Inter-Annual variability (e.g. ENSO)
- Sea Level Rise

3



• Sediment Supply

- Cross Shore
- Long Shore
- Offshore loss/ Supply
- Rivers

4



• Human Impact

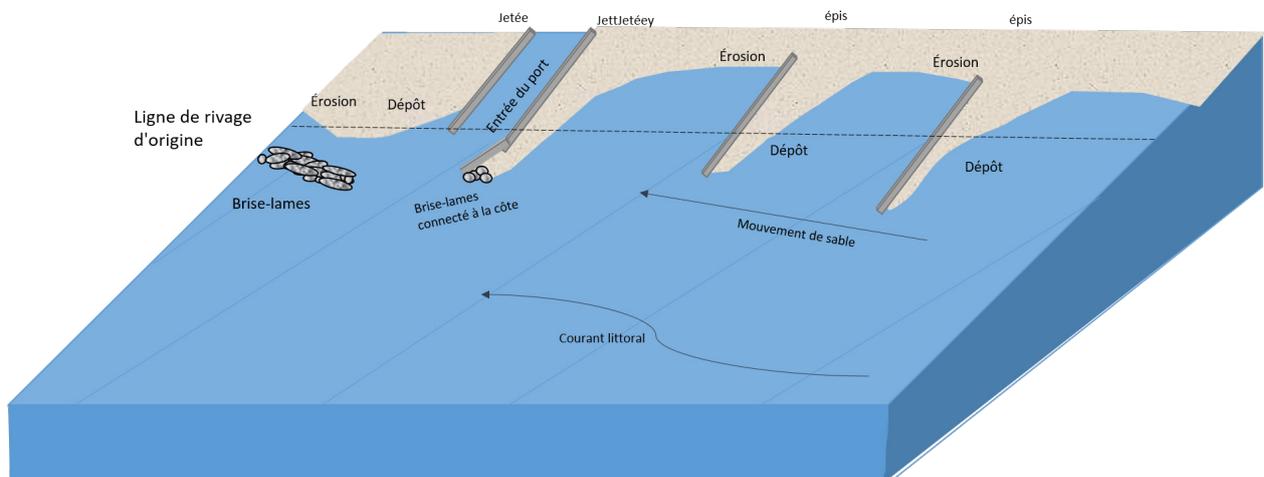
- Coastal Squeeze
- Engineering
- Construction (Sand Mining)

Figura 18: Factores que afectan la erosión costera y el transporte de sedimentos, de Splinter y Coco (2021).

d'érosion côtière. Les caractéristiques géologiques et géomorphologiques d'un littoral influencent sa vulnérabilité à l'érosion. Par exemple, les sédiments mous, tels que le sable et la boue, sont plus vulnérables à l'érosion que les côtes rocheuses. Dans la Caraïbe, la diversité des reliefs côtiers, allant des plages de sable et des dunes aux falaises et aux forêts de mangroves, se traduit par des taux d'érosion variables dans la région.

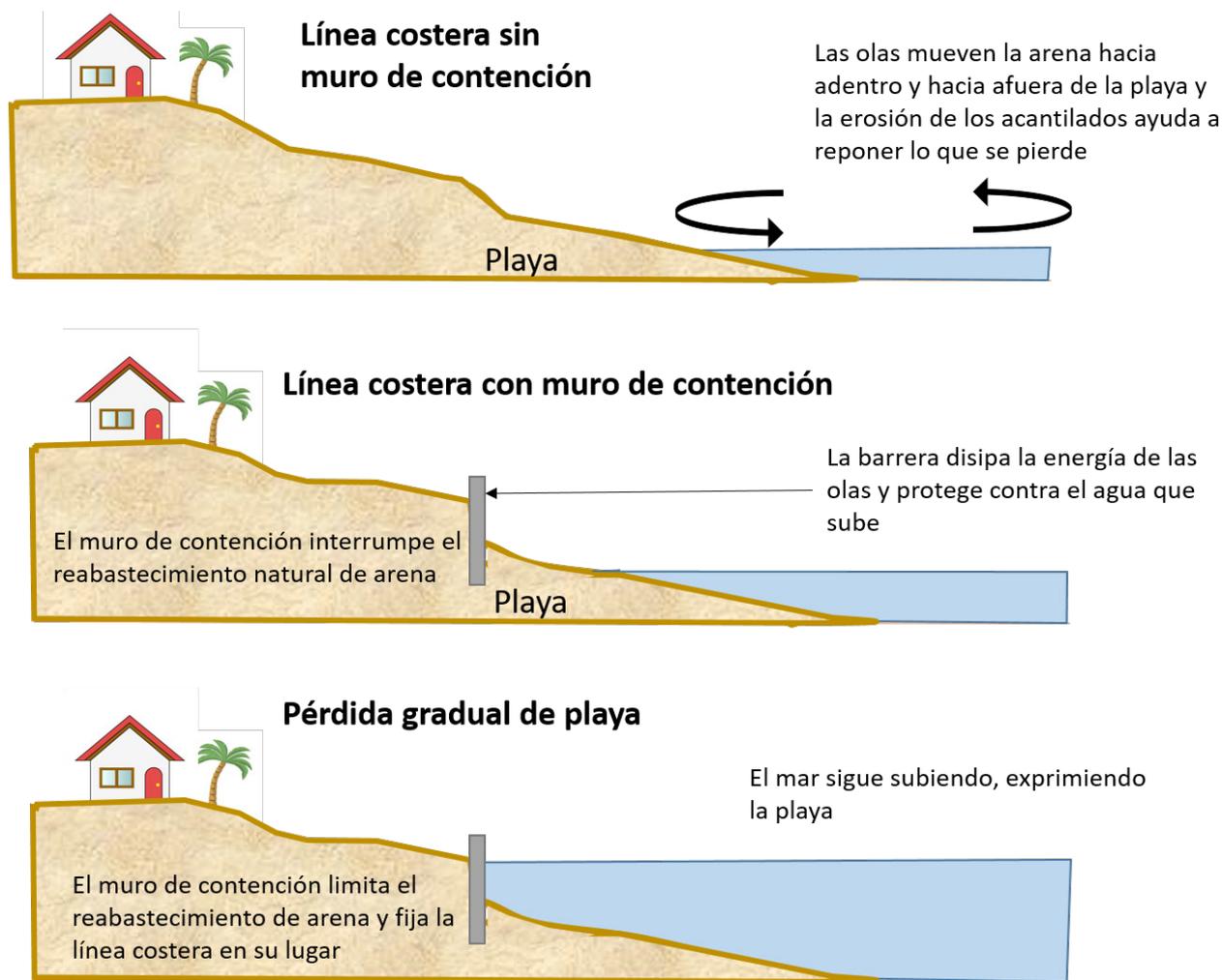
3.3.2. Les causes anthropiques de l'érosion

Les structures artificielles peuvent être une cause majeure d'érosion des plages si elles sont mal conçues ou si elles ont des conséquences inattendues. Les structures artificielles telles que les épis, les brise-lames, les digues et les revêtements construits perpendiculairement ou parallèlement au rivage, comme le montre le Document 19, peuvent interrompre le transport naturel des sédiments et provoquer l'érosion dans certaines zones (Silva et al., 2018).



Document 19 : Interruption du transport de sédiments littoraux causée par des structures côtières.

Les digues et autres structures parallèles au rivage peuvent provoquer une réflexion d'ondes excessive, entravant la croissance naturelle de la plage et conduisant à l'érosion (Document 20). En outre, ils peuvent perturber l'échange naturel de sédiments entre la plage et le système dunaire. D'autres structures de durcissement du littoral, comme les revêtements, peuvent également empêcher la migration naturelle des plages et perturber les processus naturels, entraînant l'érosion. (Nicholls et al., 2018).



Document 22 La relation entre les murs de protection côtiers et la perte de plage.

L'interruption à grande échelle des sources de sédiments due aux activités humaines est également une préoccupation majeure. Les activités minières et de construction peuvent détruire les dunes de sable, supprimant ainsi une source cruciale de sédiments et compromettant le tampon naturel qui protège le littoral de l'érosion. La canalisation des rivières et la construction de barrages peuvent réduire la charge sédimentaire transportée par les rivières jusqu'à la côte, entraînant des déficits sédimentaires et exacerbant l'érosion côtière. En outre, les activités de dragage peuvent déstabiliser les fonds marins, perturber le transport des sédiments et augmenter la turbidité, ce qui entraîne l'érosion des plages et la dégradation des habitats côtiers.

L'une des causes les plus courantes et les plus évitables de l'érosion est la destruction par l'homme des barrières côtières. Les activités humaines telles que la déforestation et le remplissage des zones humides peuvent détruire les forêts de mangroves, tandis que la surpêche, les pratiques de pêche destructrices et la pollution peuvent endommager

les récifs coralliens. Ces barrières naturelles offrent une protection contre les vagues et les tempêtes, mais lorsqu'elles sont détruites, elles rendent les côtes plus vulnérables à l'érosion (Mumby et al., 2018). Il existe des exemples précis dans la mer des Caraïbes de zones de récifs coralliens dégradés entraînant une érosion plus sévère (Reguero et al., 2018). Des études quantitatives montrent également l'importance économique des récifs pour la protection des propriétés côtières et de l'économie côtière (Storlazzi et al., 2021).

Le changement climatique exacerbe l'érosion côtière en augmentant la fréquence et l'intensité des tempêtes, en contribuant à l'élévation du niveau de la mer et en modifiant les schémas météorologiques. Ces facteurs peuvent accélérer les taux d'érosion dans la Caraïbe et dans d'autres régions côtières, amplifiant les impacts des causes naturelles et anthropogéniques de l'érosion. L'élévation globale du niveau de la mer, principalement due au changement climatique, est un autre facteur contribuant à l'érosion côtière dans la Caraïbe. Avec l'élévation du niveau de la mer, le littoral recule vers l'intérieur des terres, ce qui entraîne l'inondation et l'érosion des zones côtières. Les îles basses et les plaines côtières de la Caraïbe sont particulièrement vulnérables aux effets de l'élévation du niveau de la mer. L'érosion due au changement climatique est également une préoccupation croissante. Avec l'élévation du niveau de la mer et l'augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, l'érosion côtière risque de devenir un problème encore plus important à l'avenir (Reguero et al., 2015). Les communautés côtières devront développer des stratégies d'adaptation pour faire face aux impacts du changement climatique sur les zones côtières.

3.4. Identifier les cycles et les phénomènes d'érosion

L'érosion et l'accrétion des plages se produisent à différentes échelles de temps, reflétant la complexité des systèmes côtiers et leurs interactions avec les phénomènes océanographiques. Ces échelles de temps peuvent être classées en trois grandes catégories: épisodique, saisonnière/annuelle et à long terme/chronique.

Épisodique - événements extrêmes

- Les ouragans : Les cyclones tropicaux peuvent entraîner une érosion rapide et sévère des plages en raison des ondes de tempête, des fortes précipitations et de la forte action des vagues. Les impacts des ouragans sur les plages peuvent être à la fois de courte et de longue durée, en fonction de l'intensité de la tempête et de la résilience du système côtier (Document 21 et Document 22).

- La houle hivernale: Dans certaines régions, les tempêtes hivernales génèrent de puissantes houles qui peuvent provoquer une érosion épisodique des plages. Ces événements peuvent entraîner des changements temporaires dans la morphologie des plages, tels que la formation de marques ou l'enlèvement du sable du haut de plage.

Réponse saisonnière / annuelle au régime des vagues annuelles

- Le régime saisonnier des vagues : Les plages peuvent connaître des changements saisonniers en réponse aux variations de l'énergie et de la direction des vagues tout au long de l'année. Par exemple, l'énergie accrue des vagues pendant les mois d'hiver peut provoquer l'érosion, tandis que des conditions de vagues plus calmes pendant l'été peuvent favoriser l'accrétion et le rétablissement de la plage. Dans certaines régions, les vents saisonniers peuvent influencer le mouvement des sédiments le long du littoral. Ces changements saisonniers dans le transport des sédiments peuvent entraîner une alternance de périodes d'érosion et d'accrétion.

Long terme / Chronique - réponse à l'apport de sédiments à long terme, à la tectonique, etc.:

- L'apport de sédiments à long terme : Les plages peuvent connaître une érosion ou une accrétion à long terme en fonction de l'équilibre entre les apports de sédiments (par exemple, débit fluvial, érosion des falaises) et les sorties (par exemple, transport de sédiments, perte au large). Les modifications de l'apport en sédiments dues à des processus naturels ou à des activités humaines peuvent entraîner une érosion ou une accrétion chronique sur plusieurs années, voire plusieurs décennies.
- La tectonique : L'activité tectonique peut influencer l'érosion et l'accrétion des plages sur de longues échelles de temps en provoquant des changements dans l'élévation des terres ou en modifiant le bilan sédimentaire régional. Par exemple, un soulèvement tectonique peut rendre un littoral plus résistant à l'érosion, tandis qu'un affaissement peut le rendre plus vulnérable à l'élévation du niveau de la mer et à l'érosion.
- L'élévation du niveau de la mer : L'élévation à long terme du niveau de la mer, induite par le changement climatique, peut entraîner une érosion côtière chronique à mesure que le littoral recule vers l'intérieur des terres. Ce processus peut être particulièrement prononcé dans les zones côtières de faible altitude et sur les petites îles.

La compréhension des différentes échelles de temps de l'érosion et de l'accrétion des plages est essentielle pour une gestion côtière efficace et le développement de stratégies d'adaptation visant à protéger les communautés et les écosystèmes côtiers des impacts de l'érosion côtière. Au Chapitre 4, les techniques de surveillance qui permettent de quantifier ces changements en termes de largeur de plage sont examinées en détail.

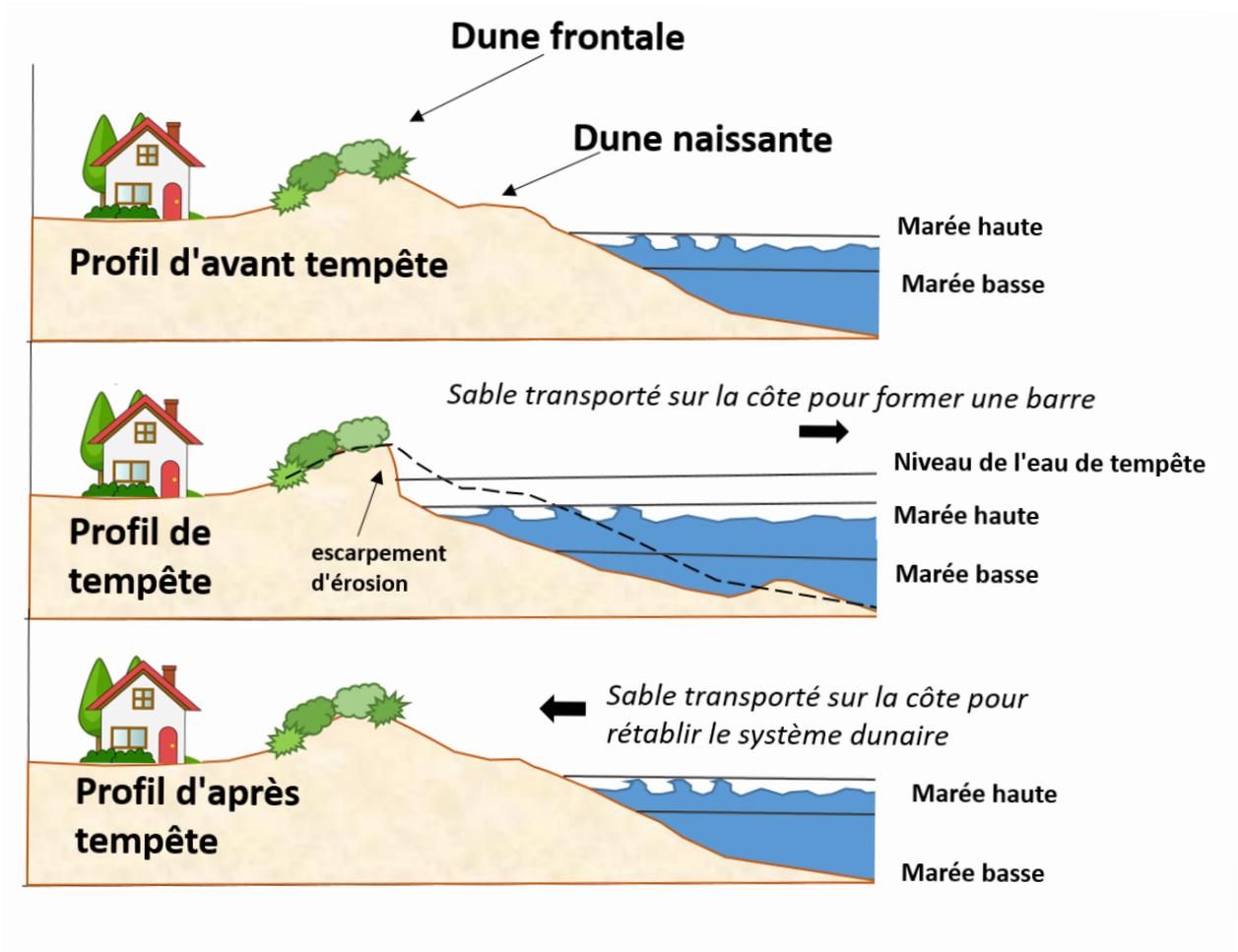
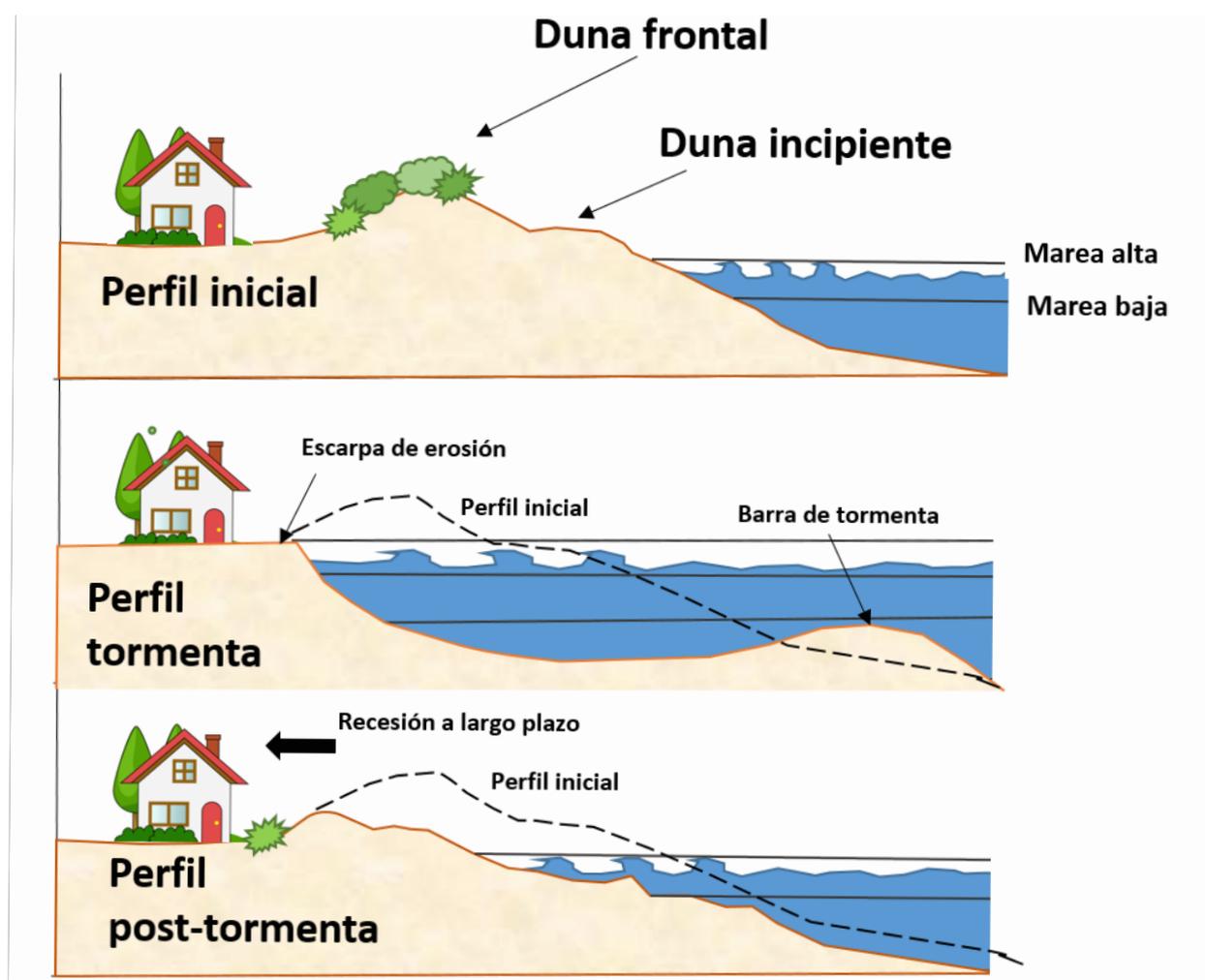


Figura 21 Cycle typique d'érosion et d'accrétion des plages dans un cas sans perte permanente de sable. Adapté de l'État de Nouvelle-Galles du Sud et du Bureau de l'environnement et du patrimoine 2018.



Document 22 Modèle typique d'érosion des plages où l'on observe une tendance à l'érosion à long terme. Adapté de l'État de Nouvelle-Galles du Sud et du Bureau de l'environnement et du patrimoine 2018.

Synthèse

En conclusion, l'érosion côtière est un processus complexe qui peut avoir des impacts environnementaux et économiques significatifs. Si les causes naturelles de l'érosion ne peuvent être totalement évitées, les causes anthropiques peuvent et doivent être atténuées. Les stratégies de lutte contre les causes anthropiques de l'érosion doivent donner la priorité à la protection des barrières naturelles, à la réduction de l'interruption des sources de sédiments et à la limitation de l'utilisation des structures de renforcement du trait de côte. En outre, les collectivités doivent élaborer des stratégies d'adaptation pour faire face aux effets du changement climatique sur les zones côtières. En prenant des mesures pour atténuer les causes anthropiques de l'érosion côtière, nous pouvons contribuer à la protection de nos côtes et à la préservation de nos ressources naturelles.

Chapitre 4

SURVEILLANCE DE L'ÉROSION CÔTIÈRE

Le suivi régulier de l'érosion est un préalable indispensable à la gestion et à la prévention de ce phénomène car il permet de mieux comprendre les dynamiques à l'œuvre à différentes échelles de temps et d'espace, et d'orienter les mesures d'atténuation à mettre en œuvre.

En effet, il est important de distinguer les cycles saisonniers, annuels, voire pluriannuels, des impacts des événements et des tendances à long terme (changement climatique), comme décrit au Chapitre 3. En outre, les observations doivent distinguer les effets sur les différents compartiments de la plage (Chapitre 2) afin de fournir une vision intégrée du système de la plage.

Un exemple typique est la disparition partielle ou totale d'une plage à la suite d'une tempête ou d'un cyclone. En l'absence de suivi ou d'observation, il peut être tentant pour un gestionnaire de mettre en place des travaux de génie côtier pour enrayer le phénomène. Cependant, les observations peuvent indiquer que le sable a été en partie stocké sous forme de barres dans la partie immergée de la plage et qu'il peut revenir, à la faveur de houles moins énergiques. Ces informations permettent donc aux décideurs d'éviter 1) des investissements coûteux lorsqu'ils ne sont pas nécessaires, 2) de bloquer la dynamique hydro-sédimentaire et d'empêcher le retour naturel du sable, 3) de privilégier lorsque cela est possible des solutions de protection douces basées sur la nature (revégétalisation du haut de plage par exemple).

Ce chapitre vise donc à détailler les différentes méthodes d'observation et de mesure pour mettre en place un réseau de surveillance ou un observatoire de l'érosion côtière. Le Chapitre 6 se concentrera sur le réseau de surveillance mis en place dans la Grande Caraïbe dans le cadre du projet Littoraux sablonneux/Sandy Shorelines.

Ce chapitre aborde les aspects suivants de la surveillance de l'érosion côtière:

1. Les indicateurs morphologiques qui reflètent la dynamique actuelle
2. Les forçages hydrométéorologiques à suivre pour comprendre les relations de

cause à effet

3. Les critères de sélection des plages à inclure dans le réseau de surveillance
4. Les méthodes et outils de mesure et d'échantillonnage sur le terrain
5. Les outils numériques de traitement des données de mesure et d'observation
6. Les méthodes d'analyse et d'interprétation des informations obtenues

Un résumé à l'intention des décideurs synthétisera les informations essentielles à la mise en œuvre d'un réseau de surveillance.

4.1. Indicateurs des processus d'érosion.

Les indicateurs observables dans le paysage sont discutés ici, ainsi que les marqueurs à mesurer et à suivre dans le temps pour traduire les dynamiques en cours (les méthodes d'observation sont détaillées au point 4.3).

4.1.1. Indicateurs à observer

Cette section présente les indicateurs morphologiques typiques des plages tropicales de la Grande Caraïbe (Document 23). Ceci inclut les plages elles-mêmes et les compartiments associés dans les arrière-plages (dunes) ou dans les avant-plages (plages sous-marines).

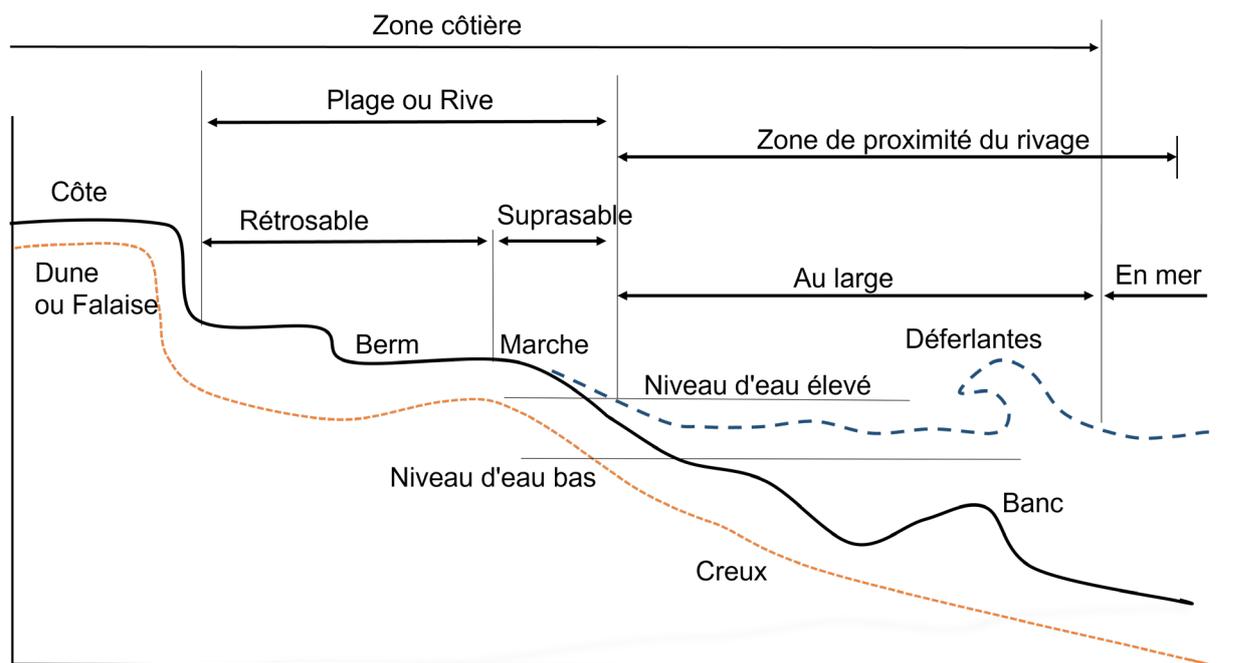
Beaches:

Tout d'abord, la pente indique le caractère réfléchif ou dissipatif de la plage (Wright et Short, 1984). Si la plage est exposée à des conditions énergétiques, c'est-à-dire à une agitation importante (vague), sa pente sera plus forte et dite réfléchive. La pente peut s'accroître après un événement donné ou avoir un profil durablement abrupt, en fonction de son exposition ponctuelle ou chronique aux vagues. Les plages à pente douce sont considérées comme dissipatives car elles sont moins exposées aux vagues (généralement en fond de baie).

Dans la Grande Caraïbe, les plages les plus réfléchives auront tendance à se trouver sur

la façade exposée à l'océan Atlantique plutôt qu'à la mer des Caraïbes où les conditions sont plus calmes (façade ouest des îles en particulier).

En fonction de la largeur de la plage, la partie la plus abrupte peut se trouver uniquement dans la zone du jet de rive où les vagues meurent avec un haut de plage plus plat. Sur les plages étroites, l'action des vagues peut affecter la majeure partie de la pente de la plage.



