

Financé en majeure partie par :

Interreg
Caraïbes
Fonds européen de développement régional




**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
Liberté
Égalité
Fraternité

 Géosciences pour une Terre durable
brgm


Office National des Forêts
DEMAIN PREND RACINE
— AUJOURD'HUI —



 **CaribCoast**

 **OLIG**
Observatoire littoral îles de Guadeloupe

GUIDE POUR LA GESTION DE L'ÉROSION LITTORALE DANS LES CARAÏBES

*Comment utiliser la surveillance des côtes et les
solutions fondées sur la Nature pour prévenir et
atténuer les risques littoraux ?*




**PRÉFET
DE LA
GUADELOUPE**
Liberté
Égalité
Fraternité

Direction
de l'Environnement,
de l'Aménagement et du Logement


**PRÉFET
DE LA
MARTINIQUE**
Liberté
Égalité
Fraternité

Direction
de l'Environnement,
de l'Aménagement et du Logement

 **REGION GUADELOUPE**
Archipel d'Avenir


**Office de l'Eau
GUADELOUPE**


ode
OFFICE DE L'EAU
MARTINIQUE

Table des matières

Introduction	3
1. Contexte insulaire caribéen	4
Contexte géographique	4
Contexte géologique et morphologique	4
Contexte climatique	4
Contexte hydrodynamique	4
Environnements côtiers et écosystèmes associés dans la Caraïbe	4
■ Cordons littoraux et végétation de haut de plage :	5
■ Récifs coralliens	6
■ Les herbiers	7
■ Mangroves	8
■ Falaises et côtes rocheuses	9
2. Dynamique côtière et exposition aux risques côtiers dans la région des Caraïbes	10
Processus et dynamique côtiers	10
Risques côtiers	11
■ Érosion Côtière	11
■ Submersion marine	12
Changement climatique et impact attendu sur les zones côtières	13
3. Surveillance et modélisation physique des côtes	16
Suivi côtier	16
Modélisation côtière	20
4. Gestion des risques côtiers	22
5. Solutions fondées sur la Nature d'atténuation des risques littoraux	29
Services de protection offerts par les écosystèmes côtiers	29
■ L'atténuation de l'impact des vagues	29
■ L'atténuation des phénomènes de submersion marine	30
■ Réduction de l'érosion et maintien de sédiment	30
Rôles et services des écosystèmes côtiers de la Caraïbe	30
■ Plages et dunes côtières	30
■ Mangroves	38
■ Récifs coralliens	42
■ Herbiers marins	48
Conseils pour la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature	52
■ Diagnostic	52
■ Actions	56
■ Suivi et adaptation	60
Recommandations internationales sur l'utilisation des solutions basées sur la nature appliquées aux aléas côtiers	62
Glossaire	64
Bibliographie	64

Introduction

Les zones côtières des États insulaires de la Caraïbe concentrent la majorité de la population, des activités économiques, des infrastructures et leurs économies sont très dépendantes du tourisme et de l'exploitation des ressources naturelles. Or les zones côtières de ces États sont très exposées aux aléas côtiers en lien avec des phénomènes météorologiques intenses induits par l'activité cyclonique à l'échelle régionale et l'élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique à l'échelle globale.

Ce document vise à présenter des recommandations générales pour l'élaboration des stratégies de gestion des risques côtiers et à promouvoir les solutions fondées sur la nature (SFN) pour atténuer les aléas côtiers. Il s'adresse aux décideurs et gestionnaires des États insulaires de la Caraïbe exposés aux phénomènes d'érosion du littoral et de submersion marine ainsi qu'aux défis que représente

l'adaptation aux effets du changement climatique dans les zones côtières. Il n'est pas destiné à fournir de conseils de conception technique mais plutôt à introduire les approches qui peuvent être mises en œuvre dans les zones côtières de la région Caraïbe.

Ce guide, spécialement adapté à la région Caraïbe, a été réalisé dans le cadre du projet européen de coopération régionale Interreg CARIB-COAST, réseau caribéen de prévention des risques côtiers en lien avec le changement climatique, avec le soutien du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), de l'Office national des forêts (ONF) et du Centre d'Activités Régional du Protocole relatif aux zones et à la vie sauvage spécialement protégées de la Grande région Caraïbe (CAR-SPAW). Il a été réalisé sur la base du retour d'expérience des travaux menés dans le cadre de ce projet ainsi que sur la base des recommandations internationales.



Contexte insulaire caribéen

I CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

Les îles de la Caraïbe s'étendent sur un arc compris entre le nord du Venezuela et le sud de la Floride dans la zone tropicale de l'hémisphère nord. On distingue aussi généralement deux ensembles parmi ces îles. Les grandes Antilles, constituées de quatre îles principales (Cuba, Jamaïque, Hispaniola et Puerto-Rico) et les Petites Antilles sont organisées en deux arcs insulaires. Un arc externe, de la Barbade à Anguilla et prolongé au nord jusqu'aux Bahamas constitués d'îles basses et calcaires. Un arc interne, de Grenade aux îles du nord, constitué par des îles montagneuses et volcaniques.

I CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET MORPHOLOGIQUE

Les deux principaux types de morphologie des îles de la Caraïbe sont associés à des contextes géologiques différents. Les îles les plus récentes, à dominante volcanique (Dominique, Martinique, Saint-Vincent les Grenadines, par exemple), présentent des reliefs importants avec de fortes pentes. Ces îles sont généralement exposées aux phénomènes de glissement de terrain. La présence de récif frangeant est assez limitée. La plaine côtière est en général peu développée et concentre une partie importante de la population. Les îles plus anciennes, à dominante calcaire, sont généralement associées à des formations récifales reposant sur un substratum volcanique ancien (Antigua-et-Barbuda et Anguilla par exemple). Elles présentent une morphologie tabulaire/de plateau plus ou moins surélevée selon l'influence de la tectonique avec des côtes à falaises escarpées ou des plaines côtières étendues. Enfin, il existe des îles mixtes, d'origine volcanique et calcaire comme la Guadeloupe et les Grandes Antilles.

I CONTEXTE CLIMATIQUE

Situées dans la zone tropicale, les îles de la Caraïbe sont soumises à un climat relativement stable en termes de température. Les quantités de précipitations varient cependant selon les îles, l'altitude et l'exposition. Le régime des précipitations est associé à une saison sèche de décembre à avril et humide

de mai/juin à octobre/novembre avec des périodes de transition. Le régime des alizés est constant en direction et varie du secteur sud-est à nord-est. Les alizés se renforcent de juin à juillet et décembre à mars. Les dépressions des moyennes latitudes peuvent également affecter les Grandes Antilles, particulièrement durant la période hivernale d'octobre à avril. Les îles de la Caraïbe se situent également dans la zone des ouragans qui se développent dans la zone tropicale de l'Atlantique Nord et se déplacent vers l'ouest entre juin et novembre avec un pic d'intensité de l'activité cyclonique observé en septembre.

I CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

L'amplitude des marées dans la Caraïbe est faible avec des variations comprises entre 0,3 et 0,5 m pour des marées de vives-eaux. La plupart des îles connaissent un régime de marée à inégalité diurne, c'est-à-dire qu'il existe des variations importantes entre la hauteur des pleines mers et des basses mers d'une même journée. Les vagues proviennent majoritairement du secteur et avec des variations allant du secteur sud-est à nord-est selon le régime des alizés, relativement constant au cours de l'année. Il existe ainsi une distinction entre les secteurs côtiers, au vent à l'est, plus exposés et ceux sous le vent, plus protégés, à l'ouest de ces îles. Durant la période hivernale de l'hémisphère nord, les dépressions des moyennes latitudes peuvent générer des vagues puissantes de secteur nord généralement pendant la période allant de décembre à mars. Enfin, les cyclones peuvent générer des épisodes de vagues très intenses pouvant impacter n'importe quel secteur côtier entre juin et novembre.

I ENVIRONNEMENTS CÔTIERS ET ÉCOSYSTÈMES ASSOCIÉS DANS LA CARAÏBE

Il existe une grande diversité d'environnements côtiers dans la Caraïbe associés à la structure et aux caractéristiques géologiques de ces îles. Il s'agit de falaises escarpées, de plateformes basses rocheuses, de cordons littoraux ou de zones humides de mangrove.

Cordons littoraux et végétation de haut de plage

La morphologie des plages des îles de la Caraïbe (Figure 1) comprend de longs cordons, pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres, ainsi que des petites plages de poche de quelques centaines de mètres seulement, présentes en fonds de baie et délimitées par des falaises ou des promontoires rocheux. La variété de taille et de nature des sédiments est également importante en fonction de la lithologie de la côte, de la présence ou l'absence de rivière ou de récifs coralliens. Dans les îles basses calcaires, les sédiments sont d'origine biogénique (sables calcaires et coquillés) généralement issues des plateformes récifales environnantes. Pour les îles volcaniques hautes, les plages sont composées de sédiments d'origine volcanique (sables noirs et galets), apportés à la côte par les rivières et issues de l'érosion des formations rocheuses volcaniques.

Les cordons littoraux sont en constante évolution, sous l'effet de facteurs météorologiques,

géologiques et anthropiques. L'énergie des vagues incidentes, la présence ou l'absence de récifs coralliens représentent les facteurs naturels les plus importants intervenant dans le contrôle de la morphologie des plages dans la Caraïbe.

Les plages représentent une valeur socio-économique élevée, notamment dans la Caraïbe avec des économies tournées vers le tourisme et fournissent des services écosystémiques pour les populations locales ainsi qu'un rôle écologique pour des espèces emblématiques comme les tortues marines par exemple.

Présents naturellement sur les littoraux sableux, les écosystèmes de haut-de-plage se retrouvent dans toute la Caraïbe. La végétation qui les compose, que l'on peut qualifier de flore littorale sèche, est adaptée aux rudes conditions du littoral caribéen. Ces espèces végétales sont ainsi capables de se maintenir sur un sol sableux, perméable, salin et instable et surtout de résister à la houle et aux embruns.

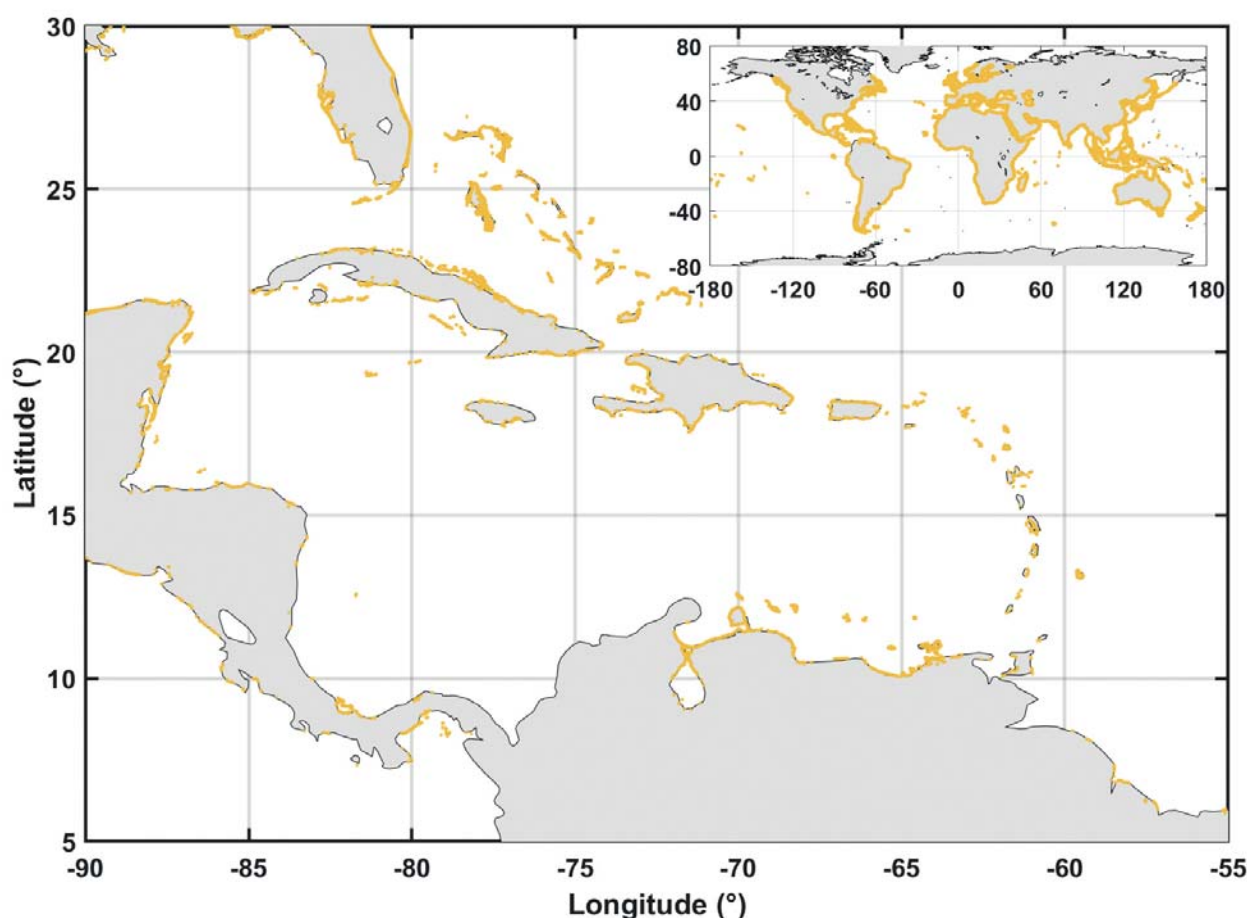


Figure 1 : Distribution des plages dans la Caraïbe d'après Vousedoukas et al., (2020)

Cette forêt littorale sèche, lorsqu'elle est en bon état, est constituée de trois strates végétales :

- Une strate herbacée, composée essentiellement d'espèces rampantes, caractérisée dans toute la Caraïbe par la patate bord de mer (*Ipomoea pes-caprae*), le pois bord de mer (*Canavalia rosea*) et l'herbe bord de mer (*Sporobulus virginicus*)
- Une strate arbustive, là aussi constituée d'un cortège floristique typiquement caraïbéen, avec l'olivier bord de mer (*Bontia daphnoides*), l'amourette (*Volkameria aculeata*), le romarin blanc (*Tournefortia gnaphalodes*), le romarin noir (*Suriana maritima*), la cerise bord de mer (*Scaevola plumieri*)
- Une strate arborée, dont les essences communes et emblématiques sont entre autres le raisinier bord de mer (*Coccoloba uvifera*), le poirier pays (*Tabebuia heterophylla*), le catalpa (*Thespesia populnea*), le palétuvier gris (*Conocarpus erectus*), et, plus rare de nos jours car exploité pour son bois, le gaïac (*Guaiacum officinale*).

La fonctionnalité écologique de ces écosystèmes de haut-de-plage est permise par la présence de ces trois strates. Malheureusement, les pressions anthropiques, et notamment la surfréquentation des plages, ont entraîné la disparition des strates herbacée et arbustive sur de nombreuses plages. La strate arborée elle-même a été localement remplacée par le cocotier, symbole des plages paradisiaques et "cartes postales" recherchées par de nombreux visiteurs. Sur de nombreuses plages des Caraïbes, le cordon forestier littoral n'est plus en mesure de jouer son rôle d'atténuation contre les aléas côtiers.

Récifs coralliens

Les récifs coralliens représentent un écosystème important pour la protection et la formation des plages dans la Caraïbe (Figure 2). Les récifs se développent généralement dans les zones peu profondes et proches de la côte. Leurs présences jouent un rôle fondamental dans le contrôle de l'agitation et les courants associés dans la zone proche côtière.

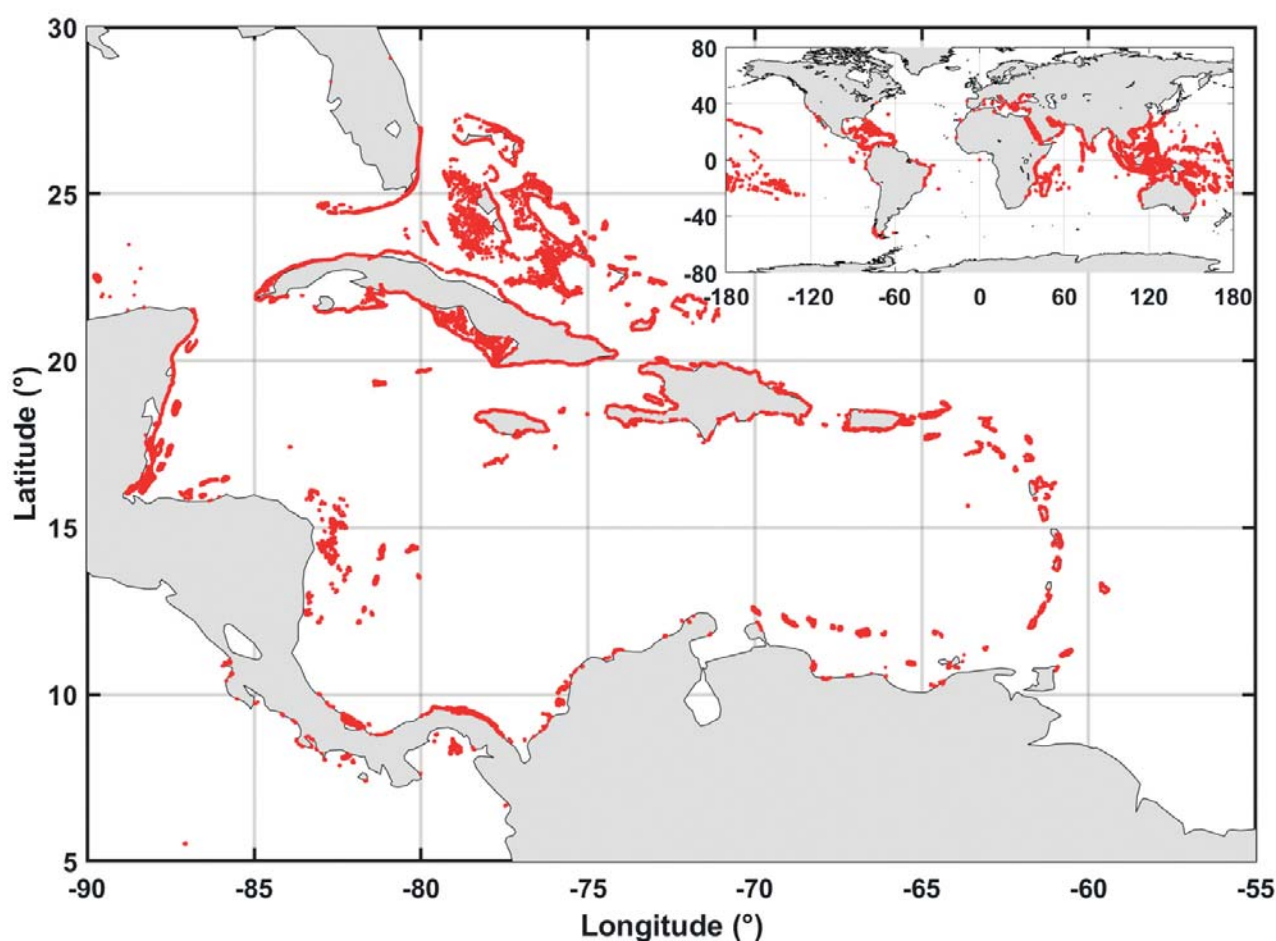


Figure 2 : Distribution des récifs coralliens dans la Caraïbes d'après UNEP-WCMC et al., 2021)

Les récifs représentent également un rôle important dans la production de sédiments sableux.

Dans la Caraïbe, on estime que les récifs couvrent plus de 26 000 km² (Miloslavich *et al.*, 2010). Les récifs frangeants, présentant une plate-forme récifale qui borde la côte, représentent la morphologie la plus répandue dans la région. Il existe également des récifs barrières, plus distants et séparés de la côte par la présence d'une dépression récifale (lagon) ou d'un chenal. Enfin, il existe des formations récifales sous forme de massifs isolés de seulement quelques mètres de diamètre, présentant des morphologies moins organisées que les types de récifs précédents.

Les récifs coralliens représentent l'écosystème marin le plus riche en termes de biodiversité. Dans la Caraïbe, on estime qu'un total d'environ 30 000 espèces, tous groupes confondus, résident dans les récifs coralliens (Reaka-Kudla, 2005). Les récifs jouent un rôle important pour de nombreuses espèces marines. Mammifères, tortues, poissons,

mollusques, crustacés, vers, mais encore algues, champignons et bactéries, profitent des récifs qui servent à la fois d'habitats, de nurseries, d'abris, de garde-manger, de lieux de repos, de lieux de reproduction, etc.

Les herbiers

Les herbiers de phanérogames marines se situent généralement dans des zones peu profondes et sont souvent associés à la présence de récifs coralliens. Il ne s'agit pas d'algues mais bien de plantes à fleurs qui se développent principalement par un système de tiges rampantes sous le fond marin pour former des prairies sous-marines. Dans la région Caraïbe, on estime que les herbiers couvrent environ 66 000 km² (Miloslavich *et al.*, 2010) (Figure 3).

On les retrouve sous trois configurations principales : les baies ou les lagons ouverts ; les lagons fermés, protégés par une barrière récifale ; et plus rarement dans les eaux saumâtres des estuaires. Il s'agit généralement de zones peu exposées à la houle. La

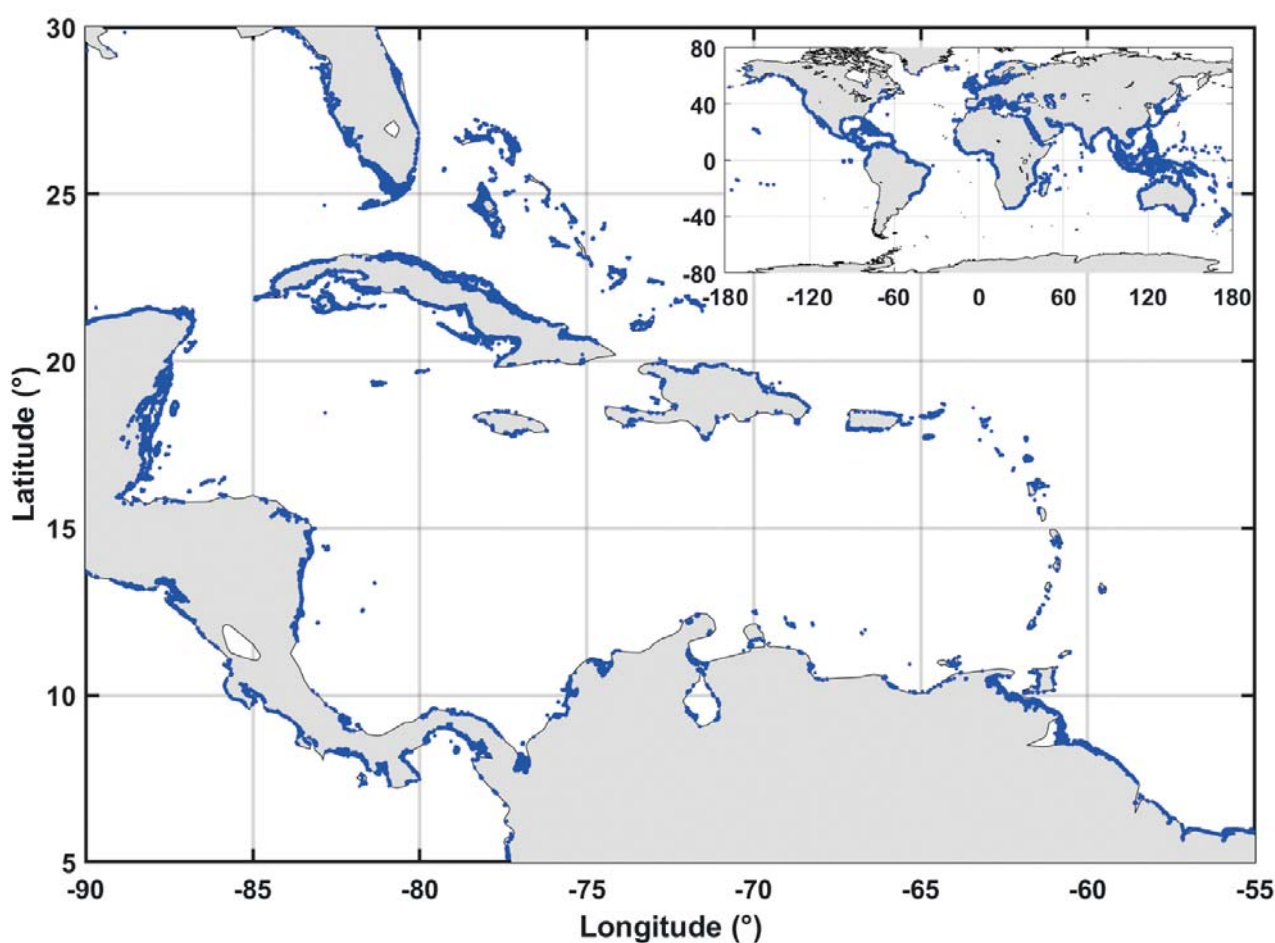


Figure 3 : Distribution des herbiers dans la Caraïbe d'après UNEP-WCMC et Short (2021)

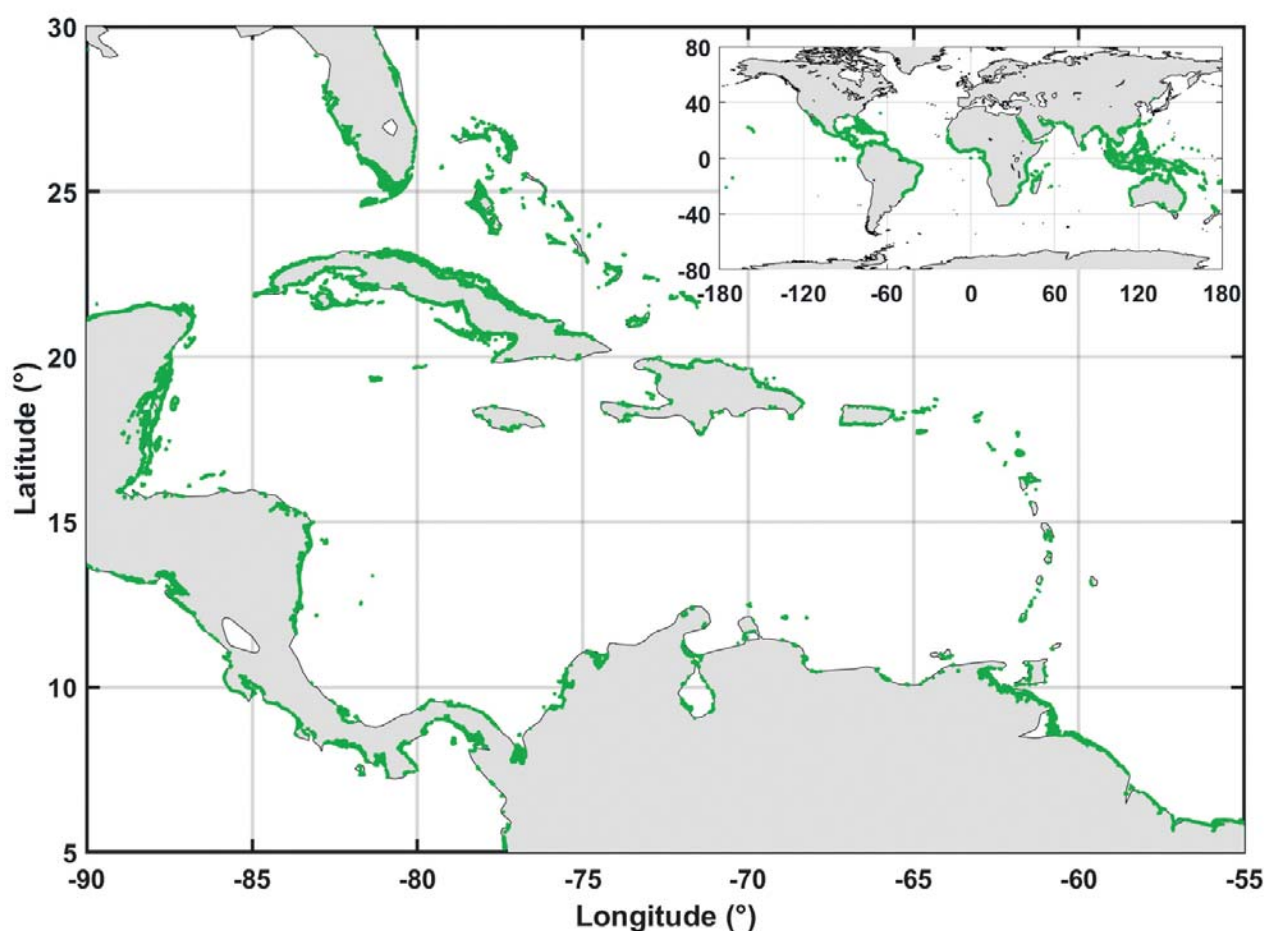


Figure 4 : Distribution de la mangrove dans la Caraïbe d'après Spalding, et Collins (2010)

majorité des herbiers caribéens se situent entre 1 et 3 mètres mais il est possible de les retrouver jusqu'à des profondeurs maximales d'une cinquantaine de mètres. 7 espèces majoritaires sont présentes dans la Caraïbe dont trois principales *Thalassia testudinum*, la plus abondante, *Cymodocea filiforme* et *Diplanthera wightii*.