Document 23 Profil de plage et caractéristiques morphologiques (adapté de Kraus, 2005)

Sur les plages réfléchives, des ondulations appelées croissants de plage peuvent apparaître dans la zone de jet de rive. Elles constituent un autre marqueur permettant d'identifier l'exposition à des niveaux d'énergie élevés des forçages hydrodynamiques (vagues). Les croissants peuvent également apparaître et disparaître à la faveur du passage de la houle.

Il faut également tenir compte de plusieurs marqueurs spécifiques aux tempêtes. En effet, après le passage d'une tempête ou d'un cyclone, une berme en haut de plage est souvent présente en raison de l'érosion créée par les vagues et du transport de sable de la plage aérienne vers la plage sous-marine. Au pied de cet escarpement ou plus bas sur la plage lorsque la tempête est moins forte, on trouve le plus souvent une laisse de tempête, c'est-à-dire un dépôt de végétation, d'algues ou d'autres déchets laissés par les vagues. La présence de plusieurs niveaux de dépôts (plusieurs laisses)

permet de distinguer la chronologie de la tempête ou la succession de plusieurs épisodes de vagues. Enfin, l'apparition de grès de plage au niveau de la zone de jet de rive indique une perte d'épaisseur sédimentaire qui peut être ponctuelle dans le temps ou plus souvent tendancielle. En effet, ces formations sableuses indurées se forment naturellement à environ 1m de profondeur sous l'effet chimique de la chaleur et de l'humidité (Vousdoukas et al., 2007). Ce type de formation est plus fréquemment rencontré dans les contextes tropicaux.

En haut de plage, la limite végétation-sable, lorsqu'elle existe, est enfin un marqueur pour le suivi de la dynamique à plus long terme du site. Dans la Caraïbe et plus largement sous les tropiques, elle est souvent composée de plantes rampantes de type ipomée (*Ipomea pes-caprae*). La végétation joue un rôle dans la fixation du sable et sa disparition ou son enlèvement peut expliquer en partie les phénomènes d'érosion observés.

Arrière-plage

Certaines plages de la Grande Caraïbe peuvent être bordées, côté terre, par un système de dunes plus ou moins développé, comme indiqué au Chapitre 2.

Le pied de dune est alors le repère le plus intéressant à suivre pour observer le recul potentiel. Le front dunaire peut également être entaillé par les vagues lors d'une tempête et former une microfalaise dont l'escarpement dépendra de la hauteur de la dune bordière.

La ligne de végétation des dunes du côté de la plage, comme celle des plages, peut également fournir des informations sur la tendance de l'évolution.

L'estran:

La pente de la partie immergée de la plage est généralement plus douce que celle de la partie aérienne, mais des morphologies typiques peuvent être observées.

C'est notamment le cas des bandes d'avant-côte (Chapitre 2). Ces bandes peuvent être permanentes ou temporaires, se déplacer par rapport à la côte, se diviser ou se couper en fonction des conditions de houle. Elles peuvent également être créées après le passage d'une tempête qui a provoqué un transport de sable dans la partie aérienne de la plage.

Pour les plages dites coralliennes, l'estran est marqué par la présence d'un récif frangeant, parfois doublé d'un récif barrière. Si ces récifs ne sont pas mobiles comme les bancs de sable, il peut être intéressant d'observer leur ensablement ou leur dégradation potentielle. En effet, même si les stocks de sable sont en partie fossiles (hérités de périodes géologiques de plus bas niveau marin), les récifs coralliens sont encore aujourd'hui les fournisseurs de sable bioclastique de la plage et leur dégradation met en péril la production de sable (Perry et Hepburn, 2008; Perry et al., 2011). La dégradation des récifs peut être naturelle (choc mécanique des vagues ou consommation par des organismes vivants comme les poissons perroquets) mais dans la Caraïbe, elle est trop souvent due à une mauvaise qualité de l'eau en lien avec un traitement insuffisant ou inexistant des eaux usées d'origine humaine (Rosado-Torres et al., 2019).

La présence d'une passe est également importante à prendre en compte car elle peut "drainer" le sable lors d'une tempête mais rendre plus difficile son retour sur la plage terrestre en raison de la présence bloquante du récif.

4.1.2. Indicateurs à mesurer.

Pour étudier l'évolution de l'aire de répartition considérée, il est donc possible d'utiliser les morphologies observées comme indicateurs de son état et de ses changements. Les outils de mesure de ces indicateurs sont présentés dans la section 4.4.

Les indicateurs longitudinaux constituent ce que l'on appelle le trait de côte. En bas de plage, c'est souvent la limite du jet de rive qui est relevée ou celle des croissants de plage ou de la laisse de mer. En haut de plage, on utilise la limite de végétation ou le pied de dune. Ce suivi longitudinal peut permettre d'observer les transports liés à la dérive littorale (Chapitre 3) et les cycles saisonniers, voire les phénomènes de "rotations" typiques des plages de poche (Chapitres 2 et 3).

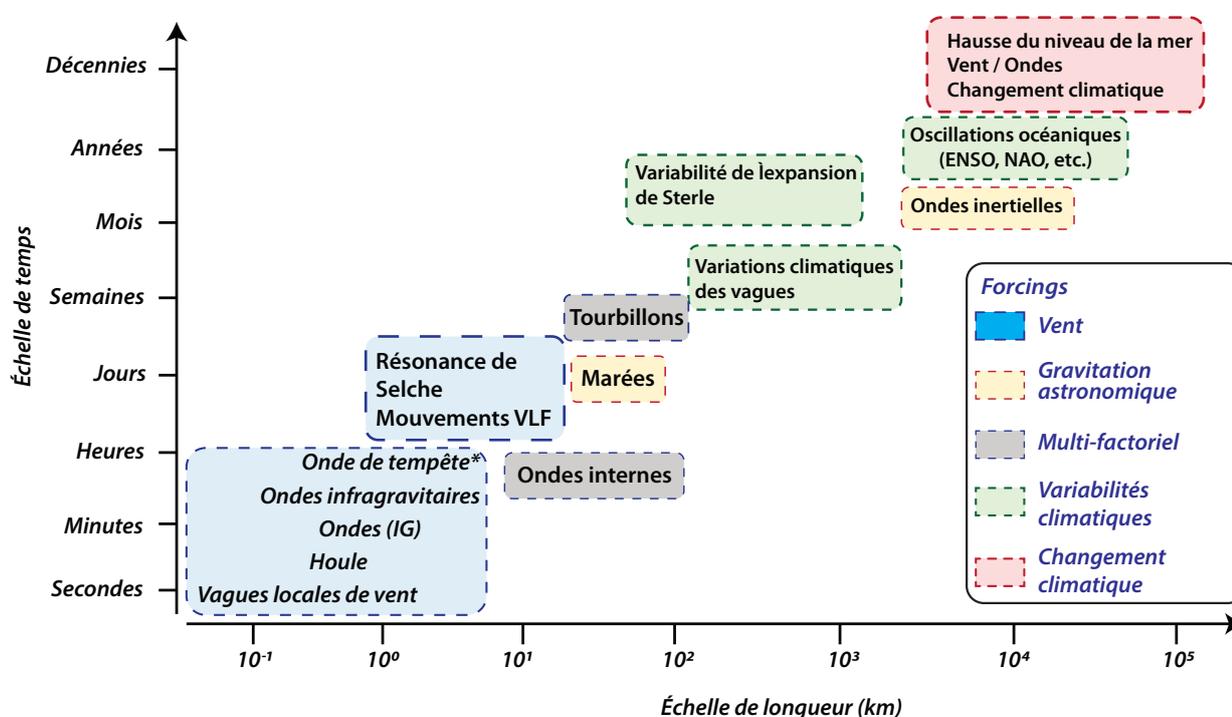
Cependant, le recul du trait de côte n'est pas forcément synonyme d'érosion car la quantité de sable peut rester la même et il est important de suivre la dynamique transversale de la plage à travers les profils de plage. Cet indicateur transversal consiste à enregistrer la pente de la plage, potentiellement de la dune à la partie immergée. Il est nécessaire d'en implanter au moins 3 sur une plage pour observer les inclinaisons et reproduire les relevés toujours sur le même axe.

Enfin, l'indicateur le plus complet est celui qui rend compte de la morphologie de la

plage en trois dimensions. Pour cela, des nuages de points peuvent être relevés pour constituer des grilles de Modèles Numériques de Terrain. Le croisement des grilles à différentes dates permet d'identifier précisément les zones de perte et de dépôt. Quant aux profils, différentes techniques sont possibles pour couvrir les parties aériennes et sous-marines..

4.2. Paramètre de la météo marine.

Pour interpréter et expliquer les tendances observées, il est nécessaire de prendre en compte les forçages météo-marins (Document 24) qui en sont à l'origine (Chapitre 2).



Document 24 Contraintes météo-marines en fonction de leur échelle temporelle (adapté du BRGM)

Vagues

Il est donc important de mesurer ou de collecter des informations sur les conditions de houle au cours de la période considérée.

Les données relatives aux vagues sont décomposées en trois paramètres principaux : la hauteur H (mètres), la période T_p (secondes) et la direction Dir (degrés). Ces paramètres peuvent être décomposés en valeurs dites « significatives » (H_s ou H 1/3 correspondant

à la moyenne du tiers des vagues les plus fortes) ou en valeurs maximales ou crêtes (Hmax ou Hp). La hauteur et la période des vagues nous renseignent sur l'énergie associée. L'orientation indique l'incidence de la houle par rapport à la plage considérée et la direction du transport sédimentaire par la dérive littorale (Chapitre 3).

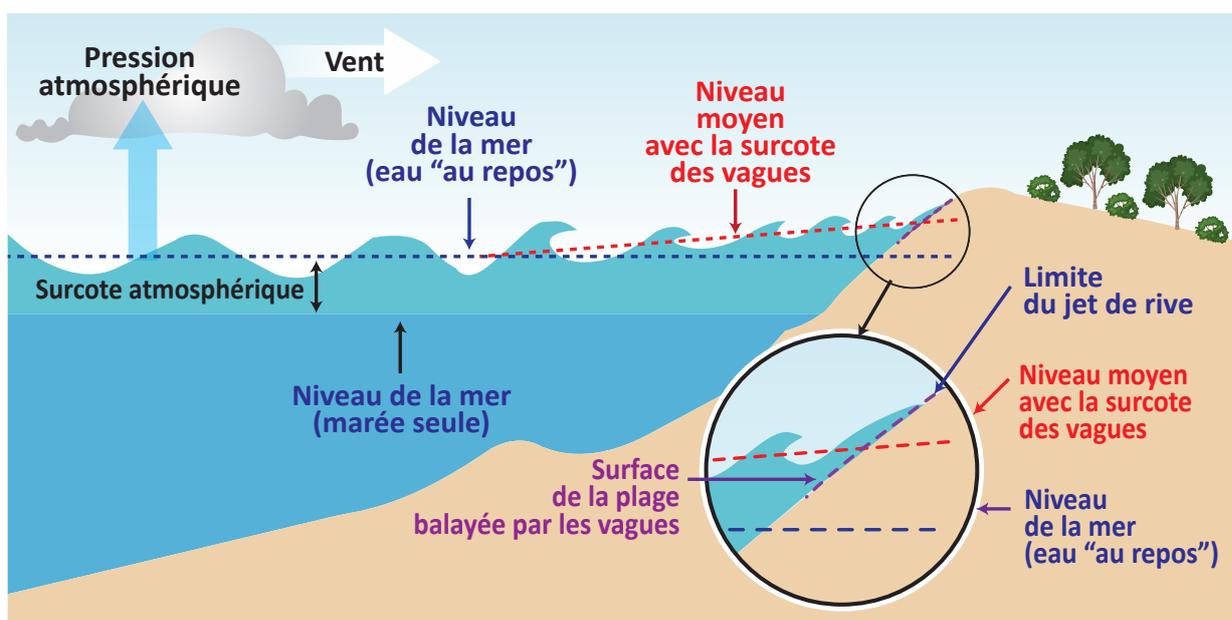
Le spectre de fréquence (en hertz) de l'onde peut également être un paramètre intéressant pour une analyse plus approfondie des différentes longueurs d'onde et de leurs rôles respectifs (ondes infragravitaires dans les zones lagunaires, par exemple).

Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau ou les niveaux de la mer sont également un paramètre potentiel à surveiller, en particulier si les vagues n'expliquent pas les changements observés.

Le niveau est exprimé en mètres par rapport à une référence, dite hydrographique 0, différente de la référence verticale terrestre. Il est donc nécessaire de préciser le système de référence dans lequel il est considéré.

Le niveau de la mer est fonction des marées astronomiques, des cycles saisonniers liés, par exemple, aux grands courants océaniques ou aux variations de température et de salinité des masses d'eau. Les ondes de tempête peuvent également influencer le niveau des eaux. Il est lié à la baisse de la pression barométrique, à l'action du vent marin ou au déferlement des vagues (Chapitre 3).



Document 25 SDifférents niveaux de la mer tenant compte des contraintes atmosphériques et marines (Adapté du BRGM)

Courants

Les courants peuvent être mesurés (vitesse en m/s et direction en degrés) si l'on cherche à préciser le transport hydro-sédimentaire dans la zone immergée de la plage, notamment dans les baies ou les lagunes où les effets de passage peuvent compliquer les circulations.

Vent

Les paramètres météorologiques sont généralement moins utilisés. L'action du vent est morphogène sur le haut de plage et les formations dunaires par le phénomène de déflation, c'est-à-dire le transport de sable par le vent (Chapitre 3).

Comme les courants, le vent est considéré en vitesse (m/s) et en direction (degré) et mesuré en moyenne sur une heure ou une journée et en instantané (y compris les rafales).

4.3. Actions anthropiques

Pour comprendre les changements morphologiques observés sur le terrain, il est enfin nécessaire d'intégrer les éventuelles actions anthropiques sur la plage afin de les distinguer des dynamiques naturelles.

En effet, les travaux de rechargement artificiel, l'installation de structures ou un trafic important peuvent influencer directement les volumes de sable, le transport des sédiments ; ou indirectement comme le piétinement de la végétation sur la mobilité du sable. (Pilkey & Cooper, 2014, Hesp et al., 2010).

Ces informations (volumes, plans, dates, etc.) doivent être collectées auprès de la population locale.

4.4. Procédure de sélection des plages du réseau de surveillance.

Plusieurs critères de représentativité permettent de sélectionner les plages à intégrer dans un réseau de surveillance régional ou national.

Tout d'abord, il peut être jugé nécessaire de prendre en compte un critère géographique afin de couvrir les différentes régions ou secteurs d'un territoire. Pour une île de la Caraïbe, différentes façades peuvent être envisagées. Pour un archipel, il peut s'agir de différentes îles.

En outre, il sera intéressant d'intégrer un critère morphologique afin de distinguer les différents types de plages (avec ou sans récifs coralliens, dunes ; plages de poche, plages ouvertes, baies ; composées de sable volcanique, biodétritiques ; bordées de falaises, plages urbaines, etc.).

L'exposition ou non aux vagues, la présence d'une lagune sensible aux variations de niveaux d'eau et de courants peuvent également constituer des critères hydrodynamiques.

Enfin, la conjonction entre les phénomènes d'érosion connus et la présence d'enjeux humains (bâtiments, activités touristiques ou de pêche) ou patrimoniaux (espace culturel, site historique, espace naturel protégé) permet d'identifier des sites sensibles et vulnérables à surveiller en priorité.

Voici un exemple de réseau national de surveillance à Antigua-et-Barbuda (Document 26).

Les sites surveillés sont plus nombreux à Antigua où se concentrent la population et les enjeux. Ce réseau, particulièrement dense pour la taille du territoire, couvre les deux îles principales et les différentes façades. Plusieurs types de plages sont suivis, certaines naturelles, d'autres avec des complexes touristiques et d'autres encore en milieu urbain.

4.5. Méthodes de mesure et d'échantillonnage sur le terrain.

Ce chapitre présente les méthodes à mettre en œuvre sur le terrain et la fréquence des suivis à effectuer afin d'élaborer un protocole d'observation.

4.5.1. Topographie

La principale méthode consiste à suivre les indicateurs susmentionnés en enregistrant leurs variations morphologiques d'une date à l'autre à l'aide de méthodes topographiques.

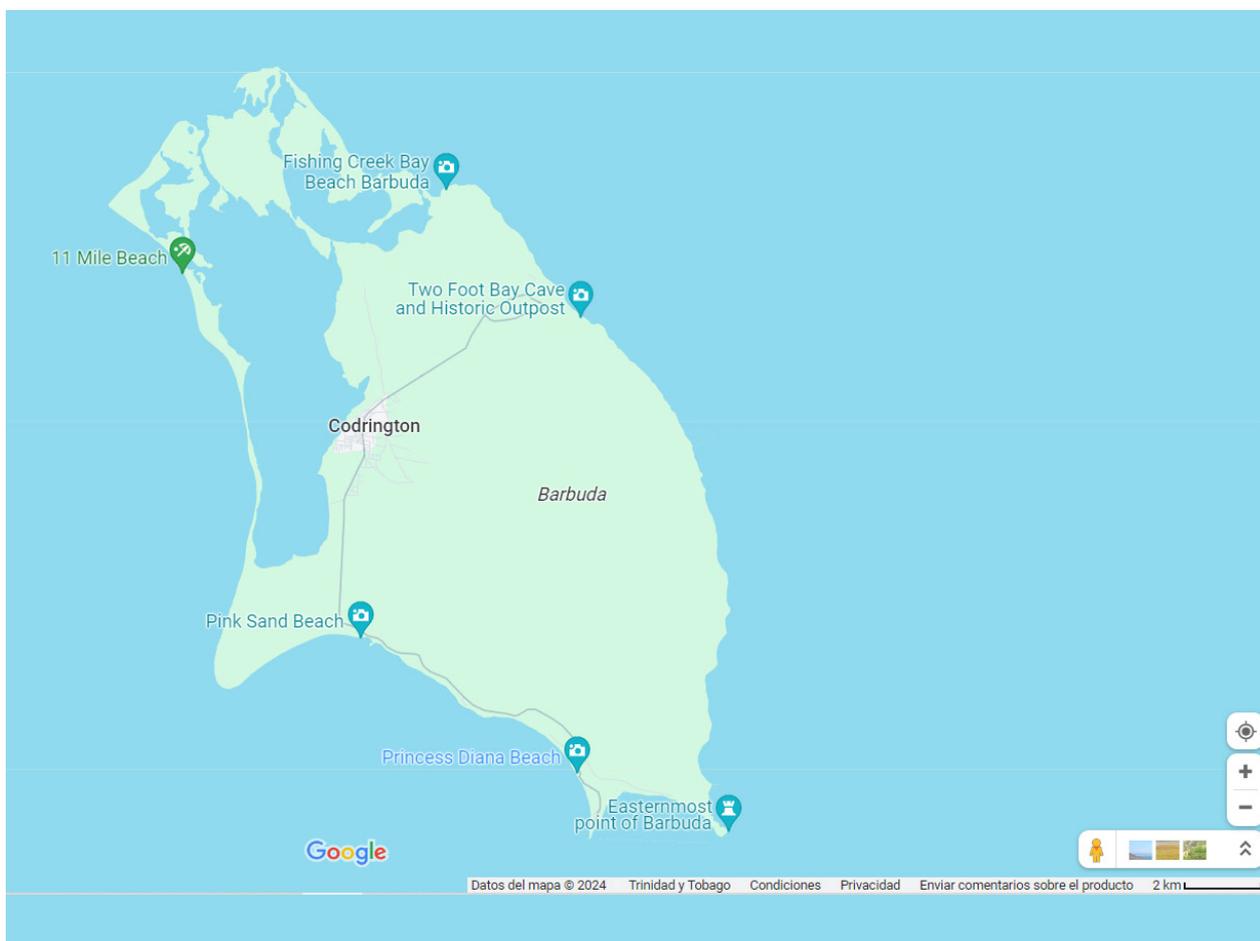
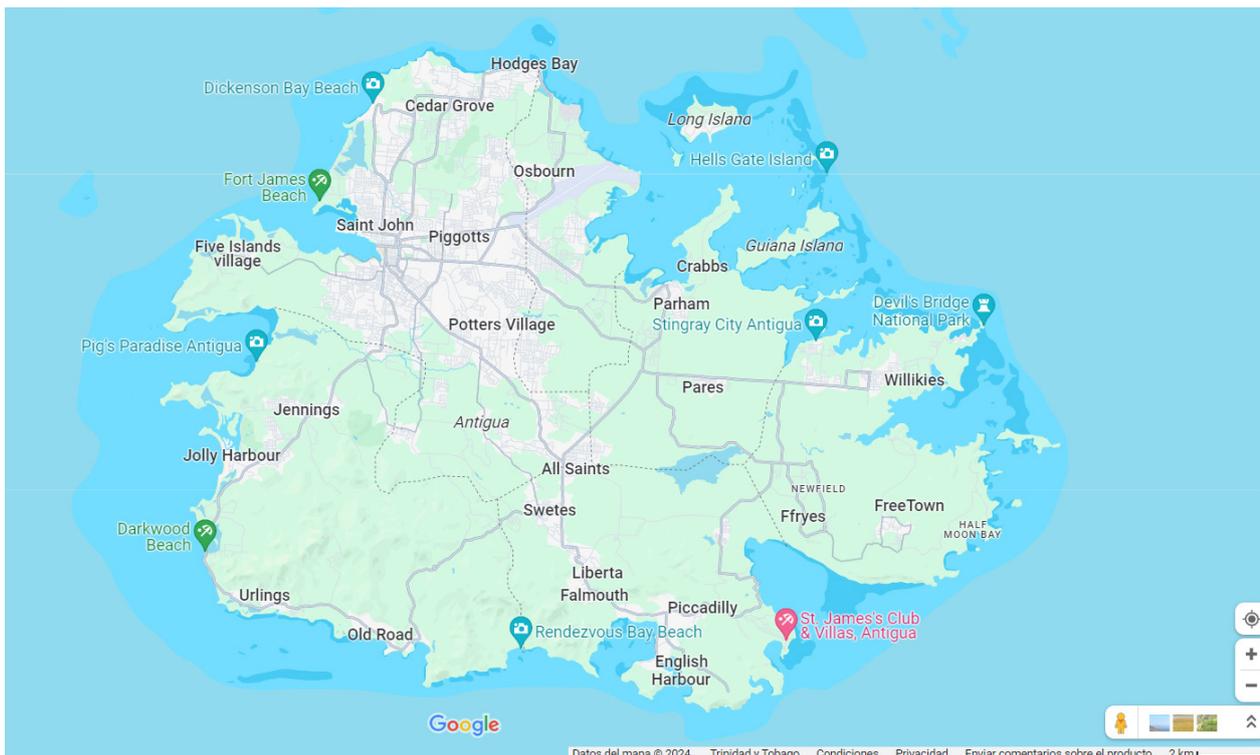


Figura 26 Antigua and Barbuda Monitored Sites (Sandy Shorelines Project)

Suivis de base

Le plus simple est de faire des photos au format dit « paysage ». C'est-à-dire toujours du même angle de vue et avec le même rayonnement. Pour interpréter les changements (moins ou plus de sable typiquement), il est utile d'avoir un repère invariant tel qu'un arbre, un muret, etc. En l'absence de repère existant, il est possible d'installer un pieu qui sera idéalement gradué afin de pouvoir interpréter les variations devant ou derrière le pieu mais aussi en altitude (hauteur du sable sur le pieu).

Cette méthode est notamment utilisée dans le projet de science participative CoastSnap qui permet à tout un chacun de prendre une photo sur un support et de la télécharger via une application.

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne permet pas de quantifier précisément et directement les évolutions.

Il est donc important de pouvoir compléter cette approche paysagère en mesurant les profils de plage. Une méthode de bricolage consiste à utiliser un cadre gradué (Document 27). Ce matériel peut être réalisé à partir de 2 tubes PVC verticaux et gradués auxquels est relié 1 tube horizontal (perpendiculaire) et coulissant. Le tube horizontal peut être remplacé par une corde mais celle-ci étant souple, il est alors plus difficile de garantir son horizontalité. La différence de hauteur entre les deux tubes verticaux peut ainsi être mesurée puis reportée sur un graphique. Il est d'usage de partir du haut de la plage, par exemple d'un repère existant ou d'un pieu implanté à cet effet, et de descendre vers la mer du côté perpendiculaire de la plage.



Document 27 GPS portable

Un GPS portable peut enfin permettre d'enregistrer la position du trait de côte en bas de plage ou la limite du haut de plage (Document 27). Ces appareils, couramment utilisés pour la randonnée ou le guidage, ont une précision suffisante en plan (coordonnées X, Y de l'ordre du mètre) pour ce type d'indicateur, mais insuffisante en altitude (coordonnée Z) pour réaliser des profils de plage.

Il est essentiel de noter quel est le marqueur enregistré pour le trait de côte (ligne eau-sable, croissant, berme, ligne de végétation, pied de dune, etc.) afin de pouvoir enregistrer la même chose d'une date à l'autre et de disposer d'un ensemble de données comparables.

Suivi avancé

Pour effectuer un suivi plus précis, il est recommandé d'utiliser des instruments topographiques tels que ceux utilisés sur les chantiers: lunette de chantier, tachymètre, théodolite et surtout GPS différentiel (ou système GNSS). Le principe est d'installer à chaque fois une station de référence sur un point dont les coordonnées X, Y et Z sont connues et de relever les points environnants à partir de cette référence. Le point connu peut être un point d'altitude référencé par un géomètre ou un organisme national. S'il

est éloigné, il est nécessaire d'implanter un point de référence sur la portée du point connu.

Les lunettes de chantier, tachymètres et autres théodolites utilisent une mesure locale. En effet, la station mesure la position d'une cible à partir d'une lunette grossissante ou d'un faisceau laser. Les systèmes GNSS, quant à eux, utilisent la position envoyée par les satellites. Il est utilisé en mode « différentiel » car il calcule la différence de position de la station mobile par rapport à la station de référence (Document 28). Ce mode différentiel permet d'obtenir une précision de l'ordre de 10 cm en altitude et de l'ordre du centimètre en plan. Les systèmes GNSS plus récents permettent de récupérer une correction envoyée en 3G/4G à partir d'antennes situées sur le territoire. En utilisant cette méthode, il n'est plus nécessaire d'installer une station de référence pour atteindre une précision décimétrique. Cependant, le coût de l'abonnement au système de station fixe peut être important.



Document 28 Images de profilage des plages avec des systèmes GNSS : Théodolite et Récepteur de base GNSS

Ces instruments permettent donc de collecter des profils de plage mais aussi des nuages de points sur l'ensemble de la surface terrestre pour créer un modèle 3D.

Néanmoins, la manière la plus efficace de créer un modèle 3D est d'effectuer un relevé photogrammétrique à l'aide d'un drone équipé d'un appareil photo (Document 29). En plaçant des cibles temporelles au sol et en disposant d'un système GNSS embarqué ou au sol (mode différentiel station fixe au sol et capteur mobile sur le drone) pour le géoréférencement des images, il est en effet possible de quadriller le champ de tir selon un plan de vol et une altitude déterminée afin de créer ensuite une orthomosaïque et un modèle numérique de surface (Chapitre 4.5). L'utilisation d'un drone peut cependant se limiter à la réalisation de photographies sans corrections dans la même logique que le suivi du paysage. Un drone peut nécessiter, selon la réglementation nationale en vigueur, un permis ou une licence de pilotage et peut être soumis à des autorisations de vol.



Document 29. Levé topographique utilisant la photogrammétrie par drone.

Des systèmes de caméras fixes situées sur la plage permettent également de prendre des images et de les redresser afin qu'elles soient comparables et mesurables (Document 30). L'avantage de cette technique est de pouvoir augmenter la fréquence d'acquisition, par exemple toutes les heures, et d'envoyer les images via internet ou un réseau mobile vers un serveur. Des systèmes autonomes à bas coût sont développés à partir d'un téléphone portable protégé par une coque étanche, et alimenté par un petit panneau solaire (Valentini & Balouin, 2020). Des dispositifs plus élaborés comprennent la construction d'une tour ou d'un mât, comme celui installé sur la plage de Hellshire en Jamaïque, dans le cadre du projet Littoraux sablonneux (Chapitre 6). Cela permet

d'extraire automatiquement le trait de côte d'un grand ensemble d'images. D'autres indicateurs morphologiques, de végétation ou hydrodynamiques peuvent également être suivis à partir de traitements ad hoc (images moyennées, profils d'images, etc.). Ce type de traitement peut également être réalisé à partir de photographies issues des sciences participatives (cf. dispositif Coastsnap).



Document 30
*Surveillance par caméra
fixe : Jamaïque (Projet
Littoraux Sablonneux)*

Les données Lidar (détection et télémétrie par ondes lumineuses) sont très utiles pour obtenir une référence d'altitude. Exploitées le plus souvent à partir d'un avion ou d'un hélicoptère, ces données sont très coûteuses et peuvent difficilement être reproduites chaque année. Des systèmes miniaturisés pour drones sont désormais disponibles sur le marché. Il existe également des équivalents terrestres fixes (sur trépied) ou mobiles (à pied ou en voiture). Il s'agit d'une mesure télémétrique, c'est-à-dire d'une mesure de la distance entre le capteur et le point au sol à partir d'un faisceau lumineux. Un nuage de points est ainsi directement obtenu pour une représentation en 3D du terrain.

Enfin, l'utilisation d'orthophotographies ou d'ortho-images d'origine aérienne ou satellitaire peut être nécessaire, notamment pour les sites difficiles d'accès. Certains capteurs offrent des images à très haute résolution, comme le satellite Pléiades (0,5m de pixel) qui permettent de suivre visuellement et d'enregistrer le trait de côte ou la ligne de végétation. En revanche, il est plus compliqué d'extraire des informations suffisamment précises sur l'altitude.

4.5.2. Bathymétrie.

La bathymétrie est la science qui mesure la profondeur de l'eau et le relief sous-marin ; c'est en quelque sorte « la topographie des fonds marins ».

Comme pour la partie terrestre, des méthodes spécifiques permettent de suivre l'évolution de la morphologie de la plage sous-marine.

Suivis de base

La prise de photographies de paysages sous-marins permet tout d'abord d'obtenir des informations sur la nature des fonds (rocheux, sableux, etc.) ainsi que sur la perte ou le gain de sable dans certaines zones (présence/absence de barres d'estran, ensablement ou dégradation du récif frangeant à la suite d'une tempête, etc.) Le plus simple est d'utiliser un appareil étanche. Le suivi d'une zone avec un référentiel invariant (par exemple une passe) permet de mieux observer les évolutions.

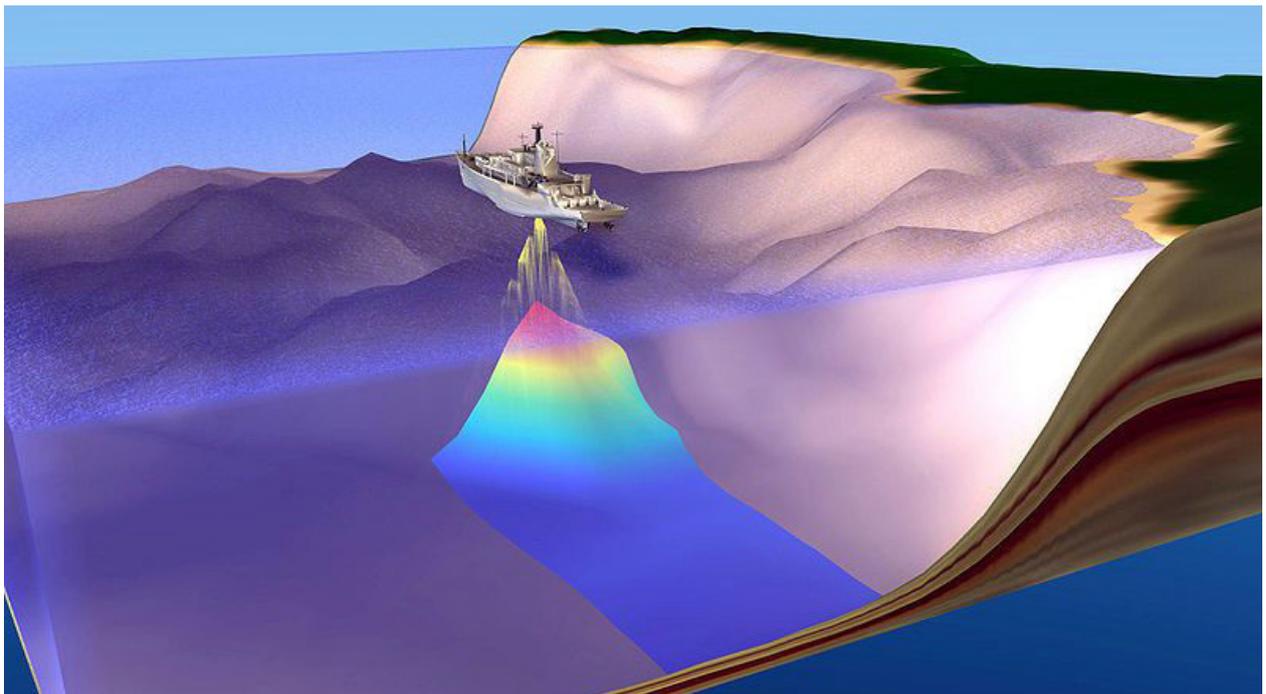
En termes de mesures bathymétriques, le moyen le plus simple est d'utiliser un échosondeur manuel pour effectuer une mesure ponctuelle de la profondeur le long d'un profil à partir d'un bateau (. Le principe de l'échosondeur est de calculer le temps d'émission et de réception d'une onde sonore se réfléchissant sur le fond. Les coordonnées X et Y de la position peuvent être relevées par un GPS portable et les coordonnées Z par le sondeur simultanément. Le respect de l'axe du profil bathymétrique par le pilote doit se faire à l'aide d'un système de guidage nautique (tracé sur le GPS portable ou le GPS du navire), ou au moins à partir d'un double repère à terre (deux repères à terre sur le même axe). Si le pilotage est en vue, il est donc nécessaire de faire le profil de la mer vers la terre. Enfin, le sondeur manuel doit être tenu verticalement pour effectuer la mesure afin de ne pas fausser la valeur. Deux ou trois valeurs peuvent être moyennées si nécessaire (si elles sont agitées par le plan d'eau). Afin de pouvoir comparer les données dans le temps, il sera nécessaire de recalibrer la mesure en fonction du niveau de l'eau et de la marée.

Suivis avancés

Des échosondeurs plus élaborés permettent une surveillance plus précise. Il s'agit de systèmes monofaisceau (une onde) ou multifaisceaux (une bande d'ondes). Doublés d'un système GNSS centimétrique, voire d'une centrale inertielle (correction des mouvements dus au roulis et au tangage), ces sondeurs sont fixés verticalement sur le côté ou sous le bateau. Ils sont pilotés par un logiciel qui gère la navigation, l'acquisition synchronisée et continue des données X, Y et Z, en ignorant directement la marée.

Les systèmes à faisceau unique sont utilisés le long des profils, qui peuvent se croiser si vous souhaitez quadriller une zone et générer un nuage de points pour la modélisation 3D. Les systèmes multifaisceaux procèdent de la même manière mais ont une fauchée qui s'élargit au fur et à mesure que la profondeur d'eau augmente. Il est possible de prévoir une grille pour couvrir entièrement un secteur en fonction du fauchage.

Ces dispositifs peuvent être installés sur des navires de différentes tailles, ainsi que sur des embarcations légères (zodiacs ou kayaks, par exemple). Des solutions sur drones nautiques sont aujourd'hui disponibles, mais privilégiées pour les zones protégées des vagues. Enfin, plusieurs équipements de géophysique marine permettent d'acquérir des informations sur la nature du fond, sa morphologie, l'épaisseur des sédiments, voire la structure du plancher océanique. Il s'agit notamment du sonar latéral, du sondeur de sédiments, de la sismique réflexion, etc



Document 31 Surveillance bathymétrique avancée à bord d'un **bateau**.

4.5.3. Sédimentologie.

La taille des particules et la nature des sédiments sont également des indicateurs de la dynamique des plages

Taille de particules

La granulométrie est la mesure de la taille des sédiments. Différentes classes sont référencées en fonction du diamètre du grain : les argiles, les limons, les sables, les galets et les blocs.

Un gradient de taille des particules est observé en fonction de la pente. Plus la pente est forte, plus le diamètre est grossier. L'agent de transport du sable conditionne également un tri granulométrique, les vagues pouvant transporter des grains plus lourds que le vent. Il est donc important de connaître la granulométrie des différents compartiments de la plage.

Les méthodes d'échantillonnage se font simplement à l'aide d'une pelle manuelle en prélevant le sable dès le premier centimètre et en le stockant dans un sac numéroté. Le plus souvent, le plan d'échantillonnage est réalisé le long des profils de plage. Dans la partie sous-marine, l'utilisation d'une benne à sédiments est nécessaire à partir d'un bateau. Les modèles Van Veen et Shipeck sont les plus utilisés.

Les échantillons devront ensuite être séchés dans un four avant d'être triés et pesés par diamètre à l'aide d'une colonne granulométrique (tamis) ou d'un granulomètre laser afin d'obtenir une courbe granulométrique.

Pour certains contrôles spécifiques, les pièges à sédiments peuvent également être utilisés pour quantifier la taille des particules à différentes hauteurs en fonction du transport par les vagues ou le vent.

Autres analyses sédimentologiques

La nature des sédiments est importante à prendre en compte avec des sables d'origine biodétritique (coraux ou coquillages), volcanique, alluviale, etc. (Document 32).



Figura 32 : Différents types de sable : biodétritique, volcanique, alluvial (G-D)

La composition peut également être mixte. Dans la Caraïbe, il peut être utile de connaître la quantité de matériel biodétritique pour estimer la contribution du récif corallien. Pour cela, une analyse calcimétrique à base d'acide chlorhydrique permet de dissoudre la fraction carbonatée (corail, coquillages) et de quantifier sa proportion par pesée avant et après.

Enfin, l'examen à la loupe binoculaire permet d'évaluer l'indice d'émoussé d'un grain afin d'évaluer le temps qu'il a passé dans l'eau (analyse morphoscopique). Plus le grain est rond, plus il a séjourné dans l'eau.

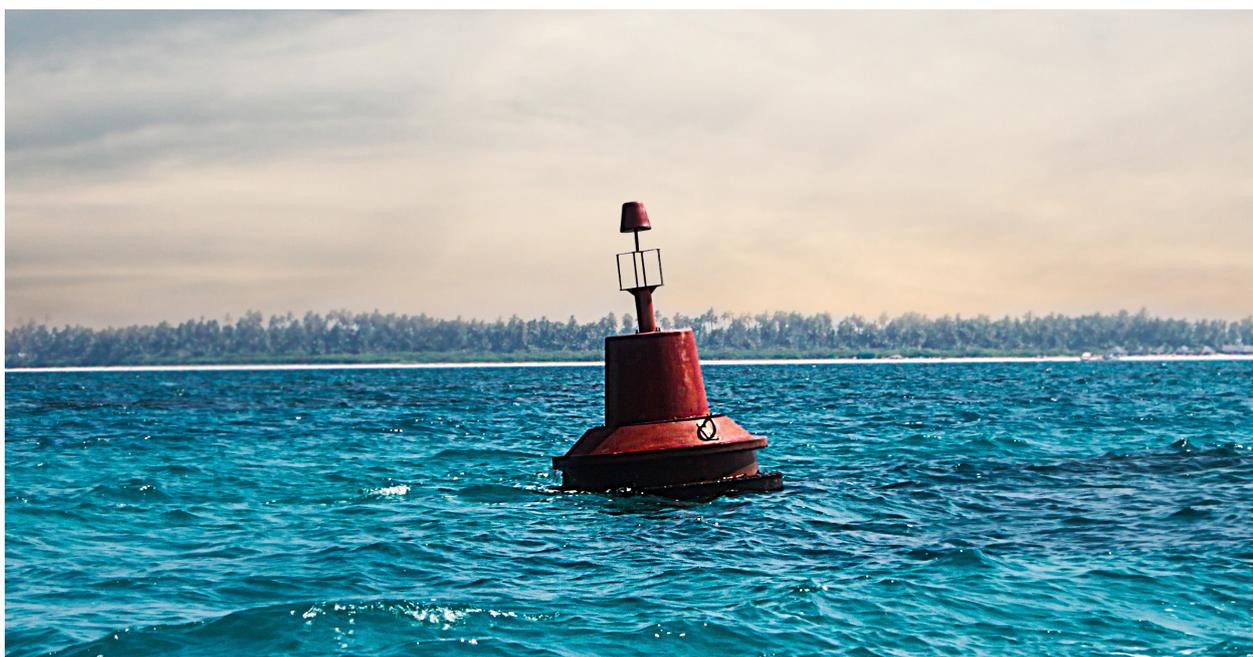
4.5.4. Hydrométéorologie.

Les moyens de mesure des paramètres météorologiques marins peuvent être locaux ou régionaux.

Vagues et turbulences

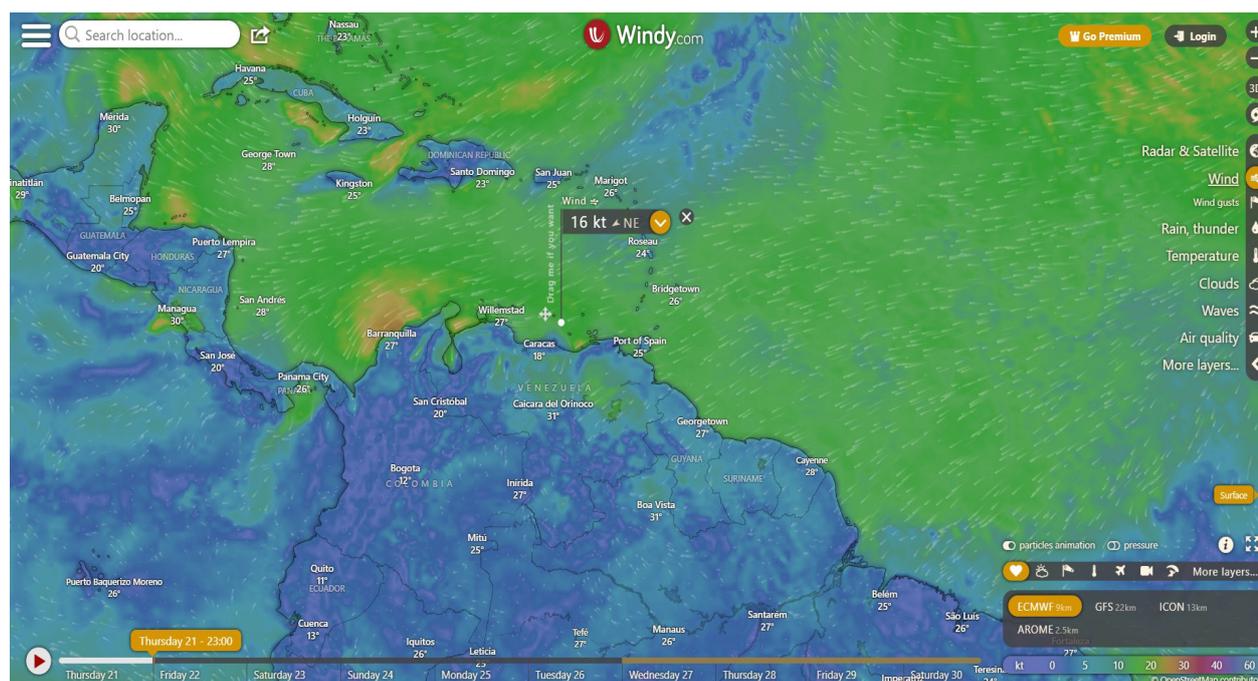
Ces informations peuvent d'abord être collectées à partir de bouées houlomotrices lorsqu'elles existent sur la façade en question (Document 33). Ces bouées, alimentées en permanence par un panneau solaire, acquièrent et transmettent en temps réel des données (Hs, Tp, Dir), qui peuvent être consultées, voire téléchargées, le plus souvent en ligne.

En l'absence de système régional, l'utilisation d'une installation locale peut être envisagée à moindre coût par l'installation d'un capteur de pression qui mesure les paramètres Hs et Tp mais aussi le spectre de fréquence des ondes (Document 33). L'inconvénient est que ces capteurs ne sont pas autonomes et qu'il faut les relever pour charger les données et changer la batterie.



Document 33 Surveillance des vagues : bouée fixe

Enfin, si aucun équipement de mesure n'est disponible, il est toujours possible de consulter les sites de prévision des vagues (Document 34) et de télécharger leurs données (références au Chapitre 3). Dans ce cas, il faut considérer qu'il ne s'agit que de prévision et non d'observation et qu'une marge d'erreur liée aux simulations est présente. Néanmoins, les grandes tendances seront bien représentées.



Document 34 : Exemple de plateforme publique de prévisions des vagues (capture d'écran de www.windy.com prise le 21 mars 2024)

Water levels

Comme les houlographes, les marégraphes régionaux peuvent mesurer le niveau de l'eau (Document 35). Situés à l'intérieur des ports, ils prennent en compte la marée et les cycles saisonniers mais seulement la composante atmosphérique de l'onde de tempête car leur emplacement est protégé des vagues. Leurs valeurs seront donc réduites pour les zones exposées.



Document 35 Surveillance des marées : marégraphes

Localement, des capteurs de pression peuvent également être utilisés pour mesurer le niveau de l'eau (voir les vagues).

Les harmoniques de marée peuvent être facilement évaluées plusieurs années à l'avance. Il existe également des modèles de prévision du niveau d'eau basés sur les données historiques des marégraphes. Ces derniers prennent donc en compte, outre la marée, les variations saisonnières et l'élévation du niveau de la mer. Ces modèles ne permettent pas de prévoir les effets des marées provoquées par des événements (Codiga, 2011).

Courants

Il existe peu de dispositifs régionaux ou de modèles de prévision et le plus souvent, les courants sont mesurés localement et temporairement à l'aide de courantomètres sur l'ensemble de la colonne d'eau ou en découpant la colonne d'eau en tranches.

Il est également possible d'utiliser des dériveurs. Ces dispositifs sont semblables à des bouées sur lesquelles est fixé un GPS. Ils renseignent sur l'intensité et le schéma principal des courants. Ils peuvent être utiles à l'échelle de la cellule sédimentaire pour déterminer les flux de courants et de sédiments, ou à l'échelle régionale pour évaluer les principaux courants de surface.

Vents

Les stations utilisées par les services météorologiques collectent le plus souvent ces données, bien qu'il soit possible d'en mettre une en place localement ou d'effectuer des mesures manuelles instantanées. Les modèles de prévision en ligne sont également courants.

4.5.5. Fréquence des observations.

La fréquence des observations dépend des cycles à suivre et des moyens disponibles. Tout d'abord, il est important de pouvoir enregistrer des suivis sur plusieurs années afin de pouvoir comparer et dissocier les cyclicités (mensuelles, annuelles voire pluriannuelles) des tendances à long terme.

Dans le contexte caribéen, au cours d'une même année, il est nécessaire de pouvoir qualifier la variabilité saisonnière avec une campagne de terrain sur chaque plage sélectionnée avant et après la saison cyclonique. Une campagne complémentaire doit également pouvoir être déclenchée au passage d'un événement significatif (cyclone, tempête) afin de mesurer le recul maximal avant de rééquilibrer le système. Certains protocoles assez complets prévoient des relevés mensuels.

Enfin, des capteurs installés à demeure permettent un suivi « en continu » (toutes les heures, par exemple), soit lors d'une campagne intensive (un mois sur un cycle de marée lunaire, par exemple), soit en permanence et en temps réel pour des stations autonomes avec transmission des données à distance.

4.5.6. Résumé des méthodes de terrain et exemple de protocole.

Il existe une grande variété de méthodes et d'outils pour suivre la dynamique des plages. Si les suivis de base sont relativement simples et peu coûteux, les méthodes les plus avancées nécessitent toutes une formation spécifique et un investissement budgétaire conséquent.

Le tableau ci-dessous résume les différentes méthodes, l'estimation de l'investissement associé (coût, formation), leur performance (taux de fiabilité, efficacité) et la fréquence de contrôle recommandée (Tableau 2).

Tableau 2: Synthèse des méthodes et outils de surveillance

Méthode	Instrument	Indicateur	Coût	Formation externe	Performance	Fréquence d'acquisition
Topographie	Appareil photo	Suivi du paysage, points de repère fixes	max 300 \$	Non	Faible	Deux fois par an si des déplacements sont nécessaires ; aléatoire s'il existe un cadre pour la participation du public
	GPS portable	Littoral, relevés X, Y	max 300 \$	Autonome	Faible	Mensuelle à semestrielle
	Cadre gradué bricolé	Profils des plages	max 50\$	Autonome	Faible	Mensuelle à semestrielle
	Niveau du site, théodolite, tachymètre	Profils des plages	300 - 10 000\$	De quelques jours à plusieurs années	Très bonne	Mensuelle à semestrielle
	Système GNSS différentiel	Profils de plage, nuage de points	6000 à 20 000\$	De quelques jours à plusieurs années	Très bonne	Mensuelle à semestrielle
	Drone photo oblique	Suivi du paysage, points de repère fixes	max 1000\$	Depuis plusieurs jours	Faible	Mensuelle à semestrielle
	Drone photogrammétrique	Diagramme de dispersion	10 000\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne	Mensuelle à semestrielle
	Caméra vidéo fixe	Diagramme de dispersion, ligne de côte	300 à 5000\$	Pas de formation ad hoc, accompagnement	Bonne	En continu
	Lidar sur terre ou dans les airs	Nuage de points	min 5000 \$	De quelques jours à plusieurs années	Très bonne	De semestrielle à interannuelle
	Images aériennes et satellites	Littoral, relevés X, Y	Google Earth Pro (gratuit)	De quelques jours à plusieurs années	Bonne	De semestrielle à interannuelle

Méthode	Instrument	Indicateur	Coût	Formation externe	Performance	Fréquence d'acquisition
Bathymétrie	Appareil photo	Suivi du paysage, points de repère fixes	max 300 \$	Non	Faible	Deux fois par an
	Sondeur portable	Profils de plage	max 300\$	Autonome	Faible	Mensuelle à semestrielle
	Sonars mono et multifaisceaux	Profils de plage, nuage de points	min 1000\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne à Très bonne	Mensuelle à semestrielle
	Drone nautique	Nuage de points	min 2000\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne	Mensuelle à semestrielle
	Imagerie vidéo, drone, satellite	Nuage de points	0 – 10 000\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne	De semestrielle à interannuelle
	Sismique, sondeur de sédiments, sonar latéral	Profils de plages	min 10 000\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne à Très bonne	Un ascenseur de référence

Méthode	Instrument	Indicateur	Coût	Formation externe	Performance	Fréquence d'acquisition
Sédimentologie	Pelle, benne	Profils de plages	10 - 1000 \$	Autonome	Faible	De semestrielle à interannuelle
	Piège bricolé	Profils de plages	max 300\$	Autonome	Faible	Campagne intensive
Hydrométéorologie	Capteur de pression	Mesure en 1 point	300 - 1000\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne à Très bonne	Campagne intensive
	Vague	Mesure en 1 point	50 000\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne à Très bonne	En continu
	Marégraphe	Mesure en 1 point	min 1000\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne à Très bonne	En continu
	Courantomètre ponctuel ou ADCP	Mesure en 1 point	15000 - 35 000\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne à Très bonne	Campagne intensive
	Station météorologique, anémomètre	Mesure en 1 point	min 300\$	De quelques jours à plusieurs années	Bonne à Très bonne	De ponctuel à continu

Ces estimations restent très variables car pour un même type d'équipement, il existe des gammes d'entrée de gamme et des gammes professionnelles avec des différences considérables. La formation, les performances et la fréquence recommandée sont également à adapter à l'utilisation et à l'objectif recherché.

A titre d'exemple, voici le protocole de suivi mis en place en Guadeloupe par le BRGM:

1. Relevés saisonniers de 2 campagnes topo-bathymétriques par an, avant/après la saison cyclonique à partir d'un système GNSS couplé à un sondeur mono-faisceau (bateau léger) sur une douzaine de plages (profils, trait de côte, ligne de végétation) ;
2. Relevé photogrammétrique annuel par drone terrestre sur les sites les plus sensibles (orthomosaïque, maillage) ;
3. Etude en continu (toutes les heures) par caméra vidéo autonome « bon marché » sur les sites propices aux échouages de sargasses (littoral) ;

En cas de campagne post-événement cyclonique, inventaire des impacts sur l'ensemble du linéaire (photo au format paysage et drone sur les sites d'impacts majeurs).

4.6. Outils numériques pour le traitement de l'information

Une fois les données brutes collectées, un traitement est nécessaire pour les rendre interprétables.

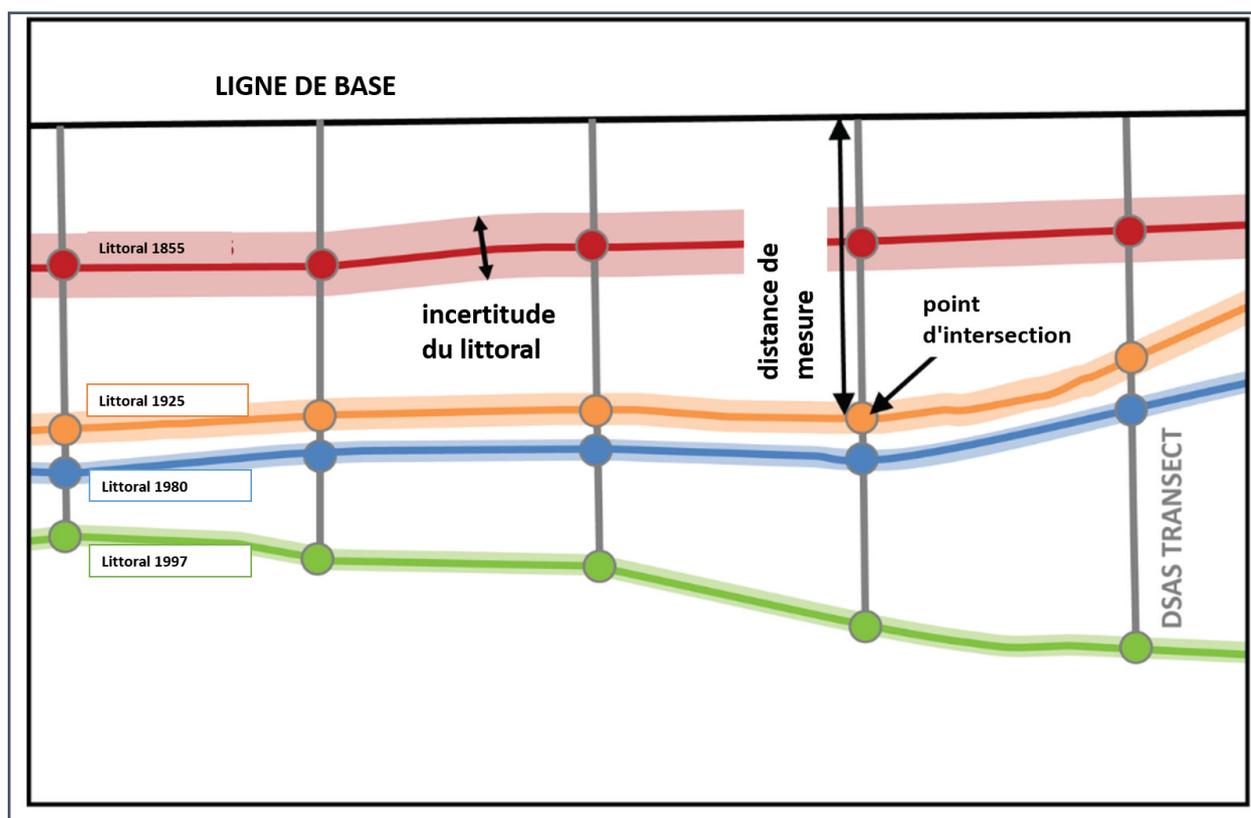
Traitement des données planaires sur le trait de côte (2D)

Les données de trait de côte (ou d'autres indicateurs de ce type tels que la limite en pied de dune, de berme, de végétation, etc.) sont issues soit de relevés de terrain (points GPS/GNSS), soit d'images (caméras fixes, drones, avions, satellites). Dans les deux cas, l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG type ArcGis, QGis, etc.) ou d'une interface de programmation (Python, Matlab, etc.) est nécessaire pour représenter la position du trait de côte sur une carte en plan (2 dimensions) ?

Pour les données GPS, il faut importer les points (coordonnées X, Y) et générer automatiquement une ligne en les reliant. A partir d'une image, la ligne est directement

générée point par point par photo-interprétation et numérisation (l'opérateur « dessine » sur l'image).

L'analyse de l'évolution temporelle du trait de côte se fait en superposant plusieurs dates de trait de côte et en calculant des indices d'évolution (distance, taux annuels) le long de transects recoupant les traits de côte. L'outil DSAS développé par l'USGS à partir d'ArcGis permet d'automatiser ces tâches (Document 36).



Document 36 DSAS génère des transects qui sont projetés perpendiculairement à la ligne de base de référence avec un espacement spécifié par l'utilisateur le long de la côte. DSAS mesure la distance entre la ligne de base et chaque intersection de la ligne de côte le long d'un transect, et combine les informations de date et l'incertitude de position pour chaque ligne de côte.