Les herbiers représentent un habitat marin important pour de nombreuses espèces animales marines, notamment au stade larvaire de leur développement, et pour la source de nourriture pour de nombreuses espèces emblématiques et commerciales tels que les conches par exemple.

Mangroves

Les mangroves se développent généralement dans des estuaires, des lagons et des zones humides à l'arrière des cordons littoraux généralement associés à une sédimentation vaseuse dans des environnements abrités des vagues. Celles-ci couvrent

environ 22 000 km² dans la région, soit près de 15 % de la surface mondiale (Teutli-Hernández et al., 2021) (Figure 4).

Le Mexique et Cuba comportent à eux deux plus de la moitié de la surface de mangrove de la Caraïbe. Avec les États-Unis, le Panama et les Bahamas, ils regroupent 82 % de la surface de mangroves caribéennes. Les 18 % restants sont partagés entre les autres territoires. On retrouve une dizaine d'espèces dans la Caraïbe, dont 4 qui sont majoritaires. La majorité des mangroves de la Caraïbe sont constituées de palétuviers rouges. Il s'agit de l'espèce la moins tolérante à la salinité. C'est pourquoi on la retrouve le long des côtes où, proche des estuaires, là où la salinité n'excède pas celle de l'eau de mer (OECS, 2009).

Les mangroves représentent des habitats importants d'un point de vue écologique pour différentes espèces marines et terrestres.

Falaises et côtes rocheuses

La présence des côtes rocheuses est importante dans les îles de la Caraïbe. Les côtes abruptes et à falaises sont majoritaires dans la plupart des îles volcaniques (Dominique par exemple). La morphologie tabulaire des îles calcaires, peuvent également présenter des côtes basses rocheuses ou des falaises abruptes dans certains secteurs selon l'influence de la tectonique.

Dynamique côtière et exposition aux risques côtiers dans la région des Caraïbes

PROCESSUS ET DYNAMIQUE CÔTIERS

Le littoral, à l'interface entre la terre et la mer, est un espace mobile qui s'adapte en permanence aux conditions du milieu. Les facteurs à l'origine de l'évolution du littoral sont multiples et complexes. Ils interviennent à différentes échelles spatiales et temporelles pour constituer ce que l'on appelle le système côtier (Figure 5).

Les **facteurs géologiques** interviennent généralement à l'échelle régionale sur des périodes de plusieurs milliers d'années. Ils sont responsables des mouvements verticaux du sol, principalement associés à la tectonique dans le contexte caribéen.

Les **facteurs hydrodynamiques** associés au vent, la houle et le niveau d'eau jouent un rôle à l'échelle régionale. Ils sont à l'origine de la variabilité interannuelle, saisonnière et événementielle dans le cas de tempêtes par exemple.

À l'échelle de la cellule sédimentaire, **les processus côtiers** interviennent dans le déplacement des sédiments dans la zone côtière sous l'effet des courants côtiers générés par la houle et les vents. Les processus côtiers sont influencés par la morphologie de la côte qui contrôle la prorogation de la houle dans la zone côtière et le déplacement des sédiments. À cette échelle, les apports de sédiments par les cours d'eau ou l'érosion des falaises interviennent également.

Enfin, à l'échelle locale **les interventions humaines** peuvent également modifier les conditions d'équilibre du système côtier et impacter les processus de transport des sédiments en lien avec la présence d'aménagement ou de prélèvements directs sur les plages par exemple.

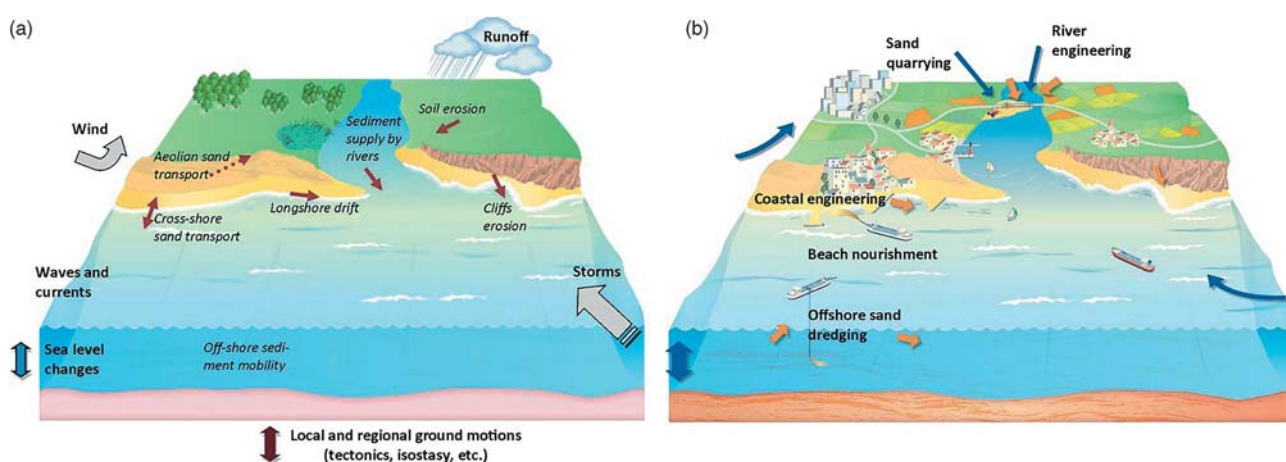


Figure 5 : Processus impliqués dans le transport des sédiments en zone côtière et l'évolution du trait de côte en l'absence d'interventions humaines (a) et sous l'influence des interventions humaines (b) d'après Cazenave et Le Cozannet (2013)

RISQUES CÔTIERS

Érosion Côtière

L'érosion du littoral intervient par la perte de sédiment sous l'action de la mer et se traduit par un abaissement du profil de plage et un recul du trait de côte. Les côtes les plus sensibles à l'érosion sont les côtes basses sableuses. Les côtes de falaises composées de roches meubles ou de formations rocheuses altérées sont également particulièrement sensibles à l'érosion avec des phénomènes de glissement de terrain ou de chute de bloc notamment sur les îles volcaniques.

Les études réalisées en Guadeloupe et en Martinique,

indiquent qu'environ 1/3 des côtes basses sableuses présentent une tendance au recul depuis les années 1950. Cambers (2009) mentionne un taux de recul annuel moyen de 0,5 m par an d'après les données d'évolution du littoral analysées sur huit îles des Caraïbes entre 1985 et 2000, principalement affecté par l'impact de plusieurs tempêtes tropicales sur cette période d'observation (Anguilla, La Dominique, Grenade, Montserrat et Saint-Kitts et Nevis). À titre d'exemple, la majorité des plages des îles de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy a été affectée par un recul brutal suite au passage de l'ouragan Irma en 2017 compris entre 5 m et 30 m avec de nombreux dommages associés sur les infrastructures côtières (Duvat *et al.*, 2018 et Pillet *et al.*, 2019).

IMPACT DE LA COLLECTE DES ALGUES SARGASSES SUR L'ÉROSION DU LITTORAL

Depuis 2011, la plupart des îles de la Caraïbe sont exposées à des phénomènes d'échouage massif des algues sargasses. Ces algues pélagiques se développent en mer, dérivent sous l'influence des courants marins de la zone tropicale de l'Atlantique Nord et viennent s'échouer massivement sur les côtes de la Caraïbe avec des impacts importants sur les populations, les écosystèmes côtiers et les activités exercées à proximité du littoral.

La collecte de ces algues peut avoir des impacts importants sur les plages exposées aux échouages. En effet, la collecte des algues peut être associée à des prélèvements de sables importants, pouvant représenter jusqu'à 50 % des volumes collectés. Ces prélèvements indirects peuvent donc contribuer à aggraver le phénomène d'érosion s'ils ne sont pas maîtrisés. Par ailleurs, l'utilisation d'engins lourds peut être à l'origine d'une dégradation de la végétation de haut de plage (Figure 6). Il est donc important d'adapter les techniques de collecte afin d'éviter au maximum les prélèvements de sable et d'empêcher les impacts sur la végétation de haut de plage. Par exemple, l'utilisation de griffe à la place des godets ou bien de cribleuse lorsque cela est adapté permet de limiter les prélèvements de sable associés à la collecte de ces algues.



Figure 6 : Exemple de techniques pouvant limiter le prélèvement de sables associé à la collecte des sargasses. À gauche, tractopelle équipé d'un godet griffet et à droite cribleuse (source : Préfecture de Guadeloupe)

Comme indiqué plus haut, les processus associés à la dynamique du littoral sont multiples et complexes. Ils interviennent à différentes échelles spatiales et temporelles. Il est parfois difficile d'attribuer précisément les facteurs à l'origine de l'érosion du littoral. Parmi les facteurs pouvant être à l'origine d'un phénomène d'érosion dans la Caraïbe on peut citer les suivants :

- fréquence et intensité des événements extrêmes;
- évolution des conditions climatiques à l'échelle saisonnière ou interannuelle;
- élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique intervenant sur de longues périodes et à l'échelle globale;
- dégradation des écosystèmes côtiers à l'échelle locale;
- modifications des conditions locales induites par des aménagements côtiers;
- prélèvements directs de sédiments dans la zone côtière pour la construction ou la collecte des sargasses échouées sur les plages par exemple.

Par ailleurs, bien que les surfaces occupées par les forêts de mangrove tendent à diminuer dans la Caraïbe en lien avec le développement de l'urbanisation dans les zones basses côtières, leur limite d'extension progresse en mer dans de nombreux secteurs estuariens. En effet, les activités agricoles présentes dans les bassins versants favorisent l'érosion des sols et augmentent les apports en sédiments dans la zone côtière. Ce qui a pour conséquence d'étendre les surfaces de vasières côtières, favorables au développement des mangroves.

Submersion marine

Les submersions marines désignent une inondation temporaire de la zone côtière par la mer associée à des conditions météorologiques extrêmes. Dans la Caraïbe, les submersions marines sont principalement associées au passage des cyclones à l'origine d'une élévation soudaine du niveau de la mer, de fortes houles et des vents importants. Les zones basses côtières ou les plus exposées aux déferlements des vagues représentent les secteurs les plus exposés à ce phénomène (Figure 7).

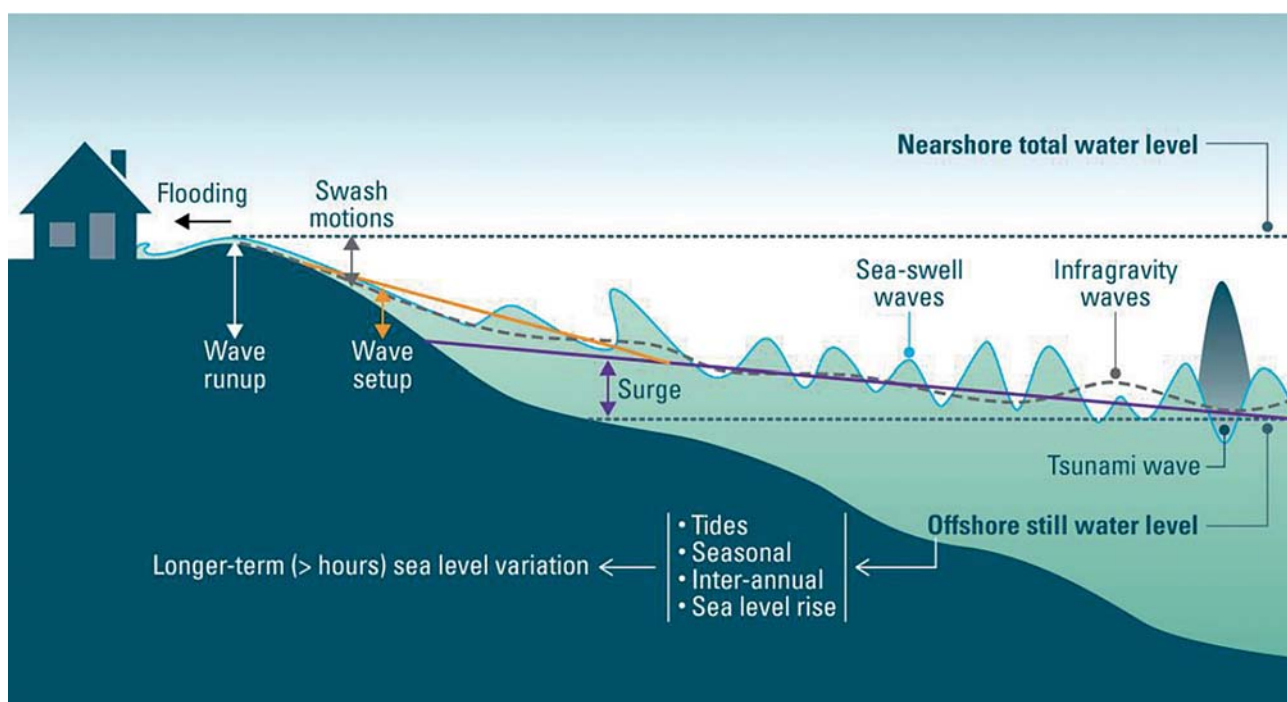


Figure 7 : Contribution des processus hydrodynamiques associées au phénomène de submersion marine d'après Morris et al., 2021 (Morris et al., 2021)

En moyenne une douzaine de tempêtes tropicales, dont 6 cyclones, affectent le bassin de l'Atlantique chaque année. D'après Martin et al. (2022), la partie orientale des îles de la Caraïbe reçoit plus de

3 cyclones tropicaux par décennie, la partie occidentale est affectée en moyenne par 1 cyclone par décennie et le sud de la Caraïbe n'est pratiquement pas touché en raison de la trajectoire de

déplacement à dominante vers l'ouest-nord-ouest. Les îles les plus touchées comprennent les Antilles, Hispaniola (République Dominicaine et Haïti) et Porto Rico. La partie occidentale de Cuba est la zone touchée par les cyclones tropicaux les plus intenses. Bien que les Petites Antilles ne soient pas affectées par les cyclones les plus puissants, le passage d'un grand nombre de cyclones sur cette zone en fait une des plus exposées à leurs impacts. Les vagues générées par les cyclones peuvent atteindre plus de 10 m, notamment sur les côtes orientales des îles exposées sur l'Atlantique (Antilles, Hispaniola et Porto Rico). Les surcotes les plus importantes, supérieures

à 2 m, sont observées le long des côtes de Cuba, en raison de la configuration des eaux côtières peu profondes qui favorisent ce phénomène. Les valeurs les plus faibles sont observées sur les îles situées au sud du bassin. En plus de la trajectoire du cyclone qui génère une zone de basse pression, des variations de surcotes importantes peuvent être observées localement en raison de la configuration de la côte et des interactions avec le vent et les vagues. En effet, les zones qui présentent un plateau insulaire étendu et peu profond sont propices à la génération de surcotes importantes.

FOCUS SUR LA SAISON CYCLONIQUE 2017

La saison cyclonique 2017 illustre parfaitement l'exposition des îles de la Caraïbe aux cyclones. Parmi les 29 îles de la Caraïbe, 22 étaient touchées par au moins un ouragan de catégorie 4 ou 5 avec des effets dévastateurs dans les zones côtières en lien avec les phénomènes de submersion marine (Irma, Jose et Maria). Par exemple, une importante surcote s'est produite sur l'île de Barbuda, où Irma a touché terre en tant qu'ouragan de catégorie 5. Un marégraphe sur l'île a enregistré un pic de niveau d'eau 2,4 m au-dessus des plus hautes mers. L'institut météorologique de Cuba rapporte également que l'ouragan Irma a produit d'importantes inondations le long de la côte nord de l'île en raison de la surcote de tempête et des vagues. Dans la province de Ciego de Avila, la mer s'est élevée de 3 à 3,5 m et a pénétré à l'intérieur des terres sur plus de 800 m. Irma a causé 37 décès directs en raison de ses vents violents, des fortes pluies et des vagues, principalement dans les îles de la Caraïbe. Pour les petits États insulaires, les dommages causés par les cyclones tropicaux peuvent être très importants et affecter durablement leur économie. Par exemple, le coût des dommages associée à l'ouragan Maria en Dominique est estimé à 226 % de son produit intérieur brut de 2016.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET IMPACT ATTENDU SUR LES ZONES CÔTIÈRES

Les effets potentiels et les impacts induits par le changement climatique sur les risques côtiers sont multiples (Mycoo *et al.*, 2022). Parmi ces effets, **l'élévation du niveau moyen de la mer** à l'échelle globale représente la menace la plus importante pour les zones basses côtières situées sous le niveau de la mer qui seront directement exposées aux submersions chroniques et permanentes (Figure 8).

Une étude de 2018 de la banque interaméricaine de développement (IDB. 2018. *Sea-level rise threats in the Caribbean*), estime qu'environ 500 000 personnes vivent dans des zones situées à moins de 0,5 m au-dessus du niveau local des plus hautes mers et 1 000 000 occupent des terres situées en dessous

de 1 m dans la Caraïbe étendue. Les Bahamas représentent le territoire le plus exposé à l'élévation du niveau de la mer avec plus de 40 % de la population située à moins de 1 m du niveau local des plus hautes mers (Tableau 1). Les zones côtières des îles de la Caraïbe concentrent également la majorité des infrastructures de transports et des activités.

Par ailleurs, il est aujourd'hui reconnu que le réchauffement climatique induira avec une forte probabilité **une augmentation de l'intensité des événements météorologiques extrêmes**. Des cyclones plus puissants sont ainsi attendus dans la zone tropicale de l'Atlantique Nord. Ces événements extrêmes seront associés à des phénomènes de submersion marine et d'érosion côtière plus intenses et plus fréquents, notamment en lien avec l'élévation du niveau de la mer.

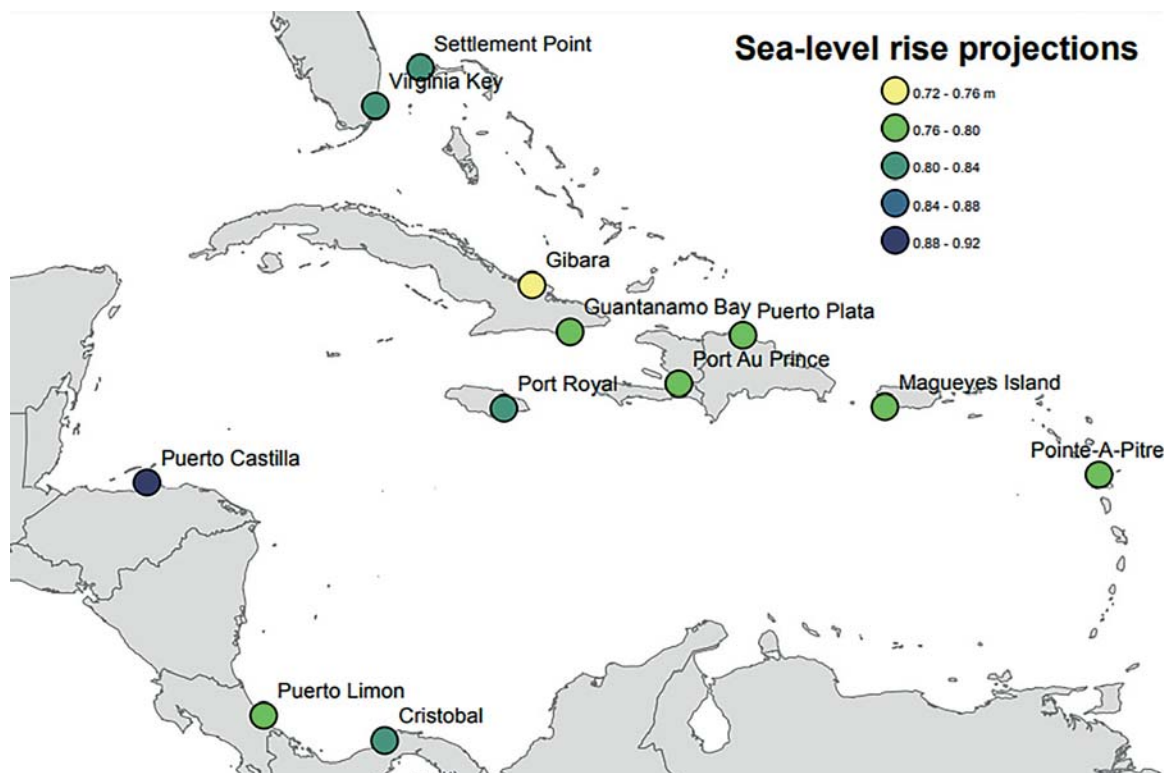


Figure 8 : Projection médiane de l'élévation du niveau de la mer autour du bassin de la Caraïbe à l'horizon 2100 selon le scénario RCP 8.5 du GIEC d'après Kopp et al., (2014).

Place	National Total Pop.	0.5m Tot	Pct	1m Tot	Pct	2m Tot	Pct	4m Tot	Pct
Antigua and Barbuda	86,710	1,170	1.3%	1,737	2.0%	4,236	4.9%	12,759	14.7%
The Bahamas	310,015	76,993	24.8%	128,328	41.4%	176,398	56.9%	247,435	79.8%
Barbados	285,134	240	0.1%	526	0.2%	5,643	2.0%	25,335	8.9%
Dominica	72,811	737	1.0%	1,277	1.8%	3,284	4.5%	6,316	8.7%
Dominican Republic	9,812,309	99,310	1.0%	127,179	1.3%	232,506	2.4%	574,226	5.9%
Grenada	107,817	1,021	0.9%	2,108	2.0%	4,859	4.5%	8,728	8.1%
Guyana	723,107	101,871	14.1%	191,368	26.5%	446,309	61.7%	558,477	77.2%
Haiti	9,660,438	97,241	1.0%	164,310	1.7%	405,978	4.2%	852,626	8.8%
Jamaica	2,847,231	13,700	0.5%	22,681	0.8%	75,242	2.6%	370,732	13.0%
Saint Kitts and Nevis	49,898	244	0.5%	613	1.2%	1,996	4.0%	4,310	8.6%
Saint Lucia	160,742	2,725	1.7%	8,659	5.4%	22,466	14.0%	31,838	19.8%
Saint Vincent and the Grenadines	104,218	697	0.7%	1,129	1.1%	3,650	3.5%	8,060	7.7%
Suriname	508,340	52,493	10.3%	102,318	20.1%	332,934	65.5%	435,907	85.8%
Trinidad and Tobago	1,228,676	4,426	0.4%	15,384	1.3%	66,640	5.4%	170,167	13.8%

Tableau 1 : Population habitants dans les zones basse côtière dans la Caraïbe élargie d'après l'IDB (2018)

Enfin, les changements environnementaux associés à **l'augmentation de la température des eaux de surface, le phénomène d'acidification des océans** et l'élévation du niveau moyen de la mer contribueront également à fragiliser les écosystèmes côtiers, tels que les récifs coralliens, déjà fortement impactés par les perturbations humaines. Ces écosystèmes représentent une protection naturelle contre

les aléas et permettent de réduire le risque dans la zone côtière notamment lors des événements extrêmes. Ces perturbations seront très probablement associées à une réduction des services de protection offerts par ces écosystèmes si leur capacité de résilience naturelle ne permet pas de s'adapter aux changements de conditions du milieu.

UN OUTIL DE VISUALISATION DES PROJECTIONS DU NIVEAU DE LA MER

La NASA a développé un outil interactif de projection du niveau de la mer qui permet aux utilisateurs de visualiser et télécharger les données de projection du niveau de la mer du 6ème rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (AR6). L'objectif de cet outil est de fournir un accès et une visualisation faciles et améliorés des projections du GIEC (Figure 9).

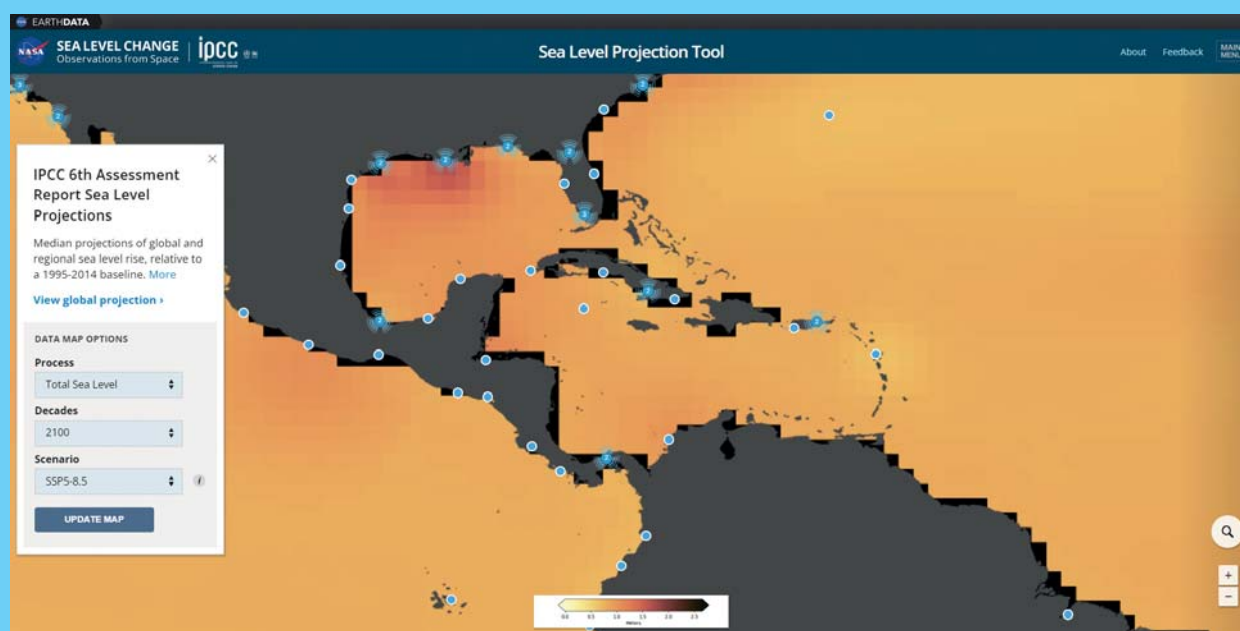


Figure 9 : Visualisation de l'outil de projection du niveau de la mer accessible accessible à l'adresse suivante : Sea Level Projection Tool – NASA Sea Level Change Portal

L'outil permet aux utilisateurs de visualiser les projections mondiales et régionales du niveau de la mer de 2020 à 2150 et les incertitudes associées selon les différents scénarios étudiés par le GIEC. Les utilisateurs peuvent cliquer sur un point n'importe où dans l'océan ou sur les ports de références pour obtenir la projection du niveau de la mer pour un emplacement donné. Les contributions des différents processus physiques liés à l'élévation du niveau de la mer sont également présentées.



Surveillance et modélisation physique des côtes

La collecte de données sur l'évolution du littoral sur le long terme est essentielle pour la compréhension des processus côtiers associés à l'évolution du littoral, la caractérisation des risques et la définition d'actions de gestion adaptées au contexte local et à la dynamique naturelle de chaque site.

Les observations sont généralement complémentaires aux outils de modélisations numériques afin de produire des analyses pour la compréhension du fonctionnement du système côtier et la gestion des risques (Figure 10).

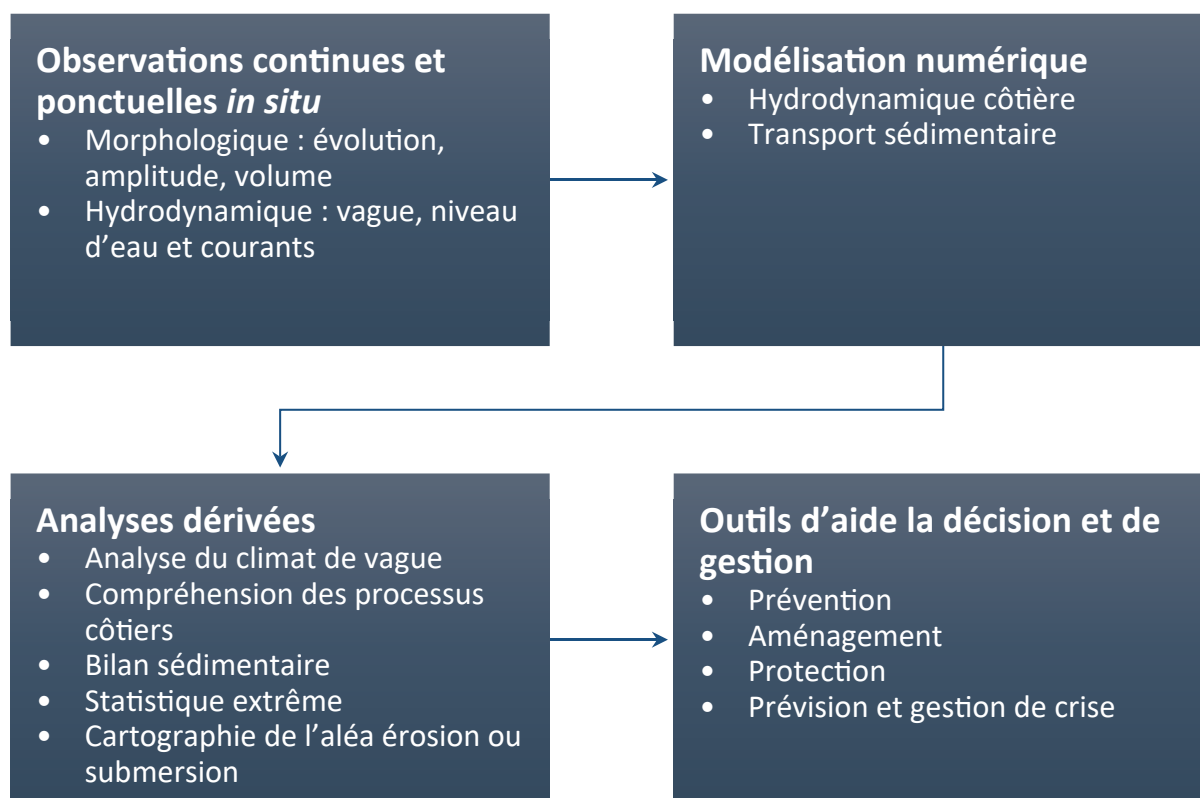


Figure 10 : Principaux outils d'analyses du fonctionnement du système côtier pour la mise en œuvre de stratégies de gestion

SUIVI CÔTIER

Plusieurs types d'observations peuvent être employées afin de collecter des données sur l'évolution du littoral de manière ponctuelle ou en continue. Elles peuvent varier selon l'échelle d'observation, la précision, la fréquence d'acquisition,

la technicité et le coût de mise en œuvre. Il s'agit généralement de données topographiques, morphologiques ou hydrodynamiques associées à des indicateurs d'évolution du littoral (trait de côte, profil de plage, modèle numérique de terrain, paramètres d'exposition aux conditions hydrodynamiques) (Figure 11).

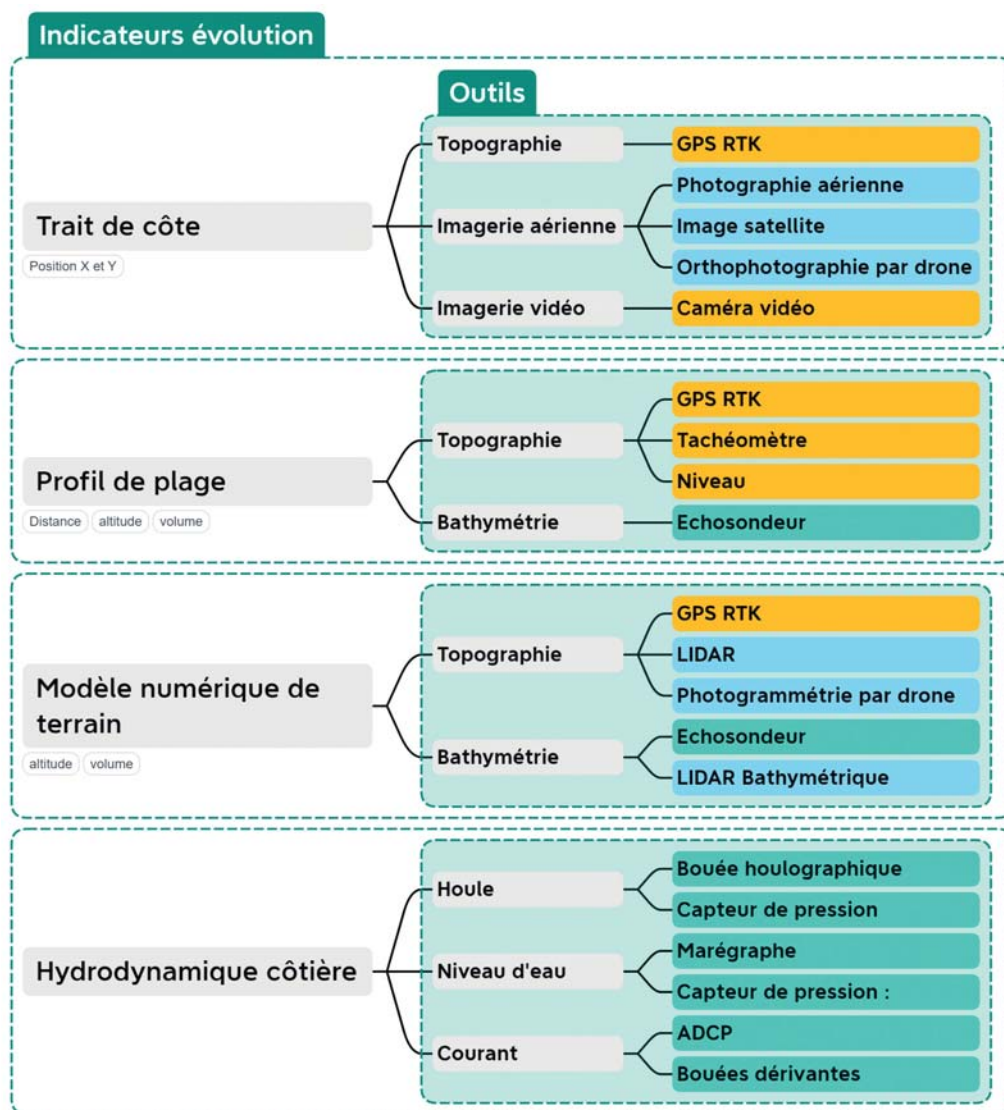


Figure 11 : Principaux indicateurs et outils associés aux observations morphologiques et hydrodynamiques côtières

Par exemple, les observations indirectes issues de l'imagerie aérienne ou satellite peuvent être utilisées pour analyser des évolutions à l'échelle régionale et sur de longue période d'observation (pluri-décennale). Elles peuvent par contre représenter des limites de précisions pour analyser des processus locaux (résolution inférieure au mètre pour les images aériennes et/ou de plusieurs mètres pour les images satellites en libre accès par exemple). La fréquence d'acquisition peut également présenter une limite pour analyser la variabilité à l'échelle de la saison ou les impacts associés aux événements (pluriannuelle pour les images aériennes ou mensuelles pour certains satellites).

D'autres types d'observations directes plus précises (de l'ordre du mètre ou du décimètre) peuvent être employés à l'échelle de la cellule sédimentaire dans le cadre de la mise en œuvre de programmes de suivis réguliers. Ces suivis permettent généralement de mieux caractériser l'évolution des stocks sédimentaires à partir de données collectées sur le terrain (profil de plage, position du trait de côte et modèle numérique de terrain). Il s'agit généralement de mesures topographiques terrestres, d'imagerie vidéo ou de suivi aérien par drone. Ces mesures terrestres peuvent être complétées par des mesures bathymétriques afin de suivre l'évolution de l'avant-côte et analyser les échanges sédimentaires avec le compartiment terrestre.

EXEMPLE DU PROGRAMME NATIONAL DE SUIVI DES PLAGES DE LA TRINITÉ

En 1995, l'Institut des affaires maritimes de la Trinité et Tobago a lancé un programme national de surveillance du littoral afin d'améliorer les connaissances sur l'évolution du littoral et fournir des éléments d'aide à la décision pour une gestion durable des zones côtières. Ainsi 25 plages sont suivies à la Trinité et comprennent un total de 64 stations de profil topographique de plage (Figure 12). Les analyses réalisées concernent la dynamique des plages en termes d'évolution de la largeur et de volume mais aussi les caractéristiques des sédiments.

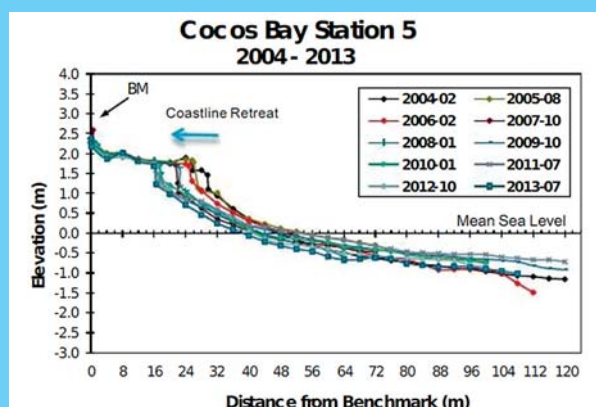
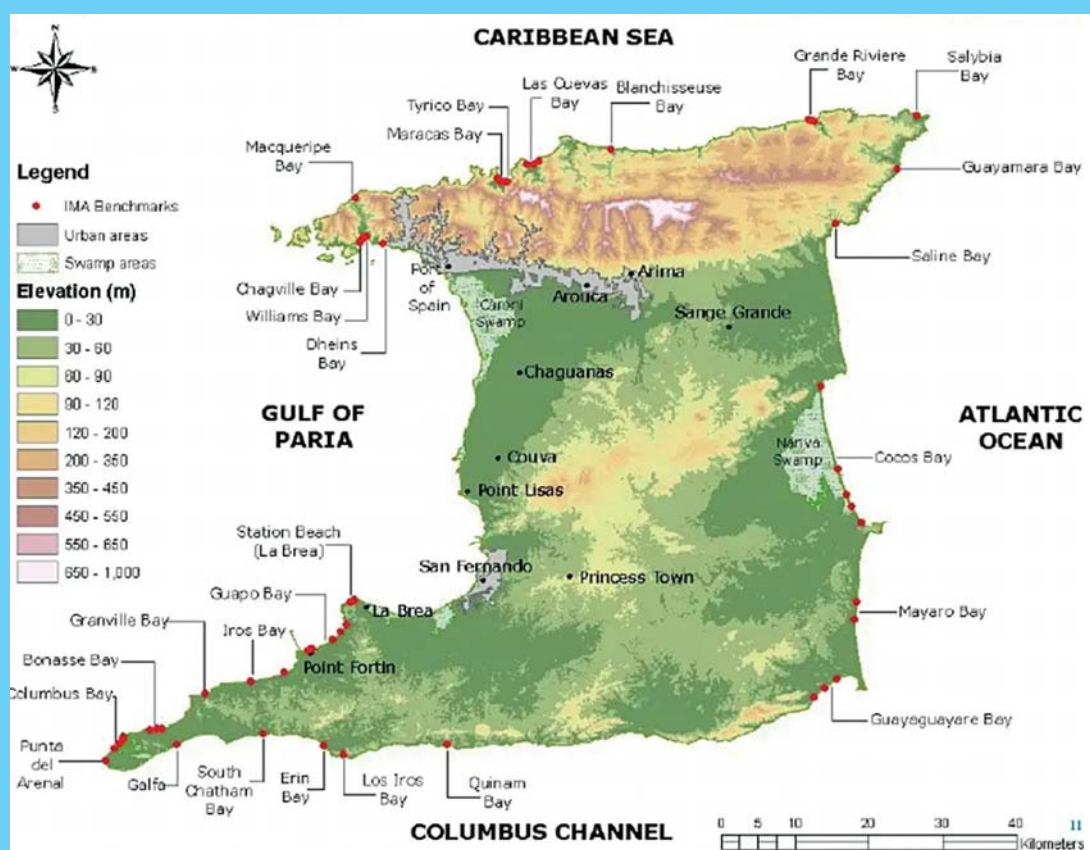


Figure 12 : Cartographie des sites étudiés dans le cadre programme national de suivi des plages de la Trinité et profil de plages associées (Source : Institut of Marine Affairs)

Les résultats indiquent que la plupart des plages de la Trinité se situent dans un état d'équilibre dynamique où les évolutions saisonnières d'érosion et d'accrétion tournent autour d'un état de stabilité sur la période d'observation. Il est observé que si les plages de la côte nord sont moins sujettes à l'érosion, des taux d'érosion élevés dans des secteurs situés à l'est, au sud et à l'ouest, ont incité à la construction d'ouvrages de protection. Alors que ces structures de protection semblent efficaces sur la côte ouest abritée de l'île, sur la côte est plus exposée à la houle, ces structures sont moins efficaces.

Les résultats de ce programme de suivi mettent en avant les enjeux associés à une approche sur mesure pour la gestion et la protection du littoral face au phénomène d'érosion. Cela nécessite une collecte continue de données sur le long terme afin de mieux comprendre les processus côtiers et d'apporter des éléments d'aide à la décision nécessaire à la mise en place d'une stratégie de gestion et d'adaptation des zones côtières exposées.

En complément des suivis morphologiques, les données d'observations hydrodynamiques représentent plusieurs intérêts. Elles permettent de caractériser les conditions d'exposition d'un site (niveau d'eau, houle et courants), caler et valider les modélisations numériques et alimenter des systèmes de

prévisions et d'alerte. Ces mesures peuvent être réalisées de manière ponctuelle et temporaire à l'aide de capteurs installés dans la zone côtière (capteur de pression et courantomètre), ou bien de manière permanente (bouée houllographe ou marégraphe par exemple) (Figure 13).

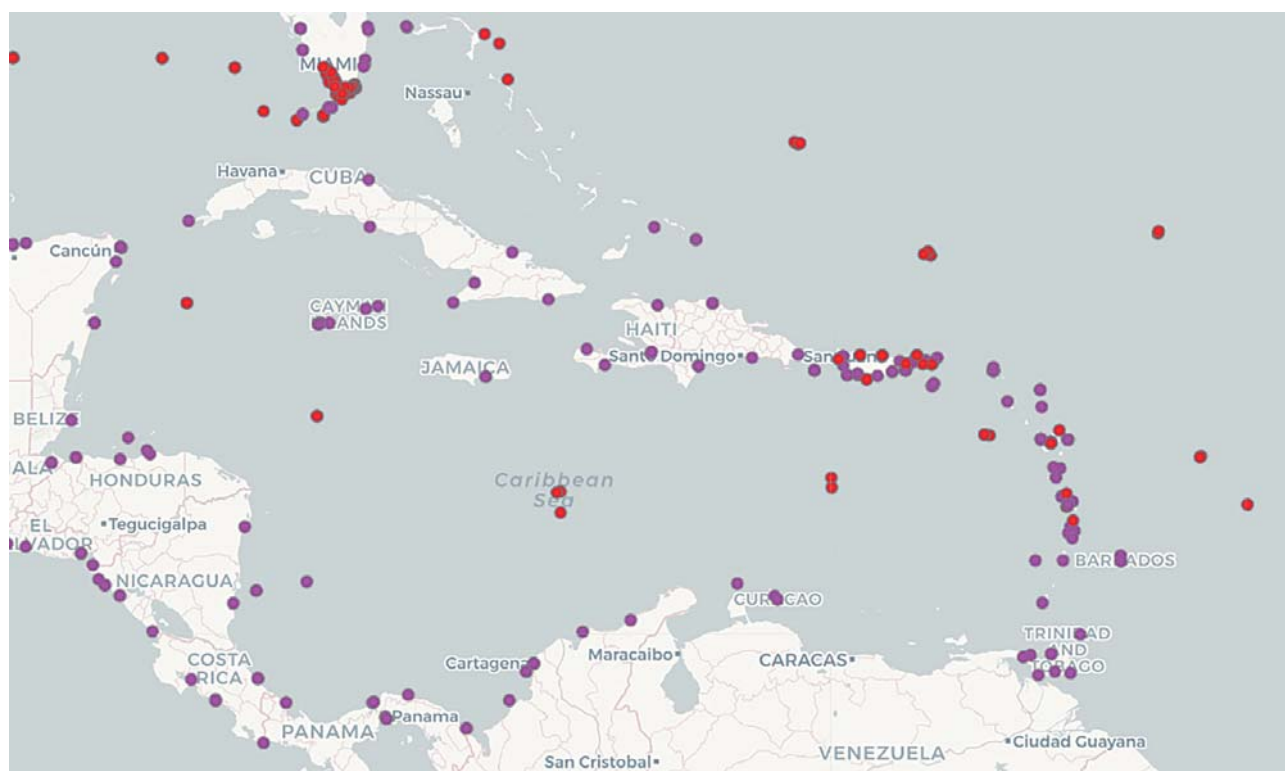


Figure 13 : Localisation des dispositifs de mesures en continu de la houle et des niveaux d'eau dans la région Caraïbe d'après les données de la plate-forme EMODnet (<https://map.emodnet-physics.eu/>). Les points violets représentent les marégraphe et les points rouges les bouées houllographiques

MODÉLISATION CÔTIÈRE

Les modèles numériques peuvent également être utilisés en compléments des observations *in situ*. Les observations servent à la fois à alimenter les modèles mais également à les calibrer et les valider. Les modèles peuvent être mis en œuvre pour des applications diverses : simulation de scénario d'aménagement et impacts associés, cartographie des aléas, évaluation de l'impact du changement climatique, systèmes de prévision, etc. Ils peuvent permettre de simuler une variété de conditions (usuelles, extrêmes et projections futures) à différentes échelles (locale, régionale ou globale). Ils sont particulièrement utiles pour améliorer la compréhension des processus pour des situations complexes. Cependant, il ne faut pas oublier qu'il s'agit d'une représentation simplifiée de la réalité et que

chaque code de calcul s'applique dans un certain domaine de validation et reste limité par la qualité des données disponibles.

La modélisation numérique est particulièrement utile pour la cartographie de l'aléa de submersion marine. Elle permet de prendre en compte des processus hydrodynamiques complexes faisant intervenir les vagues et le niveau d'eau en zone côtière dans des situations extrêmes pour simuler les surcotes, les franchissements et les submersions associées. Les analyses statistiques sur les événements extrêmes permettent notamment de définir des scénarios de conditions d'exposition probabilistes avec des périodes retour associées pour la modélisation et la cartographie des aléas (intensité et emprise).

EXEMPLE DU RÉSEAU DE SURVEILLANCE DES TEMPÊTES ET DE LEURS IMPACTS EN GUADELOUPE ET EN MARTINIQUE

Dans le cadre du projet CARIB-COAST, un réseau de surveillance des tempêtes et de leurs impacts a été développé en Guadeloupe et en Martinique afin de recueillir et capitaliser les informations relatives aux événements extrêmes.

Le réseau s'appuie sur les prévisions météo-marines issues de modèles. Plusieurs seuils d'impacts potentiels ont été déterminés à partir de l'analyse des conditions hydrodynamiques et des impacts historiques observés sur le littoral. Lorsqu'un événement prévisible dépasse un seuil d'impact potentiel, un bulletin est généré automatiquement pour informer et mobiliser un réseau de partenaires afin de collecter des informations qualitatives et quantitatives sur le terrain (érosion, submersion et dommages éventuels) (Figure 14).

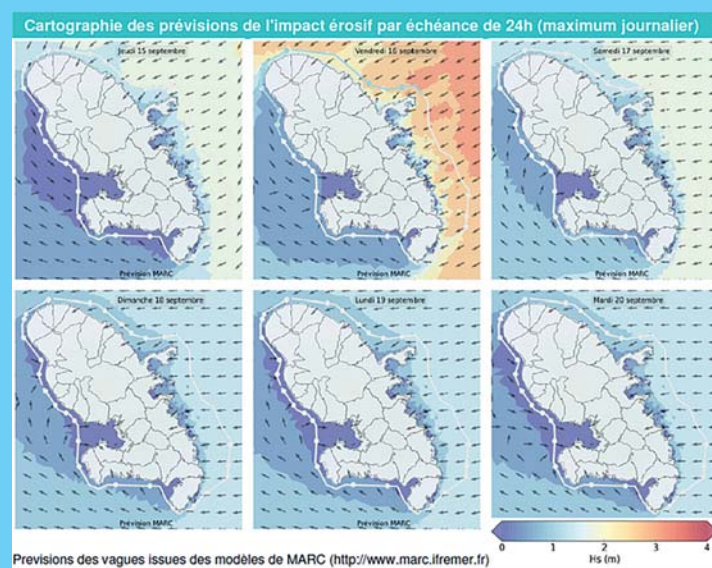


Figure 14 : Extrait du bulletin du réseau tempête en Martinique

Ces observations peuvent être complétées par un réseau de caméras autonomes à bas coût déployé sur le littoral de la Guadeloupe et de la Martinique. Ces observations permettent de réaliser des observations hautes fréquences (toutes les heures par exemple) pour analyser les impacts morphologiques sur les plages étudiées (Figure 15).

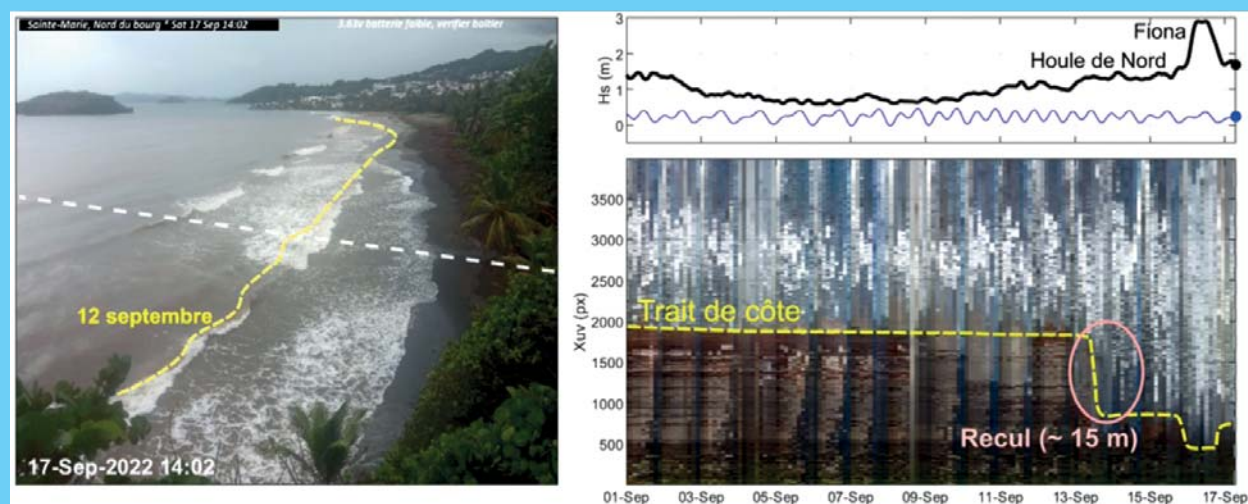


Figure 15 : Observation par caméra autonome réalisée avant et après le passage de la tempête tropicale FIONA le 16 septembre 2022 sur le site de Sainte-Marie en Martinique

À terme, il s'agit d'homogénéiser et mutualiser les observations sur les impacts associés aux tempêtes, capitaliser les informations et améliorer la compréhension des processus côtiers associés aux phénomènes extrêmes. Ce type de réseau peut également faire intervenir le public dans le cadre d'une démarche de science participative pour collecter des informations sur le terrain. Ces informations sont particulièrement utiles pour mieux comprendre l'exposition du territoire aux risques côtiers, améliorer les dispositifs de prévisions et accompagner les autorités pour mettre en place des stratégies de gestion.