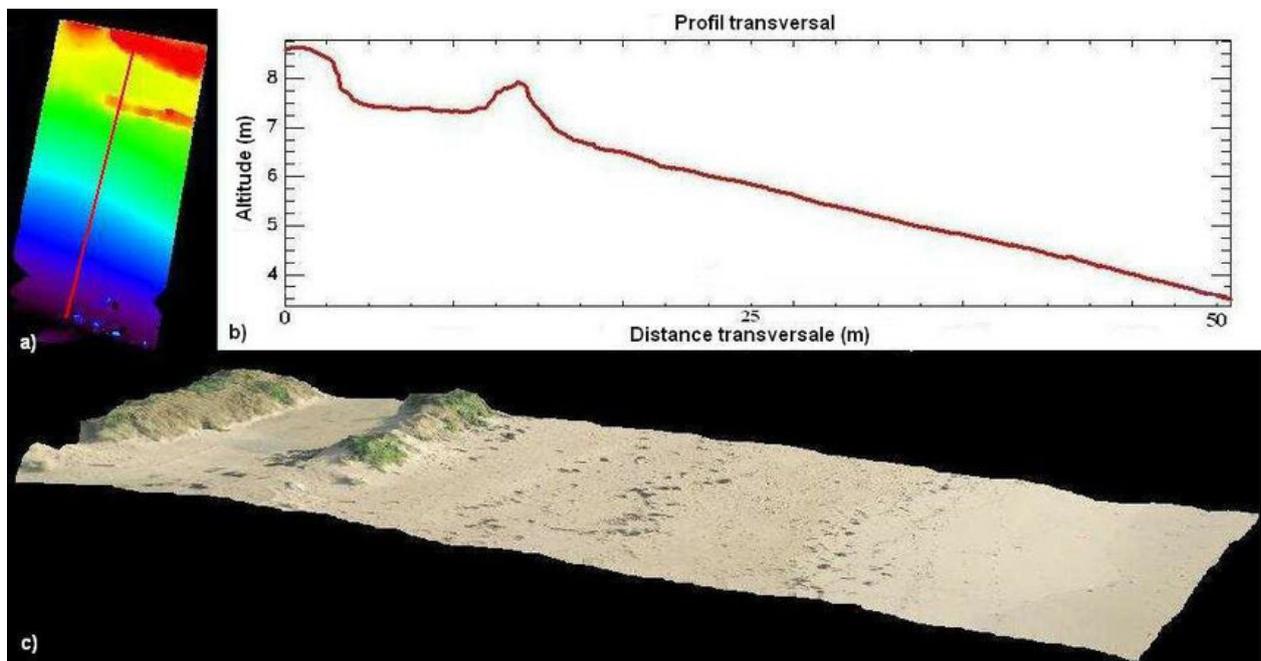
Traitement des données de profil de gamme en coupe transversale (2D)

Les profils de plage sont extraits de campagnes de terrain ou de grilles altimétriques (photogrammétrie, lidar).

Pour les données topo-bathymétriques, les coordonnées X, Y, Z de chaque point doivent être importées dans un tableur ou une interface de programmation et un graphique représentant la pente de la section transversale (2 dimensions) avec en abscisse la

distance en mètres de la tête du profil et en ordonnée l'altitude en mètres (Document 37). Différents outils permettent de générer automatiquement des profils à partir des coordonnées de points GPS. Les profils peuvent également être extraits de grilles d'élévation existantes via le module de grille d'un SIG ou d'un logiciel de grille spécifique (par exemple Surfer) à l'aide de l'outil de profil dédié (Document 37).

La superposition d'un même profil à différentes dates permet d'estimer les évolutions transversales (perte ou gain d'épaisseur de sable en mètres, transit le long du profil). Par ailleurs, la comparaison de plusieurs profils d'une plage permet d'appréhender les variations longitudinales (transit de sable d'un secteur à l'autre). La localisation des profils sur une carte peut également se faire en important les coordonnées X, Y sous SIG.



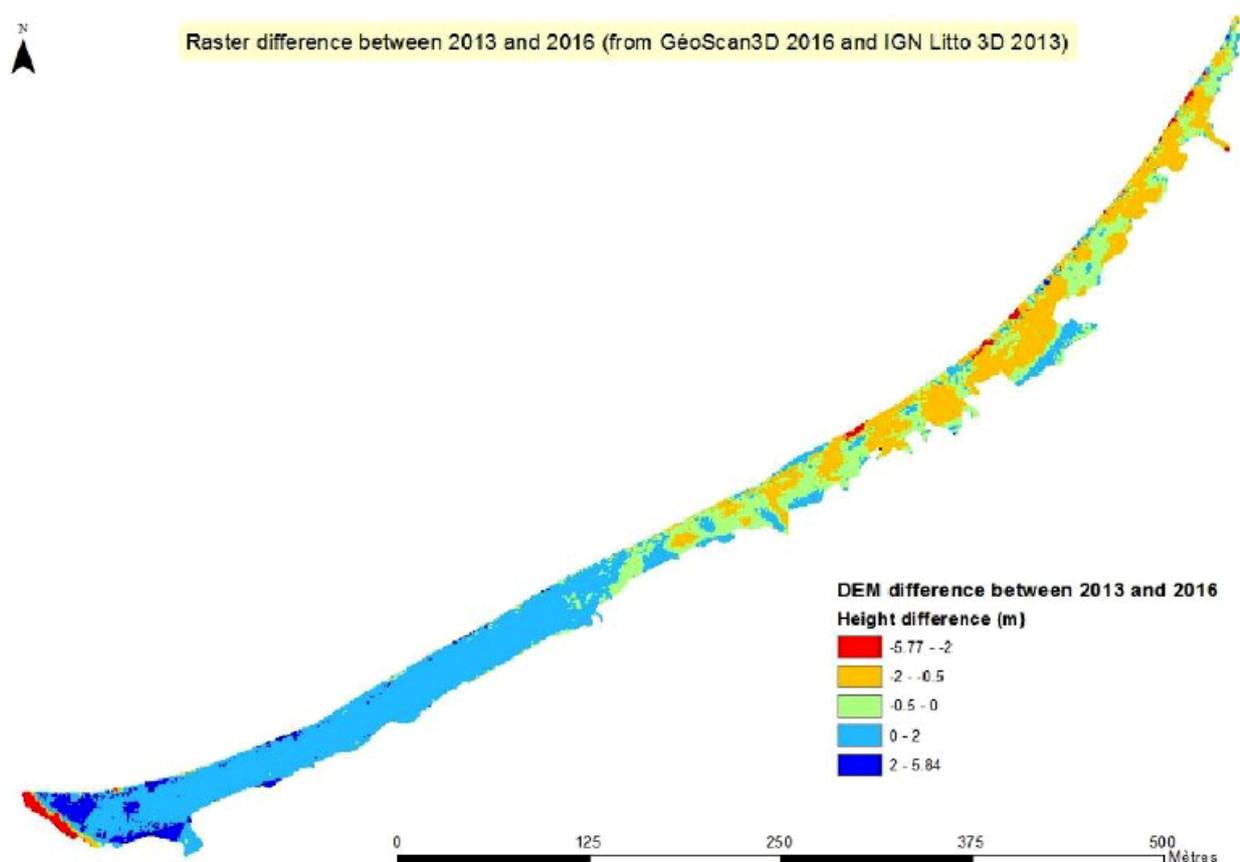
Document 37 Traitement des données relatives aux profils de plage : à partir d'un relevé sur le terrain (à gauche) ou d'une extraction de MNE (à droite)

Traitement des nuages de points et des grilles (3D)

Le principe est de mailler un nuage de points pour créer une représentation tridimensionnelle de l'étendue. Les nuages de points sont créés à partir de données in situ (GNSS, lidar) ou d'images (photogrammétrie). La mesure directe de l'altitude du sol génère un modèle numérique d'élévation (MNE), tandis que l'extraction à partir d'une mosaïque d'images se limite à un modèle numérique de surface (MNS) dont la valeur peut être celle de l'auvent ou du toit d'un bâtiment plutôt que celle du sol.

Il est possible de créer une grille en important les points X, Y, Z sous SIG ou un logiciel spécifique (Surfer, Cloudcompare, etc.). Pour la photogrammétrie, la création d'une orthomosaïque, d'un nuage de points et d'une grille se fait à l'aide de logiciels dédiés tels que Agisoft Metashape.

L'analyse temporelle est réalisée en croisant les grilles afin de calculer les gains ou pertes de volumes (en m³) et d'identifier les transits correspondants (Document 38).

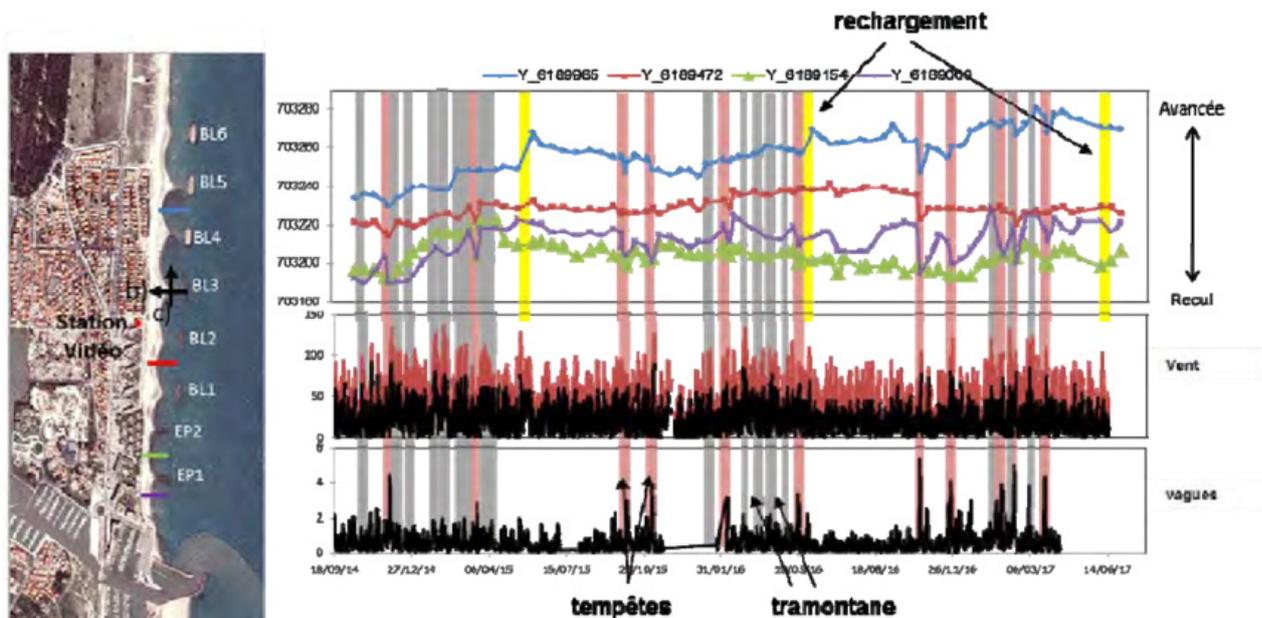


Document 38 Analyse temporelle de la grille topographique : soustraction de l'élévation d'une date à l'autre pour obtenir l'érosion et l'accumulation pour chaque pixel (BRGM)

Traitement des données météorologiques et marines

Les données météorologiques marines sont le plus souvent importées via des scripts et des paquets qui peuvent être automatisés. Ceux-ci permettent d'extraire des paramètres spécifiques des données intégrées (moyenne, maximum, significatif, direction, etc.). Pour le traitement des données de vagues, le package Wafo (<https://github.com/wafo-project/wafo>), par exemple, est très répandu et fonctionnel sur Matlab et Python. Il est bien sûr possible d'utiliser un tableur pour une visualisation rapide des données.

Une série temporelle de la hauteur des vagues (par exemple) permet d'identifier les périodes de tempêtes morphogènes et de les mettre en relation avec les morpho-indicateurs enregistrés (profils, traits de côte, MNT (Document 39). Les roses de houle permettent également de représenter contextuellement le climat de houle (moyen)



Document 39 . Série temporelle avec superposition des positions du trait de côte (couleurs liées aux profils), du vent et des vagues (de haut en bas)

Traitement des données sédimentologiques

Les données granulométriques sont les plus utilisées. Le mode de traitement le plus simple est la représentation sous forme d'une courbe granulométrique (appelée en S) avec en abscisse le diamètre des grains et en ordonnée la fréquence cumulée des poids Cette courbe permet d'évaluer la proportion de classes granulométriques dans un échantillon selon différents indices statistiques (médiane, quantiles, tris, etc.).

Dans l'espace, il est utile de présenter la médiane de différentes manières le long des profils ou mieux sous la forme d'une grille si vous disposez d'un maillage suffisamment serré. Cette information est particulièrement cruciale dans le contexte des opérations de rechargement de sable artificiel où le sable apporté doit être le plus similaire au sable local.

4.7. Points clés pour les décideurs

1. Un réseau de surveillance national ou régional est essentiel pour comprendre la dynamique des plages dans leur complexité et leur cyclicité.
2. Il existe une multitude d'outils et de méthodes et l'investissement doit être proportionnel aux enjeux économiques et patrimoniaux des plages.
3. La formation d'un personnel spécialisé est nécessaire.
4. La pérennité d'un observatoire est envisagée à long terme.
5. Les suivis permettent d'orienter les recommandations en termes de gestion et d'adaptation sur le site.

Chapitre 5

Aperçu des modèles numériques et de leur rôle dans la compréhension et l'atténuation de l'érosion côtière.

5.1. Introduction

Les modèles numériques océanographiques sont un outil essentiel pour comprendre la dynamique des systèmes côtiers, les processus d'érosion et la conception de projets de protection des plages. Ces modèles utilisent des ordinateurs et des algorithmes pour résoudre des équations mathématiques, simuler des processus océanographiques et fournir des prévisions sur la hauteur des vagues, les courants, le transport des sédiments et l'érosion côtière. En simulant différents scénarios, les modèles permettent aux océanographes et aux ingénieurs côtiers d'évaluer les impacts potentiels et les causes de l'érosion côtière et de développer des stratégies pour en atténuer les effets. Dans ce chapitre, nous décrivons brièvement certains des modèles les plus populaires utilisés par les océanographes et les ingénieurs côtiers, y compris les modèles numériques de vagues, les modèles de circulation côtière, les modèles couplés vagues/courant/transport de sédiments, et les modèles d'érosion des plages et de brèche dans les dunes. À des fins éducatives, nous mettrons également en évidence certains des travaux de modélisation numérique entrepris dans le cadre des projets exécutifs financés par l'Association des États de la Caraïbe (AEC) et réalisés par Inversiones GAMMA SA du Ministère cubain de la science, de la technologie et de l'environnement. Ces projets portaient sur la réhabilitation des plages de Viento Frío, Colón, République du Panama ; Runaway Bay, Antigua et Barbuda ; et Bonasse, Cedros Bay, République de Trinité et Tobago. La modélisation numérique étant un domaine très avancé, il convient de souligner que l'objectif de ce chapitre n'est pas d'apprendre aux lecteurs à utiliser ces modèles, mais de comprendre comment ils fonctionnent et ce que l'on peut attendre des efforts de modélisation.

5.2. Fonctionnement des modèles numériques.

Les modèles océanographiques numériques sont des outils essentiels de l'ingénierie côtière, utilisés pour simuler et prévoir divers processus côtiers. Ces modèles aident les ingénieurs et les océanographes à comprendre les processus physiques qui se

produisent dans l'océan et les zones côtières, tels que la génération et la propagation des vagues, les courants induits par les vents, les vagues et les marées, le niveau de la mer et les ondes de tempête, le transport des sédiments et l'érosion côtière. Différents types de modèles numériques sont utilisés en ingénierie côtière, notamment les modèles hydrodynamiques, qui simulent le mouvement de l'eau dans la zone côtière, les modèles de vagues, qui simulent la génération, la propagation et la transformation des vagues, et les modèles de transport de sédiments, qui simulent le mouvement des sédiments dans l'environnement côtier. Ces modèles travaillent souvent conjointement, car les processus qu'ils simulent sont interdépendants et s'influencent mutuellement. Par exemple, les modèles de vagues peuvent alimenter les modèles de transport de sédiments, car les vagues sont un facteur clé du mouvement des sédiments. Ceci est particulièrement vrai dans la Caraïbe, où les marées sont faibles et où les vagues sont généralement le principal moteur du transport de sédiments et de l'évolution du littoral.

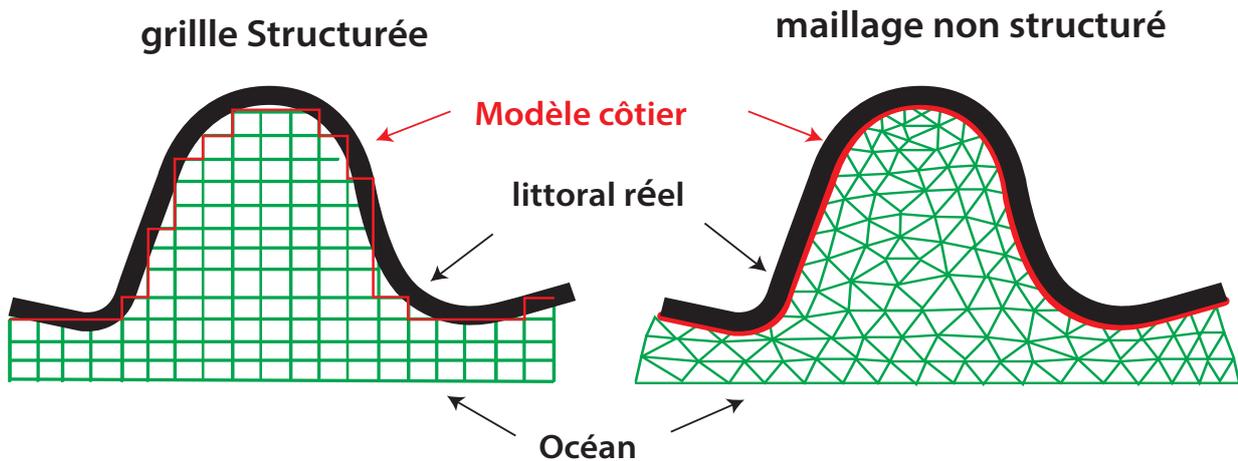
Les modèles numériques peuvent être unidimensionnels, bidimensionnels ou tridimensionnels, et chacun peut être plus approprié en fonction de la complexité de la question analysée. Dans le contexte de l'hydrodynamique littorale et de l'érosion des plages, les modèles 1D, 2D et 3D offrent chacun des avantages différents. Un modèle 1D prend en compte les variations le long d'une seule dimension horizontale, généralement le profil cross-shore. Ce modèle est optimal pour simuler des scénarios où les variations dans la direction littorale sont minimales ou peuvent être ignorées, et où l'accent est mis sur les changements dans le profil de la plage, le transport des sédiments ou la transformation des vagues le long d'un seul transect. Un modèle 2D prend en compte les variations dans les deux dimensions horizontales, cross-shore et longshore, et est idéal pour simuler des phénomènes tels que les courants littoraux, les courants d'arrachement ou les schémas de transport de sédiments qui présentent des variations significatives dans les deux directions horizontales, mais où les variations verticales peuvent être moyennées ou ignorées. Enfin, un modèle 3D prend en compte les variations dans les trois dimensions spatiales et est nécessaire pour simuler des scénarios complexes où les variations horizontales et verticales des paramètres hydrodynamiques sont importantes, comme l'interaction détaillée entre les vagues, les courants et le fond marin, ou le transport de sédiments et de polluants dans la colonne d'eau. Le choix de la dimensionnalité du modèle dépend en fin de compte de la nature du problème, des ressources informatiques disponibles et du niveau de détail requis dans les résultats de la simulation.

La modélisation numérique présente de nombreux avantages, tels que la possibilité de simuler des processus complexes dans un environnement contrôlé, de prédire les

changements futurs et de concevoir des mesures efficaces d'atténuation de l'érosion côtière. Cependant, elle présente également des limites, telles que la nécessité de disposer de données d'entrée précises, les ressources informatiques requises, ainsi que les simplifications et les hypothèses faites pour représenter des processus naturels complexes dans un modèle mathématique. Ces hypothèses peuvent parfois conduire à des erreurs importantes, et il est important de toujours garder à l'esprit que les modèles ne sont pas parfaits. C'est pourquoi il est important de calibrer et de valider les modèles à l'aide de données océanographiques et sédimentaires réelles. Malgré ces limites, la modélisation numérique est un outil indispensable au génie côtier, qui permet de mieux comprendre les processus côtiers et de concevoir des mesures efficaces pour protéger nos côtes.

Pour mettre en œuvre et faire fonctionner un modèle numérique permettant de simuler les vagues, les courants et/ou le transport de sédiments dans une zone côtière, une série d'étapes cruciales doivent être exécutées. Chaque étape est décrite en termes généraux ci-dessous :

- 1. Déterminer le domaine du modèle :** Tout d'abord, la portée géographique de la zone d'étude doit être définie, ainsi que la résolution de la grille du modèle. Pour les modèles littoraux, la grille doit englober la zone d'intérêt, depuis les eaux relativement profondes où des données appropriées sont disponibles pour forcer le modèle, et doit s'étendre à la région littorale où se trouve la plage ou la zone d'étude souhaitée. Il s'agit d'une étape très importante, car la définition d'un domaine inadéquat peut conduire à des résultats incorrects et trompeurs en raison des effets de frontière. La forme du domaine peut varier en fonction du type de modèle et de l'utilisation d'une grille structurée nécessitant généralement des domaines rectangulaires, ou d'un maillage non structuré qui permet une plus grande flexibilité dans la définition du domaine et peut se conformer aux contours de profondeur (Document 40).
- 2. Collecter les données d'entrée :** Les modèles océanographiques nécessitent différents ensembles de données d'entrée, tels que les données bathymétriques, les données de vent, les données de marée et les conditions de vagues au large. Les données bathymétriques utilisées pour la grille ou le maillage du modèle doivent être de haute qualité, idéalement obtenues à partir de données LIDAR, et doivent résoudre les caractéristiques bathymétriques les plus importantes affectant les vagues et les courants dans la zone. Le référentiel vertical doit être soigneusement ajusté pour coïncider avec d'autres ensembles de données, en particulier les conditions de forçage du niveau de l'eau. Les conditions de vagues au large des côtes, à utiliser



Document 40 Différences entre les grilles structurées et non structurées,, © 2001-2024
FVCOM @ MEDML. Conçu par Dr. Chen

comme conditions limites pour le modèle, sont également extrêmement importantes. Elles peuvent être obtenues à partir de données de bouées océanographiques ou de modèles de vagues régionaux tels que Wavewatch III (<https://polar.ncep.noaa.gov/waves>). Ces conditions de vagues dépendant du temps sont généralement appliquées à la limite du modèle vers la mer. La vitesse et la direction du vent sont aussi généralement appliquées comme conditions limites de surface et peuvent être obtenues à partir de capteurs météorologiques terrestres ou de bouées ou de modèles numériques régionaux tels que GFS, entre autres. Pour les modèles de transport de sédiments, des données d'entrée telles que la composition et la distribution de la taille des grains de sédiments et la distribution spatiale des habitats benthiques sont nécessaires.

- 3. Prétraitement des données :** Tous les prétraitements des données, y compris les transformations du système de coordonnées, l'interpolation des données sur la grille du modèle et les contrôles de cohérence des données, doivent être effectués avant d'exécuter le modèle. Ces données doivent être soigneusement visualisées pour s'assurer qu'il n'y a pas de données d'entrée parasites susceptibles d'affecter négativement les résultats du modèle.
- 4. Mise en place du modèle :** Cette étape consiste à sélectionner les paramètres du modèle tels que les paramétrages physiques, les schémas numériques, le pas de temps de calcul et la gamme de fréquences. La durée de la simulation est également importante et doit être soigneusement déterminée en fonction du type de modèle, de la résolution du modèle et des ressources informatiques disponibles.

5. **Exécuter le modèle** : Après avoir configuré le modèle et préparé les données d'entrée, la simulation est exécutée. La plupart des modèles modernes utilisent une architecture informatique parallèle et peuvent être exécutés sur des systèmes d'exploitation Linux, Mac ou Windows. Les modèles les plus avancés et les plus coûteux en termes de calcul fonctionnent généralement sur des systèmes basés sur Linux. De nos jours, il n'est pas nécessaire de posséder une grappe d'ordinateurs coûteuse, car les services informatiques en nuage tels qu'Amazon Elastic Compute (<https://aws.amazon.com/ec2/>) permettent d'exécuter de grands modèles sans aucune infrastructure locale de calcul.

6. **Post-traitement et analyse des résultats** : Une fois l'exécution du modèle terminée, le post-traitement des données sortantes a lieu. Des logiciels tels que Python, MATLAB et autres sont utilisés pour générer des visualisations des résultats telles que des figures affichant la distribution spatiale des contours de la hauteur des vagues et des courants littoraux pour différents pas de temps de simulation et à différents niveaux de zoom.

5.3. Modélisation numérique des ondes.

Les modèles numériques de vagues simulent la génération, la propagation et la transformation des vagues à l'aide d'équations mathématiques qui décrivent la physique des vagues. Les modèles utilisent des données d'entrée sur la vitesse du vent, la pression atmosphérique, les courants océaniques et la bathymétrie pour prédire la hauteur, la direction et la période des vagues. Ces modèles sont essentiels pour comprendre le climat des vagues et évaluer leur impact potentiel sur la morphologie côtière. Il existe deux types de modèles de vagues : les modèles de vagues à moyenne de phase ou spectraux et les modèles à résolution de phase. Les modèles de vagues à moyenne de phase simulent l'évolution de l'énergie des vagues sur une gamme de fréquences et de directions, fournissant des informations statistiques sur le champ de vagues, mais ne résolvent pas les formes de vagues individuelles ou les phases. En revanche, les modèles à résolution de phase simulent la forme complète de chaque vague, capturant les relations de phase entre les vagues, et sont capables de représenter avec précision les interactions vague-vague, le déferlement des vagues et d'autres effets non linéaires.

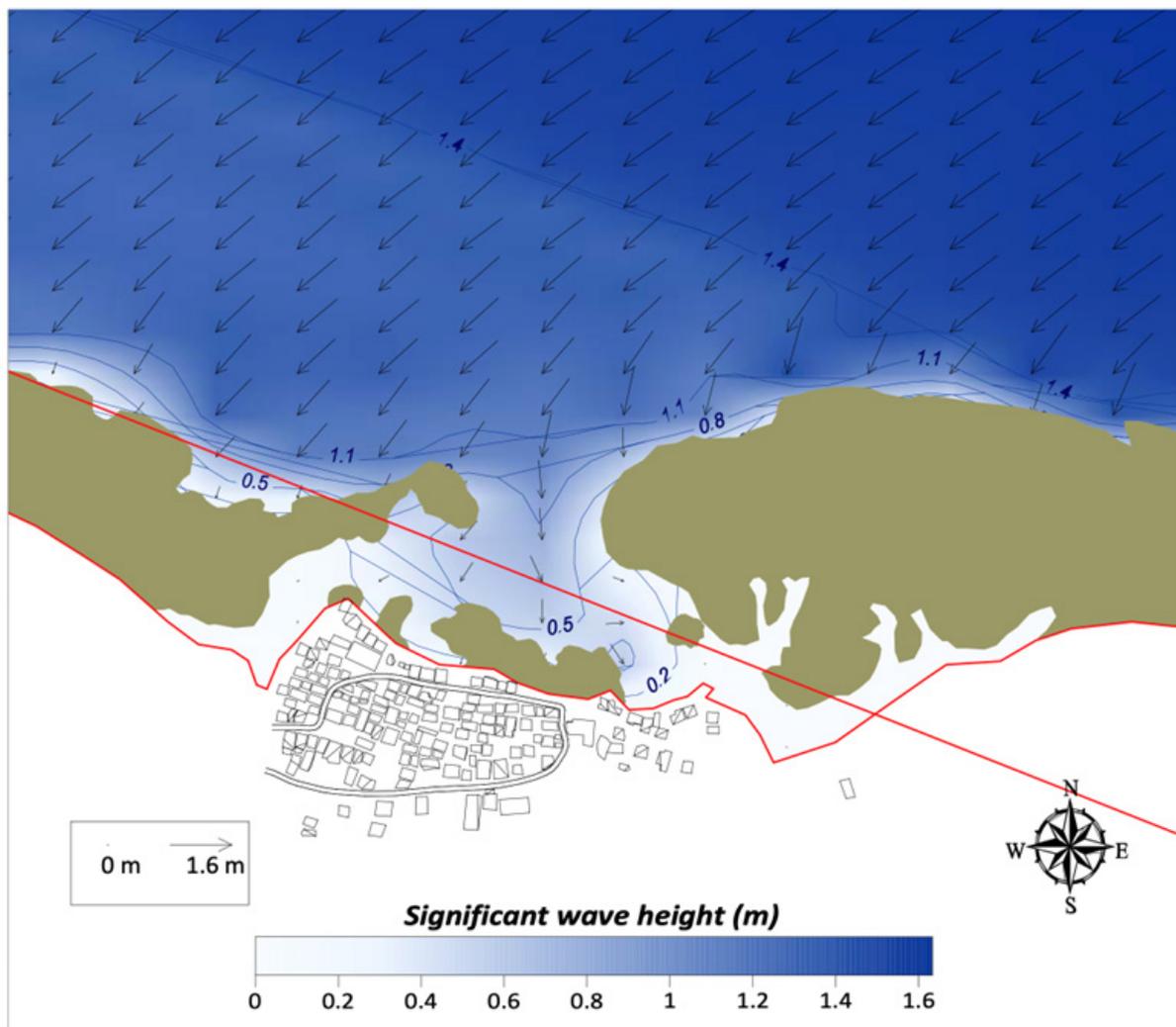
Deux des modèles de vagues les plus populaires sont le WaveWatch III et le modèle SWAN. WaveWatch III est un modèle de vagues global qui fournit des prévisions de vagues jusqu'à dix jours à l'avance. Le modèle utilise des données sur la vitesse du

vent et la pression atmosphérique pour prévoir la hauteur, la période et la direction des vagues. WaveWatch III est développé par la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/viewer.shtml>) et utilisé par plusieurs organisations, dont l'US Navy et le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts>). Le modèle de vagues WaveWatch 3 pour les Caraïbes, disponible à l'adresse <http://ww3.cimh.edu.bb>, est une implémentation régionale du modèle de vagues WaveWatch 3, spécialement conçu pour la mer des Caraïbes. Le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore, <https://swanmodel.sourceforge.io>) des Pays-Bas est un modèle de vagues spectrales qui simule la transformation des vagues des eaux profondes vers la zone littorale. Ce modèle est largement utilisé pour les applications d'ingénierie côtière, y compris les évaluations de l'énergie des vagues, les études d'érosion côtière et la conception des ports. Le Document 41 montre un exemple de modélisation numérique des vagues réalisée par Inversiones Gamma dans le cadre du projet exécutif de restauration de la plage de Bonasse Neach dans la baie de Cedros, extrait du rapport de Izquierdo Alvarez et al. (2022).