Gestion des risques côtiers

Le changement climatique à travers l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de l'intensité des événements extrêmes et la fragilisation des écosystèmes côtiers contribuera à accroître l'exposition des populations aux aléas côtiers dans une région déjà vulnérable. Afin de se prémunir des conséquences des aléas côtiers, des actions d'adaptation peuvent être mises en œuvre à différentes échelles pour préserver les vies humaines, réduire le coût des dommages et le temps de retour à la normale. Parmi ces actions on peut distinguer deux grandes catégories.

La première catégorie fait intervenir des **actions visant à réduire l'exposition à l'aléa**. Il peut s'agir d'**actions structurelles** qui reposent sur la réalisation d'ouvrages de protection ou bien de **solutions basées sur la nature** (SFN) qui s'appuient sur les caractéristiques des écosystèmes naturels afin de renforcer la protection des zones côtières.

La seconde catégorie fait intervenir des **actions non**

structurelles qui visent à agir sur les enjeux afin de réduire leur vulnérabilité et leur exposition.

Il peut s'agir des mesures de **prévention** à travers l'information de la population pour développer la conscience du risque et diffuser les consignes de comportements. Il existe également des mesures en lien avec l'**aménagement du territoire** afin de limiter le développement de nouveaux enjeux dans les secteurs exposés à travers la réglementation de l'urbanisme pouvant aller jusqu'à la relocalisation des enjeux existants en dehors des zones exposées.

Les **mesures d'adaptation** visent à réduire la vulnérabilité des enjeux situés dans les zones à risque pour renforcer la sécurité des personnes, réduire les dommages et le temps de retour à la normale (surélévation du bâti et des équipements sensibles par exemple). Enfin, les actions non structurelles regroupent **les dispositifs de prévision et les mesures organisationnelles de sauvegarde de la population** (prévision, alerte, sauvegarde et plan de retour à la normale) (Figure 16).

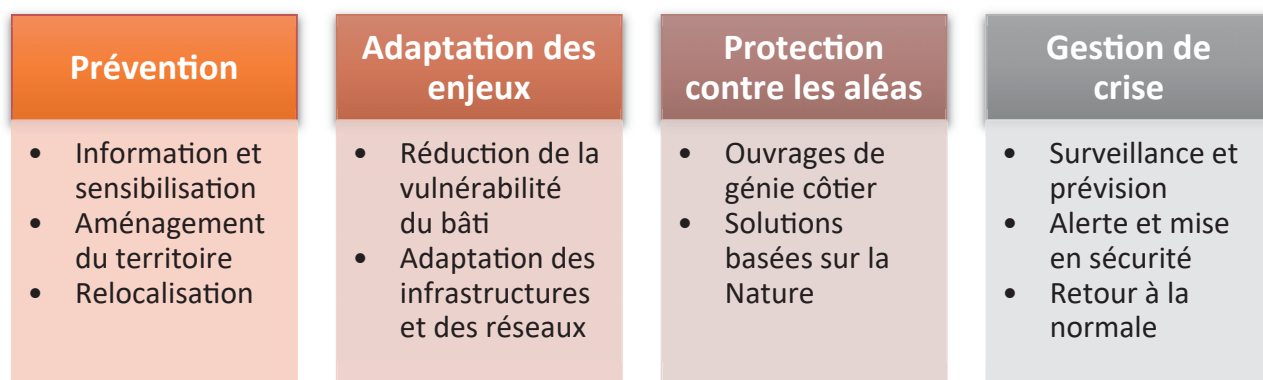


Figure 16 : Typologie des actions visant à réduire l'exposition aux risques côtiers

Ces actions de gestion peuvent être également classées selon plusieurs degrés d'intervention (Figure 17). Le premier niveau consiste à ne pas intervenir si les enjeux ne le justifient pas. Il s'agit ensuite des actions non structurelles de prévention et organisationnelles (réglementation de l'occupation des sols, système d'alerte et de sauvegarde de la

population par exemple). Les mesures intervenant sur les enjeux visant à réduire leur vulnérabilité en les adaptant ou par leur relocalisation en dehors des zones à risque. Les mesures de protection visant à réduire l'exposition aux aléas à travers les solutions basées sur la nature et les ouvrages de protection. Chacune de ces options d'interventions peuvent se



Figure 17 : Degrés des options de gestion des risques côtiers

combiner à différentes échelles spatiales et temporelles pour améliorer l'efficacité de la gestion des risques sur un territoire.

En effet, l'ensemble de ces actions peuvent être mises en œuvre à travers une stratégie visant à développer une approche globale de la gestion des risques côtiers. Le GIEC présente 6 types de stratégies d'adaptation pour les zones basses côtières :

l'inaction; les ouvrages de protection; l'adaptation des enjeux; la relocalisation; l'avancée sur la mer ou l'élévation des terres et les solutions basées sur la nature (Figure 18). Le choix de la stratégie doit reposer sur une analyse de l'aléa, une évaluation du niveau d'exposition des enjeux dans leur globalité ainsi que d'une analyse des contraintes et avantages que représentent chacune de ces options pour le territoire concerné.

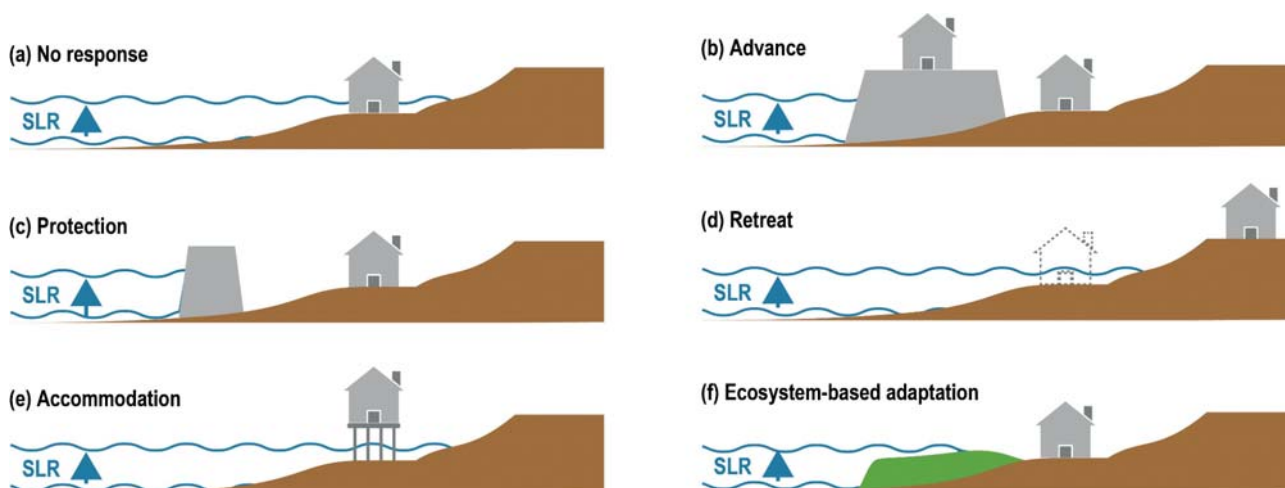


Figure 18 : Typologie des différents types de stratégies d'adaptation possible en réponse à l'exposition aux risques côtiers et à l'élévation du niveau de la mer (IPCC, 2019)

La sélection des stratégies et leur temporalité de mise en œuvre doit être étudiée dans leur globalité par des analyses multicritères faisant intervenir l'ensemble des enjeux humains, économiques, techniques, environnementaux, socio-économiques et culturels.

Des stratégies hybrides peuvent être mise en œuvre faisant intervenir une ou plusieurs options de gestion. Les stratégies sont également susceptibles d'évoluer dans le temps dans le cadre de ce que l'on appelle des chemins d'adaptation. C'est-à-dire

qu'une stratégie peut être considérée comme soutenable jusqu'à une certaine échéance à partir de laquelle d'autres types de stratégie peuvent être mises en œuvre. Par exemple, on peut considérer qu'un ouvrage de protection est efficace dans des conditions actuelles mais que pour des raisons de modification des conditions associées à l'élévation du niveau de la mer, il sera préférable de procéder à une relocalisation des enjeux exposés. Cela peut permettre de gagner du temps pour organiser la relocalisation sur le long terme.

EXEMPLE DU RÉSEAU DE SURVEILLANCE DES TEMPÊTES ET DE LEURS IMPACTS EN GUADELOUPE ET EN MARTINIQUE

La mise en place de structures mixtes alliant des techniques d'ingénierie lourde à des techniques de génie écologique basées sur le végétal sont susceptibles de constituer des alternatives crédibles à des projets de développement initialement envisagés uniquement sous une version minérale.

Ainsi, les palétuviers plantés dans la baie de Kingston en Jamaïque sont associés à des protections rocheuses et en fibre végétale qui permettent l'atténuation de l'énergie des vagues le temps que les palétuviers croissent suffisamment et assurent ce rôle (Figure 19).



Figure 19 : Plantation de palétuviers rouges (*Rhizophora mangle*) dans la baie de Kingston (Source : Adam Gibaud (ONF), 10/10/2019)

Les principales étapes recommandées pour l'élaboration et la mise en œuvre d'une stratégie de gestion sont représentées dans le graphique suivant et

détaillé ci-après dans le cadre d'un processus itératif (Figure 20).

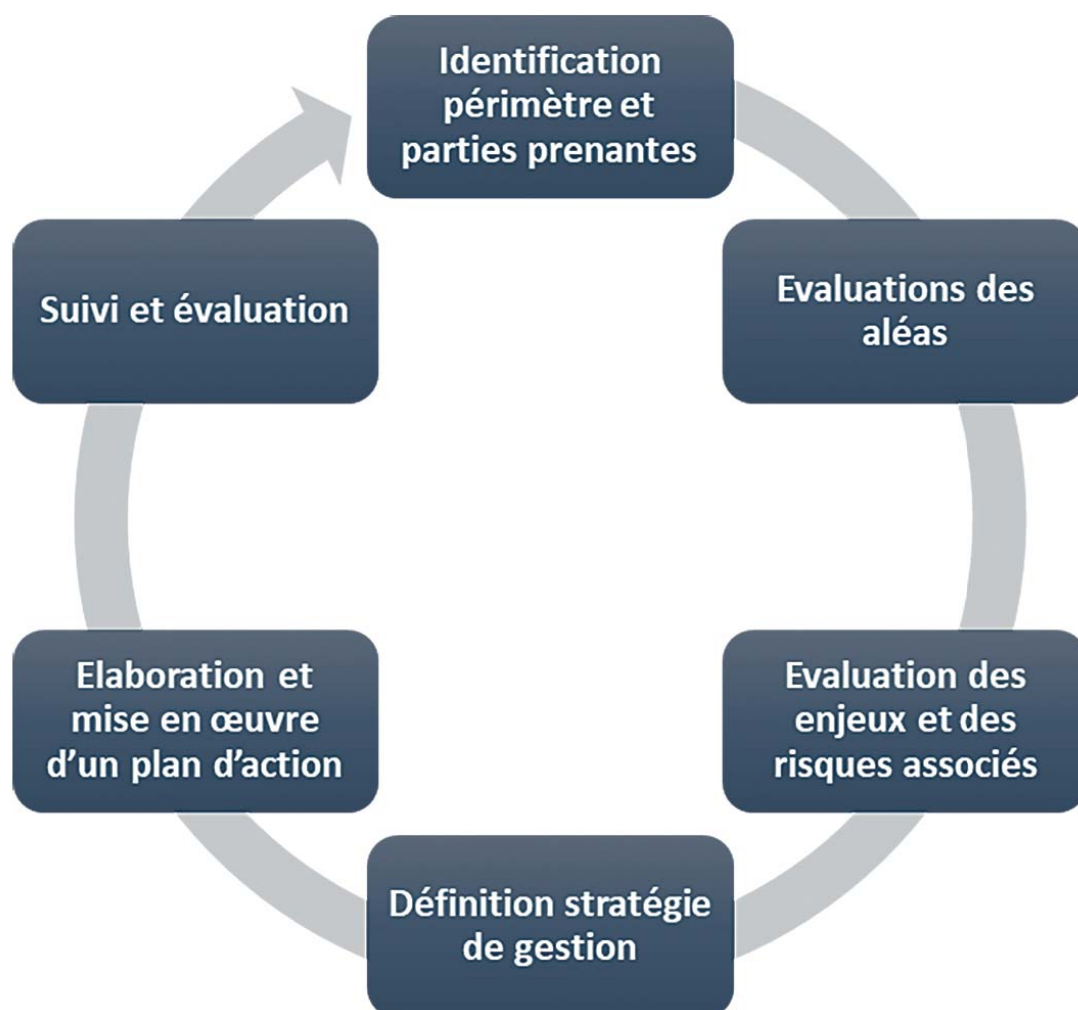


Figure 20 : Schéma conceptuel présentant les phases générique intervenants dans l'élaboration d'une stratégie de gestion des risques côtiers et d'adaptation aux effets du changement climatique

1

2

3

Identification du périmètre d'intervention, des parties prenantes associés et des données disponibles

- Définition de la portée et des objectifs de la stratégie
- Délimitation de périmètre d'intervention de la stratégie
- Identification des parties prenantes
- Recueillir l'accord et l'engagement des parties prenantes
- Définir une gouvernance pour les associer dans le processus d'élaboration
- Recueillir les informations et les besoins de chaque partie prenante
- Organiser la collecte des données, réaliser un bilan des connaissances et évaluer les besoins pour améliorer les connaissances.

Evaluation des aléas

- Analyse des processus côtiers
- Définition des scénarios
- Caractérisation des aléas
- Evaluation de l'exposition actuelle et future en lien avec le changement climatique
- Évaluation des dispositifs actuels de protection et de leurs impacts éventuels
- Analyse et cartographie de l'aléa et des projections futures associées.

Evaluation des enjeux et des risques associés

- Identifier les enjeux humains (construction, activités, infrastructures, réseaux) et naturels exposés à l'aléa
- Qualifier l'importance des enjeux (patrimoniaux et culturels/sociaux, économiques/ environnementaux)
- Déterminer le niveau d'exposition des enjeux et les conséquences associées
- Évaluer les impacts pour le territoire afin de justifier les actions de gestion du risque.

4

Définition d'une stratégie de gestion

- Définir une méthode de concertation et de consultation afin de recueillir l'adhésion et l'avis de l'ensemble des parties prenantes
- Segmenter le périmètre par bassin de risque
- Définir des objectifs de gestion par bassin de risque
- Examiner la faisabilité des différentes alternatives de gestion
- Analyser l'efficacité et les contraintes des options de gestion par rapport aux objectifs recherchés (analyse coûts bénéfice ou multicritères)
- Sélectionner les options les plus adaptées au contexte
- Échelonner les options de gestion dans le temps le cas échéant pour tenir compte des adaptations possible en fonction des contraintes de mises en œuvre ou de l'évolution d'exposition au risque.

5

Elaboration et mise en œuvre du plan d'action

- Définir les actions nécessaires à la mise en place des options de gestion sélectionnées
- Identifier un ou plusieurs responsables par actions et les parties prenantes associés
- Estimer le coût de chaque action et établir un plan de financement
- Prioriser les actions et définir un calendrier
- Établir les modalités de mise en œuvre
- Identifier les actions nécessaires pour résoudre les incertitudes identifiées
- Organiser la communication autour de la stratégie et des actions
- Réaliser les études opérationnelles et les travaux le cas échéant pour les actions structurelles

6

Suivi et évaluation du plan

- Identifier les critères d'évaluation des actions de gestion
- Assurer un suivi adapté sur le long terme sur le périmètre du site afin d'évaluer l'efficacité des actions, surveiller les impacts potentiels associés et améliorer les connaissances sur les processus côtiers
- Le cas échéant adapter la stratégie et le plan d'action selon les évolutions observées et les changements d'orientations stratégiques.

EXEMPLE DU PROGRAMME D'ÉVALUATION ET DE GESTION DES RISQUES CÔTIERS DE LA BARBADE

Le programme d'évaluation et de gestion des risques côtiers de la Barbade repose sur des investigations menées à l'échelle de l'île pour quantifier les risques côtiers, identifier les écosystèmes, les infrastructures vulnérables et développer des stratégies de gestion pour améliorer la résilience de l'île au changement climatique et aux risques côtiers. L'objectif principal est de renforcer les capacités en termes de gestion intégrée des zones côtières à la Barbade en intégrant des principes de réduction du risque et d'adaptation au changement climatique dans le processus de planification et de développement (Figure 21).

Ce programme s'appuie notamment sur plusieurs composantes :

- Le renforcement des connaissances à travers l'acquisition de données topo-bathymétrique LIDAR dans les zones côtières, des modélisations hydrodynamiques et hydrosédimentaires, des investigations géotechniques sur les falaises, des études sur l'évolution du trait de côte.
- Des études d'évaluation du risque avec la cartographie des aléas et une évaluation de la vulnérabilité des enjeux.
- Le développement d'une plate-forme nationale d'information et de planification sur les risques côtiers, comprenant une base de données sur les aléas, les enjeux et les risques.
- Des outils d'aide à la décision et de communication pour les autorités.
- Des études de conception d'infrastructures pour plusieurs projets pilotes de protections et de solutions d'adaptation basées sur la nature.
- Des actions visant à renforcer les politiques publiques en matières de gestion des risques côtiers à travers, des plans de sensibilisation et de formation pour les autorités, la mise à jour du plan de gestion intégrée des zones côtières, évolution de la réglementation en matière de gestion des zones côtières et préparation d'un plan d'action stratégique pour la gestion de crise et l'adaptation au changement climatique.



Figure 21 : Extrait de la mise à jour du plan de gestion intégrée des zones côtières de la Barbade en lien avec l'exposition aux risques côtiers



Solutions fondées sur la Nature d'atténuation des risques littoraux

Les Solutions Fondées sur la Nature (SFN) sont définies par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) comme *“les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité”*.

Elles s'appuient sur la capacité naturelle pour des écosystèmes en bon état à fournir des services écosystémiques, comme la protection face aux risques naturels. A ce titre, les écosystèmes côtiers présents dans la Caraïbe (récifs coralliens, herbiers, mangrove et cordon littoraux) représentent une protection naturelle pour atténuer les impacts des événements extrêmes sur le littoral.

Parmi les actions de protection ou d'atténuation des aléas côtiers, les SFN présentent plusieurs avantages par rapport à l'emploi de solutions structurales classiques généralement employées pour se prémunir de ces aléas (digue, enrochement, mur verticaux, épis transversaux et brises lames).

En effet, au-delà de la fonction de protection du littoral offertes par ces écosystèmes, la mise œuvre des SFN présentent généralement des co-bénéfices d'un point de vue environnemental, économique et social à travers la fourniture d'une série de services écosystémiques. Par ailleurs, ces solutions bénéficient également d'une capacité de résilience et de régénération naturelle face aux dégradations potentielles si les conditions du milieu le permettent. Ces écosystèmes sont en effet capables de s'adapter aux évolutions du milieu. Enfin, le coût de mise en œuvre et d'entretien de ce type de solutions est bien souvent inférieur à celui des ouvrages côtiers sur le long terme. En effet, les écosystèmes ont une certaine capacité de résilience face à des facteurs de stress ou de dégradation. Si les conditions le permettent, ils peuvent se régénérer naturellement, totalement ou en partie.

Cependant, la mise en œuvre des SFN nécessite du temps pour être efficace. Il faut généralement attendre plusieurs années ou décennies avant de pouvoir bénéficier d'une capacité de protection effective. Par ailleurs, ces écosystèmes, pour pouvoir se développer et s'adapter aux modifications de leur environnement, doivent disposer d'une surface suffisante, malheureusement souvent contrainte par les pressions naturelles comme anthropiques : l'intervention sur ces milieux peut être rendue impossible faute d'espace disponible. Enfin, ces écosystèmes sont généralement soumis à de multiples pressions qui peuvent affecter leur développement, il est ainsi nécessaire d'assurer un entretien et un suivi régulier.

SERVICES DE PROTECTION OFFERTS PAR LES ÉCOSYSTÈMES CÔTIERS

Ainsi, toutes les démarches en faveur de la préservation et de la restauration de ces écosystèmes sont donc favorables à l'atténuation des impacts des aléas côtiers et l'adaptation aux effets du changement climatique dans les zones côtières de la Caraïbe. En effet, la présence de ces écosystèmes côtiers joue un rôle de protection à travers plusieurs mécanismes physiques.

L'atténuation de l'impact des vagues

La présence de ces environnements, lorsque l'écoulement interagit avec la rugosité induite par la présence de ces écosystèmes, contribue à dissiper l'énergie des vagues dans la zone côtière. L'importance de la dissipation dépend des conditions de vague incidente, de la morphologie, de flexibilité des espèces, de la densité de l'habitat ainsi que de la continuité de sa couverture.

Par exemple, de par leur configuration, les formations récifales dissipent fortement l'énergie des vagues incidentes (jusqu'à 97 %). En effet, là où les récifs sont présents, les vagues déferlent au large avant d'atteindre la côte. L'efficacité de la dissipation par déferlement dépend de la localisation du

récif par rapport aux vagues incidentes et de sa profondeur relative par rapport à la surface.

L'atténuation des phénomènes de submersion marine

Il est également admis que certains écosystèmes comme les mangroves jouent un rôle pour limiter l'intensité des phénomènes de submersion en réduisant le niveau d'eau et en ralentissant l'écoulement associé en condition extrême. En effet, les forces de traînée exercées sur les écoulements de par la présence de ces écosystèmes tend à abaisser le niveau d'eau avec un gradient décroissant vers la terre. La présence de mangroves contribue ainsi à diminuer l'impact des phénomènes de submersion marine.

Les cordons littoraux, qui se situent en surélévation par rapport au sol, représentent également une barrière physique de protection naturelle contre les phénomènes de submersion. La végétation présente sur ces cordons littoraux joue également un rôle pour ralentir les écoulements et dissiper l'énergie des vagues incidentes.

Réduction de l'érosion et maintien de sédiment

Au-delà du rôle des écosystèmes sur l'action des vagues et du contrôle du niveau d'eau dans la zone côtière, les écosystèmes participent également à la stabilisation du littoral. En effet, en interagissant avec les écoulements de surface, ils réduisent l'impact de l'érosion littorale et favorisent l'accumulation des sédiments. Le système racinaire développé par certaines espèces permet aussi de maintenir les sédiments en place.

Par exemple, le système racinaire des herbiers de phanérogame marine contribue à maintenir les sédiments dans les zones peu profondes et favorise leur accumulation en interagissant avec les courants sur le fond. Par ailleurs, les organismes qui disposent d'un squelette en carbonate de calcium comme les coraux représentent une des principales sources de sédiment dans certaines zones côtières de la région et participent à la formation des plages sableuses sur le long terme.

I RÔLES ET SERVICES DES ÉCOSYSTÈMES CÔTIERS DE LA CARAÏBE

Plages et dunes côtières

Les plages, associées ou non à des formations dunaires, offrent une protection contre le franchissement des vagues et la submersion. Le niveau de protection contre l'érosion est estimé à partir du

stock sédimentaire disponible dans la partie active de la plage. Il s'agit du volume de sable qui peut être mobilisé en réponse à un ou une série d'événements rapprochés dans le temps. Le niveau de protection contre les submersions est généralement associé à la morphologie (élévation et la largeur) et la présence de végétation en haut de plage.

Les dunes associées aux plages sableuses représentent des accumulations sableuses situées en haut de plage issue du transport des sédiments par le vent. Elles se développent uniquement dans les secteurs où les volumes de sédiments sableux sont importants d'une part et pour des conditions où le régime des vents est suffisant en intensité et en fréquence pour assurer le transport du sable sur le haut de plage d'autre part. Le rôle de la végétation est également primordial pour piéger et retenir le sable. D'un point de vue morphologique, ces formations sédimentaires d'accumulation se situent en surélévation par rapport au niveau du terrain naturel et représentent une barrière physique particulièrement efficace contre les submersions. Cependant la présence d'aménagement sur le haut de plage ou l'arrière-plage contraint généralement leur développement. Le stock sédimentaire des dunes constitue également une source d'alimentation de sédiments pour accompagner la reconstitution naturelle des plages en cas d'érosion.

L'action la plus répandue pour renforcer la capacité de protection naturelle des cordons littoraux et des dunes consiste à réaliser des rechargements de plage. Il s'agit, selon les objectifs de protection, d'augmenter la largeur ou l'élévation du cordon par apport artificiel de sédiments à partir d'un site "donneur". Les sédiments apportés doivent cependant être compatibles en termes de granulométrie, nature et de qualité par rapport aux caractéristiques des sédiments du secteur à recharger. Dans certains cas, il s'agit simplement d'un transfert de sédiments d'une partie vers une autre d'une même plage afin de réaliser un rééquilibrage ou bien à partir d'une alimentation par des prélèvements externes (sédiments de dragage pour l'entretien des chenaux et des ports ou bien dépôts de sables marins présents au large situés en dehors de la partie actives par exemple). Les facteurs à prendre en compte dans les projets de rechargement sont l'identification des zones de prélèvements, le volume et la nature du sable, les modalités de dépôts, l'entretien et le suivi sur le long terme. Généralement, la géométrie des projets de rechargement vise à retrouver un profil

naturel d'équilibre adapté aux conditions hydrodynamiques et la nature des sédiments.

Le reprofilage de plage est une autre technique qui consiste à transférer mécaniquement une partie des sédiments présents sur le bas de plage vers le haut de plage pour imiter les processus naturels de reconstitution sédimentaire par temps calme et modifier le profil d'une plage. Cette technique est généralement employée pour protéger des infrastructures présentes en arrière-plage. Cependant, elle ne paraît pas adaptée pour des sites en situation d'érosion chronique ou disposant d'un volume sédimentaire limité. Bien qu'il s'agisse d'une solution peu coûteuse, des études préalables permettant d'analyser le fonctionnement hydro-sédimentaire sont nécessaires afin d'identifier les volumes mobilisables, la périodicité et la géométrie du reprofilage.

La végétation joue également un rôle primordial dans la formation et le maintien des dunes littorales. Les espèces végétales qui se développent sur les cordons littoraux permettent de piéger le sable transporté par le vent, favorise son accumulation et le développement des formations dunaires sur le long terme. Elle permet également de maintenir le stock sédimentaire en place et favorise ainsi la stabilité du trait de côte. Les racines maintiennent la cohésion du sol. Les structures aériennes des plantes (tiges et feuilles) atténuent l'énergie des vagues et ralentissent l'écoulement, ce qui a pour effet de réduire les phénomènes de franchissement et favorise le maintien des sédiments en cas d'événement extrême.