Les modèles de vagues à résolution de phase, tels que SWASH (Simulating WAVes till SHore) et XBEACH, sont des modèles numériques avancés à résolution de phase conçus pour simuler les processus de vagues près du rivage avec une grande précision. SWASH est un modèle qui simule la transformation des vagues, le déferlement des vagues et les courants induits par les vagues dans la zone de déferlement, tandis que XBEACH est spécifiquement conçu pour modéliser l'érosion côtière et le transport des sédiments dans des conditions de tempête extrêmes. Ces deux modèles sont importants pour comprendre l'hydrodynamique littorale qui affecte l'érosion côtière, car ils fournissent des informations détaillées sur le comportement des vagues et les processus de transport de sédiments qui se produisent dans la zone littorale. L'article d'Escudero et al. (2012) est un excellent exemple de la façon dont la modélisation des vagues peut être utilisée pour comprendre la physique liée à la façon dont le récif mésoaméricain au Mexique protège de l'érosion les lignes de rivage sablonneuses dans le nord de Quintana Roo.

5.4. Modélisation numérique des courants.

- Les modèles de circulation côtière simulent l'écoulement de l'eau dans les zones côtières et littorales, y compris les effets des marées, des vagues, des vents et des forces de flottabilité. Ces modèles sont essentiels pour comprendre les courants



Document 41: Exemple de modélisation numérique des vagues réalisée par Inversiones Gamma dans le cadre de l'exécution du projet exécutif de restauration de la plage de Bonasse Beach dans la baie de Cedros, à Trinité-et-Tobago. La hauteur des vagues (en bleu) et leu

côtiers, les fluctuations du niveau de l'eau et le transport des sédiments et des polluants. Trois des modèles les plus populaires sont le modèle ROMS, le modèle ADCIRC et le modèle FVCOM, mais il en existe beaucoup d'autres.

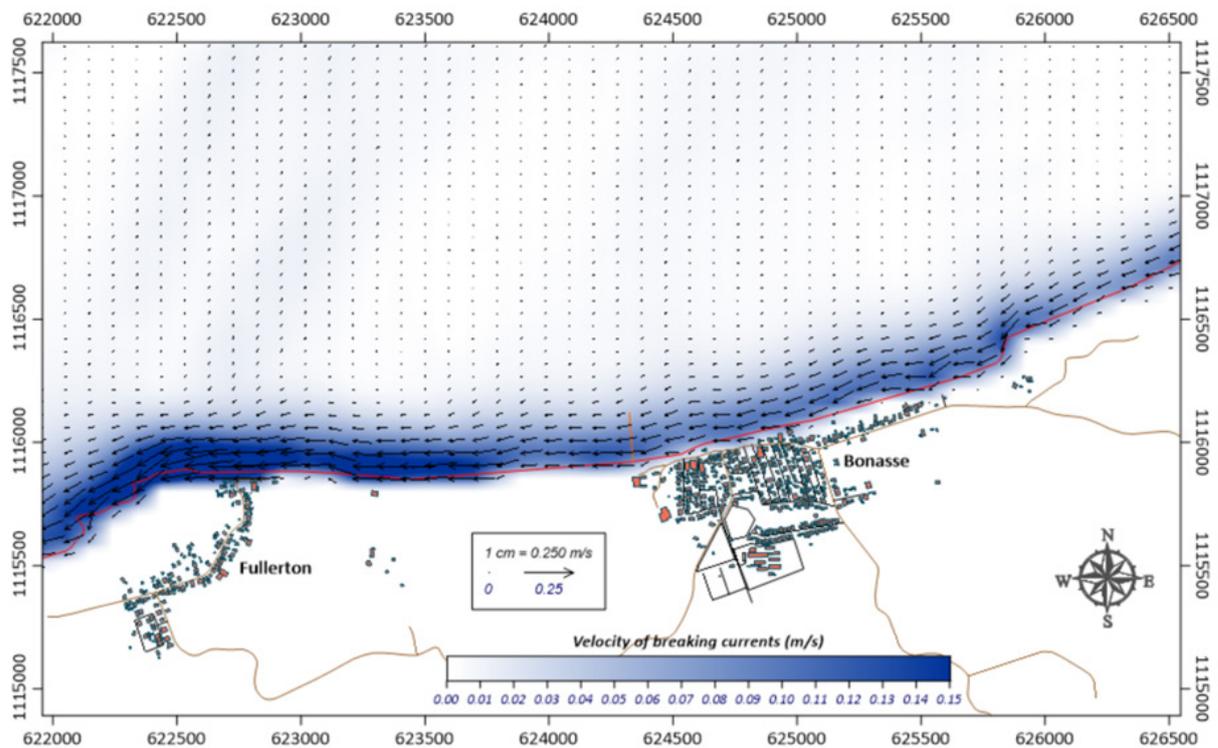
- Le système régional de modélisation des océans (ROMS) est un modèle numérique de pointe qui simule la circulation océanique et la propagation des vagues dans la zone côtière. Le modèle peut être utilisé pour prédire les variations du niveau de l'eau, les courants de marée et le transport des sédiments, entre autres variables. ROMS est largement utilisé pour la recherche et la gestion côtières, notamment pour des études sur les inondations côtières, le transport de sédiments et l'acidification des océans.

- Le modèle de circulation avancée (ADCIRC) est un modèle d'éléments finis qui simule les effets des marées, des vagues et des ondes de tempête sur l'hydrodynamique côtière. Le modèle est largement utilisé dans la Caraïbe pour la prévision des ondes de tempête et l'évaluation des risques, y compris pour les ouragans et autres événements météorologiques extrêmes.
- Le modèle communautaire de circulation océanique côtière à volume fini (FVCOM) est un modèle de circulation océanique côtière à volume fini tridimensionnel et à grille non structurée qui simule la dynamique des courants océaniques, des marées et des distributions de température et de salinité dans les eaux côtières et estuariennes (Chen et al., 2003). Pour la Caraïbe, il est particulièrement utile de simuler l'écoulement de l'eau dans les zones de mangrove, les estuaires et les bras de mer.

Les modèles à résolution de phase tels que SWASH et XBEACH peuvent également être utilisés pour simuler les courants induits par les vagues dans la zone côtière. En raison de la nature des vagues, du fait qu'elles sont plus faciles à mesurer et que leur physique est plus simple, les modèles de vagues sont généralement plus précis que les modèles de circulation. Les modèles de circulation doivent toujours être validés de manière rigoureuse, en particulier lorsque des processus tels que la flottabilité, les courants océaniques à grande échelle et les courants induits par le vent sont importants. Un exemple de résultats de la modélisation numérique des courants induits par les vagues est présenté dans le Document 42, qui montre la sortie d'un modèle de circulation côtière utilisé par Inversiones Gamma dans son exécution du projet exécutif de restauration de la plage de Bonasse Beach dans la baie de Cedros, à Trinité-et-Tobago (Izquierdo Alvarez et al. 2022).

5.5. Modélisation numérique du transport des sédiments et de l'érosion côtière.

Les modèles couplés vagues/courants/transport de sédiments simulent l'interaction entre les vagues, les courants et le transport de sédiments dans la zone côtière. Ces modèles sont essentiels pour comprendre les processus qui façonnent la morphologie côtière et l'impact de l'érosion côtière. Ces modèles sont également essentiels pour estimer le succès potentiel d'un projet de restauration côtière et l'impact qu'il peut avoir sur la dynamique de la plage. Certains des modèles les plus populaires sont énumérés ci-dessous°:



Document 42 Exemple de la sortie d'un modèle de circulation côtière utilisé par Inversiones Gamma dans le cadre de son exécution du projet de restauration des plages exécutif à la plage de Bonasse à Cedros Bay, Trinidad et Tobago.

- Le modèle Delft3D (<https://oss.deltares.nl/web/delft3d>) est un modèle numérique 3D qui simule les vagues, les courants et le transport des sédiments dans la zone côtière. Le modèle peut être utilisé pour prédire l'érosion des plages, la rupture des dunes et les changements du littoral, entre autres variables. Delft3D est largement utilisé pour la gestion côtière, notamment pour la conception de mesures de protection côtière et l'évaluation des risques côtiers.
- Le modèle XBeach (<https://oss.deltares.nl/web/xbeach/>) est un modèle numérique qui simule les processus hydrodynamiques et morpho-dynamiques dans la zone littorale. Le modèle peut être utilisé pour prédire l'impact de l'érosion côtière sur les plages et les dunes, y compris le bréchage des dunes et la submersion. XBeach est largement utilisé pour la recherche et la gestion côtières, notamment pour comprendre l'impact des tempêtes sur les projets de remblayage des plages.
- CSHORE (Cross-Shore) : CSHORE est un modèle unidimensionnel, basé sur les processus, qui permet de prédire le transport sédimentaire cross-shore et les changements de profil de plage (Johnson et al., 2012). Il comprend des formulations

pour la transformation des vagues, le transport sédimentaire et les processus d'érosion/dépôt, et a été développé par le Corps des ingénieurs de l'armée américaine.

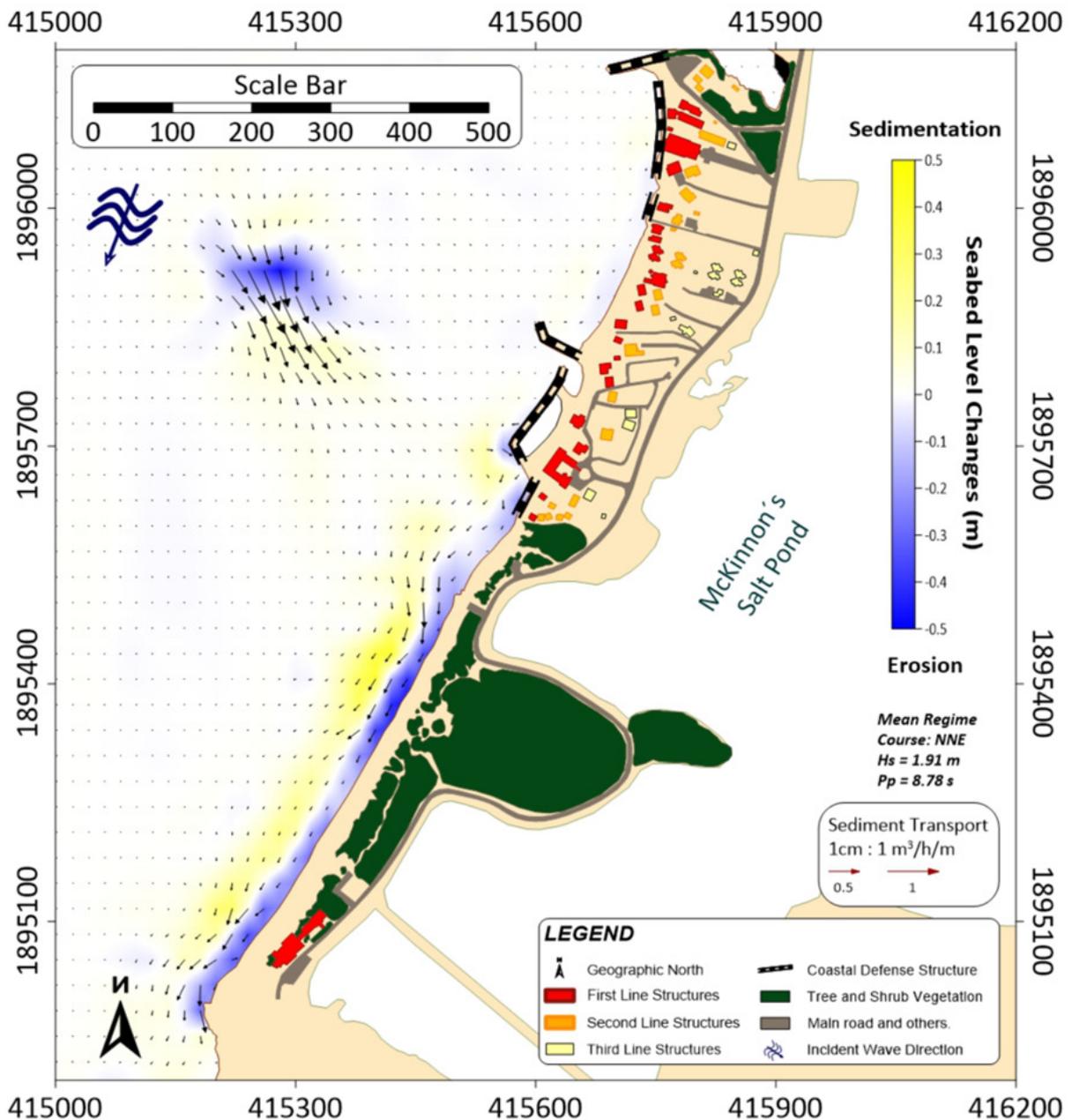
- GENESIS (modèle généralisé de simulation de l'évolution du trait de côte) : GENESIS est un modèle numérique unidimensionnel permettant de simuler le transport sédimentaire longshore et l'évolution du trait de côte. Il combine la transformation des vagues, le transport des sédiments et l'évolution du trait de côte dans un cadre unique.
- GENESIS (modèle généralisé de simulation de l'évolution du trait de côte) : GENESIS est un modèle numérique unidimensionnel permettant de simuler le transport sédimentaire longshore et l'évolution du trait de côte. Il combine la transformation des vagues, le transport des sédiments et l'évolution du trait de côte dans un cadre unique.

Les modèles énumérés ci-dessus ne sont qu'une liste partielle et il existe de nombreux autres modèles qui simulent le transport des sédiments et l'érosion. Le choix du modèle pour une étude spécifique dépendra de l'expérience de l'océanographe ou de l'ingénieur côtier, des ressources informatiques disponibles et de la complexité du site. Le Document 43 montre un exemple de modélisation du transport des sédiments et des changements morphologiques réalisée par Inversiones Gamma pour le projet exécutif de restauration de la plage de Runaway Bay à Antigua-et-Barbuda. L'illustration est extraite du rapport de Morales Diaz et al. (2022).

5.6. Modélisation numérique à l'appui de la conception de projets

La modélisation numérique à très haute résolution est parfois le seul outil dont disposent les océanographes et les ingénieurs lorsqu'ils tentent d'estimer les performances potentielles d'un projet d'atténuation de l'érosion côtière. En général, les modèles sont appliqués pour examiner les modèles de vagues et de circulation actuels et avec le projet, ainsi que pour évaluer les différentes alternatives du projet.

Par exemple, lors de l'installation de structures de dissipation des vagues à proximité d'une plage, les effets de ces structures sur la dynamique des vagues et de la circulation doivent être analysés dans des conditions opérationnelles ainsi que lors d'événements extrêmes. Ceci est important pour s'assurer que les structures atteignent leur objectif tout en veillant à ce qu'il n'y ait pas de conséquences imprévues pour les plages



Document 43 Example of sediment transport and morphology change modelling carried out by Inversiones Gamma for the executive beach restoration project at Runaway Bay Beach in Antigua and Barbuda. Taken from the report by Morales Diaz et al. (2022).

avoisinentes. L'impact des structures d'atténuation des vagues sur la dynamique globale de la circulation dans la zone d'étude doit être étudié de près, étant donné l'importance d'une qualité d'eau adéquate pour la santé des organismes biologiques tels que les coraux et les herbiers marins.

Les modèles numériques sont également utilisés pour estimer la durée de vie prévue

des projets de remblayage des plages et la fréquence du remblayage d'entretien qui serait nécessaire pour maintenir une certaine largeur de plage. Lorsque les modèles numériques sont couplés à des modèles économiques, ces modèles peuvent également aider à déterminer le rapport coût/bénéfice et à déterminer si un projet spécifique de stabilisation du littoral ou d'atténuation de l'érosion est économiquement réalisable.

Des articles récents ont également montré l'utilisation de la modélisation numérique pour évaluer l'efficacité des solutions écologiques telles que la restauration de la végétation des hauts de plage pour atténuer l'érosion côtière (Laigre et al., 2023).

Pour des exemples de modélisation numérique spécifique à un projet dans la Caraïbe et la façon dont la modélisation peut aider à informer la conception des projets de restauration des plages, le lecteur est invité à consulter les rapports susmentionnés de Morales Diaz et al. (2022) et Izquierdo Alvarez et al. (2022).

Synthèse

Le choix d'un modèle numérique approprié pour comprendre l'érosion des côtes et des plages dépend de l'environnement côtier spécifique et des objectifs de l'étude. Chaque modèle a ses avantages et ses limites, et il est essentiel de tenir compte de la complexité, de la disponibilité des données et des ressources informatiques lors du choix d'un modèle approprié. Dans certains cas, il peut être avantageux de combiner plusieurs modèles pour mieux saisir les différents processus et échelles impliqués dans l'érosion côtière et le transport de sédiments.

Chapitre 6

MESURES DE PROTECTION ET DE RÉHABILITATION DES PLAGES DE LA CARAÏBE

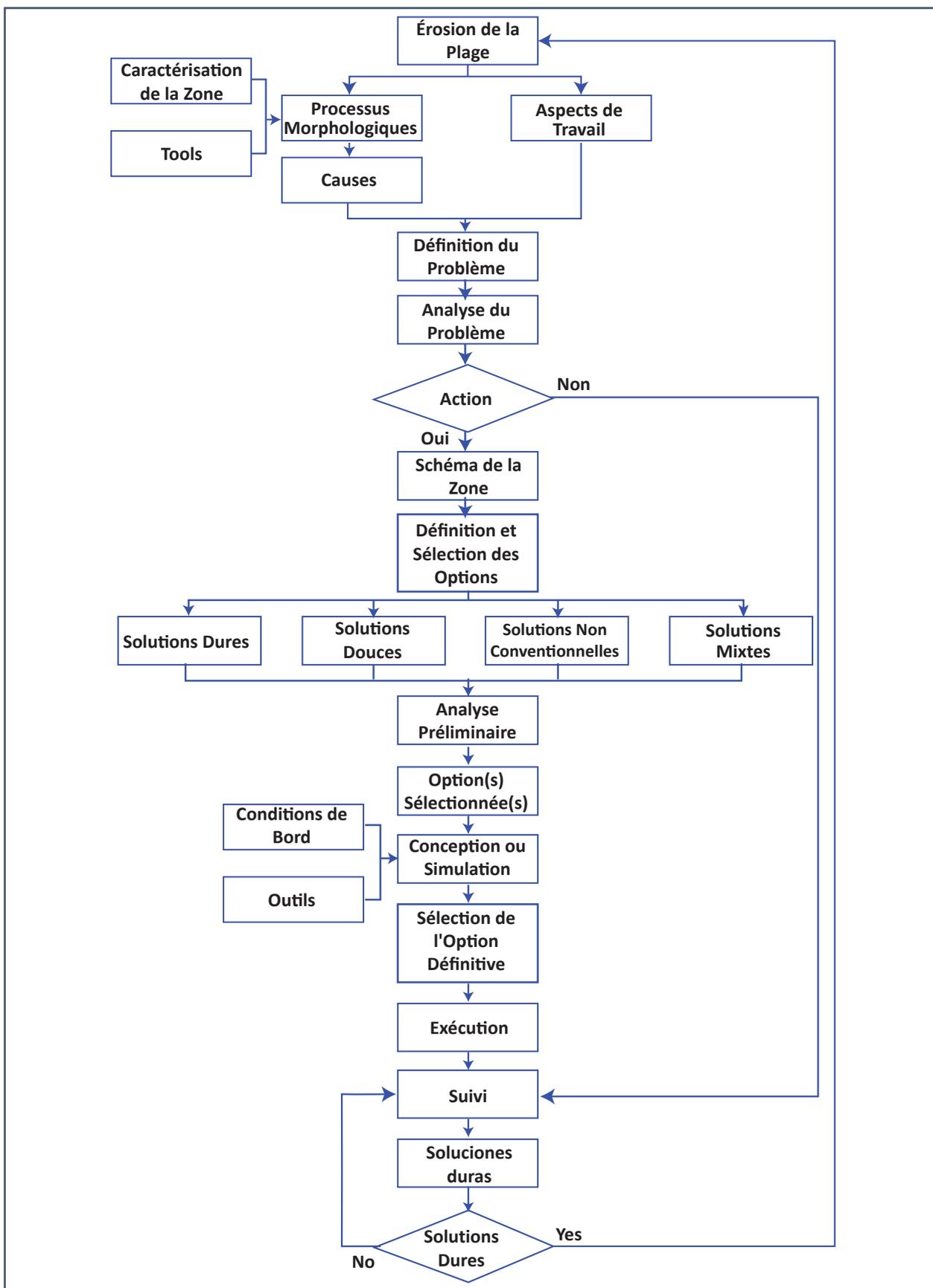
Le problème de l'érosion côtière, non seulement dans la grande Caraïbe mais dans le monde entier, principalement associé à l'élévation du niveau de la mer due au changement climatique, et l'importance des plages dans l'économie de nombreux États côtiers, ont fait naître le besoin de proposer des alternatives d'atténuation dans un large éventail d'options. Celles-ci vont de l'atténuation douce à l'atténuation forte, en passant par des options intermédiaires, ainsi que des options mixtes.

6.1. Procédure d'évaluation des causes de l'érosion et propositions de solutions.

Pour l'analyse des alternatives, une évaluation complète du site spécifique est initialement requise, identifiant les causes de l'érosion côtière, les éléments naturels et artificiels présents dans la zone spécifique, et garantissant, dans la mesure du possible, la récupération et la préservation de ses valeurs naturelles. Selon le Manuel sur l'alimentation artificielle des plages (CUR, 1987), les processus côtiers opérant dans la zone et les intérêts économiques spécifiques doivent également être pris en compte.

La proposition méthodologique pour la réhabilitation et la protection des plages de Torres-Hugues & Córdova-López (2010) présente un schéma de la manière dont un projet de solution à l'érosion côtière peut être abordé (Document 44). La méthodologie proposée par ces auteurs répond à un point de vue plus large de la conception de solutions, puisqu'elle envisage un éventail plus large d'options, et établit un processus d'observation de l'environnement plus détaillé pour prévenir ou agir à temps, au cas où l'érosion côtière réapparaîtrait.

De même, l'évaluation de l'impact environnemental que la solution proposée peut générer est requise, en considérant les impacts possibles, positifs et négatifs, de type environnemental, socioculturel et économique GAMMA - ICIMAR (2022)



Document 44 Méthodologie pour la réhabilitation et la protection des plages (Adapté de Torres-Hugues & Córdova-López (2010))

6.2. Considérations d'ordre juridique.

Les considérations juridiques à prendre en compte pour réaliser des projets d'atténuation de l'érosion côtière dépendent de la législation appliquée dans chaque pays pour ce type de travaux. En général, de nombreux pays n'ont pas de règles claires à cet égard qui permettent d'orienter clairement les actions dans ce domaine.

Par exemple, selon le rapport de GAMMA - ICIMAR (2022), il n'existe pas de législation dans la République du Panama, basée sur l'exploitation des systèmes côtiers, qui limite l'extension des propriétés sur le profil dynamique de la plage. Pour sa part, Antigua-et-Barbuda ne dispose pas d'un cadre institutionnel et juridique qui encourage et garantisse la mise en œuvre de stratégies et d'actions visant à restituer progressivement les conditions naturelles de la plage (GAMMA, 2022). D'autres pays ont progressé dans la création de ce cadre institutionnel et juridique, en s'orientant vers des programmes d'atténuation de l'érosion. Par exemple, la Barbade a créé une unité de gestion de la zone côtière (<https://www.coastal.gov.bb/>) dont le travail comprend la conception et l'exécution de mesures d'ingénierie dures et douces pour la protection, la stabilité et l'amélioration des plages (Wong, 2018). Le rapport souligne également la mise en œuvre du programme de gestion côtière intégrée de la plage de Varadero à Cuba, ainsi que son programme d'investissement national pour la récupération des plages, dans le cadre d'un plan d'État pour faire face au changement climatique, qui a été précédé par la mise en œuvre du décret-loi 212, sur la gestion de la zone côtière (GAMMA, 2022).

6.3. Solutions pour atténuer l'érosion côtière.

En général, les solutions contre l'érosion côtière se divisent en deux grands groupes, les solutions dures (infrastructures grises) et les solutions douces (solutions basées écologiques ou infrastructures vertes), bien que ces dernières années des solutions hybrides se soient également répandues, qui combinent des aspects des deux

Tableau 3 Solutions contre l'érosion côtière par catégorie

Solutions dures	Solutions hybrides	Solutions douces
Digues Épis Brise-lames Brise-lames artificiels	Littoraux vivants	Ingénierie écologique Restauration des écosystèmes Gestion basée sur les écosystèmes

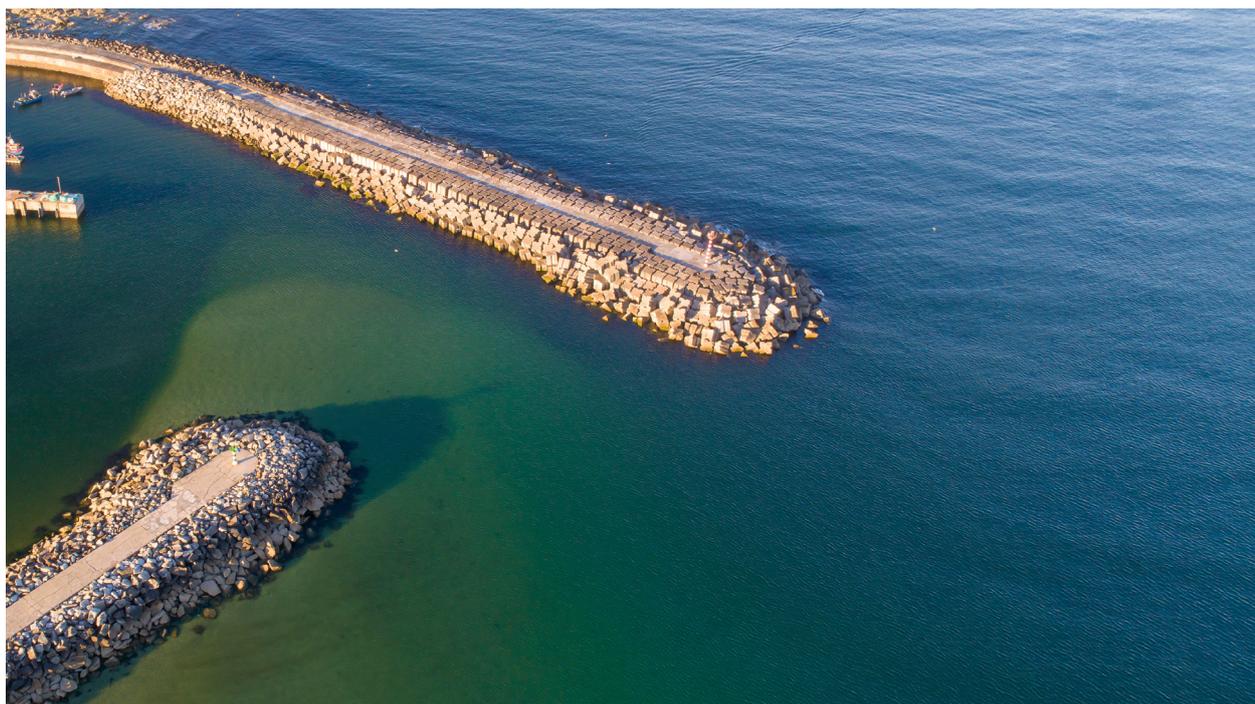
groupes. Les solutions basées sur l'écosystème prennent de plus en plus d'importance. Cependant, leur principal inconvénient est la lenteur avec laquelle des résultats pratiques sont obtenus pour la restauration de la plage, bien qu'à long terme elles puissent être décisives. (Wong, 2018)

6.3.1. Solutions dures ou infrastructures grises

Les options dures, également appelées infrastructures grises, correspondent à l'ingénierie avec des structures dures construites sur la plage (digues, épis, brise-lames ou brise-lames artificiels). Ces options influencent les processus côtiers afin d'arrêter ou de ralentir le rythme de l'érosion côtière.

Epis

Un épi est une structure côtière construite perpendiculairement à la ligne de rivage, du rivage à la mer, pour piéger le transport littoral de sédiments ou contrôler les courants littoraux (Document 45). Ce type de structure est facile à construire avec divers matériaux tels que le bois, la roche ou le bambou et est normalement utilisé sur les rivages sablonneux. Les inconvénients sont qu'il produit un sapement local au pied des structures, provoque une érosion en aval, nécessite un entretien régulier et requiert généralement plus d'une structure (Prasetya, 2007).



Document 45 Exemple de épis côtiers

Ce type de solution, qui a été largement mis en œuvre sur de nombreuses plages de la Caraïbe, en particulier dans la Caraïbe continentale, présente de nombreux exemples dans lesquels les résultats escomptés ne sont pas très satisfaisants par rapport aux résultats réels, générant de l'érosion en aval. Par exemple, l'épi construit sur la plage principale de la ville de Riohacha (Caraïbe colombienne), a permis de restaurer la plage sur environ 100 m, mais a causé deux dommages majeurs, d'une part, l'accumulation de sédiments entre l'épi et l'embouchure de la rivière Ranchería (qui fournit le sable du secteur), générant un blocage en période de basses eaux ; d'autre part, le manque de sédiments en aval, dû à ces structures, a généré une forte érosion dans les secteurs de Jose Antonio Galán et Marbella (Ricaurte-Villota et al., 2018).

Digues

Une digue est une structure construite parallèlement au littoral qui protège ce dernier de l'action des vagues (Document 46). Cette structure a de nombreuses conceptions différentes elle peut être utilisée pour protéger une falaise de l'attaque des vagues et améliorer la stabilité des pentes ; elle peut également dissiper l'énergie des vagues sur les rivages sablonneux. Les inconvénients sont qu'elle crée des reflets des vagues et favorise le transport des sédiments vers le large ; le sapement se produit au pied des plages érodées, ne favorise pas la stabilité de la plage et doit être construit le long de toute la côte. Sinon, l'érosion se produira sur la côte adjacente (Prasetya, 2007).

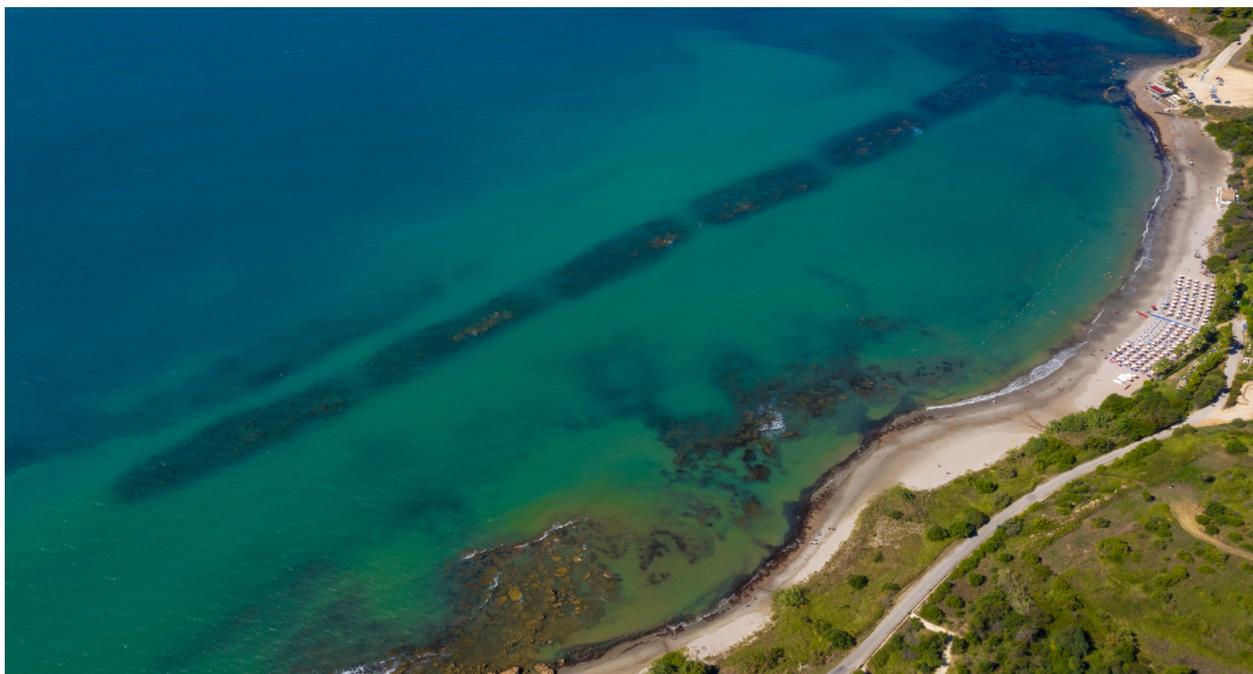


Document 46 Digue de retenue à façade incurvée (Tiré de EngineeringCivil.org)

La construction de ces ouvrages fait appel à des matériaux tels que les moellons, la maçonnerie de granit ou le béton armé. En fonction de leur disposition, les digues sont classées en trois catégories: digue à façade incurvée, Malecon en gradins et digue brise-lames.

Brise-lames immergé

Un brise-lames submergé est une structure parallèle à la côte (dans la zone proche de la côte) qui sert à absorber les vagues. Il réduit l'énergie des vagues sous le vent et crée un rebord ou un tombolo derrière la structure qui influence le transport des sédiments le long de la côte (Document 47). Plus récemment, la plupart des brise-lames immergés sont devenus des récifs artificiels polyvalents dans lesquels se développent des habitats pour les poissons et améliorent le brise-lames pour les activités nautiques. Ces structures conviennent à toutes les côtes. Leurs inconvénients sont qu'elles sont grandes et relativement difficiles à construire, qu'elles nécessitent une conception spéciale et qu'elles sont vulnérables à l'action des fortes vagues (Prasetya, 2007).



Document 47 Brise-lames immergé

Brise-lames artificiels

Cette structure est construite pour favoriser les plages naturelles car elle agit comme un promontoire artificiel (Document 48). Elle est relativement facile à construire et nécessite peu d'entretien. Les inconvénients sont qu'il s'agit également d'une structure

relativement grande, qui peut provoquer une érosion en aval de la longueur du littoral protégé, et qui est peu stable face aux grandes vagues (Prasetya, 2007).



Document 48 Brise-lames artificiel

6.3.2. Solutions douces ou solutions écologiques

Certaines solutions qui ont gagné du terrain dans le domaine de l'atténuation de l'érosion côtière sont des solutions écologiques. L'approche des stratégies des petits États insulaires en développement (PEID) pour faire face au changement climatique est essentiellement adaptative. Pour de nombreux pays, l'adaptation implique essentiellement la conception de stratégies de retrait progressif des zones les plus vulnérables, ajustées au rythme prévisible de l'élévation du niveau de la mer et au suivi du recul du trait de côte. Bien qu'il soit reconnu que le retrait, en tant que stratégie d'adaptation, n'est pas possible dans de nombreux petits États insulaires en développement (PEID) en raison de leur petite taille, de leur territoire limité et de leur nature basse (Wong, 2018).

6.3.3. Ingénierie écologique

Rechargement artificiel des plages

Le rechargement artificiel des plages est l'une des techniques de restauration des plages les plus largement appliquées aujourd'hui, en raison de ses avantages environnementaux et paysagers par rapport à d'autres alternatives basées sur l'utilisation de structures

rigides, et l'une des techniques les plus réussies et les plus efficaces. Elle consiste à fournir de nouveaux volumes de sable provenant d'une zone de prêt voisine, qui apporte au système les sédiments perdus sous l'effet de l'érosion. Il fournit au profil de la plage le volume de sable et l'espace nécessaires à son fonctionnement dynamique, servant également de défense côtière (GAMMA Inversiones, 2022).

Les solutions de rechargement de plage ont été mises en œuvre avec succès sur la plage de Varadero (Cuba) et ont été proposées dans les projets exécutifs de réhabilitation de plage à Runaway (Antigua-et-Barbuda), Bonasse Bay (Trinité-et-Tobago) et Viento Frío (Panama). Certains détails de ces projets peuvent être trouvés dans le Chapitre 6 de ce manuel.

Le principal inconvénient de cette alternative est que, bien qu'elle apporte en peu de temps le sable perdu en plusieurs années et rétablit le fonctionnement du profil, elle n'agit pas directement sur les causes qui ont généré les processus d'érosion, ce qui, au fil des ans, nécessite de nouveaux travaux d'entretien. La rapidité avec laquelle le profil est restauré et la non-introduction de nouvelles structures dans la zone côtière est l'un de ses avantages les plus importants, étant une solution plus écologique et plus esthétique que la création de brise-lames, de brise-flots ou de jetées. Son application ne compromet pas l'application d'autres mesures à l'avenir, si elles s'avèrent nécessaires, car elle ne modifie pas la morphologie de base du secteur côtier et n'introduit pas d'éléments coûteux difficiles à éliminer. (GAMMA Inversiones, 2022).

Ce type de solution comporte trois éléments principaux : la définition des zones de prêt, l'adéquation du sable à utiliser et le calcul du volume de remplissage.

Zone de prêt : Il s'agit de la localisation d'une zone de prêt, marine ou continentale adjacente, avec le volume et la qualité nécessaires pour être introduite sur la plage et à une distance de la zone d'action qui soit économiquement viable (GAMMA Inversiones, 2022).

Adéquation du sable à utiliser : La caractérisation sédimentologique de la plage et de la zone de prêt permet d'établir la composition granulométrique et la genèse du sable, dont les résultats permettent de délimiter des zones offrant de meilleures possibilités d'utilisation pour les travaux de restauration (GAMMA Inversiones, 2022).

Calcul du volume de remplissage : L'expérience internationale montre que divers critères sont utilisés pour estimer le volume de remplissage, bien que l'on s'accorde

à dire que la densité des rejets ne doit pas être inférieure à 60 m³ par mètre linéaire de plage (Juanes, 1996). Pour la conception des plages, on utilise une formule qui détermine le profil d'équilibre à partir des conditions de vagues et de sédiments donnés. Lors de l'alimentation artificielle, le sable injecté est réparti sur l'ensemble du profil dans la zone de rupture jusqu'à une profondeur connue sous le nom de profondeur de fermeture du profil actif (h^*) (GAMMA Inversiones, 2022a). L'évaluation quantitative du volume de remblai supplémentaire nécessaire pour obtenir les dimensions réelles du projet est réalisée en tenant compte des pertes de sable qui peuvent être produites par la sélection naturelle, le transport des sédiments et la redistribution par taille de grain (GAMMA Inversiones, 2022a), en utilisant le calcul du facteur de débordement RA conformément à la méthodologie proposée dans le Shore Protection Manual (Army Coastal Engineering Research Center, 1984) et dans le Manual on Artificial Beach Nourishment (CUR, 1987).



Document 49 Alimentation d'une plage par dragage

Sacs de sable et géotubes

Les sacs de sable sont une solution très courante contre l'érosion côtière. Ils sont empilés le long des côtes pour les protéger des vagues et de l'élévation du niveau de la mer.

Ils présentent l'avantage d'être une solution économique et accessible contre l'érosion côtière, mais les inconvénients sont les suivants : bien que d'apparence naturelle, ils sont fabriqués à partir d'un matériau synthétique, ils sont généralement remplis sur place et si les sacs de sable sont perforés, leur résistance sera gravement compromise. Les géotubes sont des sacs de sable très résistants fabriqués à partir de divers tissus géotextiles (Document 51). Le tissu choisi détermine la résistance et la porosité de la solution contre l'érosion côtière et ils sont remplis de divers matériaux, empilés sur place et recouverts de sable et de végétation. Elles présentent l'avantage d'apporter structure et stabilité à la côte, d'augmenter la résistance superficielle du sable et de dissiper l'énergie des vagues, qui peut être mise en valeur par des plantes indigènes, renforçant ainsi le littoral et créant un environnement plus naturel. L'inconvénient est qu'ils peuvent être exposés au fil du temps ou après une tempête, et bien que cela ne compromette pas nécessairement la fonction du produit, ils sont moins attrayants pour les communautés côtières qui souhaitent un littoral naturel (Colonial Construction materials, 2022).



Document 50 Géotubes sur une plage

6.3.4. Ecosystem restoration methods.

Ces méthodes visent à travailler avec l'environnement physique et à le renforcer, en utilisant des méthodes naturelles de défense côtière. Elles utilisent des principes et des pratiques écologiques qui ont un impact négatif moindre sur l'environnement et qui sont généralement moins coûteuses.

Restauration des dunes côtières et de leur végétation

Les dunes de sable côtières sont connues pour leurs fonctions écologiques et leurs qualités esthétiques, car elles constituent un habitat unique avec une grande valeur de biodiversité pour la flore et la faune. En outre, elles sont reconnues pour leurs capacités protectrices puisqu'elles agissent comme une barrière naturelle contre les inondations causées par les ondes de tempête et les vagues (D'Alessandro et al., 2020). La stratégie de restauration de la végétation dunaire tient compte de la zonation naturelle des espèces végétales qui reflète les différents niveaux de salinité du substrat qu'elles tolèrent, les plantes herbacées étant celles qui tolèrent les niveaux les plus élevés d'aérosols salins (GAMMA, 2022).

Comme pour les autres solutions d'atténuation de l'érosion côtière, il est important de connaître la dynamique de la côte et de déterminer s'il existe une source de sable disponible pour la construction de dunes avant d'entreprendre toute phase de restauration (Lithgow et al., 2014).

La restauration des systèmes dunaires (Document 51) s'effectue en six étapes fondamentales: élimination ou contrôle des sources de dégradation, rétablissement topographique, rétablissement de la végétation (si nécessaire), protection du site, divulgation et suivi à long terme (Ley-Vega et al., 2007).

Ce type de mesures a été mis en œuvre avec succès dans diverses régions de la Caraïbe, comme à Cuba et au Mexique. Par exemple, sur les plages de la Riviera Maya au Mexique, le projet « Adaptation au changement climatique basée sur les écosystèmes avec le secteur du tourisme » (ADAPTUR) a été développé avec succès. A travers ce projet, la restauration des dunes a été mise en œuvre avec différents types de stratégies, y compris le reboisement avec des espèces variées et stratifiées¹.

Restauration des récifs coralliens et des herbiers marins

En utilisant le service de protection côtière fourni par les écosystèmes côtiers submergés tels que les récifs coralliens et les herbiers marins, qui repose sur le principe que ces écosystèmes dissipent l'énergie des vagues en les brisant ou en les frictionnant à travers les structures récifales et protègent ainsi les zones côtières (van Zanten et al., 2014). Les récifs coralliens produisent également du sable fin qui alimente les côtes et retient les sédiments (Bellwood, 1995 ; Reguero et al., 2018), tandis que les prairies sous-

1 <https://adaptur.mx/>



Document 51
Restauration de dune

marines stabilisent davantage les sédiments grâce à leur couche dense de rhizomes et de racines, même en cas de vagues extrêmes (James et al., 2021).

Ce type d'initiative est mené avec succès dans plusieurs pays de la Caraïbe, tels que Cuba, le Mexique, le Costa Rica, la République dominicaine et la Colombie, entre autres. S'il est vrai qu'il n'y a pas encore de résultats concluants sur leur efficacité à réduire l'érosion côtière, les exercices réalisés jusqu'à présent impliquent divers acteurs locaux dans les régions, tels que les opérateurs touristiques et les pêcheurs, ce qui génère des stratégies visant à réduire la vulnérabilité des habitants du littoral, comme dans le cas du projet colombien « Un million de coraux pour la Colombie »².

2 <https://cop26.minambiente.gov.co/un-millon-de-coraux-por-colombia/>



Document 52 Un scientifique marin menant un projet de restauration des coraux dans un écosystème récifal endommagé.

6.3.5. Stratégies de gestion du littoral.

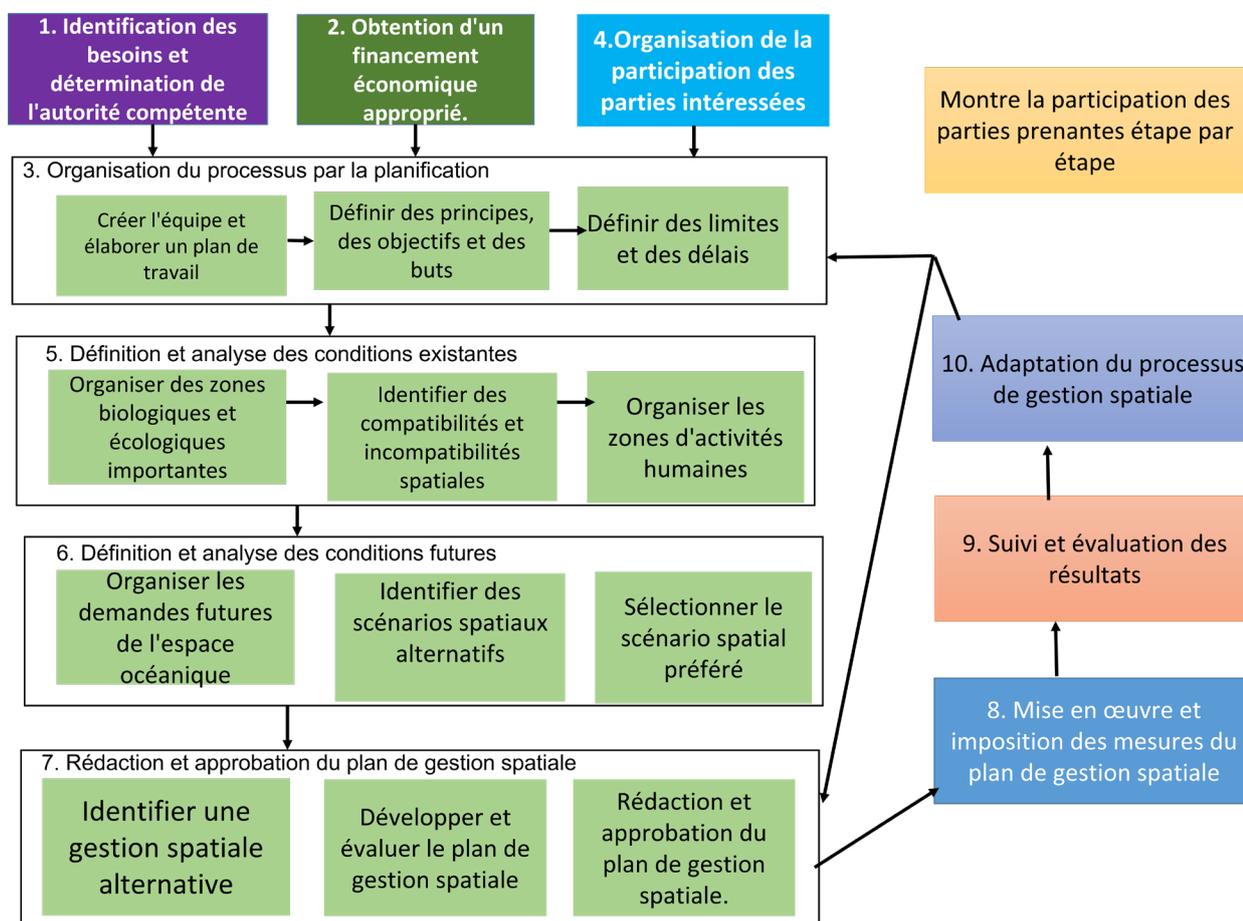
Une partie du problème de l'érosion côtière est due à des causes anthropiques telles que l'extraction de sable, la croissance désordonnée des zones côtières, la mauvaise construction des infrastructures de protection côtière, la destruction des écosystèmes côtiers tels que les dunes, les récifs coralliens, les prairies marines, entre autres ; ce qui, en plus de la perte de leur service écosystémique de fourniture et de rétention des sédiments, diminue leur capacité à protéger les côtes des menaces côtières telles que les ouragans, les mers fortes, les tsunamis et autres événements extrêmes. Certaines alternatives pour la protection et la réhabilitation des plages sont liées aux stratégies de gestion des zones côtières, qui garantissent l'utilisation rationnelle de leurs ressources tout en préservant leur beauté et leurs processus naturels.

Outils de planification du littoral et de politique publique en matière d'érosion côtière

La planification du développement futur du littoral, à une distance raisonnable de la plage, réduira le besoin de mesures défensives coûteuses à l'avenir (Cambers, 1998).

Une approche pratique de la gestion des compatibilités et des incompatibilités dans

l'environnement marin, compte tenu de la pression du développement et de l'intérêt croissant pour la conservation de la nature, est la planification de l'espace marin (PEM), qui est un outil de gestion pour la répartition spatiale et temporelle des activités humaines dans les espaces maritimes afin d'atteindre des objectifs écologiques, économiques et sociaux qui ont été spécifiés par un processus politique (Ehler et Douvere, 2013). Elle détermine comment, quand et où les activités seront développées, afin d'atteindre les objectifs proposés pour une zone donnée, en respectant les usages de l'espace marin et en intégrant les exigences du développement à la nécessité de préserver l'environnement. La PEM peut être mise en œuvre dans une zone en suivant une séquence de dix étapes, décrites dans le Document 53.



Document 53 Guide étape par étape du processus de planification de l'espace marin (d'après Ehler et Douvere, 2013).

Gestion intégrée des zones côtières (GIZC)

La gestion intégrée des zones côtières (GIZC) est un concept qui a été formulé il y a plus de 30 ans, mais ce n'est qu'après le Sommet « planète Terre » de Rio de Janeiro

(Brésil) en 1992 qu'il a été adopté dans le monde entier comme concept central pour la gestion des côtes et des océans (Steer et al., 1997). À bien des égards, elle est similaire à la planification de l'espace maritime, par exemple, toutes deux sont globales, stratégiques et participatives, et toutes deux cherchent à maximiser la compatibilité entre les activités humaines et à réduire les conflits entre les utilisations humaines et la nature (Ehler et Douvere, 2013).

La GIZC a pour but de guider le développement des zones côtières d'une manière écologiquement durable. Les programmes de GIZC doivent être guidés par les principes de Rio, en mettant l'accent sur l'égalité entre les générations, le principe de précaution et le principe du « pollueur-payeur ». La GIZC doit avoir un caractère interdisciplinaire et holistique, en particulier en termes de science et de réglementation. L'objectif fondamental de la GIZC est l'intégration sectorielle et intergouvernementale, et pour cela, les mécanismes institutionnels pour une coordination efficace entre les multiples niveaux de gouvernement opérant dans la zone côtière sont fondamentaux. Ils doivent être modelés pour s'adapter parfaitement au contexte spécifique et unique de chaque gouvernement national (Steer et al., 1997).

Éducation à l'environnement

Enfin, l'éducation à l'environnement constitue, avec la recherche scientifique, un outil essentiel de sensibilisation à l'environnement, nécessaire à la gestion durable des affaires et des espaces côtiers et marins (González-Ruiz et al., 2003).

De la même manière, il s'agit d'un besoin des humains pour faire face à la crise environnementale. La société doit comprendre la nature complexe de l'environnement, résultat de l'interaction des aspects sociaux, biologiques, physiques et culturels, de sorte que l'éducation représente la base fondamentale du développement à long terme (Bautista-Zúñiga, 2013), les communautés participant activement à l'entretien et à la préservation de leurs zones côtières et marines.

6.3.6. Solutions hybrides

Rivages vivants

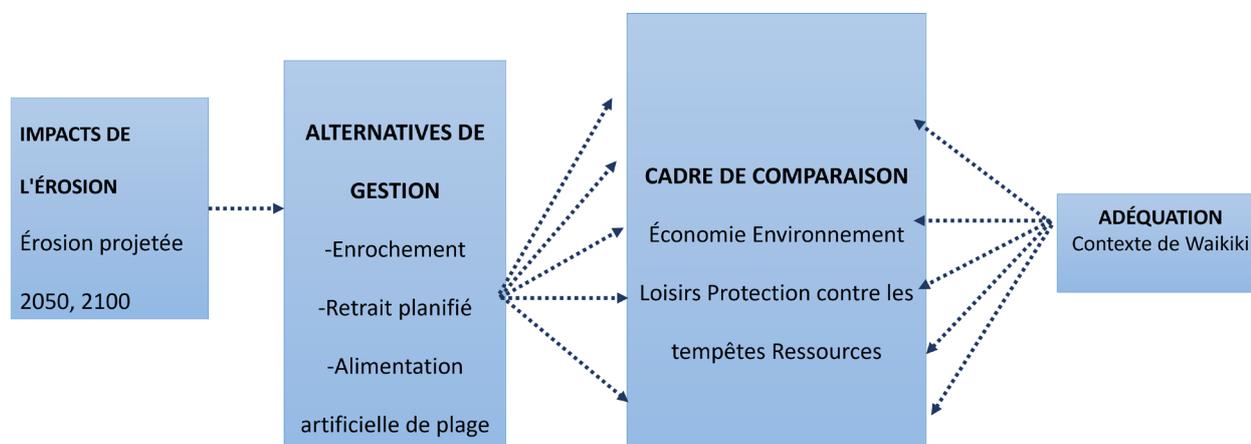
Les côtes vivantes font référence à un certain nombre de techniques d'« habillage doux » utilisées pour stabiliser les côtes et protéger ou améliorer les caractéristiques

naturelles. Ces techniques visent à lutter contre l'érosion et les inondations en recréant ou en améliorant les côtes naturelles grâce à la végétation et à d'autres matériaux naturels ou organiques. Les techniques hybrides combinent la végétation, comme les plantes de marais et la végétation aquatique submergée, avec des matériaux plus durs pour ajouter de la structure et de la stabilité, comme les coquilles d'huîtres, les matériaux biologiques (produits de contrôle de l'érosion fabriqués à partir de matériaux naturels biodégradables) ou les rochers. Les avantages comprennent le contrôle de l'érosion et la protection contre les inondations, tout en augmentant la connectivité des marées avec une perturbation minimale des processus côtiers normaux (Massachusetts Wildlife, 2017).

6.3.7. Analyse coûts/bénéfices

Le choix des sites à défendre et de la manière de le faire repose sur une analyse coût-bénéfice, surtout si l'on tient compte du problème généralisé de l'érosion côtière le long des côtes des pays ; c'est pourquoi il est nécessaire d'établir un ordre de priorité pour les sites à défendre.

Pour évaluer les différentes alternatives de gestion, il faut prendre en compte la protection économique, environnementale et récréative contre les événements extrêmes et les impacts sur les ressources (Document 54). En termes d'impacts économiques, les coûts directs et indirects sont évalués. Les coûts directs sont les coûts de construction estimés pour mettre en œuvre une stratégie, qu'elle soit publique, privée ou mixte, tandis que les coûts indirects sont les répercussions économiques de chaque stratégie : perte ou



Document 54 Cadre d'évaluation des impacts des alternatives de gestion de l'érosion (tiré de Porro et al., 2020).

gain de terres ou de biens, activité économique, etc. De plus, la prise en compte des impacts sur l'environnement, les activités récréatives, la protection contre les tempêtes et les ressources nécessaires à leur mise en œuvre permet une comparaison plus complète entre les stratégies (Porro et al., 2020).

Chapitre 7

ENSEIGNEMENTS TIRÉS DU DÉVELOPPEMENT DU PROJET LITTORAUX SABLONNEUX <SANDY SHORELINES>

Dans ce chapitre du guide, une révision de l'exécution des actions de chaque composante du projet est faite dans le but de tirer des leçons dans les aspects organisationnels, conceptuels, méthodologiques et logistiques. Ces leçons permettent une meilleure élaboration des tâches des futurs projets nationaux et régionaux qui donnent une continuité aux investigations de l'effet du changement climatique sur les plages de sable de la Grande Caraïbe et à l'adoption des meilleures mesures pour y faire face.

7.1. Composante 1. Mise en place de points focaux pour les pays participants

Les activités conçues dans le cadre de la Composante 1 avaient un caractère organisationnel et méthodologique. Dans chaque pays participant, l'institution qui assumerait la responsabilité de coordonner les activités au niveau national et de soutenir l'échange de travail requis avec l'AEC a été définie, et le réseau des points focaux du projet a été établi.

Lors de la troisième réunion en présentiel des points focaux qui s'est tenue au Panama en août 2018, le « Profil du projet pour l'élaboration du plan national sur le processus d'érosion côtière » a été analysé et approuvé, ce qui reflète la procédure organisationnelle pour la conduite des tâches au niveau national (Annexe 1).