Les actions visant à restaurer la végétation de haut de plage favorisent le développement et la stabilité des cordons littoraux. Elles peuvent intervenir sur les pressions, en régulant les usages, à travers la canalisation de la fréquentation par exemple avec l'installation de barrières ou d'enclos de protection. D'autres actions visent à restaurer des espaces pour la dynamique naturelle des cordons, en déplaçant des routes ou des parkings par exemple. Ces mesures, qui concourent à diminuer les pressions exercées sur le milieu mais sans intervention humaine sur la dynamique de végétation, sont des actions de restauration écologique passive. Le simple fait de réduire la pression anthropique exercée sur le milieu par la mise en place d'un enclos de protection (piétinement du sol, passage de véhicules) engendre une diminution du tassement du

sol favorable à la germination des graines et au développement de plantules (porosité du sol, flux d'air et d'eau sous-terrain) et assure une protection à des plantules qui pourraient être cassées ou arrachées dans le cas contraire. Il en résulte une recolonisation progressive des espèces végétales.

Pour les sites les plus dégradés ou pour accélérer la régénération du milieu, des actions de restauration active peuvent également être mises en œuvre afin de retrouver une couverture végétale avec des espèces appropriées au milieu. Le choix des essences à planter doit être effectué en privilégiant les espèces locales au fort ancrage racinaire (dans une optique de maintien du stock sableux) et non envahissantes. À ce propos, la lutte contre les espèces envahissantes pour favoriser le développement d'espèces natives, offrant un service de protection plus adapté, est également une piste à étudier selon le contexte.

Enfin, une dernière catégorie d'action repose sur des techniques de génie végétal comme l'installation de brises vent ou ganivelles, pour favoriser le piégeage des sédiments et leur accumulation en haut de plage. Ce type d'action est uniquement adapté pour les environnements dunaires où le transport du sable par le vent est le principal facteur à l'origine des accumulations sédimentaires littorales. De la même façon, les fascines végétales sont des éléments de protection des hauts de plage exposés à la houle. Elles sont constituées de fagots de matériel végétal ligaturé ou de gaulettes tressées maintenus en place par des pieux ancrés verticalement dans le sol. Le treillis formé par le matériel végétal constitue un piège à sédiments à même de reconstituer un cordon sableux. Ces techniques peuvent être employées en complément des solutions s'attachant à restaurer la couverture végétale sur les plages dégradées, la végétation jouant le même rôle que les brises vent ou les fascines pour piéger et maintenir les sédiments. Le génie végétal constituerait alors une étape préalable à une action de restauration active ou passive.

DIVERSITÉ VÉGÉTALE ET ATTÉNUATION DES RISQUES CÔTIERS

Plus que la simple présence de végétation en bord de mer, c'est la qualité et la diversité de la barrière végétale qui garantit son efficacité en matière de protection. La structure et la stabilité du sol peuvent être en effet modifiées par l'introduction d'espèces exotiques comme le cocotier (*Cocos nucifera*), originaire d'Asie et d'Océanie et aujourd'hui omniprésent sur les côtes caribéennes. Son système racinaire superficiel et sa faible capacité de résistance aux vents violents n'offrent pas la même capacité de résilience face aux risques côtiers écosystémiques que la végétation indigène, à l'enracinement plus profond (Figure 22).



Figure 22 : Les plantations monospécifiques de cocotiers ne permettent pas le maintien du sable - Pointe Marin, Martinique (source : Adam Gibaud (ONF), novembre 2019)

De plus, un système racinaire complexe et solide est obtenu par l'imbrication de racines de différentes espèces végétales. Ainsi, de manière générale, les espèces herbacées possèdent un système racinaire plus développé en surface, alors que les espèces arbustives ont un système racinaire plus ancré en profondeur. De même, plus les essences et les strates sont diversifiées et plus la forêt littorale d'un site est dense et à même de retenir le sable déplacé par l'action des vents (Figures 23 et 24). Une diversité écologique est par conséquent plus à même de jouer un rôle d'atténuation efficace contre les aléas côtiers. L'efficacité de cet écosystème est également liée à la largeur et la densité de couverture de la végétation de haut de plage.

Les exemples suivants illustrent le rôle de la végétation dans le maintien et l'accumulation des sédiments en haut de plage.



Figure 23 : Morphologie d'accumulation permis par l'ensemble des strates végétales - Plage de Clugny, Guadeloupe (Source : Adam Gibaud (ONF), juillet 2019)



Figure 24 : Maintien du sable par la patate bord-de-mer (*Ipomea pes-caprae*) - Plage de Sainte-Marie, Martinique (Source : Noémie Videau (ONF), octobre 2022)

La présence d'un cordon végétal dense et diversifié constitue un écran de protection naturel efficace par l'atténuation de l'énergie des vagues et de l'énergie éolienne. La végétation de haut de plage limite ainsi les dégâts engendrés en cas de cyclones ou de tsunamis. Un minimum de 30 m de couvert végétal est nécessaire pour jouer le rôle de bouclier en, ce à quoi il faut ajouter une bande permettant de capturer les sédiments en provenance de la mer.

Le choix des techniques de restauration dépend des conditions favorables ou non à la constitution de formation dunaire, de la disponibilité en sédiments, de l'espace disponible et de l'état du milieu naturel.

Il doit reposer sur une analyse fine du fonctionnement hydro-sédimentaire et des processus d'évolution associés (Figure 25).

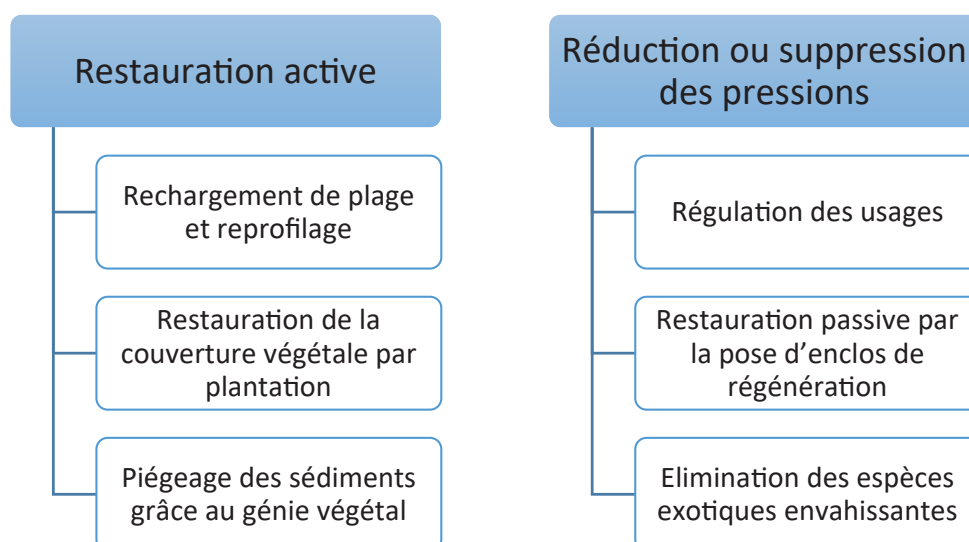


Figure 25 : Synthèse des actions de restauration pouvant améliorer les services de protection des cordons littoraux

SITE PILOTE D'ANSE MAURICE : MISE EN ŒUVRE DE SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE POUR LA VÉGÉTATION DE HAUT-DE-PLAGE

Située sur la façade atlantique Nord de la Guadeloupe, l'Anse Maurice, sur la commune de Petit Canal, est le premier site pilote portant sur les écosystèmes de haut-de-plage installé dans le cadre du projet Carib-Coast. Les actions mises en œuvre sur ce site ont suivi les différentes étapes plébiscitées pour la mise en place des SFN décrites dans ce guide.

1. Diagnostic

La première étape inhérente au choix des sites pilotes du projet est l'identification de l'exposition aux aléas côtiers. Sur Anse Maurice, un recul du trait de côte de 30 m en un peu plus de 60 ans (1950 - 2013) a été constaté. Les causes de cette érosion sont multiples (Figure 26) :

- Une érosion littorale naturelle due à la houle et au vent, accentuée par la situation atlantique du site
- Un vol de sable présumé pendant plusieurs décennies
- Un ramassage mécanique des sargasses ces dix dernières années, qui a accéléré le processus érosif
- Une végétation littorale altérée qui ne remplit plus son rôle protecteur

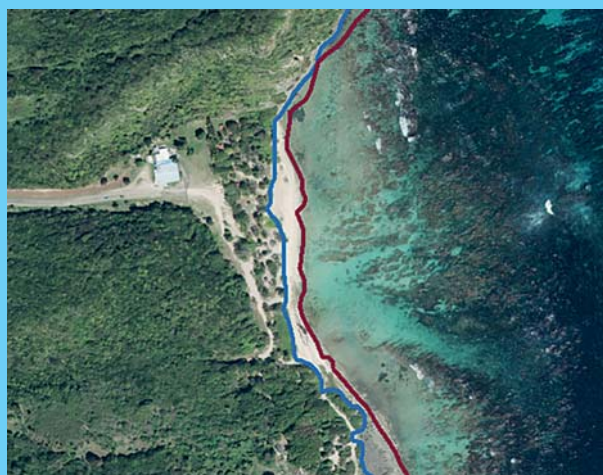


Figure 26 : Entre 1950 et 2013, la limite de végétation a reculé de 30 m (en rouge, trait de côte en 1950; en bleu, trait de côte en 2013)

Plusieurs pressions s'exercent sur cet écosystème qui nécessite donc d'être restauré pour pouvoir remplir son rôle protecteur. Le passage des engins pour le ramassage des sargasses et des voitures les jours de forte affluence ont tassé le sol et laisse le beach rock apparent par endroit (Figure 27). Cette surfréquentation, couplée avec un pâturage de chèvres, impacte les plantules et les jeunes arbres (par la coupe de branches pour faire des feux par exemple) et empêche donc la régénération naturelle de la forêt.

Pour évaluer la pertinence de mettre en place des SFN et choisir les plus adaptées, un inventaire des écosystèmes présents sur site a d'abord été réalisé. On y retrouve un reliquat de forêt littorale typiquement caribéenne : plusieurs espèces clés sont présentes comme le raisinier bord-de-mer, le poirier pays, le catalpa ou encore la patate bord-de-mer pour la strate herbacée. Celle-ci est d'ailleurs inégalement répartie sur la plage, la strate arbustive est absente, et s'il existe une relative diversité dans la strate arborée avec quelques arbres semenciers, elle se caractérise surtout par son absence de régénération naturelle. De nombreux cocotiers sont présents mais ne forment pas de peuplement monospécifique.



Figure 27 : Tassement du sable dû au ramassage des sargasses (Source : Adam Gibaud (ONF); 20/11/2019)

La restauration de cet écosystème passe donc par la réduction de ces pressions, mais avant toute chose, il faut analyser la possibilité d'intervention. Celle-ci est rendue possible par la maîtrise foncière du site, situé en forêt domaniale du littoral et géré par l'ONF. L'espace en arrière-plage est également suffisant pour permettre un développement de la végétation et en faire une barrière efficace.

2. Actions

L'étape de diagnostic a permis de valider la nécessité et la faisabilité de la mise en œuvre de SFN. Avant de débiter les actions concrètes de restauration écologique, une étape de concertation pour réduire les pressions décrites ci-dessus était nécessaire. La commune de Petit-Canal et la communauté d'agglomération ont été bien impliquées dès le début du projet, ce qui a permis d'aboutir à un arrêt du ramassage des sargasses dès 2019. Le propriétaire du restaurant d'arrière-plage a aussi été approché concernant la gestion du pâturage de ses chèvres.

A la suite de cette démarche, plusieurs actions de restauration écologique ont été mises en place en réponse à chaque problématique. Avant de déployer des mesures de restauration active, des actions pour réduire les pressions précédemment décrites ont été réalisées, pour retrouver des conditions environnementales favorables au déploiement de SFN.

Avant toute chose, la pose de 39 blocs en tuf sur le long du parking et du chemin littoral a été réalisée pour empêcher les voitures de pénétrer sur la plage (Figure 28). Un décompactage du sol a été mis en œuvre dans les endroits très tassés pour rétablir un substrat favorable à la reprise du milieu. Un curage du fossé d'évacuation des eaux pluviales a été effectué pour réduire la perte de sédiments par ruissellement (Figure 29).



Figure 28 : Pose de blocs rocheux pour empêcher la circulation des voitures sur la plage (Source : Adam Gibaud (ONF); 22/10/2020)



Figure 29 : Décompactage du substrat dans les enclos de régénération (Source : Adam Gibaud (ONF); 05/08/2020)

Une fois ces pressions gérées en amont, des actions de restauration passive ont pu être mises en œuvre. 8 enclos de régénération ont été posés, permettant la mise en défens de 4130 m² de plage (Figure 30). L'objectif de ces enclos est d'éviter le piétinement et le pâturage de la végétation pour favoriser la régénération naturelle du cordon littoral. Le type de protection avec du grillage est adapté à la présence de chèvres : dans d'autres contextes et notamment dans le cas d'un site de ponte de tortues marines, les enclos auraient été adaptés au passage des tortues, fermés par un seul fil suffisamment haut en front de mer. L'emplacement des enclos a été choisi en fonction de la présence d'arbres semenciers dans leur emprise, permettant d'assurer une banque de graines propices à la régénération naturelle. L'accès à la plage a aussi été pris en compte, une attention particulière a été mise pour que les enclos ne soient pas situés sur les passages habituels des usagers, et qu'ils soient ainsi mieux respectés.



Figure 30 : Enclos de régénération (Source : Adam Gibaud (ONF); 05/11/2020)

Ces mesures de restauration écologique passive ont été complétées par des plantations et du semis d'espèces indigènes afin d'appuyer la régénération naturelle et d'enrichir également le milieu avec des espèces qui avaient localement disparu. Ces plantations ont été réalisées deux mois après la pose des enclos en partenariat avec une association locale. Environ 40 citoyens ont participé à la plantation de 170 plants de 12 espèces différentes et ont ainsi été sensibilisés à la fragilité de la forêt littorale (Figure 31).



Figure 31 : Plantation participative (Source : Anaig Dantec (ONF); 05/12/2020)

3. Evaluation et suivi

Afin de pouvoir évaluer l'efficacité des actions mises en place, un suivi photographique des enclos a été mené, d'abord tous les deux mois la première année, puis tous les six mois. La réussite des plantations a elle été évaluée grâce au comptage des plants et au calcul du taux de mortalité réalisé tous les six mois également (Figure 32).

S'il est difficile à ce stade, après un recul de 2 ans seulement, d'avoir un retour d'expérience bien documenté sur ce site pilote, les suivis réalisés ont quand même livré des premiers résultats. Dans 7 enclos sur 8, on observe une forte reprise de la couverture herbacée quelques mois seulement après la pose des enclos. Un seul enclos ne présente aucune régénération car son sol, très pierreux, empêche le développement des plantules : 1 seul plant a d'ailleurs survécu dans cet enclos.



Figure 32 : Evolution d'un enclos de régénération : en haut à gauche, le 20/10/2020; en bas à gauche, le 23/12/2020; en haut à droite, le 18/08/2021; en bas à droite, le 06/01/2022; (Source : ONF)

Dès le premier comptage des plants, le taux de mortalité approche les 50 %. Il est d'ailleurs assez inégal selon les espèces : pour certaines comme le bois d'Inde, il est 100 % alors que le raisinier bord-de-mer lui affiche 100 % de réussite. Ce taux de mortalité s'explique par la période de plantation, en décembre, peu de temps avant la saison sèche de mars à mai. Il n'y a pas eu d'arrosage et les plants ont souffert de la sécheresse.

Cette première évaluation a permis de tirer des conclusions :

- sur la période de plantation : il faut favoriser la saison des pluies et planter entre juin et octobre
- sur l'arrosage : il faut prévoir un arrosage la première année pendant la saison sèche
- sur le choix des espèces : le raisinier bord-de-mer, le catalpa ou encore le poirier pays ont montré un taux de réussite de plus de 90 %. Ces espèces classiques du littoral caribéen sont donc à privilégier dans les plantations pour assurer une restauration écologique minimale.

Enfin, s'il est un peu tôt pour juger aujourd'hui de l'efficacité des enclos de régénération d'Anse Maurice, ce type d'enclos a pu être installé par l'ONF il a plus de 10 ans, notamment sur la plage de Clugny, second site pilote du projet. La reprise de la végétation s'observe facilement par vue aérienne (Figure 33). La restauration écologique de la forêt littorale a été un succès là où les enclos ont été implantés et respectés, permettant d'atténuer l'érosion très marquée sur cette plage.



Figure 33 : Reprise de la végétation suite à la mise en place d'enclos de régénération en 2008 – Plage de Clugny (Sainte-Rose, Guadeloupe) en 2004 (en haut) et en 2017 (en bas)
(Source : BDOrtho IGN 2004 & 2017)

Mangroves

Les forêts de mangrove sont particulièrement efficaces pour atténuer les aléas côtiers de submersion et d'érosion (Figure 34).

Les mangroves sont connues pour être capables d'atténuer efficacement l'énergie des vagues incidentes (entre 15 à 65 %), ralentir les écoulements

pendant les phénomènes de submersion et réduire l'impact des vagues formées par les tsunamis et les cyclones en formant des barrières naturelles (Spalding et *al.*, 2014). Ce rôle est bien connu et a été démontré à différentes reprises dans la région avec les passages d'Hugo (1989), Andrew (1992), Ivan (2004) et plus récemment Maria et Irma (2017).

De plus, elles permettent aux récifs coralliens adjacents de retrouver leur biodiversité plus rapidement après de tels catastrophes (Mumby et Hastings, 2008).

Les parties aériennes permettent aussi d'affaiblir les vents, permettant de protéger les infrastructures alentour et de limiter la formation de vagues.

Les mangroves ont également un rôle "d'éponge" lors d'inondations. Ces vastes zones humides sont capables de capter de grands volumes d'eau et ainsi limiter les impacts sur les infrastructures de la terre ferme.

Grâce à leur système racinaire, les mangroves sont capables de fixer de grands volumes de sédiments (principalement du sable et de la boue), sur de grandes surfaces (Guannel *et al.*, 2016). Cela favorise la sédimentation grâce à la décantation des sédiments. Une étude australienne estime que 80 % des

sédiments provenant de la côte sont piégés lors de leur passage par une mangrove (Furukawa *et al.*, 1997). Ceci permet d'offrir une eau de qualité permettant un bon développement des herbiers et des coraux adjacents.

Par la chute de leurs branches et de leurs feuilles, les palétuviers permettent un apport organique direct au milieu qui vient s'ajouter à l'apport sédimentaire. Non seulement les sédiments sont piégés, mais les mangroves sont également capables d'élever le niveau du sol de manière conséquente (Lee *et al.*, 2014) qui peut varier entre 1 et 10 mm par an (Furukawa *et al.*, 1997; McIvor *et al.*, 2013).

Cette capacité des mangroves à s'adapter à l'augmentation du niveau de l'eau est néanmoins limitée lorsqu'elles sont bloquées par des constructions ou barrières physiques qui les empêchent de s'étendre.

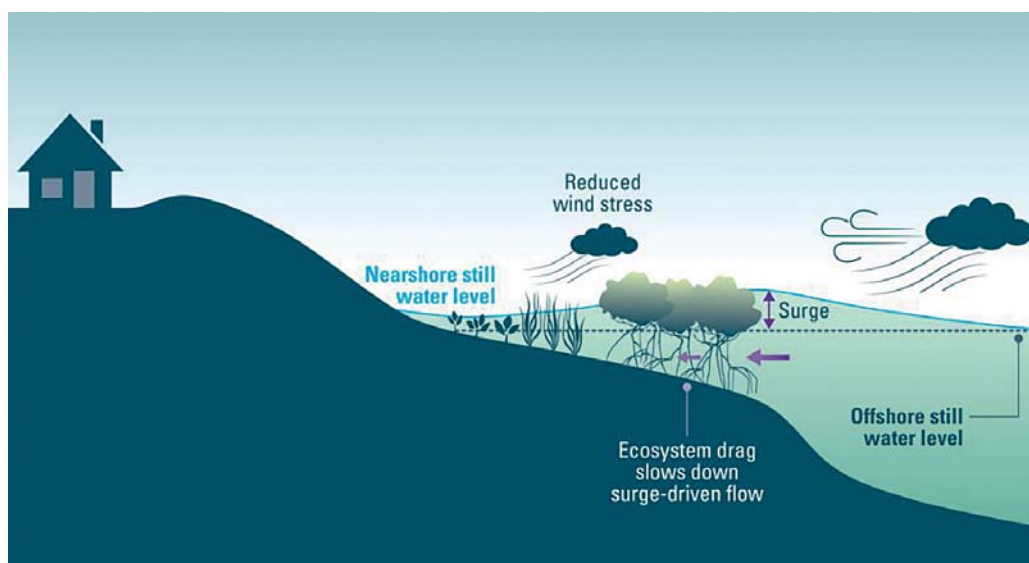


Figure 34 : Rôle des mangroves pour la réduction du niveau des surcotes marines par ralentissement des écoulements d'après Morris *et al.* (2021)

La capacité de protection de la mangrove est déterminée par la largeur de la forêt, sa densité et la couverture de la végétation. La biomasse racinaire, le diamètre du tronc et la canopée des arbres sont également des paramètres participant à l'atténuation des vagues et des phénomènes de submersion marine.

Les mangroves exigent des conditions environnementales particulières pour leur développement

et les espèces de mangrove n'ont pas toutes la même tolérance. Les paramètres généraux intervenant dans le développement des mangroves comprennent la salinité, le niveau et la durée d'inondation par la mer et l'agitation. Ces facteurs affectent la répartition des espèces de mangroves. D'autres facteurs tels que la disponibilité en nutriment, la présence de substrat favorable ou la température interviennent également dans leur expansion.

Hormis la destruction directe par le développement de l'urbanisation, une des causes les plus fréquentes de la disparition de la mangrove est liée à la modification des conditions hydrologiques (fréquence d'exposition à l'inondation et augmentation de l'agitation suite à des aménagements côtiers ou la destruction de la mangrove elle-même par exemple). La disparition de la mangrove favorise généralement des processus de rétroaction qui ne sont pas favorables à la recolonisation des vasières (augmentation de l'agitation et érosion).

Quand cela est possible, c'est-à-dire si la mangrove produit d'elle-même suffisamment de propagules, la recolonisation naturelle est à privilégier. Il faut dans ce cas s'assurer que les conditions soient optimales notamment au niveau des paramètres abiotiques : physico-chimiques (salinité du substrat, pH, température, etc.), hydrodynamiques (énergie des vagues, submersion et irrigation), topographiques (pente, sédimentation) et la qualité de l'eau (pollutions) (Pôle relais zone humides tropicales, 2018). Cette approche est souvent celle préconisée par les experts du milieu de la restauration pour favoriser la dynamique naturelle de l'écosystème, surtout lorsqu'il y a des signes d'auto-régénération de la mangrove et/ou que la zone à restaurer est étendue (>100 ha) (Teutli-Hernández *et al.*, 2021).

Lorsque des conditions hydrodynamiques ont été modifiées (aménagement, défrichement du front pionnier, etc.), il convient d'essayer de rétablir des conditions favorables à la dispersion et l'implantation naturelle des propagules. Des actions de restauration passive peuvent être nécessaires pour la mise

en place de structures destinées à limiter l'énergie des vagues, de la houle et des courants de marée et ainsi limiter l'érosion du substrat (e.g. utilisation de géotextile ou des structures de bambous). Ces actions favorisent l'installation et le maintien des propagules dans la mangrove. Les actions visant à rétablir les connexions hydrologiques et favorisant la dispersion des propagules ou des graines (e.g. création de brèches dans les digues, butes, murets ou utilisation de buses ou de drains) sont à mettre en place. Elles permettent l'écoulement des flux liés au balancement des marées et la présence de chenaux naturels (Pôle relais zone humides tropicales, 2018, Teutli-Hernández *et al.*, 2021).

Enfin, lorsque la zone à restaurer n'a pas le potentiel de se régénérer (zone à restaurer trop grande par rapport au site donneur, production de propagules insuffisante, destruction intégrale de la mangrove, etc), il est alors envisageable de restaurer activement la mangrove. Le reboisement est la technique la plus utilisée dans le monde pour les projets de restauration des mangroves. Cependant, si cette action est menée sans une analyse adéquate des conditions environnementales (hydrologiques et physico-chimiques) dans lesquelles se trouve le site, elle peut entraîner un gaspillage de ressources et d'efforts et une tentative infructueuse (Pôle relais zone humides tropicales, 2018).

Il existe deux méthodes de restauration par plantation. Celle qui consiste à planter directement dans le site à restaurer les propagules collectées sur les palétuviers ainsi que celle qui utilise la mise en pépinière pour que les propagules collectées atteignent une certaine maturité dans un milieu plus ou moins

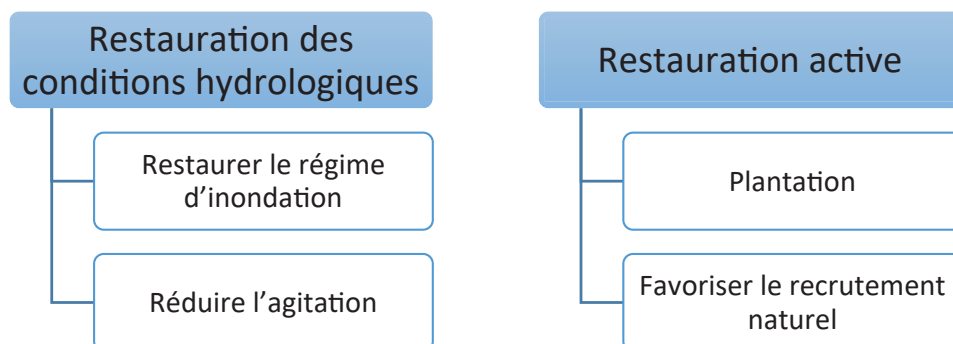


Figure 35 : Synthèse des actions de restauration de la mangrove pouvant améliorer les services de protection

contrôlé avant plantation sur site. Cette seconde méthode a l'avantage d'augmenter les chances de survie lors de la plantation, les propagules ayant déjà acquis une certaine croissance et développé un système racinaire plus conséquent (Pôle relais zone humides tropicales, 2018). Néanmoins, l'utilisation de pépinière nécessite de bien considérer les conditions environnementales pour qu'elles soient similaires (salinité, exposition au soleil, etc.) dans la

pépinière et le site de plantation afin que maximiser les chances de survie des semis transplantés (Teutli-Hernández *et al.*, 2021).

Dans tous les cas, les projets de restauration de mangrove doivent s'appuyer sur une analyse fine des conditions hydrologiques d'une part et environnementales d'autre part pour sélectionner les espèces les plus adaptées au milieu pour les actions de plantation (Figure 35).