L'évolution ultérieure du projet a montré que le plan national était bien conçu d'un point de vue méthodologique et qu'il est devenu le document de référence pour évaluer l'avancement des tâches à réaliser par les points focaux dans chaque pays. À cet égard, les enseignements suivants peuvent être notés :

COMPOSANTE 1

- Le plan national devrait mieux définir l'engagement et la responsabilité des institutions qui collaborent avec le point focal dans l'exécution du projet et, en particulier, dans les domaines de la formation et du travail sur le terrain du réseau de surveillance.

- Le calendrier annuel devrait définir plus précisément les tâches du projet et l'institution responsable de sa mise en œuvre.
- Le contrôle trimestriel de la conformité avec le plan national devrait être le principal outil de contrôle de l'avancement du projet par les responsables du projet.

7.2. Composante 2. Renforcement des capacités institutionnelles et des ressources humaines.

Le programme de formation du projet comprenait la participation de spécialistes des points focaux à trois événements de renommée internationale sur les questions côtières, ainsi qu'une visite de travail à l'Institut coréen de recherche et de technologie océaniques (KIOST). La participation à ces événements a permis de mettre à jour les sujets de recherche les plus avancés sur les processus d'érosion côtière et l'impact de l'élévation du niveau de la mer, ainsi que les alternatives d'ingénierie qui sont actuellement appliquées pour y faire face.

En 2018, une activité de formation a été développée au Panama avec la participation d'une trentaine de spécialistes de la région, comprenant l'enseignement post universitaire « Processus côtiers et critères méthodologiques pour la récupération des plages », un séminaire de sédimentologie par des spécialistes cubains, et trois conférences données par des experts de Colombie, de Barbade et de Corée. Le cours post-universitaire et le séminaire de sédimentologie ont été dispensés dans les trois pays où les projets de réhabilitation des plages ont été développés.

Bien que toutes les activités développées dans le cadre du volet 2 du projet aient été évaluées avec succès, les enseignements suivants peuvent être tirés :

COMPOSANTE 2

- Les activités de formation sont plus efficaces lorsqu'elles sont développées à l'échelle de chaque pays, car elles permettent d'atteindre un plus grand nombre de participants et de réaliser des tâches pratiques avec des études de cas d'intérêt national.
- La formation doit répondre aux besoins de chaque pays et inclure une formation à l'utilisation du matériel acquis pour les travaux de terrain et de laboratoire.

- La formation devrait inclure une formation à l'interprétation des résultats du travail de surveillance.
- Les activités de formation devraient faire partie du plan national de chaque pays et impliquer les universités.
- Développer et systématiser les échanges et les consultations techniques entre les spécialistes des points focaux, le coordinateur technique et les spécialistes du groupe consultatif technique (GCT).

7.3. Composante 3. Mise en place du réseau régional de surveillance de l'érosion.

L'un des objectifs proposés par le projet « Littoraux sablonneux » était l'évaluation actualisée de l'intensité, de l'étendue et des causes de l'érosion sur les plages des Caraïbes. Pour ce faire, il a été jugé nécessaire d'établir un réseau de surveillance régional qui garantirait des mesures à long terme et permettrait d'évaluer l'effet de l'élévation du niveau de la mer.

Afin de standardiser les critères pour l'établissement du réseau de surveillance, les documents méthodologiques ont été préparés et analysés avec les points focaux : « Procédure à suivre pour la sélection des plages du réseau de surveillance, Fiche de travail pour l'inventaire des plages et Guide pour la préparation de la fiche d'inventaire des plages », qui serviront de référence pour la réalisation du travail sur le terrain et la préparation des rapports sur l'état d'avancement des travaux du réseau.

Dès le début du projet « Littoraux sablonneux », il a toujours été entendu que la mise en place du réseau régional serait une tâche complexe compte tenu des difficultés techniques, organisationnelles et logistiques qu'il faudrait surmonter. Ce qui était imprévisible, c'est qu'au cours de la période d'exécution du projet, une pandémie mondiale apparaîtrait et rendrait encore plus difficile l'exécution des tâches, en particulier l'acquisition du matériel demandé par chaque point focal.

Malgré ces inconvénients lors des réunions virtuelles avec les points focaux, la vérification des progrès dans la mise en place du réseau a toujours été incluse dans l'ordre du jour et avec les rapports préparés par chaque pays, un rapport complet a été préparé en janvier 2023, dans lequel les principales faiblesses des rapports nationaux

ont été soulignées et les difficultés rencontrées par chaque point focal dans l'exécution du travail ont été rassemblées. Sur la base de ce rapport, les enseignements suivants peuvent être identifiés:

COMPOSANTE 3

- Les points focaux ont besoin d'augmenter leur personnel technique et de développer leurs alliances de travail avec d'autres institutions telles que les universités et les centres spécialisés.
- L'acquisition du nouveau matériel doit être confiée à une entreprise spécialisée dans les services d'importation afin d'accélérer les négociations avec les fournisseurs et le processus de transport.
- Les points focaux soulignent la nécessité d'augmenter le soutien logistique et financier pour le développement du travail sur le terrain du réseau.
- Planifier et systématiser la supervision du développement du travail du réseau de surveillance et l'interprétation de ses résultats par le coordinateur technique et les spécialistes du GCT.

7.4. Composante 4. Elaboration de 3 projets de réhabilitation de plages sous forme d' « études de cas »

Lors de la conception du projet « Littoraux sablonneux », il a été jugé opportun d'inclure la préparation de trois projets de réhabilitation de plages dans des lieux présentant des caractéristiques différentes qui illustreraient d'une certaine manière la diversité des plages de la région et la nature généralisée du problème.

Pour la sélection des sites où seront réalisées les « études de cas », la direction du projet, en consultation avec les spécialistes du GCT, a élaboré une procédure qui a ensuite été approuvée par les points focaux et qui consistait en l'étape suivante :

1. Elaboration par la direction du projet et le GCT des critères et engagements à suivre par les Points Focaux pour faire la proposition du site à sélectionner.
2. Les critères à suivre par le OWG pour évaluer les propositions des points focaux.

3. Visite des spécialistes du GCT sur les sites sélectionnés pour la vérification des informations évaluées.

Les trois étapes indiquées ont été conclues de manière satisfaisante et les plages de Viento Frío au Panama, de Runaway Bay à Antigua-et-Barbuda et de Bonasse Bay à Trinité-et-Tobago ont été sélectionnées.

Les trois projets exécutifs de restauration des plages ont été confiés à l'entreprise de services environnementaux GAMMA S. A., appartenant au Ministère de la science, de la technologie et de l'environnement de Cuba (CITMA), et ont été conçus sur la base de quatre principes fondamentaux :

1. L'étude des processus et du fonctionnement du système côtier pour l'identification correcte des causes de l'érosion.
2. L'évaluation des mesures réglementaires et de gestion visant à éliminer ou à minimiser autant que possible les causes anthropiques de l'érosion.
3. La réduction aux indispensables solutions d'ingénierie dure.
4. L'évaluation de la faisabilité de la reconstruction des conditions naturelles de la plage avec l'alimentation artificielle en sable et l'adaptation basée sur l'écosystème.



Document 55 À gauche. Dune conçue pour protéger l'hôtel des événements érosifs extrêmes et de la montée du niveau de la mer. Hôtel IberoStar. Plage de Varadero, Cuba. Juillet 2015. À droite. Quelques jours après l'ouragan Irma en septembre 2017. (Juanes J. L. 2017))

5. L'application de cette pratique a été très satisfaisante sur les plages cubaines, tant pour le maintien des conditions naturelles et esthétiques de la plage que pour la protection des nouveaux hôtels par les dunes reconstruites et reboisées.

Un exemple de ces résultats peut être observé dans la Document 55 qui représente une dune aménagée visant à protéger l'hôtel IberoStar des événements d'érosion extrêmes et de l'élévation du niveau de la mer à la plage de Varadero, à Cuba, en juillet 2015, à gauche, et à droite, la même scène quelques jours après le passage de l'ouragan Irma en septembre 2017, mettant en évidence le rôle protecteur de la dune dans la préservation des installations hôtelières et le maintien des conditions récréatives et esthétiques de la plage.

Chapitre 8

RECOMMANDATIONS POUR LES DÉCIDEURS

Comme indiqué au début, la raison d'être de ce document, un « Guide pour la protection et la réhabilitation des plages de la Grande Caraïbe », était de fournir un guide simplifié pour comprendre un problème commun au monde entier, mais concentré dans la région de la Caraïbe, puisque le problème de l'érosion des plages affecte de nombreuses îles de la région physiquement, socialement et économiquement. Les informations sont destinées à être utiles aux spécialistes, aux décideurs et au grand public. Nous sommes conscients qu'il existe de nombreux manuscrits spécialisés et complets qui traitent du problème de l'érosion des plages, et l'objectif de ce document est d'être un guide assez simple.

Dans le **Chapitre 1**, l'introduction expose comment une réunion sur les « Défis, dialogues et coopération pour la durabilité de la mer des Caraïbes » a été l'élément déclencheur de la recherche de fonds pour aborder ces concepts dans la région de la Caraïbe. KOIKA, l'agence internationale coréenne, a financé le projet, qui comportait 8 objectifs. Parmi eux, l'intention de rédiger un « manuel de réhabilitation des plages avec des critères scientifiques et techniques qui répondent aux caractéristiques spéciales des plages tropicales de la région de la Caraïbe », qui s'est transformé plus tard en Composante 5 « Préparation du manuel de réhabilitation des plages pour la Caraïbe ». Neuf pays de la Caraïbe (Antigua et Barbuda, Costa Rica, Cuba, Guatemala, Haïti, Jamaïque, Panama, République dominicaine et Trinité-et-Tobago) ont été inclus dans le projet, et certaines de leurs expériences sont partagées dans le présent guide.

Recommandation pour les responsables politiques et les décideurs : Lorsqu'un problème se pose, il convient de consulter les experts et d'évaluer si le problème est de nature locale ou régionale. En s'associant avec d'autres pays, il est possible d'obtenir l'avis d'un plus grand nombre d'experts et de trouver des solutions, et il est possible et plus facile de trouver des financements pour résoudre ces problèmes. En outre, le partage des expériences qui n'ont pas abouti à des solutions est tout aussi précieux que celui des expériences qui ont fonctionné.

Le **Chapitre 2**, Définition de la plage, énonce la définition et les concepts utilisés dans l'étude des plages sablonneuses, évite les malentendus et les idées fausses et établit la

norme en matière de terminologie appliquée à la région Caraïbe. Il est important d'avoir une description commune du type et de la taille des matériaux trouvés sur les plages sablonneuses, ainsi qu'une identification claire du processus dynamique d'érosion et d'accrétion qui modifie ces zones. Plusieurs exemples de plages de la Caraïbe sont donnés. Les aspects juridiques et les lois relatives aux littoraux ont été discutés, en soulignant l'importance d'avoir une législation locale, étatique ou nationale en la matière. Tous les pays de la région Caraïbe n'ont pas de lois qui supervisent la réglementation des littoraux.

Recommandation pour les responsables politiques et les décideurs : Identifier la terminologie et les concepts relatifs aux plages de sable utilisés dans votre région ou dans l'ensemble de votre pays pour tenter de les unifier et de les relier aux concepts et à la terminologie régionaux. Déterminer s'il existe une réglementation ou une loi relative aux littoraux, et si elle est appliquée et respectée. S'il n'existe pas de loi ou de règlement en la matière, consultez ceux qui sont appliqués dans plusieurs pays de la Caraïbe, afin d'en préconiser un. Il est important de savoir si les processus qui se produisent le long des rivages sont naturels ou anthropogéniques, et de déterminer les responsables de l'assainissement.

Le **Chapitre 3** L'érosion sur les plages de la Caraïbe traite de la compréhension des processus d'érosion et d'accrétion sur les plages sablonneuses. Certaines variations géographiques de l'érosion côtière dans la Caraïbe sont examinées. Chaque processus de plage est différent et tous les facteurs doivent être pris en compte lors de la comparaison avec des plages côtières d'autres régions du monde. Comme il a été mentionné, de nombreuses plages dans les pays de la Caraïbe sont des sites touristiques, ainsi l'impact des phénomènes d'érosion ou d'accrétion peut se traduire par un changement économique très important, qui peut être temporaire ou permanent.

Recommandation pour les responsables politiques et les décideurs : Il est important de comprendre les processus d'érosion et d'accrétion qui se sont produits sur une plage. En discutant avec les habitants ou les autorités locales de l'état de la plage des années en arrière ou en demandant de vieilles photographies, on peut se faire une idée des changements qui se sont produits dans un certain laps de temps. Étant donné que la région Caraïbe subit l'impact de phénomènes graves tels que les tempêtes ou les ouragans et qu'elle est soumise à des changements progressifs dus au changement climatique, les mesures correctives requièrent des stratégies différentes. Déterminer la valeur économique de la région et ce qui se passera si l'érosion ou l'accrétion peut avoir un impact sur la plage, graduellement ou soudainement, légèrement ou sévèrement.

Combien de personnes, de maisons, d'hôtels, de commerces, de routes et d'installations seront touchés, pendant combien de temps et dans quelle mesure?

Dans le **Chapitre 4** Surveillance de l'érosion côtière, il est essentiel de connaître les éléments constitutifs de la plage et son profil, afin de déterminer les conditions et la manière dont elle se comportera en cas d'événements hydrométéorologiques importants ou extrêmes. Les plages situées sous la ligne de flottaison doivent être surveillées par temps calme, et la partie située au-dessus de la ligne de flottaison, par exemple la limite sable-végétation, avant et après le passage d'un événement important. Les processus naturels et anthropogéniques doivent être pris en compte et analysés, afin de sélectionner un système de surveillance de l'érosion adéquat et fiable. La sélection d'une plage à surveiller pour l'érosion est basée sur plusieurs critères : géographiques, morphologiques, hydrodynamiques et les facteurs sociaux pour identifier les sites sensibles et vulnérables. Les types de mesures sur le terrain et les méthodes d'échantillonnage sont présentés, afin d'obtenir une mesure quantitative du processus d'érosion de la plage. La topographie basée sur la photographie, un GPS portable, la construction de bornes et de points d'observation, un tachymètre, un théodolite et un GPS différentiel ou un système GNSS sont autant d'instruments utilisés pour surveiller les plages. Certains systèmes sont manuels et la fréquence des mesures dépend de la disponibilité du personnel et des ressources. D'autres systèmes sont automatiques et peuvent envoyer régulièrement des informations à un site de surveillance. D'autres techniques telles que l'utilisation d'images aériennes ou satellitaires ou de drones peuvent être utilisées. Les mesures bathymétriques sont également très utiles mais assez coûteuses, bien qu'il existe désormais des drones nautiques conçus pour effectuer ce type d'analyse. Le suivi de la sédimentologie, de la taille et du matériau des grains qui composent la plage, est important pour comprendre les changements possibles. Ce travail doit être effectué manuellement et le plus fréquemment possible. Les événements hydrométéorologiques qui se produisent sur le site de surveillance sont désormais enregistrés par des stations qui effectuent des mesures fréquentes et transmettent les informations à un centre distant, où elles peuvent être analysées et étudiées. La variation du niveau de l'eau et les mesures de courant sont des paramètres très importants, qui varient en fonction de la morphologie du site.

Le chapitre présente un tableau avec les méthodes et le coût approximatif de la surveillance. Le coût de l'instrumentation figurant dans le tableau est d'environ 160 000 dollars US.

Recommandation pour les politiques et les décideurs : afin de sélectionner les

plages de sable à surveiller, il est important de donner la priorité à celles où la plupart des paramètres mentionnés peuvent être mesurés régulièrement et de disposer d'un centre de concentration et d'analyse de tous les signaux collectés. Il faut également se baser sur l'importance de l'impact social et économique que l'érosion de la plage peut présenter à court et à long terme, afin d'établir des procédures d'atténuation. L'évaluation du coût économique possible de la perte d'une plage sablonneuse touristique sera importante, par rapport au coût de surveillance mentionné et aux actions de remédiation possibles. La mise en place d'un réseau national de surveillance, comprenant l'instrumentation et l'interprétation des données, doit être envisagée, de même que la formation du personnel.

Chapitre 5. Aperçu des modèles numériques et de leur rôle dans la compréhension et l'atténuation de l'érosion côtière

Les modèles numériques nous permettent de comprendre le comportement dynamique des systèmes côtiers, leurs processus d'érosion et de concevoir des plans ou des projets de protection des plages. Pour utiliser ces outils de calcul, nous avons besoin de données à fournir au programme, et plus nous fournissons d'informations, meilleurs sont les résultats. Ce chapitre n'a pas pour but d'enseigner l'utilisation d'un modèle numérique particulier, mais plutôt de décrire certains modèles et leurs attributs et exigences, tels que : a) la détermination du domaine du modèle, b) la collecte des données d'entrée, c) le prétraitement des données, e) la mise en place du modèle, f) l'exécution du modèle, et g) le post-traitement et l'analyse des résultats. Plusieurs analyses peuvent être effectuées à l'aide des modèles numériques : Modélisation des vagues, qui décrit la physique des vagues et utilise des données telles que la vitesse du vent, la pression atmosphérique, les courants océaniques et la bathymétrie pour prédire la hauteur, la direction et la période des vagues. D'autres modèles numériques décriront le mouvement et la circulation des courants d'eau, ce qui nous permettra de déterminer les fluctuations du niveau de l'eau et le mouvement des sédiments. Un autre modèle numérique correspond au transport des sédiments et à l'érosion côtière. Ces modèles nous permettent de comprendre le processus qui façonne la côte et son érosion, et ils nous permettront d'évaluer le succès d'une restauration du littoral.

Le chapitre décrit un bon nombre de modèles numériques, afin de donner un exemple de leurs caractéristiques et de leurs exigences. Ces informations permettront aux décideurs de prévoir le type d'analyse qu'ils peuvent obtenir ainsi que leurs limites.

Recommandations pour les responsables politiques et les décideurs : Tout

d'abord, il est nécessaire d'identifier et de comprendre le type de données que nous voulons analyser, comme le comportement des vagues, la circulation des courants, ou le transport des sédiments et l'érosion côtière, et quels en seront l'utilisation et les avantages pour les projets. Ensuite, il est important d'identifier les informations dont le projet a besoin pour être modélisé, et si ces informations sont disponibles avec ou sans coût, quel est le format disponible et quel est le format requis pour la simulation numérique, s'il y a suffisamment de données, et enfin les exigences informatiques. Une fois que nous avons exécuté le modèle numérique et obtenu des résultats, ceux-ci doivent être interprétés et leur exactitude et leur précision doivent être évaluées. Il n'existe pas de modèle numérique parfait, meilleur ou unique, cela dépend du problème, des informations disponibles, car tous les modèles ont des avantages et des inconvénients, et dans de nombreux cas, le choix le plus approprié peut nécessiter l'utilisation de plusieurs modèles numériques.

Au Chapitre 6 ; Mesures pour la protection et la réhabilitation des plages de la Grande Caraïbe, il est nécessaire d'accorder une attention particulière aux aspects juridiques liés à la définition des traits de côte et à la remédiation de l'érosion, afin de s'assurer que les actions sont soutenues et garanties par le gouvernement. Cela garantit que les actions proposées ne sont pas seulement soutenues, mais également assurées par le gouvernement. Il est à noter que plusieurs pays des Caraïbes ne disposent pas de réglementations spécifiques à cet égard ; cependant, la Barbade sert d'exemple positif avec son Unité bien établie de Gestion de la Zone Côtière.

L'identification des processus d'érosion se produisant sur la plage afin de proposer une méthode de remédiation est nécessaire pour décider : des solutions dures (solutions grises), des solutions douces, des solutions conventionnelles hybrides, ou d'un mélange de solutions. Les solutions dures ou grises (épis, digues de confinement, brise-lames submergés, brise-lames artificiels) sont des remèdes qui nécessitent des infrastructures, peuvent être coûteux et, dans certains cas, produisent de l'érosion et de l'accrétion dans des parties spécifiques, et ont un impact visuel.

Les solutions douces ou écologiques sont de plus en plus attrayantes, comme l'alimentation en sable artificiel, les sacs de sable et les géotubes, bien qu'elles nécessitent une zone de prêt, une adéquation du matériau et le volume requis. Les méthodes de restauration des écosystèmes, dont l'impact négatif sur la nature est moindre et dont le coût est généralement moins élevé, constituent une solution très attrayante. Certaines de ces méthodes sont la restauration des dunes côtières et de leur végétation, et la restauration des récifs coralliens et des herbiers marins.

Les solutions de restauration hybrides combinent l'amélioration des côtes naturelles à l'aide de la végétation et d'autres composants naturels, avec des matériaux plus durs pour ajouter de la structure et de la stabilité. L'analyse coût-bénéfice doit prendre en compte les aspects économiques, environnementaux, récréatifs et la protection contre les événements liés aux cours d'eau, afin de trouver une solution adéquate et plausible.

Recommandation à l'intention des responsables politiques et des décideurs

: Plusieurs aspects doivent être pris en compte, ainsi que les études et l'analyse coûts/bénéfices requises, de même que le temps nécessaire à la mise en œuvre de l'assainissement et sa durée estimée. Il n'existe pas de remédiation parfaite et permanente, car la combinaison de plusieurs techniques est souvent la meilleure solution. Il est important de consacrer le temps nécessaire et d'obtenir les meilleurs conseils pour prendre une décision.

Le **Chapitre 7**. Enseignements tirés du développement du projet Littoraux sablonneux, traite du projet d'étude de l'effet du changement climatique sur les plages de sable de la Grande Caraïbe et donne un exemple des mesures prises pour passer de l'analyse d'un problème à un système d'étude et de surveillance des plages sablonneuses de la région. Les six composantes du projet permettent d'établir un protocole pour atteindre des objectifs similaires.

La Composante 1, à savoir l'établissement de points focaux pour les pays participants, est nécessaire pour identifier le meilleur partenariat dans chaque pays, étant donné que dans certains cas, les centres de recherche ou le gouvernement, ou les deux, s'intéressent au problème.

La Composante 2, Renforcement des capacités institutionnelles et des ressources humaines, indique qu'il est important de former les participants dans chaque pays et selon les besoins de chaque pays, afin de maximiser la participation ainsi que la visite sur place des plages sélectionnées pour le projet.

Dans la Composante 3, liée à la mise en place du réseau régional de surveillance de l'érosion, de nombreux aspects doivent être considérés et pris en compte lors de la sélection des sites et du réseau de surveillance de l'érosion. Le site, les aspects juridiques, l'impact socio-économique, la formation des personnes responsables de l'équipement et du traitement des données, la durée prévue du projet et le coût de l'opération. On s'attendait à des difficultés dans l'exécution, mais jamais à une pandémie comme celle qui a frappé l'Europe.

Composante 4, Elaboration de 3 projets de réhabilitation de plages sous forme d'« études de cas », sélectionnés Viento Frio au Panama, Runaway Bay à Antigua et Barbuda, et Bonasse Bay à Trinité-et-Tobago, car ils ont répondu aux exigences établies par la société GAMMA de Cuba, avec une grande expérience en la matière.

Recommandation pour les responsables politiques et les décideurs : Créer et maintenir le renforcement des capacités, investir dans la formation du personnel à l'entretien des équipements et au traitement et à l'interprétation des données. Choisir le meilleur équipement possible peut coûter plus cher, mais avec le temps, c'est la meilleure décision. Prévoir les besoins financiers, non seulement pour l'équipement, mais aussi pour le fonctionnement du réseau de surveillance

ANNEXES

L'érosion sur les plages de la Caraïbe

Annexe A : Sources de données océanographiques pour la réalisation d'études métocéaniques (auteur principal : Miguel Canals)

- Modèles régionaux (ECWMF, GFS WAVE, autres)
- Bouées opérationnelles
- Nécessité d'étendre les réseaux de bouées et d'observation

Annexe B : Modèles numériques océanographiques utilisés pour comprendre les processus d'érosion et concevoir des projets de protection des plages (auteur principal : Miguel Canals)

- Modèles numériques de vagues
- Modèles de circulation côtière
- Modèles couplés de transport de vagues/courants/sédiments
- Modèles d'érosion des plages et de rupture des dunes

Annexe A: Sources de données océanographiques pour la réalisation d'études métocéaniques

Les données historiques des modèles de vagues jouent un rôle crucial dans la compréhension des effets de la climatologie des vagues sur la dynamique des plages, le transport des sédiments et l'érosion côtière. Ces données fournissent des informations sur les modèles et les tendances de l'activité des vagues au fil du temps, ce qui permet aux chercheurs d'identifier les cycles annuels des vagues ainsi que la variabilité pluriannuelle qui façonne les plages. Ces informations sont importantes pour les gestionnaires des côtes, les ingénieurs et les décideurs, car elles peuvent contribuer à l'élaboration de stratégies visant à atténuer les risques côtiers et à réduire l'impact des phénomènes météorologiques extrêmes sur les communautés côtières.

Les cycles annuels des vagues peuvent avoir un impact significatif sur la morphologie des plages, en particulier dans des régions telles que la mer des Caraïbes, qui est sujette aux tempêtes tropicales et aux ouragans, ainsi qu'aux houles hivernales de longue

durée. Ces événements génèrent des vagues à haute énergie qui peuvent entraîner un transport de sédiments et une érosion tous deux importants. La compréhension des modèles d'activité des vagues au cours des différentes saisons peut aider les chercheurs à identifier les périodes où l'érosion côtière est la plus susceptible de se produire et à développer des mesures d'atténuation appropriées.

La variabilité pluriannuelle, telle que l'oscillation australe El Niño (ENSO) et l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (OMA), peut également jouer un rôle important dans l'évolution de la morphologie côtière. Ces phénomènes climatiques peuvent entraîner des changements dans l'activité des vagues, ce qui peut provoquer des changements significatifs dans le transport des sédiments et les schémas d'érosion. En analysant les données historiques des modèles de vagues, les chercheurs peuvent identifier l'impact de ces phénomènes sur la morphologie côtière et développer des stratégies pour atténuer leurs effets.

Pour aider les chercheurs et les gestionnaires côtiers à mieux comprendre les modèles et les tendances de l'activité des vagues dans la mer des Caraïbes, plusieurs modèles de vagues sont disponibles et fournissent des données historiques sur les modèles de vagues. Ces modèles permettent aux utilisateurs d'accéder à des informations sur l'activité des vagues au fil du temps et de comprendre comment la climatologie des vagues façonne la morphologie côtière. La disponibilité de ces données et les informations qu'elles fournissent sont essentielles pour développer des stratégies de gestion côtière efficaces qui réduisent l'impact de l'érosion côtière et atténuent les effets des événements météorologiques extrêmes.

Voici quelques-uns des modèles de vagues les plus couramment utilisés qui peuvent fournir des données historiques de modèles de vagues dans la mer des Caraïbes, ainsi que des liens vers les sites web où les utilisateurs peuvent télécharger les données :

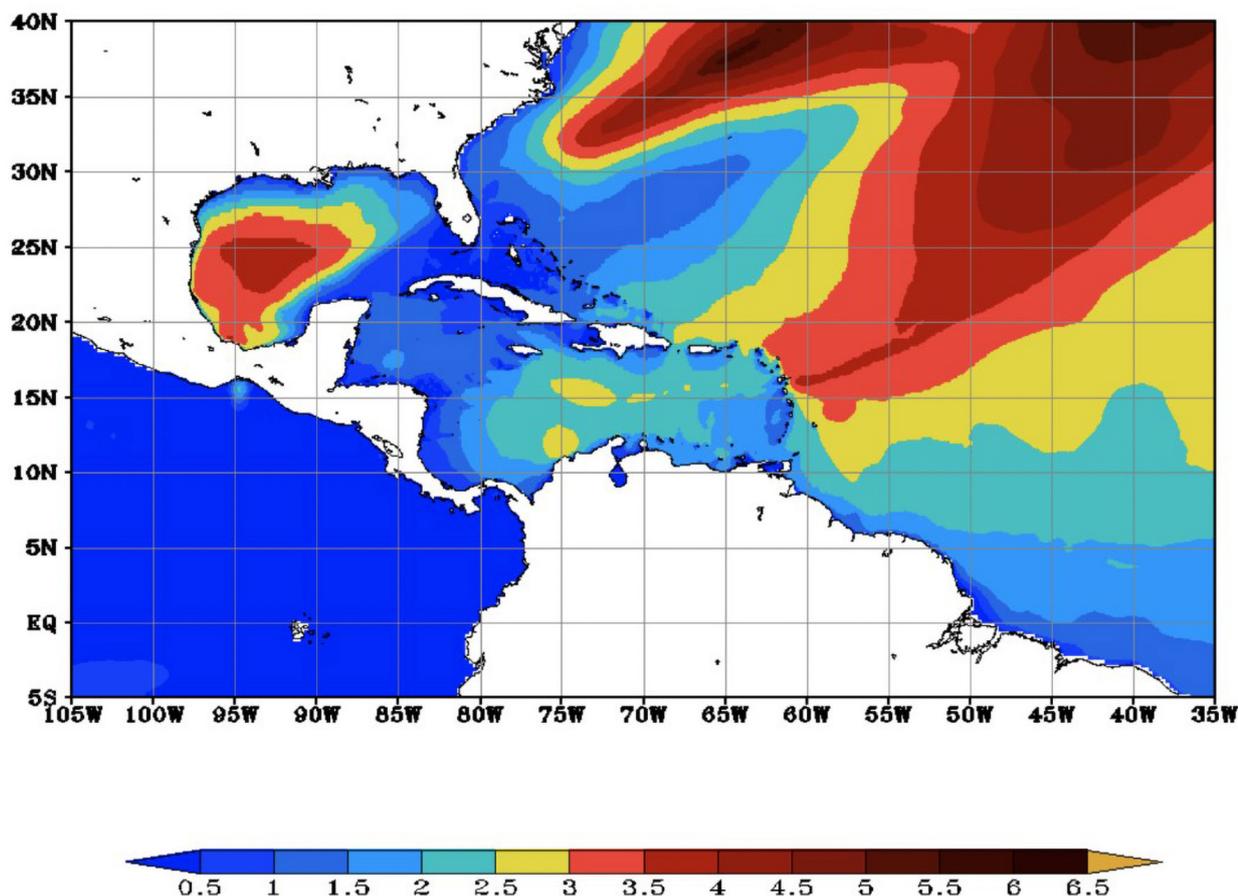
- WAVEWATCH III : Les centres nationaux de prévision environnementale (NCEP) fournissent sur leur site web des données historiques WAVEWATCH III pour la région de la mer des Caraïbes. Ces données sont accessibles à l'adresse suivante : <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/download.shtml>
- Les centres nationaux de prévision environnementale (NCEP) ont introduit un modèle avancé de prévision des vagues connu sous le nom de modèle GFS WAVE. Ce modèle numérique de pointe intègre les dernières connaissances des processus océanographiques et météorologiques, ce qui permet des prévisions de

vagues plus précises et une meilleure compréhension de la dynamique des vagues dans divers environnements marins. Le modèle GFS WAVE combine des données à haute résolution sur les vents provenant du système mondial de prévision (GFS) avec des techniques sophistiquées de modélisation des vagues, ce qui lui permet de prédire la hauteur, la période et la direction des vagues avec une plus grande précision.