EFFORTS DE RESTAURATION DE MANGROVES AUX BAHAMAS

Dans le cadre du projet Carib-Coast, l'organisation Perry Institute for Marine Science (PIMS) a mis en œuvre un projet de restauration de mangroves sur les îles Abaco et Grand Bahama qui ont été largement touchées par l'ouragan Dorian en 2019. Une étude parue en 2020 (Steinberg *et al.*, 2020) a mis en évidence que 73,8 % des systèmes de mangrove de Grand Bahama et 40,1 % des mangroves d'Abaco ont été «endommagées ou détruites» par l'ouragan Dorian. Les estimations indiquent une perte de mangroves à plus de 4 000 hectares à travers les deux îles avec peu de régénération naturelle ou de recrutement après 3 ans suite au cyclone (Figure 36).



Figure 36 : Photo de palétuviers rouges grandement endommagés à Abaco après Dorian (Source : PIMS)

Suite à des suivis complémentaires à partir de survols aériens par drone, cartographie fine avec des imageries haute définition, ainsi que des suivis sous-marins de l'état écologique des mangroves et des consultations auprès de la population locale des deux îles, PIMS a pu identifier les zones prioritaires pour la restauration. Il s'agit des zones étant les plus impactées par Dorian et incapables de se régénérer naturellement qui nécessitent des efforts de restauration active par plantation.

Ces éléments ont été rassemblés dans un plan stratégique de restauration de mangroves recommandant les sites à restaurer, les techniques de restauration à mettre en place,...

D'août à septembre 2022, PIMS a pu organiser une campagne de restauration de palétuviers rouges au sein de parcs nationaux. Ce travail a impliqué la société civile (22 volontaires) et les autorités locales

(6 membres du Bahamas National Trust) qui furent formés par PIMS aux techniques de collecte et de plantation de propagules.

Au total 20 408 propagules ont été collectées (12 500 à Grand Bahama et 7 908 à Abaco) pour être plantées sur les 10 sites (6 à Grand Bahama et 4 à Abaco). Toutes les propagules collectées localement ont été plantées à proximité de leur site d'origine et ont été suivies afin de garantir la diversité génétique lors des plantations ultérieures (Figure 37).



Figure 37 : Volontaires collectant des propagules de palétuviers rouges (à gauche) et les plantant sur des systèmes de palétuviers endommagés (à droite) (Source : PIMS)

Après la plantation de mangroves, des données de référence ont été recueillies sur les sites de plantation et les sites de contrôle où le rétablissement naturel est évalué à la fois pour Abaco et Grand Bahama (35 sites au total). La collecte de données à ce moment-là comprenait une cartographie haute résolution du site. Cette technologie permettra non seulement de suivre l'état du site, mais aussi de suivre individuellement le sort des mangroves (celles qui se régénèrent, les nouvelles recrues naturelles et les mangroves plantées) afin d'évaluer la régénération, le succès de la restauration et de déterminer quelle intervention supplémentaire sera nécessaire.

Des suivis supplémentaires sont prévus après le projet pour évaluer sur le long terme la régénération de la mangrove et examiner les changements dans la structure de la communauté de poissons et les paramètres environnementaux.

Récifs coralliens

D'après Burke et Maidens (2004), 21 % du littoral caribéen serait directement protégé par les récifs coralliens. Il s'agit certainement du rôle le plus important des récifs coralliens via leur capacité à dissiper l'énergie des vagues (Gracia et al., 2018). En effet, ils constituent très souvent la première défense face à la houle. Les récifs de type "barrières" sont ceux qui assument le mieux ce rôle dans des conditions climatiques normales. En revanche, lors d'événements climatiques extrêmes, les récifs frangeants se révèlent être plus efficaces pour protéger

la côte (Guannel et al., 2016). On estime que l'énergie des vagues peut être réduite de 97 % par les récifs coralliens en bon état écologique (Ferrario et al., 2014). Ce rôle de barrière confère un milieu propice au développement des herbiers et des mangroves adjacents qui bénéficient d'eaux calmes.

Pour que l'effet d'atténuation de l'énergie des vagues soit optimal, il est important qu'un récif soit majoritairement composé de coraux vivants (plutôt que d'algues ou d'éponges) (Guannel et al., 2016). Dans le contexte de changement climatique et de

la montée du niveau de la mer, les récifs “vivants” pourront, dans une certaine mesure, ajuster leur profondeur. A l'inverse, les récifs “morts” s'érodent et finissent par être si profonds que leur service de protection ne devient plus efficace.

Lorsqu'ils sont vivants, les coraux offrent une structure d'habitat complexe à la surface du récif. La morphologie du récif (largeur et pente), sa complexité structurale ou rugosité associée à la couverture de corail vivant ainsi que sa profondeur sont les facteurs principaux intervenant dans la protection du littoral (Figure 38). Plus la complexité ou la rugosité de surface est importante, plus la dissipation de l'énergie des vagues est élevée. La présence du récif génère également une transformation des vagues incidentes passant d'onde courtes à des ondes longues fréquences. La capacité de dissipation des vagues incidentes intervient de manière indirecte sur la réduction de l'érosion et de la submersion par franchissement dans les secteurs côtiers protégés par les récifs. En plus d'agir comme des brise-lames, les récifs fournissent des sédiments calcaires qui peuvent contribuer à alimenter et maintenir les plages sur le long terme. Par ailleurs, s'ils sont en bon état de santé, les récifs sont capables de suivre

l'élévation du niveau de la mer en maintenant leur capacité de protection.

En association avec les herbiers, les récifs coralliens permettent de stabiliser les sédiments dans l'eau. Leur présence permet de garder le sable notamment, dans les lagons ou proche des côtes, sans quoi une partie plus importante de sable serait emportée au large.

De nombreuses plages de sable blanc de la région Caraïbienne sont issues des coraux, c'est à dire des squelettes calcaires coralliens qui se transforment en sable et alimentent la côte (Gracia et al., 2018). Les poissons perroquets notamment, sont capables en se nourrissant de casser des fragments de coraux. Ces derniers sont alors rejetés sous forme de sable après la digestion (Ogden, 1977). Les plus gros spécimens de poissons perroquets peuvent produire plusieurs dizaines voire centaines de kilos de sable chaque année. Les oursins diadèmes participent aussi à cette bioérosion et peuvent également produire des quantités conséquentes de sable (Frydl et Stearn, 1978) et ainsi participent à la création et au maintien des plages de sable.

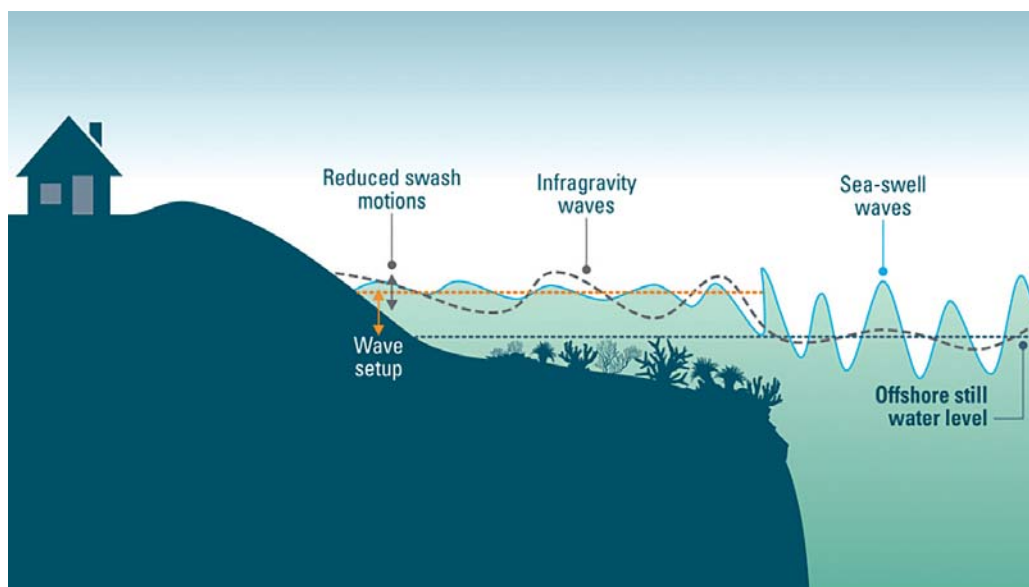


Figure 38 : Rôle des récifs coralliens dans la réduction des risques côtiers en lien avec l'atténuation des vagues incidentes par la profondeur et la rugosité associée à la présence de corail d'après Morris et al. (2021)

Les récifs coralliens se développent dans des conditions environnementales bien précises. Ils se retrouvent dans des eaux chaudes, limitées en nutriments (oligotrophes) et non turbides pour

une croissance optimale. Les paramètres environnementaux intervenant dans la distribution, la composition et la croissance des récifs coralliens sont la température, la saturation en aragonite, les

caractéristiques de l'eau (lumière, salinité, nutriment et charge sédimentaire) et l'exposition aux conditions hydrodynamiques (vagues et courants). La sélection des sites est donc essentielle pour intervenir sur la restauration des récifs coralliens.

Les récifs coralliens sont particulièrement sensibles aux nutriments et aux pollutions diffuses provenant de sources terrestres liées aux zones urbaines et à l'activité agricole. Les sources de pollution comprennent les nitrates, les phosphates et autres polluants organiques ou métalliques. Des niveaux élevés de nutriments entraînent une augmentation de la couverture de macroalgues et une concurrence avec les coraux. À un certain niveau de concentration, les nutriments peuvent même devenir toxiques pour les coraux. Les autres types de polluants métalliques et organiques peuvent également être associées à des taux accrus de maladies et de mortalité intervenant dans la dégradation des récifs. La présence de matière en suspension augmente la turbidité de l'eau et atténue la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau et nuire à la croissance du corail. Des niveaux importants d'apport de sédiment peuvent être à l'origine d'un phénomène d'hyper-sédimentation et étouffer les organismes benthiques et la mortalité des tissus.

Il est donc primordial d'analyser les conditions optimales pour le développement des récifs coralliens avant de sélectionner un site pour un projet de restauration. Plusieurs types d'actions peuvent être mises en œuvre pour améliorer la protection offerte par les récifs. Les mesures de conservation, comprenant la lutte contre les facteurs associés à leur dégradation, l'amélioration de la qualité et de la quantité du substrat ou la restauration active.

Les actions visant à intervenir sur les causes de la dégradation par des approches passive ou assistées consiste à supprimer ou réduire les pressions pour restaurer un système fonctionnel à travers : la réduction de l'exploitation des ressources récifales (zone de non-prélèvement par exemple), l'application de législation en faveur de la conservation et la réduction des nuisances. Cela passe aussi par l'implication des parties prenantes, la sensibilisation ou encore l'amélioration de la qualité de l'eau à travers des politiques de gestion des bassins versants par exemple. L'ensemble de ces actions vise à renforcer la capacité de résilience des récifs face aux sources de stress et favoriser une croissance optimale.

Une autre catégorie d'actions vise à intervenir sur la stabilisation et l'amélioration du substrat. En effet, pour se développer les larves de corail ont besoin d'un substrat dur et stable. La stabilisation du substrat implique l'utilisation de mailles ou de filets pour réduire le mouvement du substrat, l'apport de bloc rocheux permet également d'améliorer la qualité du substrat. Des structures complexes en béton peuvent également être utilisées pour créer un récif artificiel là où il n'existe pas de substrat dur. Il est cependant important d'étudier l'interaction entre la géométrie du récif artificiel avec les vagues incidentes, car l'accélération des courants peut aggraver l'érosion localement. Les mesures visant à intervenir sur le substrat sont souvent combinées avec d'autres techniques de restauration active.

La dernière catégorie d'actions relève de la restauration active et comporte diverses techniques. Elle intervient par exemple lorsque le recrutement naturel du corail n'est plus effectif. Ce type de restauration est souvent mise en place en parallèle avec des mesures passives visant à atténuer les pressions et améliorer la qualité du substrat et de l'eau si nécessaire. Parmi les mesures actives, la transplantation de corail est la mesure la plus courante dans la Caraïbe. Elle correspond au prélèvement de fragments depuis un site donneur qui sont directement implantés sur un substrat récifal ou sur une structure artificielle. Les fragments vont alors se reproduire de façon asexuée (clonage) sur le substrat pour former de nouvelles colonies. Il est possible de stimuler la croissance des coraux (25 à 50 fois la vitesse normale de croissance) par la micro-fragmentation qui consiste à couper les coraux en petits morceaux avec une scie à ruban spécialisée et de les laisser croître sur un substrat. Dans tous les cas, il est conseillé de ne pas prélever plus de 10 % des individus donneurs pour ne pas affaiblir les colonies existantes.

Afin de favoriser la croissance et la survie des fragments de coraux ainsi que mieux contrôler les paramètres environnementaux pendant l'élevage des fragments de coraux, il est possible de passer par une phase intermédiaire en pépinière aussi appelée "coral gardening". Cette méthode peut se réaliser directement en milieu naturel sur des supports artificiels (cordes, table, blocs, etc.) ou en milieu ex-situ comme des laboratoires (aquarium).

En plus de ces méthodes, il est possible d'ajouter des structures artificielles à des fins de restauration

des récifs coralliens comme substrat pour le recrutement des coraux ou la plantation de coraux. L'électrodéposition est une technique d'accrétion minérale par électrolyse de l'eau de mer. Les minéraux présents dans l'eau (ions carbonate de calcium et hydroxyde de magnésium) précipitent sur un support métallique sous l'action d'un courant électrique et favorisent la calcification nécessaire à la formation du squelette calcaire des polypes (Léocaldie *et al.*, 2020). La calcification se fait plus rapidement, les colonies croissent plus vite et auraient de meilleurs taux de survie et une meilleure tolérance aux stressés (Goreau et Hilbertz, 1996).

Les récifs artificiels, conçus pour imiter les processus naturels et être intégrés dans les paysages récifaux, peuvent également servir de substrat pour transplanter des coraux, générer des colonies et former un récif. De nombreuses solutions d'ingénierie écologique existent.

Il existe également des techniques d'ensemencement et de dispersion larvaire assistée. De grandes quantités d'ovules et de sperme sont collectées sur le terrain et ramenées en laboratoire pour fécondation ex-situ. Les embryons et les larves sont ensuite élevées dans des bassins avant d'être installés sur une série de structures artificielles pour être réimplanté sur le récif naturel ou artificiel. Cette technique permet en outre d'améliorer la diversité génétique et le recrutement naturel à terme mais nécessite plus de temps, de technicité et est plus coûteuse par rapport à la transplantation (Hein *et al.*, 2020).

Le choix des techniques à employer dans le cadre des projets de restaurations des récifs coralliens doit s'appuyer sur un diagnostic précis des facteurs intervenants dans leur dégradation. Une analyse des conditions environnementales doit également être menée pour la sélection des sites (Figure 39).

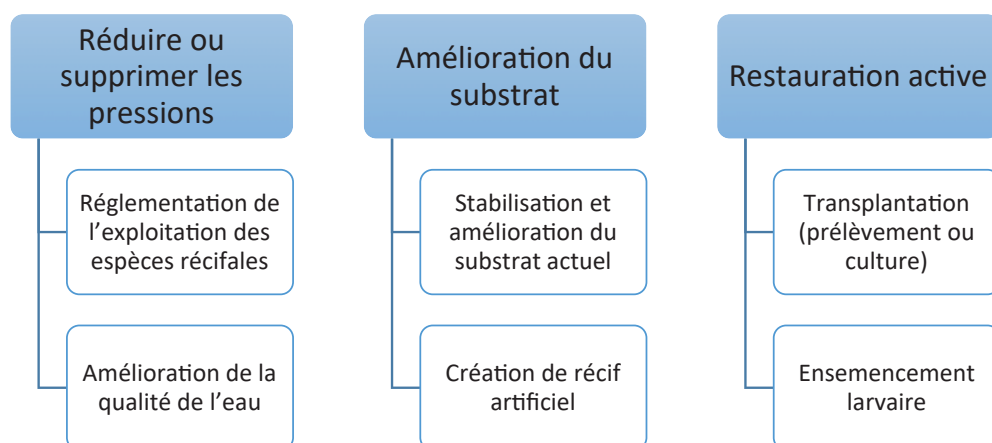


Figure 39 : Synthèse des actions de restauration des récifs pouvant améliorer les services de protection de cet écosystème

RÉCIFS ARTIFICIELS CONTRE L'ÉROSION CÔTIÈRE ET LA SUBMERSION MARINE À GRENADÉ

Un récif artificiel a été mis en place en 2015 au large de la ville de Greenville, à Grenade, pour la protéger de l'érosion. Il s'agit d'une des rares initiatives de récif artificiel de grande envergure dans la région dont l'objectif principal est la protection côtière. Ce projet a permis l'implication des communautés locales et leur retour d'expérience dans sa conception.

Des données sur l'évolution du trait de côte, la courantologie, la modification des fonds et l'état des récifs ont été prises en compte. Elles ont permis de mettre en évidence le lien entre la dégradation d'une partie du récif et l'exposition accrue aux risques côtiers d'érosion et de submersion marine (Reguero *et al.*,

2018). Suite à ces études préliminaires, 4 “unités pilotes” composées de paniers métalliques remplis de pierres ont été mises en place à des endroits stratégiques de la baie (Figure 40). Cette solution de restauration est spécialement conçue et étudiée pour améliorer la protection contre l'érosion et la submersion. Elle répond dans ce cadre à des critères techniques et écologiques spécifiques.

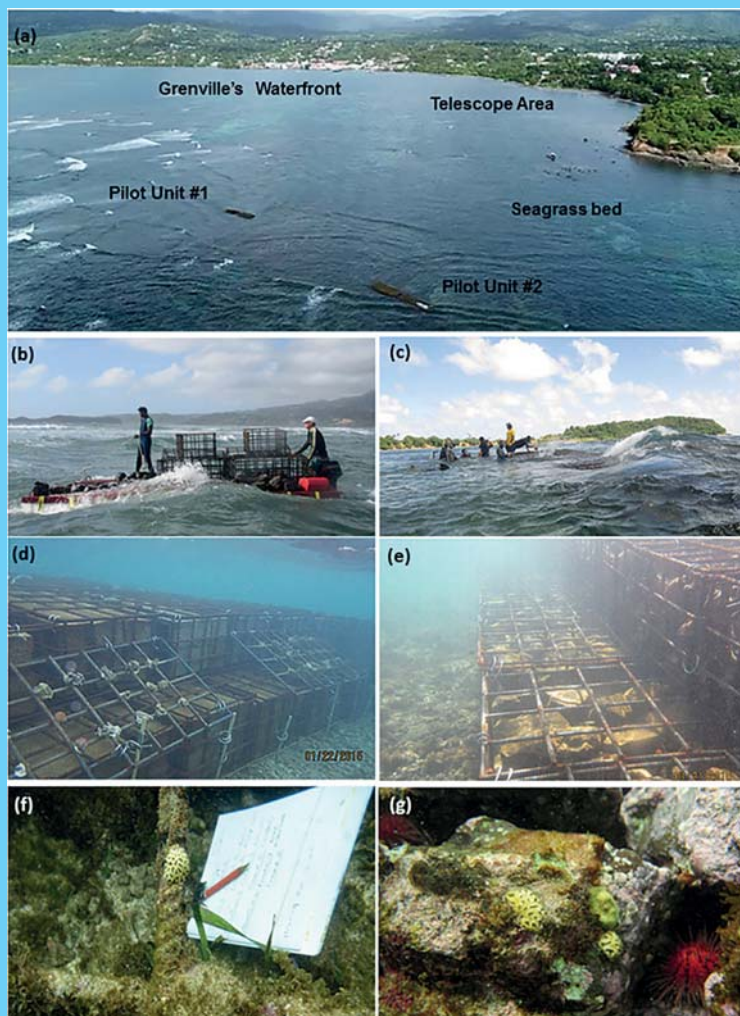


Figure 40 : Aperçu général des unités pilote 1 et 2 dans la baie de Greenville (en haut) et vue immergée des casiers installés sur le récifs dégradés en 2015 avec les greffes de corail apparentes sur le treillis métallique (Reguero et al., 2018).

L'analyse technique approfondie du site ainsi que l'appropriation et l'engagement de la population pour la conception d'une solution de restauration adaptée ont contribué à la réussite du projet. Cette installation repose une structure flexible et des matériaux disponibles localement. D'après le retour d'expérience, les structures sont toujours bien en place et jouent leur rôle d'atténuation des vagues incidentes. Un suivi sur le terme permettra éventuellement d'observer un retour progressif des sédiments. De plus, des communautés benthiques algales et coralliennes se forment sur les structures artificielles. Avec le temps ces organismes pourraient permettre aux structures de fusionner avec le récif naturel et ainsi de s'implanter durablement dans le paysage benthique de cette baie. La mise en place d'une pépinière de coraux pour la restauration active du site représente également une piste d'amélioration afin d'améliorer la croissance du corail sur le substrat. En parallèle, il s'agit également d'agir sur les facteurs de stress afin de réduire les pressions qui s'exerce sur le récif (eutrophisation et surpêche). A terme, ce récif pourra fournir de nombreux services écosystémiques aux populations locales.

RESTAURATION CORALLIENNE À TOBAGO

Dans le cadre du projet Carib-Coast, le SPAW-RAC a financé un site pilote de restauration corallienne à Tobago de 2021 à 2022 afin de contribuer à la réduction des risques côtiers et à l'adaptation au changement climatique. Environmental Research Institute Charlotteville (ERIC) a mis en œuvre des actions de restauration sur les colonies de coraux cierges (*Dendrogyra cylindrus*) qui est une espèce emblématique de corail dur de la Caraïbe et qui produit des colonies en forme de colonnes unisexes pouvant atteindre 4 m de haut (Figure 41). Cela en fait un important constructeur de récifs se développant dans les eaux côtières peu profondes et pouvant contribuer de manière significative à la réduction de l'érosion côtière.



Figure 41 : Colonie saine de corail cierge (*Dendrogyra cylindrus*) à Tobago (Source : ERIC)

Historiquement cette espèce rare et classée comme vulnérable par l'UICN a une population très fragmentée à Tobago. En effet, les populations ont été particulièrement touchées par des épisodes de blanchissement et maladies. Ces phénomènes ont fait grandement chuter le nombre de colonies autour de l'île et ainsi que leur capacité à se reproduire.

Le projet a permis de cartographier les colonies de coraux cierges restantes à Tobago, déterminer leur sexe et prélever des fragments pour les transplanter et recréer de nouvelles colonies (Figure 42). Ces travaux de restauration active ont eu pour objectif de réunir des fragments d'individus mâles et femelles à proximité afin de relancer la reproduction naturelle et éviter la disparition des coraux cierges.

Au total, 64 fragments ont été collectés sur des sites donneurs (Booby Reef et Plymouth) en bon état écologique, puis transplantés directement à Booby Reef. Les méthodes utilisées de transplantation ont eu un impact minimal sur les colonies donneuses et ont eu lieu dans des zones où l'impact humain est minime. En effet, Booby Reef est situé au large de Charlotteville qui est un village de pêcheurs avec peu de pressions liées au tourisme, pollution des eaux ou encore pratiques de pêche. De plus, ce site est situé au sein de la réserve UNESCO MAB au nord-est de Tobago. Une procédure juridique a débuté en 2021 pour désigner la zone de restauration ainsi que d'autres zones récifales d'intérêt en tant que Natural Heritage Site pour former un « cœur de réserve » permettant une protection effective des coraux dans la réserve UNESCO MAB.



Figure 42 : Colonies de coraux cierges récoltées et transplantées sur Booby Reef (Source : ERIC)

Ce projet de restauration active a bénéficié du soutien de la communauté locale impliquée dans la collecte et la transplantation des coraux ainsi que dans leur suivi sur le long terme.

Les résultats préliminaires sont encourageants et semblent indiquer que les colonies de coraux cierges transplantés survivent et sont en bonne santé. Un suivi supplémentaire est nécessaire pour montrer le

taux de réussite des travaux de restauration de ces colonies et leur capacité à se reproduire naturellement pour générer un récif capable participer à la réduction de l'érosion côtière.

Herbiers marins

Dans des conditions climatiques classiques, la surface foliaire des herbiers marins permet, par simple friction, de ralentir les vagues incidentes (Ondiviela *et al.*, 2014), favorisant ainsi la sédimentation avec les racines et les rhizomes qui empêchent l'érosion et stabilisent les sédiments (UNEP, 2020).

Les espèces les plus grandes sont celles qui assurent le mieux ce rôle de protection (Nordlund *et al.*, 2016). La performance en termes de protection est évaluée à partir de la largeur des prairies, de la taille des herbiers par rapport à la profondeur, la densité et la couverture.

Les services de protection sont différents selon les conditions physiques du milieu et sont délivrés de manière optimale par les herbiers dans des zones peu profondes avec des vagues de faible énergie et où l'interaction entre l'eau et les feuilles est maximale (Ondiviela *et al.*, 2014).

Grâce à leurs racines, les herbiers sont capables de fixer de grands volumes de sédiments (principalement du sable et de la "boue") sur de grandes surfaces (Figure 43). Cette stabilité (également due aux récifs coralliens) confère des conditions de développement optimales pour la mangrove adjacente (Guannel *et al.*, 2016).

Via leur système foliaire, ils sont capables de piéger les particules en suspension dans l'eau et de les faire sédimenter plus rapidement. Elles participent ainsi à l'accrétion de sédiments, en plus de les fixer, ce qui, sur le long terme, contribue à l'élévation du fond marin (Potouroglou *et al.*, 2017). Ce service

est particulièrement important dans le contexte du changement climatique. En effet, les prairies sous-marines peuvent s'adapter à l'élévation du niveau de la mer par l'élévation du sol ou la migration vers l'intérieur des terres, si elles ne sont pas entravées par une infrastructure côtière (Duarte *et al.* 2013). Ceci permet en parallèle de diminuer la turbidité du milieu et offrir des conditions favorables au développement des coraux (Guannel *et al.*, 2016). Les algues épiphytes participent également à ce captage de sédiments grâce à des substances qu'elles sécrètent (Agawin et Duarte, 2002).

Combinées, ces fonctions de stabilisation et d'accrétion de sédiments forment des conditions favorables au nourrissage (apport en sable) naturel des plages (Paul, 2018). Ces services seraient optimaux dans des herbiers dominés par les phanérogames (Scott *et al.*, 2018).

Les herbiers nécessitent des conditions environnementales spécifiques pour un développement optimal. Ils occupent généralement des eaux peu profondes de par leur besoin en lumière. Les apports en matière en suspension et l'eutrophisation réduisent la lumière incidente. La disponibilité de la lumière peut avoir un impact négatif sur les herbiers sur le long terme et entraîner leur dégradation. Les herbiers se développent à la fois sur des sédiments sableux ou vaseux. Ils peuvent également se développer dans des eaux calmes mais aussi plus exposées grâce à leur système racinaire. Par ailleurs, leur organisme est adapté à différentes conditions de salinité.