- ECMWF-WAM : Le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) fournit sur son site web des données historiques du modèle de vagues ECMWF-WAM pour la région de la mer des Caraïbes. Les données sont accessibles via leur boutique en ligne de données climatiques à l'adresse suivante : <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-ii>
- Le modèle de vagues WaveWatch 3 pour la Caraïbe (Document A.1 ci-dessous) que l'on trouve à l'adresse <http://ww3.cimh.edu.bb> est une mise en œuvre régionale du modèle de vagues mondial WaveWatch 3 spécialement conçu pour la mer des Caraïbes. Il simule la hauteur, la direction et la période des vagues à l'aide de données relatives aux courants océaniques, à la vitesse du vent et à la pression atmosphérique. Le modèle fournit des prévisions de vagues à haute résolution jusqu'à trois jours à l'avance, ce qui en fait un outil précieux pour la sécurité maritime, la gestion côtière et les activités de planification telles que le transport maritime, le tourisme et les opérations offshore.

Il existe également plusieurs bouées océanographiques dans l'océan Atlantique et dans la mer des Caraïbes qui peuvent être utiles pour comprendre l'activité des vagues, en particulier lorsqu'elles sont combinées avec les résultats des modèles. Le National Data Buoy Center (NDBC : <https://www.ndbc.noaa.gov>) entretient un réseau de bouées dans l'océan Atlantique et la mer des Caraïbes, qui fournit des données inestimables pour comprendre les caractéristiques des vagues sur les plages de la Caraïbe. Ces bouées sont stratégiquement placées pour collecter et transmettre en continu des données océanographiques et météorologiques essentielles, telles que la hauteur, la période et la direction des vagues, qui sont cruciales pour les chercheurs, les gestionnaires du littoral et les décideurs politiques dans l'évaluation de la dynamique des plages et des processus côtiers. Les informations en temps réel recueillies par les bouées NDBC contribuent à une meilleure prévision des risques côtiers, tels que les ondes de tempête et l'érosion, ce qui permet de prendre des décisions plus éclairées sur les stratégies de protection et de réduction des risques côtiers. En outre, les données recueillies par ces bouées peuvent être utilisées pour calibrer et valider des modèles numériques, ce qui

Wave Heights(m) for the Caribbean
Valid 20230318 00Z +30



Document 56: Le modèle de vague WaveWatch 3 pour la Caraïbe est disponible à l'adresse suivante <http://ww3.cimh.edu.bb>

permet d'améliorer la précision des prévisions concernant les impacts du changement climatique et les tendances à long terme des environnements côtiers de la région.

Annexe B: Modèles numériques océanographiques utilisés pour comprendre les processus d'érosion et concevoir des projets de protection des plages.

Les modèles numériques océanographiques sont un outil essentiel pour comprendre les processus d'érosion et concevoir des projets de protection des plages. Ces modèles utilisent des équations mathématiques pour simuler les processus océanographiques et fournir des prévisions sur la hauteur des vagues, les courants, le transport des sédiments et l'érosion côtière. Les modèles permettent aux océanographes et aux

ingénieurs côtiers d'évaluer l'impact potentiel de l'érosion côtière et de développer des stratégies pour en atténuer les effets. Dans cette annexe, nous décrivons les modèles les plus populaires utilisés par les océanographes et les ingénieurs côtiers, y compris les modèles numériques de vagues, les modèles de circulation côtière, les modèles couplés vagues/courants/transport de sédiments, et les modèles d'érosion des plages et de bréchage des dunes.

Modèles numériques régionaux de vagues

Les modèles numériques de vagues simulent la propagation et la transformation des vagues à l'aide d'équations mathématiques qui décrivent la physique des vagues. Les modèles utilisent des données d'entrée sur la vitesse du vent, la pression atmosphérique, les courants océaniques et la bathymétrie pour prédire la hauteur, la direction et la période des vagues. Ces modèles sont essentiels pour comprendre la dynamique des vagues et évaluer leur impact potentiel sur la morphologie côtière. Deux des modèles de vagues les plus populaires sont le WaveWatch III et le modèle SWAN.

- WaveWatch III est un modèle de vagues mondial qui fournit des prévisions de vagues jusqu'à dix jours à l'avance. Le modèle utilise des données sur la vitesse du vent et la pression atmosphérique pour prévoir la hauteur, la période et la direction des vagues. WaveWatch III est utilisé par diverses organisations, notamment la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la US Navy et le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme.
- Le modèle SWAN (Simulating Waves Nearshore) est un modèle spectral de vagues qui simule la transformation des vagues des eaux profondes vers la zone littorale. Le modèle est largement utilisé pour les applications d'ingénierie côtière, y compris les évaluations de l'énergie des vagues, les études d'érosion côtière et la conception des ports.

Modèles de vague à résolution de phase

Les modèles de vague à résolution de phase, tels que SWASH (Simulating Waves till Shore) et XBEACH, sont des modèles numériques avancés conçus pour simuler les processus de vagues près du rivage avec une grande précision. Contrairement aux modèles à moyenne de phase, qui ne prennent en compte que les valeurs moyennes des paramètres des vagues, les modèles à résolution de phase tiennent compte des phases individuelles de chaque vague, ce qui permet de saisir de manière plus réaliste

les interactions complexes entre les vagues et l'environnement littoral.

SWASH est un modèle qui simule la transformation des vagues, le déferlement des vagues et les courants induits par les vagues dans la zone de déferlement, tandis que XBEACH est spécifiquement conçu pour modéliser l'érosion côtière et le transport de sédiments dans des conditions de tempêtes extrêmes. Ces deux modèles sont importants pour comprendre l'hydrodynamique littorale qui affecte l'érosion côtière, car ils fournissent des informations détaillées sur le comportement des vagues et les processus de transport de sédiments qui se produisent dans la zone littorale.

Modèles de circulation côtière

Les modèles de circulation côtière simulent l'écoulement de l'eau dans la zone littorale, y compris les effets des marées, des vagues, des vents et des forces de flottabilité. Ces modèles sont essentiels pour comprendre les courants côtiers, les fluctuations du niveau de l'eau et le transport des sédiments et des polluants. Deux des modèles les plus populaires sont le modèle ROMS et le modèle ADCIRC.

- Le système régional de modélisation des océans (ROMS) est un modèle numérique de pointe qui simule la circulation océanique et la propagation des vagues dans la zone côtière. Le modèle peut être utilisé pour prédire les variations du niveau de l'eau, les courants de marée et le transport des sédiments, entre autres variables. ROMS est largement utilisé pour la recherche et la gestion côtières, notamment pour des études sur les inondations côtières, le transport de sédiments et l'acidification des océans.
- Le modèle Advanced Circulation (ADCIRC) est un modèle à éléments finis qui simule les effets des marées, des vagues et des ondes de tempête sur l'hydrodynamique côtière. Le modèle est largement utilisé pour la prévision des ondes de tempête et l'évaluation des risques, notamment pour les ouragans et autres événements météorologiques extrêmes.

Modèles de changement du trait de côte et de transport des sédiments

Les modèles couplés vagues/courants/transport de sédiments simulent l'interaction entre les vagues, les courants et le transport de sédiments dans la zone côtière. Ces modèles sont essentiels pour comprendre les processus qui façonnent la morphologie côtière et l'impact de l'érosion côtière. Certains des modèles les plus populaires sont

énumérés ci-dessous :

- Le modèle Delft3D est un modèle numérique 3D qui simule les vagues, les courants et le transport des sédiments dans la zone côtière. Le modèle peut être utilisé pour prédire l'érosion des plages, la rupture des dunes et les changements du littoral, entre autres variables. Delft3D est largement utilisé pour la gestion côtière, notamment pour la conception de mesures de protection côtière et l'évaluation des risques côtiers.
- Le modèle XBeach est un modèle numérique qui simule les processus hydrodynamiques et morpho-dynamiques dans la zone littorale. Le modèle peut être utilisé pour prédire l'impact de l'érosion côtière sur les plages et les dunes, y compris le brèchage des dunes et la submersion. XBeach est largement utilisé pour la recherche et la gestion côtières, notamment pour
- SBEACH (Modification des plages induit par les tempêtes) : SBEACH est un modèle empirique largement utilisé pour prédire les modifications de profil des plages dus à l'érosion induite par les tempêtes. Il tient compte de la transformation des vagues, du transport des sédiments et de l'évolution du profil de la plage.
- CSHORE (Cross-Shore) : CSHORE est un modèle unidimensionnel, basé sur les processus. Il permet de prévoir le transport sédimentaire cross-shore et les changements de profil de plage. Il comprend des formulations pour la transformation des vagues, le transport des sédiments et les processus d'érosion/dépôt.
- GENESIS (modèle généralisé de simulation de l'évolution du trait de côte) : GENESIS est un modèle numérique unidimensionnel permettant de simuler le transport sédimentaire à grande distance et l'évolution du trait de côte. Il combine la transformation des vagues, le transport des sédiments et l'évolution du trait de côte dans un cadre unique.

Le choix d'un modèle numérique approprié pour l'érosion des côtes et des plages dépend de l'environnement côtier spécifique et des objectifs de l'étude. Chaque modèle a ses avantages et ses limites, et il est essentiel de tenir compte de la complexité, de la disponibilité des données et des ressources informatiques lors du choix d'un modèle approprié. Dans certains cas, il peut être avantageux de combiner plusieurs modèles pour mieux saisir les différents processus et échelles impliqués dans l'érosion côtière et le transport de sédiments.

Références

CHAPITRE 1

Cooper, J.A.G., J. McKenna. 2008. Social justice in coastal erosion management: The temporal and spatial dimensions. *Geoforum*, 39(1), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2007.06.007>

Defeo, O., McLachlan, A., Schoeman, D.S., Schlacher, T.A., Dugan, J., Jones, A., Lastra, M., Scapini, F., 2009. Threats to sandy beach ecosystems: a review. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 81 (1), 1–12.

Fanning, L., R. Mahon. 2017. Implementing the Ocean SDG in the Wider Caribbean: state of play and possible ways forward, IASS, IDDRI, TMG. 53 p.

Mahon, R., L. Fanning, P. McConney and R. Pollnac. 2010. Governance characteristics of large marine ecosystems. *Marine Policy*, 34: 919-927.

Spencer, N., E. Strobl, A. Campbell. 2022. Sea level rise under climate change: Implications for beach tourism in the Caribbean, *Ocean & Coastal Management*, 225, 106207. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106207>.

UNEP. 2003. Diagnóstico de los procesos de erosión en las playas arenosas del Caribe. United Nations Environment Programme. Agencia de Medio Ambiente. Cuba. Colectivo de autores. La Habana. Marzo de 2003.

CHAPITRE 2

Brown, A. C. and McLachlan, A., *Ecology of Sandy Shores*, Editorial Elsevier, 5-39, Holand, 1990.

Brunn, P. and Schwartz, M. L., “Analytical predictions of beach profile change in response to a sea level rise”. *Z. Geomorph. N. F.* (57), 33-50, 1985.

Cambers, G. *Coast and Beach Stability in the Eastern Caribbean Islands*. Editorial UNESCO. 1985.

Center for Civil Engineering Research, Codes and Specifications/ Delft Hydraulics Laboratory, (ed), Manual on Artificial Beach Nourishment. Report (130), Holand, 1990.

Coastal Engineering Research Center, (ed). Shore Protection Manual, U.S.A., 1984.

Davidson-Arnott, Robin, An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Cambridge university press. 2010. Dean, R. G., “Los beneficios y reducción de daños obtenidos con playas regeneradas”. 21 Conferencia Internacional de Ingenieria de Costas. Libro de Resúmenes. 235, 566-568, España, 1988.

Dunaev. N., Leontiev I. O., Juanes, J. L., On the Problem of Coastal Protection of the Varadero Resort (Cuba) with an Artificial Beach. Marine Geology, 2020.

Juanes, J. L., La Erosión en las Playas de Cuba. Alternativas para su Control. Tesis de Doctorado. Cuba.

Juanes, J. L.. Procesos Costeros y Criterios Metodológicos para la Recuperación de Playas. Manual de Curso de Postgrado. AEC, 2018, 221 y 2022.

Lippman, T. C., Holman, R. A. 1990. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. Journal of Geophysical Research, 106, 973 989

Pavlidis, Y., Ionin, A. S., Ignatov, E., Lluís, M. y Avello, O., “Condiciones de formación de oolita en las regiones someras de las aguas tropicales”. Serie Oceanológica. (18), 1973.

Schwartz, M. L., Juanes, J. L., Foyo, J., Garcia, G., “Artificial nourishment at Varadero Beach, Cuba”. Proceeding. Coastal Sediments’ 91. 2081-2088. 1991.

Schwartz, M. L., (ed.) “Encyclopedia of coastal science”. 2005.

Shepard, F. P., Submarine Geology, Editorial Harper and Row, 167-205, U.S.A., 1973.

Short, A. D. “Wave power and beach-stages: a global model”. Reprinted from Proceedings of 16 Coastal Engineering Conference. chapitre 66. 1145-1162. 1978.

Short, A. D., “Three dimensional beach-stage model”. Journal of Geology. (87). 553-571. 1979.

Short, A. D. and Aagaard, T., “Single and multi-bar beach change models”. *Journal of Coastal Research*. (15). 141-157. 1993.

Short, A. D., and Masselink, G. 1999. Embayed and structurally controlled beaches. In Short, A.

D. (ed.), *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Wiley, Chichester, pp. 230-250. Silvester, 1974. *Coastal Engineering*. Elsevier, Amsterdam, 2 volumes

Sonu, C. J., “Three-dimensional beach changes”. *Journal of Geology*. 81, 42-64, 1973.

Sunamura, T. 1988. Beach morphologies and their change. In Horikawa, K. (ed.), *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*. University of Tokyo Press, Tokyo, pp. 136-166.

UNEP/GPA 2003. “Diagnosis of the Erosion Processes in the Caribbean Sandy Beaches”; report prepared by Environmental Agency, Ministry of Science, Technology and Environment, Government of Cuba, March.

Wright, L. D. and Short, A. D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56, 93-118.

Zafianov, G., *Las Costas del Océano Mundial en el siglo XX*, (en ruso), Editorial Mislá, U.R.S.S., 1978.

Zenkovich, V. P., *Processes of Coastal Development*, Editorial Oliver and Boyd, 1967.

CHAPITRE 3

Cambers, G. (1998). Coping with beach erosion: Case studies from the Caribbean. *Coastal Management Sourcebooks 1*, UNESCO, Paris. (<https://digitallibrary.un.org/record/1491442?ln=en>)

Cambers, G. (2009). Caribbean beach changes and climate change adaptation. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 12(2), 168-176. (<https://doi.org/10.1080/14634980902907987>)

Luijendijk, A., et al. (2018). The state of the world’s beaches. *Scientific Reports*, 8(1),

6641. (<https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>)

Mumby, P.J., et al. (2018). Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature*, 427(6974), 533-536. (<https://doi.org/10.1038/nature02286>)

Nicholls, R.J., et al. (2018). Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4°C world' in the twenty-first century *Phil. Trans. R. Soc. A*.369161–181 (<https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0291>)

Reguero BG, Losada IJ, Díaz-Simal P, Méndez FJ, Beck MW. Effects of Climate Change on Exposure to Coastal Flooding in Latin America and the Caribbean. *PLoS One*. (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133409>)

Reguero, B.G., Beck, M.W., Agostini, V.N., Kramer, P., and Hancock, B., 2018, Coral reefs for coastal protection—A new methodological approach and engineering case study in Grenada: *Journal of Environmental Management*, v. 210, p. 146–161. (<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.024>)

Scott, D. , Simpson, M. Charles, & Sim, R. . (2012). [The vulnerability of Caribbean coastal tourism to scenarios of climate change related sea level rise](https://doi.org/10.1080/09669582.2012.699063). *Journal of Sustainable Tourism*, 20(6), 883-898. Taylor & Francis (<https://doi.org/10.1080/09669582.2012.699063>)

Storlazzi, C.D., Reguero, B.G., Cumming, K.A., Cole, A.D., Shope, J.B., Gaido L., C., Viehman, T.S., Nickel, B.A., and Beck, M.W., 2021, Rigorously valuing the coastal hazard risks reduction provided by potential coral reef restoration in Florida and Puerto Rico: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1054, 35 p., (<https://doi.org/10.3133/ofr20211054>).

CHAPITRE 4

Brodie, K. L., B. L. Bruder, R. K. Slocum and N. J. Spore, “Simultaneous Mapping of Coastal Topography and Bathymetry From a Lightweight Multicamera UAS,” in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 9, pp. 6844-6864, Sept. 2019, doi: 10.1109/TGRS.2019.2909026.

Codiga, D.L., 2011. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Technical Report 2011-01. Graduate School of Oceanography, University of

Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp. <ftp://www.po.gso.uri.edu/pub/downloads/codiga/pubs/2011Codiga-UTide-Report.pdf>

Hesp, P., Schmutz, P., Martinez, M. L. M., Driskell, L., Orgera, R., Renken, K., Revelo, N. A. R., & Orocio, O. A. J. (2010). The effect on coastal vegetation of trampling on a parabolic dune. *Aeolian Research*, 2(2–3), 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2010.03.001>

Holman, R., Plant, N., Holland, T. (2013), cBathy: A robust algorithm for estimating nearshore bathymetry, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 2595– 2609, <https://doi.org/10.1002/jgrc.20199> .

Jagalingam, P., B.J. Akshaya, Arkal Vittal Hegde, Bathymetry Mapping Using Landsat 8 Satellite Imagery, *Procedia Engineering*, Volume 116, 2015, Pages 560-566, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.326> .

Kraus, N.C. (2005). Beach Profile. In: Schwartz, M.L. (eds) *Encyclopedia of Coastal Science*. *Encyclopedia of Earth Science Series*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_37

Perry, C. T., & Hepburn, L. J. (2008). Syn-depositional alteration of coral reef framework through bioerosion, encrustation and cementation: Taphonomic signatures of reef accretion and reef depositional events. *Earth-Science Reviews*, 86(1), 106–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.08.006>

Perry, C. T., Kench, P. S., Smithers, S. G., Riegl, B., Yamano, H., & O’Leary, M. J. (2011). Implications of reef ecosystem change for the stability and maintenance of coral reef islands. *Global Change Biology*, 17(12), 3679–3696. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02523.x>

Pilkey, O. H., & Cooper, J. A. G. (2014). *The Last Beach*. Duke Univ. Press.

Rosado-Torres, A. A., Mariño-Tapia, I., & Acevedo-Ramírez, C. (2019). Decreased Roughness and Macroalgae Dominance in a Coral Reef Environment with Strong Influence of Submarine Groundwater Discharges. *Journal of Coastal Research*, 92(sp1), 13. <https://doi.org/10.2112/si92-003.1>

Valentini, N., & Balouin, Y. (2020). Assessment of a smartphone-based camera system

for coastal image segmentation and Sargassum monitoring. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/JMSE8010023>

Vousdoukas, M.I., A.F. Velegrakis, T.A. Plomaritis, Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts, *Earth-Science Reviews*, Volume 85, Issues 1–2, 2007, Pages 23-46, ISSN 0012-8252, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.07.002>.

Wright, L.D., A.D Short, Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis, *Marine Geology*, Volume 56, Issues 1–4, 1984, Pages 93-118, ISSN 0025-3227, [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2).

CHAPITRE 5

Buttolph, A. M. B., Reed, C. W., Kraus, N. C., Ono, N., Larson, M., Camenen, B., Hanson, H., Wamsley, T. & Zundel, A. K. (2006), Two-dimensional depth-averaged circulation model CMS-M2D: Version 3.0, Report 2: Sediment transport and morphology change, Technical Report ERDC/CHL TR-06-09, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Chen, C., Liu, H., & Beardsley, R. C. (2003). An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(1), 159-186.

Escudero, M., Reguero, B.G., Mendoza, E., Secaira, F., Silva, R. (2021). Coral reef geometry and hydrodynamics in beach erosion control in North Quintana Roo, Mexico. *Frontiers in Marine Science*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.684732>

Izquierdo Álvarez, M., Núñez, C. O., González Escalona, R., & Castro Acosta, B. (2022). Rehabilitation Project for Bonasse Beach, Cedros Bay. Trinidad and Tobago: FINAL REPORT. Inversiones Gamma. Published by Association of Caribbean States.

Johnson, B. D., N, Kobayashi and M. B. Gravens. 2012. Cross-Shore Numerical Model CSHORE for Waves, Currents, Sediment Transport and Beach Profile Evolution. ERDC/CHL TR-12-22. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center.

Laigre, T.; Balouin, Y.; Villarroel-Lamb, D.; Lerma, A.N.; Valentini, N.; Moisan, M.; De La Torre, Y. Total Water Level Mitigation Related to Fringing Reef and Upperbeach Vegetation Status at a Hurricane Exposed Coast. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11, 620. <https://>

doi.org/10.3390/jmse11030620

Morales Díaz, P., Peña Fuentes, L. I., Niévares Pérez, A., Busutil López, L., & Hernández, M. F. (2022). Rehabilitation Project for Runaway Bay Beach Antigua and Barbuda: FINAL REPORT. Inversiones Gamma. Published by Association of Caribbean States.

Reguero, B.G., Beck, M.W., Agostini, V.N., Kramer, P., and Hancock, B., 2018, Coral reefs for coastal protection—A new methodological approach and engineering case study in Grenada: *Journal of Environmental Management*, v. 210, p. 146–161.

CHAPITRE 6

Army Coastal Engineering Research Center. 1984. Shore Protection Manual. Vol. 1 and 3. Corps of Engineers. Ed. USACERC. Department of the Navy.

Bautista- Zuñiga, A.E.. 2013. La educación ambiental enfocada al cambio climático en las comunidades costeras de Baja California Sur. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California Sur. 121p.

Bellwood, D.R., 1995. Carbonate transport and within-reef patterns of bioerosion and sediment release by parrotfishes (family Scaridae) on the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series*, 117: 127-136. <https://doi.org/10.3354/meps117127>.

Cambers, G. 1998. Coping with beach erosion with case studies from the Caribbean. Coastal management sourcebooks 1, UNESCO Publishing, Paris.

CUR. 1987. Manual on Artificial Beach Nourishment. Centre for Civil Research Codes and Specifications, Recommendation, vol. 1. Rijkswaterstaat/Delft Hydraulics, The Netherlands.

D'Alessandro, F., G.R. Tomasicchio, A. Francone, E. Leone, F. Frega, G. Chiaia, A. Saponieri, L. Damiani. 2020. Coastal sand dune restoration with an eco-friendly technique. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 23 (4): 417–426. doi: <https://doi.org/10.1080/14634988.2020.1811531>.

Ehler, C., F. Douvère. 2013. Planificación espacial marina: una guía paso a paso hacia la Gestión Ecosistémica. Comisión Oceanográfica Intergubernamental y el Programa del Hombre y la Biosfera. COI manuales y guías n.º 53. París, UNESCO.

GAMMA Inversiones. 2022a. Proyecto para la rehabilitación de la playa de Runaway Bay Antigua y Barbuda. Asociación de Estados del Caribe – Koica. 252 p

GAMMA Inversiones. 2022b. Proyecto ejecutivo para la rehabilitación de la playa Viento Frío, Colón, República de Panamá. Asociación de Estados del Caribe – Koica. 135 p.

González-Ruiz, M., G. García-Montero, M. Montolio-Fernández. 2003. Educación ambiental para comunidades costeras. La Habana, Acuario Nacional de Cuba. 78 p.

James, R.K., A. Lynch, P.M.J. Herman, M.M. van Katwijk, B.I. van Tussenbroek, H.A. Dijkstra, R.M. van Westen, C.G. van der Boog, R. Klees, J.D. Pietrzak, C. Slobbe, T.J. Bouma. 2021. Tropical biogeomorphic seagrass landscapes for coastal protection: persistence and wave attenuation during major storms events. *Ecosystems*, 24: 301–318. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00519-2>

Juanes, J. L. 1996. La erosión en las playas de Cuba. Alternativas para su control. Doctoral Tesis.

Ley-Vega, J., J.B. Gallego-Fernández, C. Vidal. 2007. Manual de restauración de dunas costeras. Editorial. Ministerio del Medio Ambiente. Dirección General de Costas. España. 258p.

Lithgow, D., M.L. Martínez, P. Moreno-Casasola, I. Espejel, D. Infante-Mata, Ó. Jiménez-Orocio. 2014. La restauración de dunas costeras. En: Diagnóstico general de las dunas costeras de México (pp. 105-118). CONAFOR, SEMARNAT.

Manrique-Sanguino, J.A. 2012. Estudio experimental de alternativas de protección costera caso Chelem-Chuburná, Yucatán. II Encuentro “el posgrado en la ingeniería civil”, ESIA U. Zacatenco, mayo 21 al 23 del 2012. 11pp.

Porro, R., K. Kim, D. Spirandelli, K. Lowry. 2020. Evaluating erosion management strategies in Waikiki, Hawaii. *Ocean and Coastal Management*, 188, 105113

Prasetya, G. 2007. Chapitre 4: Protection from coastal erosion. Thematic paper: The role of coastal forests and trees in protecting against coastal erosion. En: Coastal protection in the aftermath of the Indian Ocean tsunami: What role for forests and trees? Braatz, S., Fortuna, S., Broadhead, J., Leslie, R. Eds. Rap publication, 07. FAO, Tailandia.

Reguero, B.G., M.W. Beck, V.N. Agostini, P. Kramer, B. Hancock. 2018. Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada. *Journal of Environmental Management*, 210: 146-161.

Ricaurte-Villota, C., Coca-Domínguez, O., González, M.E., Bejarano-Espinosa, M., Morales, D.F., Correa-Rojas, C., Briceño-Zuluaga, F., Legarda, G.A. y Arteaga, M.E. 2018. Amenaza y vulnerabilidad por erosión costera en Colombia: enfoque regional para la gestión del riesgo. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” –INVEMAR–. Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR # 33. Santa Marta, Colombia. 268 p.

Steer, R., F. Arias-Isaza, A. Ramos, P. Sierra-Correa, D. Alonso, P. Ocampo. 1997. Documento base para la elaboración de la Política Nacional de Ordenamiento Integrado de las Zonas Costeras Colombianas. Documento de consultoría para el Ministerio del Medio Ambiente. Serie publicaciones especiales No.6. 390 p.

Torres-Hugues, R., L. Córdova-López. 2010. Metodología para la rehabilitación y protección de playas. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*, I (4): 149-155.

van Zanten, B.T., P.J.H. van Beukering, A.J. Wagtendonk. 2014. Coastal protection by coral reefs: A framework for spatial assessment and economic valuation. *Ocean & Coastal Management*, 96: 94-103.

Wong, P.P. 2018. Coastal Protection Measures – Case of Small Island Developing States to Address Sea-level Rise. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 6(3): 1-14.