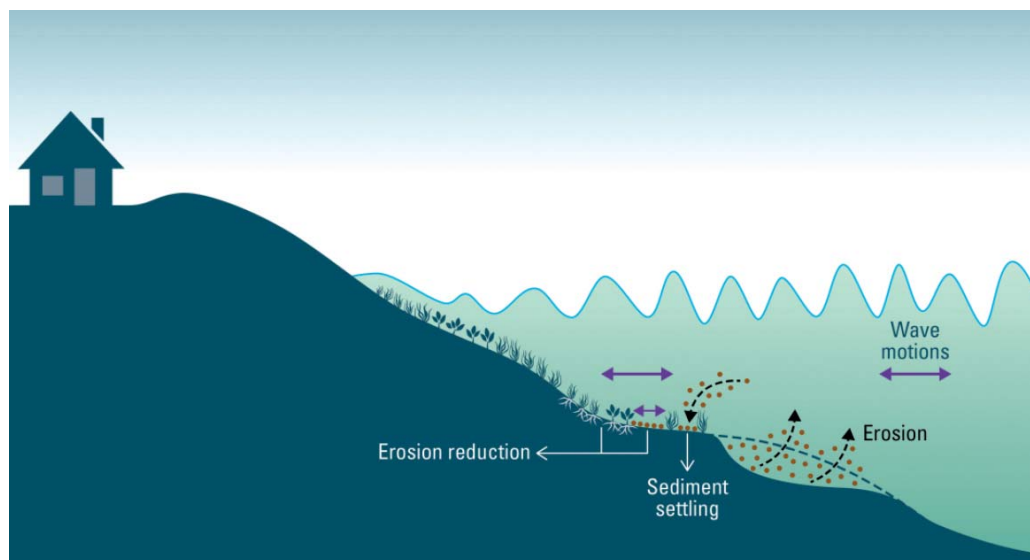


Figure 43 : Rôle des herbiers dans le maintien et l'accumulation des sédiments participant à la stabilité de la zone côtière d'après Morris *et al.* (2021)

Vis à vis de leur besoin en lumière, il est important de s'assurer que les conditions environnementales sont adaptées avant d'envisager une restauration. Une des techniques de restauration est donc d'agir sur les conditions environnementales en réduisant l'apport des matières en suspension et les sources de pollution diffuses associées à l'eutrophisation du milieu. Dans les zones de mouillage, les herbiers subissent également une dégradation directe par les ancrages des bateaux. Il est possible d'installer des bouées de mouillage et d'interdire l'usage des ancrages dans les secteurs protégés par exemple.

Les actions de restauration active font intervenir plusieurs techniques. La transplantation d'herbiers est la technique la plus utilisée dans le monde pour les projets de restauration. Cette méthode consiste à collecter des fragments de rhizome dans une prairie pour les fixer dans les sédiments d'une zone à restaurer à une profondeur appropriée. Elle peut s'effectuer manuellement ou mécaniquement. Les fragments peuvent être ancrés dans les sédiments avec des poids, des agrafes ou des chevilles pour les maintenir dans le fond jusqu'au développement de nouvelles racines (Léocadie *et al.*, 2020). L'utilisation de motte contenant des fragments et des sédiments autour des racines est également testée dans les projets de restauration. Cette technique semble améliorer la survie des plantes en limitant le stress et en favorisant l'ancrage de la plante.

La micropropagation est une autre technique qui consiste à prélever des graines ou des bourgeons dans le milieu naturel, puis de les faire germer en milieu contrôlé (culture *in vitro*) afin de générer des plants (Zarranz *et al.*, 2010). Les plantules constituent alors une pépinière et donc un stock d'individus que l'on peut planter sur les sites choisis.

Cette technique ne fonctionne pas sur toutes les espèces, notamment *S. filiforme* et *T. testudinum* (Léocadie *et al.*, 2020).

La technique d'ensemencement de graines peut également être employée. Cette approche est basée sur la capacité des herbiers à produire des graines qui peuvent se disperser et coloniser de nouveaux secteurs (Léocadie *et al.*, 2020). Les graines sont collectées et transportées vers des secteurs cibles pour la restauration. Il faut adapter l'ensemencement en fonction des caractéristiques morphologiques, des périodes de dormance et de germination des espèces d'herbiers. En effet, il faut différencier les espèces disposant de graines à développement direct des autres types d'espèces, qui produisent des graines à la fin de la saison de croissance et qui nécessitent un stockage de graines après la récolte jusqu'à ce que les conditions de croissance s'améliorent. Les résultats de la restauration sont visibles longtemps après avoir semé les graines (Léocadie *et al.*, 2020).

Enfin la gestion passive est une technique d'amélioration du recrutement naturel en favorisant la propagation et le développement naturel des herbiers grâce à l'utilisation de toiles de jute installées à même le sol, pour que les herbiers s'y accrochent en grappins (colonisation) (Wear *et al.*, 2006). Cette technique est simple à mettre en œuvre, peu chère et peu invasive, ne créant aucun impact sur les sites sources et permet le développement dans un environnement sédimentaire stable (Irving *et al.*, 2010) mais les résultats sont obtenus relativement longtemps après installation.

Quel que soit la technique utilisée, une analyse des pressions doit être réalisée au préalable afin de sélectionner celle qui est la plus appropriée. Chacune des techniques peut être combinée pour améliorer l'efficacité de la restauration (Figure 44).

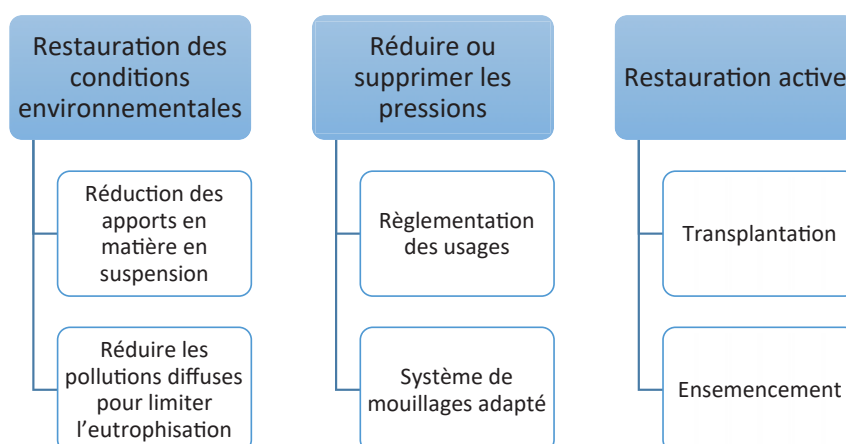


Figure 44 : Synthèse des actions de restauration pouvant améliorer les services de protection des herbiers marins

RESTAURATION D'HERBIERS MARINS À PUERTO RICO

Dans le cadre du projet Carib-Coast, le SPAW-RAC a financé un projet de restauration passive d'herbiers marins travaillant sur la limitation des pressions sur cet écosystème. Les herbiers de la baie de Tamarindo sur l'île de Culebra a connu un déclin de près de 30 % de sa surface entre 2010 et 2017. La zone côtière est soumise à des charges sédimentaires élevées en raison de l'érosion régulière des routes non pavées qui contribuent à l'apport de 400 tonnes métriques de sédiments sur la côte par an. Cette situation a été exacerbée par l'impact des ouragans Irma et Maria de 2017 qui ont causé des dommages importants sur herbiers marins, récifs coralliens et mangroves de la zone.

Protectores de Cuencas (PDC) a élaboré un projet de conception du site à restaurer situé en haut de la plage de Tamarindo et très fréquenté pour le tourisme. Ainsi de 2021 à 2022, PDC a mis en œuvre une variété de meilleures pratiques de gestion pour lutter contre les sources de pollutions telluriques et améliorer la qualité des eaux côtières et les herbiers.



Figure 45 : Restauration de l'habitat côtier à l'aide d'espèces indigènes à Tamarindo Beach, Culebra (Source : PDC)

Un total de 650 plantes natives de 8 espèces différentes ont été plantées pour restaurer l'habitat côtier de haut de plage et former une barrière végétale capable de bloquer les sédiments et stabiliser le sol (Figure 45). Les espèces choisies en fonction de leur capacité à vivre dans des sols à haut niveau de salinité et nécessitant un entretien minimal.

PDC a réalisé des travaux d'ingénierie écologique pour stabiliser la route d'accès à la plage de Tamarindo, créer un parking perméable et écologique permettant de stabiliser le sol et réduire drastiquement l'érosion. Les travaux ont également

permis de délimiter les zones d'accès public en installant de nouveaux poteaux en bois (précédemment endommagés) et des trottoirs de bois pour à la fois guider les piétons vers la plage sans perturber l'habitat côtier existant et protéger les plantes nouvellement plantées (Figures 46 et 47).



Figure 46 : Le processus de développement du parking perméable de la plage de Tamarindo (Source : PDC)

Des suivis de site après travaux ont permis d'assurer un entretien correct de la zone et évaluer sa fonctionnalité. Toutes les mesures mises en œuvre, y compris l'aire de stationnement perméable, les trottoirs de bois, la route d'accès pavée et la délimitation à l'aide de poteaux de bois et de rochers, fonctionnent comme prévu. PDC a observé que les visiteurs de la zone utilisent le parking comme il se doit et ne marchent pas sur la végétation côtière.

Parallèlement, PDC a mené une étude écologique en 2022 pour évaluer l'état de l'herbier marin en face de la zone de la plage de Tamarindo, y compris les organismes marins associés (macroalgues, éponges, invertébrés et espèces de poissons). Les résultats préliminaires semblent indiquer une amélioration de la qualité de l'eau et une réduction des apports sédimentaires dans les herbiers marins, mais un suivi supplémentaire à long terme est nécessaire pour montrer les effets positifs des travaux réalisés pour mieux gérer les sources de pollution tellurique et restaurer les herbiers marins. Il faudra attendre plusieurs années pour voir la régénération de l'herbier.



Figure 47 : Les poteaux en bois précédemment installés et endommagés (à gauche) ont été retirés et remplacés par de nouveaux poteaux en bois et des trottoirs en bois (à droite). (Source : PDC)

La plupart des projets de protection s'appuyant sur les SFN se concentrent sur la réhabilitation d'un écosystème. Cependant, il est important de noter que quelles que soient les conditions, c'est toujours l'association des trois écosystèmes Récifs/Mangroves/Herbiers qui confère le plus de services en termes de protection côtière (Guannel *et al.*, 2016). Les projets de restauration peuvent ainsi intervenir sur plusieurs écosystèmes à la fois, d'autant plus que les actions de restauration mises en œuvre sur un des écosystèmes peuvent apporter des effets bénéfiques sur les autres présents sur le site.

Par ailleurs, les SFN peuvent être associées à des ouvrages de protection structurelle afin d'améliorer l'efficacité respective des mesures de protection. Par exemple, il est possible de s'appuyer sur des ouvrages pour rétablir des conditions hydrodynamiques favorables au développement de la mangrove en réduisant l'agitation. À l'inverse, le rechargement d'une plage peut améliorer les performances structurelles d'une digue ou d'un

enrochement en protégeant l'ouvrage de l'action de la mer.

L'un des principaux avantages des SFN est que les écosystèmes peuvent s'adapter naturellement aux changements climatiques sur des échelles de temps plus longues que les structures de protection classique par accrétion ou croissance naturelle. Il est donc important de préserver ces écosystèmes en bonne santé afin qu'ils conservent leur capacité de résilience en réduisant les perturbations anthropiques et en restaurant les conditions favorables au développement de ces écosystèmes côtiers. De la même manière, il est également nécessaire de leur laisser de l'espace de développement naturel pour qu'ils puissent s'adapter à l'élévation du niveau de la mer et à l'évolution des conditions environnementales associées au changement climatique. C'est un élément important à anticiper dans les projets de restauration afin de s'assurer de l'efficacité des services de protection sur le long terme, notamment pour les cordons littoraux et la mangrove.

CONSEILS POUR LA MISE EN ŒUVRE DE SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE

Le processus de mise en place de solutions fondées sur la nature doit suivre plusieurs étapes successives

afin de sélectionner les options d'intervention et les techniques les plus adaptées au contexte local. Il doit s'inscrire dans un processus itératif permettant d'adapter les actions à l'évolution du contexte et au retour d'expérience (Figure 48).

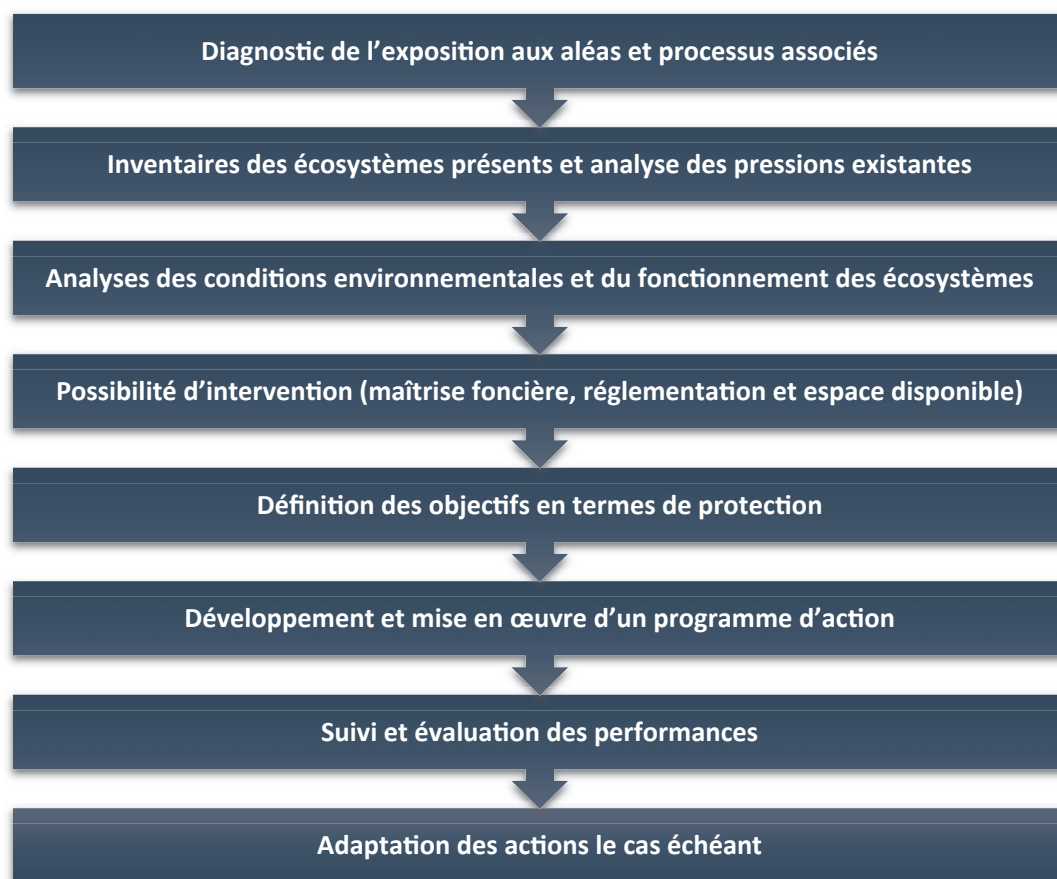


Figure 48 : Processus générique pour la mise en œuvre de projets de protection basés sur la nature

Diagnostic

La phase de diagnostic vise à analyser la faisabilité de mise en œuvre des techniques de restauration fondées sur la nature. Il vise à réaliser une analyse complète des enjeux physiques, environnementaux, réglementaires, historiques, culturels et sociaux qui peuvent intervenir dans la définition et la mise en œuvre du projet. Cette phase doit également permettre d'identifier l'ensemble des parties prenantes et le périmètre d'intervention du projet.

La phase de diagnostic de l'aléa et du risque associée intervient généralement en amont, lors de la définition des stratégies de gestion et d'adaptation des territoires exposés au risque. Cette étape vise à

étudier le fonctionnement du littoral, son évolution et les processus associés aux aléas d'érosion ou de submersion marine selon les objectifs du projet. Une analyse des enjeux exposés est également réalisée afin d'analyser leur niveau d'exposition au risque et les opportunités d'actions à mettre en œuvre pour les protéger le cas échéant (population, bâtiments, activités et infrastructures).

Afin d'analyser les actions potentielles à mettre en œuvre, parmi lesquelles les solutions fondées sur la nature, il s'agit d'identifier les écosystèmes naturellement présents sur le site qui offrent un service de protection. Cette phase doit par ailleurs évaluer l'état de ces écosystèmes, analyser les conditions

intervenant dans son fonctionnement actuel, les facteurs intervenants dans leur dégradation (pression anthropique et naturelle) et comment ces écosystèmes interviennent dans le contrôle des aléas d'érosion ou de submersion. L'analyse de l'évolution historique des écosystèmes est particulièrement utile pour comprendre les changements observés en lien avec les pressions potentiellement présentes.

Il est notamment indispensable de s'assurer que les conditions environnementales soient adaptées aux développements de ces écosystèmes. En effet, chaque écosystème a des besoins et une tolérance

différente aux conditions environnementales. Si les conditions ne sont plus adaptées, il s'agira d'envisager la mise en place d'actions permettant de rétablir ces conditions pour un développement optimal (restauration des conditions hydrologiques pour les mangroves ou amélioration de la qualité de l'eau pour les récifs par exemple). Il est également important d'évaluer l'évolution de ces conditions sur le long terme et les incertitudes associées, notamment en lien avec les effets du changement climatique (élévation du niveau de la mer par exemple) (Figure 49).



Cordons littoraux

- Espace disponible, type de sédiments, morphologie et couverture végétale



Mangroves

- Température, niveau d'eau, salinité, exposition aux vagues, type de sédiments et espace disponible



Herbiers

- Luminosité, salinité, type de sédiments et exposition aux vagues



Récifs coralliens

- Température, salinité, luminosité, apport en nutriment et en matière en suspension, qualité du substrat, exposition aux vagues et aux courants

Figure 49 : Principaux facteurs environnementaux intervenants dans les projets de protection par des solutions basées sur la nature

Enfin un des derniers paramètres importants est de pouvoir bénéficier de la maîtrise foncière pour être en capacité d'intervenir sur le site. Une analyse du contexte réglementaire, des usages et de l'aménagement est donc nécessaire. Il est notamment indispensable de prévoir un espace suffisant pour restaurer la dynamique naturelle des écosystèmes le cas échéant. C'est particulièrement le cas pour les cordons littoraux et la mangrove qui ont la capacité de s'adapter à l'évolution du niveau de la mer si l'espace n'est pas contraint par la présence

d'aménagements.

Les éléments de diagnostic devront permettre, en association avec les parties prenantes, de définir des objectifs et d'évaluer l'ensemble des options d'intervention pour sélectionner la stratégie la plus adaptée au contexte local en tenant compte des contraintes et des incertitudes. Il vise notamment à sélectionner les secteurs sur lesquels intervenir et sélectionner les techniques les plus appropriées pour maximiser les services de protection de ces écosystèmes.

DIAGNOSTIC POUR LA RESTAURATION DE MANGROVES AUX BAHAMAS

Dans le cadre du projet pilote de restauration de mangroves (voir ci-dessus), le Perry Institute for Marine Science (PIMS) a réalisé un diagnostic important sur Abaco et Grand Bahama avant de mettre en place des travaux de restauration en 2022.

Evaluation sociale : Consultations communautaires

PIMS et ses partenaires ont réalisé 8 enquêtes et 12 consultations communautaires à Grand Bahama et Abaco. Ces réunions ont impliqué les parties prenantes locales pour recueillir des informations sur la façon dont les mangroves dans les deux zones étaient perçues, appréciées et utilisées, ainsi que sur la façon dont l'ouragan Dorian a changé ces facteurs ainsi que ce que ces acteurs espéraient voir comme résultat de la restauration. Ces réunions ont permis de mieux apprécier les aspects socio-économiques et ont favorisé l'implication des communautés locales dans les activités de restauration. Au total 20 sites (12 à Grand Bahama et 8 à Abaco) ont été identifiés comme prioritaires pour la restauration de mangrove (Figure 50)

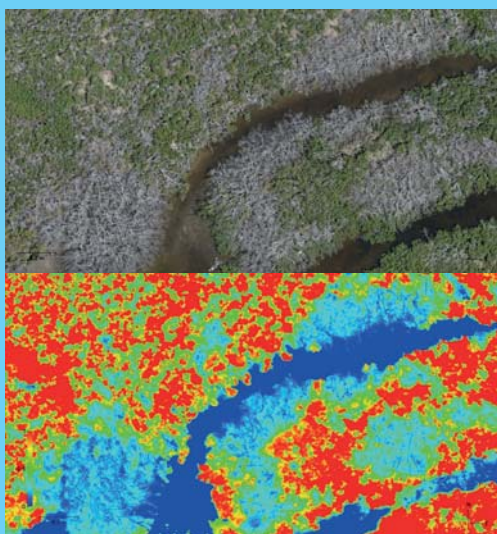


Figure 50 : Zones de mangrove de Grand Bahama, identifiées par les communautés locales comme prioritaires pour l'évaluation et la restauration. Les sites qui sont encerclés indiquent les endroits où la zone générale a été identifiée, par opposition aux endroits qui ont été nommés spécifiquement (ces zones sont identifiées par des étoiles). Les sites identifiés par des cercles orange/étoiles ont été mentionnés par plusieurs participants à l'enquête. (Source : PIMS)

Évaluation écologique : Cartographie des mangroves

A l'aide d'une technologie avancée (caméra de 45 MP et capteur multispectral à 10 bandes montés sur un drone commercial volant à environ 120 m), PIMS a cartographié un total de 34 zones de mangrove sur Grand Bahama (19) et Abaco (15), soit près de 6 700 ha.

Les données collectées ont été traitées pour compiler des photos mosaïques de chaque zone cartographiée, qui ont ensuite été évaluées à l'aide de différents produits issus des données visuelles et multispectrales, notamment un indice végétatif de différence normalisée (NDVI), une métrique utilisée pour indiquer la quantité d'activité photosynthétique. Les valeurs NDVI et les cartes SIG de l'habitat des mangroves ont été utilisées dans des analyses pour comparer la surface totale de chaque site qui était constituée de mangroves vivantes et de mangroves mortes ainsi que pour évaluer la régénération, y compris la repousse des mangroves endommagées pendant le Dorian ou les nouvelles recrues du système et les sources potentielles de propagules de mangroves à utiliser dans les efforts de replantation. Ces données



servent de référence pour les suivis long-terme des mangroves et pour évaluer le succès de restauration (Figure 51).

En plus de l'imagerie par drone, des données satellite ont été utilisées pour fournir des cartes à large échelle spatiale de la couverture vivante des mangroves avant et après Dorian sur l'ensemble de Grand Bahama et Abaco.

Ainsi il a été estimé que sur Grand Bahama, 14 000 ha de mangrove (22 %) étaient complètement morts et 9 000 ha (14 %) avaient subi des dégâts significatifs, et que sur Abaco, plus de 10 000 ha de mangrove (14 %) étaient morts et 5 500 ha (7 %) de mangroves étaient impactés. Ces résultats sont bien plus précis que ceux de l'étude produite par Steinberg *et al.*, (2020) pour discriminer les mangroves complètement mortes de celles ayant une chance de se régénérer naturellement.

Figure 51 : Vue rapprochée d'un système de mangrove avec une image à haute résolution utilisée pour cartographier les mangroves vivantes et mortes à l'échelle d'un site de restauration (en haut) La même zone (en bas) montrant l'analyse NDVI avec les zones rouges représentant les mangroves saines, le bleu clair les mangroves mortes et le bleu foncé l'eau (Source : PIMS)

Évaluation écologique : Poissons et communautés benthiques

PIMS a évalué les assemblages de poissons et les communautés benthiques associés aux mangroves pour détecter les changements écologiques causés par l'ouragan Dorian et aider à déterminer les meilleures approches pour réhabiliter ou restaurer les mangroves. Au total, 19 sites sur Grand Bahama et 11 sites sur Abaco ont été évalués par des suivis sous-marins en plongée (transects de 30 x 2 m) et des prélèvements d'eau et de sédiment. Les données recueillies ont été comparées à l'évaluation précédente effectuée en 2019 avant l'ouragan Dorian et utilisant la même méthode de suivi.

Analyse pour prioriser les sites de mangroves à restaurer :

Une analyse quantitative des habitats de mangrove a été réalisée à l'aide des données disponibles provenant des enquêtes communautaires, suivis sous-marins, suivis aériens et de l'accès à des données satellitaires fines. PIMS a également développé un système de classement hiérarchique basé sur les trois indices et appliqué de manière progressive pour filtrer les sites et sélectionner ceux où l'impact de les efforts de restauration pouvaient être les plus importants : (i) indice de dommages basé sur les valeurs NDVI qui a donné lieu à une carte SIG en ligne, (ii) indice de résilience et (iii) indice de valeur.

Ces informations ont conduit à l'élaboration d'une stratégie de restauration de la mangrove en novembre 2021 pour mener les interventions les plus appropriées sur Grand Bahama et Abaco et déterminer les méthodes de restauration adéquates lorsque la replantation de la mangrove était jugée nécessaire. Cette stratégie s'est focalisée sur les systèmes de mangrove entièrement décimés en raison de l'inondation prolongée pendant Dorian, laissant des mangroves mortes sur pied dans la plupart des cas.

Dans ce cas de figure, PIMS a favorisé la restauration active par collection de propagules sur palétuviers rouges et plantation *in situ* dans les zones très dégradées, sans passer par la restauration passive du réseau hydrologique ou des techniques de restaurant utilisant des pépinières pour faire pousser des plantules de mangroves.

Tous les sites de restauration seront surveillés chaque année à l'aide de satellites à haute résolution et d'images de drones pour suivre la croissance et la survie de la mangrove, et des suivis sous-marins seront effectués chaque année pendant au moins cinq ans pour évaluer les changements dans les communautés de poissons et benthiques ainsi que les caractéristiques environnementales.

Actions

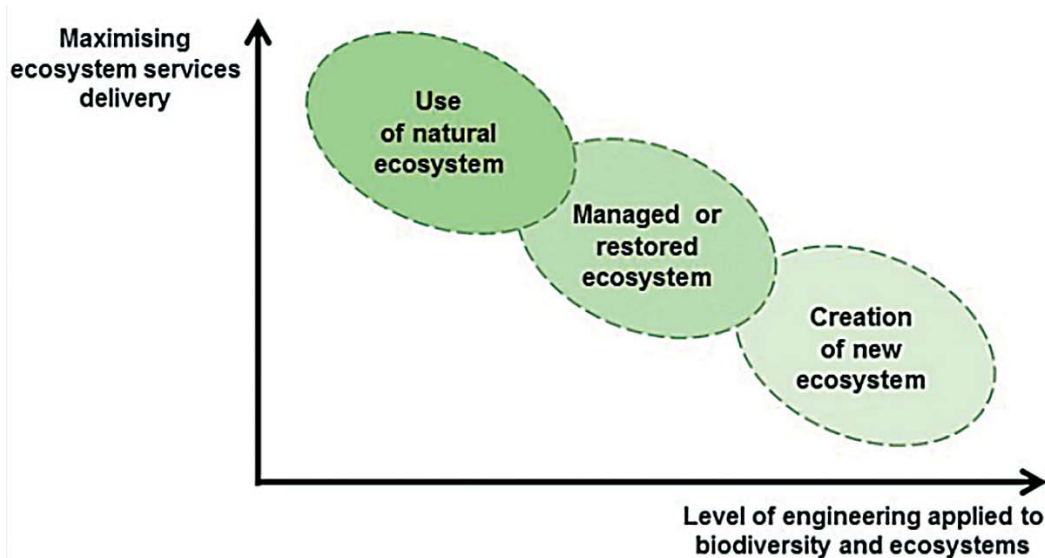
A partir du diagnostic, il s'agit d'identifier les stratégies possibles pour réduire les risques et évaluer si les solutions fondées sur la nature représentent une bonne alternative ou un complément aux autres options de gestion. Plusieurs stratégies d'interventions peuvent être étudiées selon les options suivantes :

- la non-intervention si l'on considère que les écosystèmes jouent pleinement leur rôle de protection dans leur état actuel;
- les mesures de gestion n'agissant pas directement sur les écosystèmes mais sur les pressions en amont ou sur leur protection par exemple;
- les actions de restauration visant à intervenir directement sur les écosystèmes présents

naturellement et améliorer les processus naturels d'atténuation;

- les actions d'intervention active de création de nouveaux écosystèmes;
- les solutions hybrides faisant intervenir des ouvrages de protection en combinaison avec des actions de restauration.

Ces actions peuvent ainsi porter sur la conservation, la restauration ou bien la création de nouveaux habitats (Figure 52). Le coût et la technicité des interventions va dépendre de la portée des actions et de l'emprise du projet. Il est également considéré que les écosystèmes dans leur état de conservation naturel sont ceux qui offrent le plus de services de protection.



Source: adapted from Eggermont et al., 2015.

Figure 52 : Typologie des solutions basées sur la nature selon les trois grandes catégories d'actions sur les écosystèmes naturels, restaurés et nouveaux (Cohen-Shacham et al., 2016).

Plusieurs types d'action peuvent être mises en œuvre selon les objectifs recherchés : les mesures actives ou passives et la sensibilisation (Figure 53). Les mesures actives concernent les actions de restauration intervenant directement sur les écosystèmes. Les mesures passives consistent à agir sur les pressions en amont, soit par des actions

de protection, soit par des actions de restauration assistées visant à favoriser le développement naturel des écosystèmes. La faisabilité des actions doit être analysée en fonction des capacités financières et techniques des porteurs de projets et de l'engagement des parties prenantes.

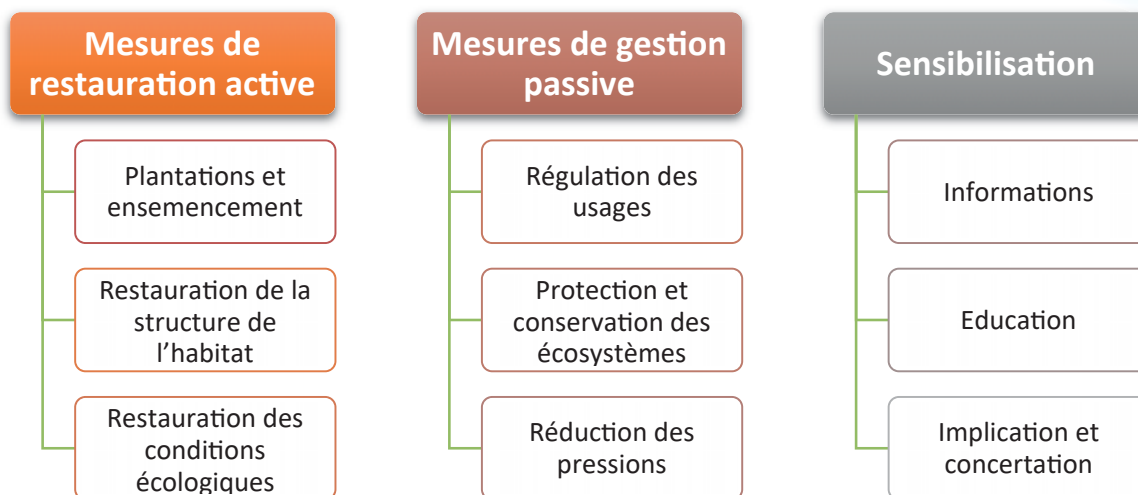


Figure 53 : Typologie des actions de restaurations pour améliorer les services de protection apportés par les écosystèmes

Plusieurs recommandations peuvent être apportées aux porteurs de projets concernant les actions à mettre en œuvre.

La mise en place des solutions fondées sur la nature nécessite généralement du temps pour observer une efficacité en termes de protection. Il est donc indispensable de prévoir les actions permettant d'accompagner le développement de ces écosystèmes sur de longues périodes (plusieurs années) à travers des actions de maintenance. Le coût des actions de maintenance n'est pas à sous-estimer car il peut représenter une part importante du budget total. Un soutien financier sur le long terme des projets est donc indispensable afin de garantir leur réussite.

En priorité, il est recommandé de traiter les pressions existantes en amont avant d'envisager une restauration active. En effet, si les pressions existantes ou les conditions environnementales ne sont pas adaptées, l'efficacité des actions de restauration

active sera limitée. Il s'agit donc généralement de mettre en place plusieurs catégories d'actions permettant de maximiser leur efficacité sur le long terme.

Ainsi, il est nécessaire d'impliquer la population et les usagers dans la conception, la mise en place et le suivi des projets. En effet, les actions qui prennent en compte les préoccupations de la population, bénéficient d'une acceptation sociale plus importante et ont plus de chance de réussite sur le long terme. Ainsi, la population doit être impliquée dès la phase de conception et tout au long de la durée du projet. La sensibilisation du public, à travers des actions de communication, est aussi importante. Elle vise à informer le public de l'intérêt de préserver ces milieux à travers les services écosystémiques multiples offerts par ces milieux. L'implication du public vise à réduire les conflits potentiels et maximiser les synergies que peuvent représenter ces actions afin de garantir la durabilité des projets de protection basées sur la nature.

IMPLICATION DE LA POPULATION LOCALE DANS LA MISE EN PLACE DES ACTIONS DE RESTAURATION ÉCOLOGIQUE SUR LA PLAGE DE CLUGNY, SAINTE-ROSE (GUADELOUPE)

Dans le cadre de l'installation des sites pilotes Carib-Coast en Guadeloupe par l'ONF, plusieurs événements impliquant la participation de la société civile (bénévoles, scolaires, jeunes en insertion...) ont permis leur sensibilisation au rôle de la végétation de haut-de-plage dans la lutte contre l'érosion.

Sur la plage de Clugny à Sainte-Rose, second site pilote du projet, les élèves des écoles et des collèges de la commune ont participé aux actions de restauration écologique dès le début des travaux (Figure 54). Chaque établissement a en effet parrainé un des 13 enclos de régénération installés sur le site. Les enfants ont réalisé un dessin collectif qu'ils sont venus accrocher eux-mêmes sur leur enclos lors d'une journée de sensibilisation organisée avec l'association de protection de la Nature locale To-Ti-Jon, qui a regroupé plus d'une centaine de participants. Cette initiative a donné lieu par la suite à la création de deux aires marines éducatives portant sur le périmètre de l'enclos parrainé par l'école (Figure 55). Un an plus tard, les enfants ont pu revenir planter des arbres de la forêt littorale caribéenne dans leur enclos. Les plants ont été numérotés et ils seront suivis par les élèves dans l'objectif d'un projet de sciences participatives.



Figure 54 : Parrainage des enclos par les élèves de Sainte-Rose (Source : Noémie Videau (ONF); 16/06/2021)

Ce travail éducatif a permis de toucher et de sensibiliser une large strate, sociale et générationnelle, de la population de Sainte-Rose : des enfants, des enseignants, des parents d'élèves, des membres d'associations ont été directement impliqués. L'affichage des dessins et la communication médiatique autour du projet a aussi permis d'informer les autres usagers du site et a concouru au respect des enclos. Enfin, la présence régulière de l'association et des écoliers sur la plage permet aussi d'être rapidement informé des éventuels incidents qui auraient lieu sur le site.



Figure 55 : Plantation dans les enclos par les enfants (Source : Noémie Videau (ONF); 21/09/2022)

Il est important de rappeler que les porteurs de projets doivent disposer de la maîtrise foncière et qu'ils doivent s'assurer de la compatibilité de leurs actions avec la réglementation au titre de l'urbanisme, l'environnement et la propriété. Par exemple, des réglementations spécifiques peuvent être appliquées en raison de la présence d'espèces protégées sur le périmètre d'intervention des projets.

Par ailleurs, des synergies peuvent être identifiées avec d'autres stratégies ou plans d'actions existants sur le périmètre d'intervention du projet. Par

exemple, les mesures visant à améliorer la qualité de l'eau à l'échelle des bassins versants peuvent également profiter aux écosystèmes côtiers de récifs coralliens et aux herbiers en limitant les pressions qui s'exercent sur ces milieux (amélioration des dispositifs d'assainissement des eaux urbaines, adaptations des pratiques agricoles pour limiter l'érosion des sols, gestion des déchets, etc.). De la même manière, les actions mises en œuvre peuvent être intégrées aux autres dispositifs intervenant dans la conservation et la protection des écosystèmes.

IMPLICATION DES COMMUNAUTÉS LOCALES DANS LA MISE EN ŒUVRE DES ACTIONS DE RESTAURATION CORALLIENNE DANS LA BAIE DE MAN'O WAR BAY, CHARLOTTEVILLE (TOBAGO)

Dans le cadre du site pilote de restauration corallienne du projet Carib-Coast, Environmental Research Institute Charlotteville (ERIC) a grandement collaboré avec la communauté locale de Tobago. En effet, pour maximiser et pérenniser les travaux de restauration des coraux cierges (*Dendrogyra cylindrus*) dans la baie de Man'O War Bay, ERIC a organisé plusieurs formations sur les techniques de détection, de suivi ainsi que de prélèvement d'échantillons et de transplantation in-situ de fragments de coraux. Ainsi, de septembre 2021 à juin 2022, 8 techniciens de terrain communautaires ont pu être formés (Figure 56). Ce transfert de connaissance a permis une meilleure acceptabilité de ce projet par la population locale, un renforcement de compétences ainsi qu'un soutien important pour poursuivre les travaux de restauration corallienne et leurs suivis sur le long-terme de la santé des coraux. Il s'agit d'un atout, particulièrement en tenant compte de la vulnérabilité des coraux face aux activités anthropiques (e.g. ancrage) et stress environnementaux (e.g. blanchiment, maladies) ainsi que le temps nécessaire pour que des coraux transplantés puissent former des récifs fonctionnels capables de limiter l'érosion côtière.



Figure 56 : Techniciens de terrain communautaires formés aux techniques de restauration (gauche) et plongeur faisant un prélèvement sur une colonie saine de coraux cierges (droite) (Source : ERIC)

En parallèle, ERIC a réalisé des présentations dans deux écoles secondaires auprès de 52 étudiants afin de parler du programme de restauration des coraux cierges en cours et de leur importance environnementale et socio-économique.

Suivi et adaptation

Un des facteurs de réussite des projets de protection basés sur la Nature repose sur l'adaptation des mesures visant à améliorer l'efficacité des actions de restauration. Cela suppose de mettre en place une évaluation et un suivi dès la mise en œuvre du projet et sur le long terme. Ces suivis sont nécessaires pour maintenir l'efficacité des solutions de protection basées sur la nature et disposer d'un retour d'expérience pour les projets futurs.

Les indicateurs de suivi et d'évaluation doivent être adaptés à chaque situation. Ils peuvent à la fois porter sur l'environnement physique, l'état des écosystèmes, son fonctionnement ainsi que leur efficacité de protection contre les aléas côtiers (Figure 57). Un suivi rapproché doit être mené lors des premières années du projet afin de s'assurer que les évolutions espérées se réalisent. La population et les usagers peuvent être directement impliqués dans la réalisation de ces suivis.



Cordons littoraux

- Élévation, largeur, volume du cordon, densité et couverture de la végétation



Mangroves

- Largeur, densité et couverture



Herbiers

- Hauteur des herbiers, couverture et densité



Récifs coralliens

- Largeur, profondeur, morphologie du récif et couverture

Figure 57 : Exemple de facteurs de performances permettant d'évaluer l'efficacité des services de protection des écosystèmes côtiers

Le suivi et l'évaluation doivent permettre de fournir des informations sur les facteurs de réussite ou non des projets. Ils doivent également permettre d'orienter les actions d'entretien et de déterminer si des actions complémentaires sont nécessaires. Il est

en effet très utile de partager les bonnes pratiques avec l'ensemble des acteurs intervenants dans la mise en œuvre des solutions de protection basées sur la nature.

RENFORCEMENT DES CAPACITÉS ET TRANSFERT DE CONNAISSANCE SUR LES TECHNIQUES DE RESTAURATION DE MANGROVE (BONAIRE)

Dans le cadre du projet Carib-Coast, le CAR-SPAW a cofinancé un atelier régional dédié à la restauration de mangrove à Bonaire entre en octobre 2021 avec le soutien de la Dutch Caribbean Nature Alliance (DCNA) et de Stichting Nationale Parken Bonaire (STINAPA).

Cet atelier organisé par Mangrove Maniacs, a rassemblé plus de 60 participants (en présentiel et en ligne) de 12 pays différents de la Caraïbe (Aruba, les Bahamas, Belize, Bonaire, Curaçao, la Jamaïque, Sainte-Lucie, la Martinique, le Mexique, le Costa Rica), d'Europe (les Pays-Bas) et les États-Unis.

L'objectif était d'offrir une plateforme d'échange aux chercheurs, aux défenseurs de l'environnement, aux autorités des parcs et à toute personne impliquée dans la préservation des mangroves pour partager idées et connaissances sur les techniques de restauration de cet écosystème.

Cet atelier de 4 jours était l'un des premiers de ce type à l'échelle des Caraïbes, alliant à la fois des modules théoriques en salle et des sessions pratiques sur le terrain (Figures 58 et 59). Il visait à renforcer les capacités et les connaissances sur la restauration de la mangrove au niveau régional. Les présentations portaient sur les méthodes de restauration hydrologiques des systèmes de mangroves, l'identification et la gestion des zones de sédimentation excessive ainsi que l'utilisation de pépinières et la plantation active de mangrove pour lutter contre le changement climatique et l'érosion côtière. Les participants ont également pu échanger sur des sujets transversaux tels que le carbone bleu, la restauration par des techniques innovantes ainsi que l'impact des sargasses afin de maximiser les efforts de conservation.

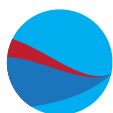


Figure 58 : Modules théoriques lors de l'atelier sur la restauration des mangroves (Source : Mangrove Maniacs)

Ainsi les participants ont pu acquérir une expérience pratique tout en élargissant leur réseau professionnel.



Figure 59 : Module pratique sur la plantation de mangroves (Source : Sabine Engel)



Recommandations internationales sur l'utilisation des solutions basées sur la nature appliquées aux aléas côtiers

En conclusion et pour aller plus loin sur le sujet des solutions basées sur la nature pour la réduction des risques côtiers quelques suggestions de références internationales :

The Australian Guide to Nature-based Methods for Reducing Risk from Coastal Hazards

Le guide australien des solutions basées sur la nature pour la réduction des risques côtiers décrit précisément les processus physiques d'atténuation des aléas par les écosystèmes, détaille les exigences écologiques et techniques et fournit un cadre pour la mise en œuvre des solutions basées sur la nature.

Morris RL, Bishop MJ, Boon P, Browne NK, Carley JT, Fest BJ, Fraser MW, Ghisalberti M, Kendrick GA, Konlechner TM, Lovelock CE, Lowe RJ, Rogers AA, Simpson V, Strain EMA, Van Rooijen AA, Waters E, Swearer SE. (2021) The Australian Guide to Nature-Based Methods for Reducing Risk from Coastal Hazards. Earth Systems and Climate Change Hub Report No. 26. NESP Earth Systems and Climate Change Hub, Australia.:

Australian guidelines for the implementation of nature-based methods for coastal hazard risk reduction | Earth Systems and Climate Change Hub

Use of Natural and Nature-Based Features (NNBF) for Coastal Resilience (US Army Corps of Engineers, 2015)

Ce rapport fournit des éléments sur l'utilisation des solutions basées sur la nature pour améliorer la résilience des territoires côtiers. Il présente une classification des solutions basées sur la nature, la caractérisation de la vulnérabilité, le développement de mesure de performance, l'intégration des politiques de gestion du risque, la surveillance et la gestion adaptative.

Bridges, Todd, Paul Wagner, Kelly Burks-Copes, Matthew Bates, Zachary Collier, Craig Fischenich, Joe Gailani, Lauren Leuck, Candice Piercy, Julie Rosati, Edmond Russo, Deborah Shafer, Burton Suedel, Emily Vuxton, and Ty Wamsley. 2015. Use of Natural and Nature-Based Features (NNBF) for Coastal Resilience. U.S. Army Engineer Research and Development :

Use of Natural and Nature-Based Features (NNBF) for coastal resilience - Technical Reports - USACE Digital Library

Implementing Nature-Based Flood Protection. Principles and Implementation Guidance (The World Bank, 2017)

Principes et recommandations de mise en œuvre pour la planification d'interventions basées sur la nature en lien avec la protection contre les inondations.

Van Wesenbeeck, Bregje K.; IJff, Stephanie; Jongman, Brenden; Balog, Simone Andrea Breunig; Kaupa, Stefanie Magdalena; Bosche, Lauren Vuilleumot; Lange, Glenn-Marie; Holm-Nielsen, Niels B.; Nieboer, Henk; Taishi, Yusuke; Kurukulasuriya, Pradeep H.; Meliane, Imen.

Implementing nature based flood protection : principles and implementation guidance (English). C. World Bank Group. :

Implementing nature based flood protection : principles and implementation guidance

International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management

Ce guide de recommandations international fournit des informations complètes et détaillées sur la conceptualisation, la planification, la conception,

l'ingénierie, la mise en œuvre et le suivi pour soutenir la réduction des risques d'inondations sur le littoral, les estuaires et les cours d'eau à partir de solutions basées sur la nature.

Bridges, T. S., J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder, and R. K. Mohan, eds (2021). International

Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management. U.S. Army Engineer Research and Development Center : International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management



Glossaire

CARIB-COAST	Caribbean Network for coastal risks prevention related with climate change
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
SFN	Solutions Fondées sur la Nature
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature



Bibliographie

- Agawin, N. S., & Duarte, C. M. (2002). Evidence of direct particle trapping by a tropical seagrass meadow. *Estuaries*, 25(6), 1205-1209.
- Bridges, Todd, Paul Wagner, Kelly Burks-Copes, Matthew Bates, Zachary Collier, Craig Fischenich, Joe Gailani, Lauren Leuck, Candice Piercy, Julie Rosati, Edmond Russo, Deborah Shafer, Burton Suedel, Emily Vuxton, and Ty Wamsley. 2015. Use of Natural and Nature-Based Features (NNBF) for Coastal Resilience. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development
- Bridges, T. S., J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder, and R. K. Mohan, eds. 2021. International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Burke, L. M., Maidens, J., Spalding, M., Kramer, P., & Green, E. (2004). Reefs at Risk in the Caribbean.
- Chambers, G., (2009): Caribbean beach changes and climate change adaptation. *Aquat. Ecosyst. Health Manag.*, 12(2).
- Cazenave, Anny & Le Cozannet, Goneri. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*. 2. 15-34..
- Cohen-Shacham, Emmanuelle & Walters, Gretchen & Maginnis, Stewart & Janzen, Christine. (2016). Nature-based Solutions to address global societal challenges. Rapport final UICN 115 p.
- Duarte, C.M., Losada, I.J., Hendriks, I., Mazarrasa, I. and Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change* 3, 961-968.
- Duvat, Virginie & Pillet, Valentin & Volto, Natacha & Krien, Yann & Cécé, Raphaël & Bernard, Didier. (2018). High human influence on beach response to tropical cyclones in small islands: Saint-Martin Island, Lesser Antilles. *Geomorphology*. 325.
- Frydl, P., & Stearn, C. W. (1978). Rate of bioerosion by parrotfish in Barbados reef environments. *Journal of Sedimentary Research*, 48(4), 1149-1157.
- Furukawa, K., Wolanski, E., & Mueller, H. (1997). Currents and sediment transport in mangrove forests. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 44(3), 301-310.

- Goreau, T. J., & Hilbertz, W. (2012). Reef restoration using seawater electrolysis in Jamaica. *Innovative Methods of Marine Ecosystem Restoration*, CRC Press, Boca Raton, 35-45.
- Gracia, A., Rangel-Buitrago, N., Oakley, J. A., & Williams, A. T. (2018). Use of ecosystems in coastal erosion management. *Ocean & Coastal Management*, 156, 277-289.
- Guannel, G., Arkema, K., Ruggiero, P., & Verutes, G. (2016). The power of three: coral reefs, seagrasses and mangroves protect coastal regions and increase their resilience. *PloS one*, 11(7), e0158094.
- Hein, MY., McLeod, IM., Shaver, EC., Vardi, T., Pioch, S., Boström-Einarsson, L., Ahmed, M., Grimsditch, G. (2020) Coral Reef Restoration as a strategy to improve ecosystem services –A guide to coral restoration methods. United Nations Environment Program, Nairobi, Kenya. p 64
- Irving, A. D., Tanner, J. E., Seddon, S., Miller, D., Collings, G.J., Wear, R.J., et Theil, M.J. (2010). Testing alternate ecological approaches to seagrass rehabilitation: links to life history traits. *Journal of Applied Ecology*, 47(5), 1119-1127.
- James RK, Christianen MJA, van Katwijk MM, et al. (2020). Seagrass coastal protection services reduced by invasive species expansion and megaherbivore grazing. *J Ecol.*;108:2025–2037.
- Kopp, Robert & Horton, Radley & Little, Christopher & Mitrovica, Jerry & Oppenheimer, Michael & Rasmussen, D.J. & Strauss, Benjamin & Tebaldi, Claudia. (2014). Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide gauge sites. *Earth's Future*. 2.
- Léocadie, A., Pioch, S., Pinault, M. (2020). Guide d'Ingénierie Écologique : La réparation des récifs coralliens et des écosystèmes associés. Édition IFRECOR. 114p
- Martín, A., Amores, A., Orfila, A., Toomey, T., and Marcos, M.: Coastal extreme sea levels in the Caribbean Sea induced by tropical cyclones, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*
- Morris, R.L., Konlechner, T.M., Ghisalberti, M., Swearer, S.E. (2018). From grey to green: efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence *Glob. Chang. Biol.*, 24, pp. 1827-1842
- Mclvor, A.L., Möller, I., Spencer, T. and Spalding, M. (2012) Reduction of wind and swell waves by mangroves. *Natural Coastal Protection Series: Report 1*. Cambridge Coastal Research Unit Working Paper 40. Published by The Nature Conservancy and Wetlands International. 27 pages. ISSN 2050-7941.
- Miloslavich, P., Díaz, J. M., Klein, E., Alvarado, J. J., Díaz, C., Gobin, J., ... & Bastidas, A. C. (2010). Marine biodiversity in the Caribbean: regional estimates and distribution patterns. *PloS one*, 5(8), e11916.
- Mentaschi, Lorenzo & Vousdoukas, Michalis & Pekel, J.-F & Voukouvalas, Evangelos & Feyen, Luc. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*. 8.
- Morris RL, Bishop MJ, Boon P, Browne NK, Carley JT, Fest BJ, Fraser MW, Ghisalberti M, Kendrick GA, Konlechner TM, Lovelock CE, Lowe RJ, Rogers AA, Simpson V, Strain EMA, Van Rooijen AA, Waters E, Swearer SE. (2021) The Australian Guide to Nature-Based Methods for Reducing Risk from Coastal Hazards. *Earth Systems and Climate Change Hub Report No. 26*. NESP Earth Systems and Climate Change Hub, Australia.
- Mumby, P. J., & Hastings, A. (2008). The impact of ecosystem connectivity on coral reef resilience. *Journal of Applied Ecology*, 45(3), 854-862.
- Mycoo, M., M. Wairiu, D. Campbell, V. Duvat, Y. Golbuu, S. Maharaj, J. Nalau, P. Nunn, J. Pinnegar, and O. Warrick, 2022: Small Islands. In: *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2043-2121.
- Nordlund, L. M., Koch, E. W., Barbier, E. B., & Creed, J. C. (2016). Seagrass ecosystem services and their variability across genera and geographical regions. *PLoS One*, 11(10), e0163091.
- OECS (2009). Biodiversity of the Caribbean, part 2, section d, Mangrove Swamp Ecosystems. Prepared by Ekos Communications, Inc. Victoria, British Columbia, Canada. 18p.

- Ogden, J. C. (1977). Carbonate-Sediment Production by Parrot Fish and Sea Urchins on Caribbean Reefs: Reef Biota.
- Ondiviela, B., Losada, I. J., Lara, J. L., Maza, M., Galván, C., Bouma, T. J., & van Belzen, J. (2014). The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. *Coastal Engineering*, 87, 158-168.
- Oppenheimer, M., B.C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, A.K. Magnan, A. Abd-Elgawad, R. Cai, M. Cifuentes-Jara, R.M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meyssignac, and Z. Sebesvari, 2019: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 321-445.
- Pillet, Valentin & Duvat, Virginie & Krien, Yann & Cécé, Raphaël & Arnaud, Gael & Pignion-Mussaud, Cecilia. (2019). Assessing the impacts of shoreline hardening on beach response to hurricanes: Saint-Barthélemy, Lesser Antilles. *Ocean & Coastal Management*. 174. 71-91.
- Pole-Relais Zones Humides Tropicales (2018). Guide Technique – La restauration de Mangrove, Synthèse des éléments clés à considérer pour tout chantier de restauration.
- Potouroglou, M., Bull, J.C., Krauss, K.W. *et al.* Measuring the role of seagrasses in regulating sediment surface elevation. *Sci Rep* 7, 11917 (2017).
- Reaka-Kudla, M. L. (2005). Biodiversity of Caribbean coral reefs. *Caribbean Marine Biodiversity: The Known and the Unknown*, 259-276.
- Reguero, B.G. & Beck, Michael & Agostini, Vera & Kramer, Philip & Hancock, Boze. (2018). Coral reefs for coastal protection: A new methodological approach and engineering case study in Grenada. *Journal of environmental management*. 210. 146-161.
- Spalding, M, M Kainuma, and L Collins. (2010). "World Atlas of Mangroves." London (UK : Earthscan.
- Spalding, M. D., Ruffo, S., Lacambra, C., Meliane, I., Hale, L. Z., Shepard, C. C., & Beck, M. W. (2014). The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management*, 90, 50-57.
- Teutli-Hernández C., Herrera-Silveira J.A., Cisneros-de la Cruz D. J., Arceo-Carranza, D., Canul-Cabrera, A., Robles-Toral P. J., Pérez-Martínez O. J., Sierra-Oramas D., Zenteno K., Us-Balam H. G., Pech-Poot E., Chiappa-Carrara X., Comín Francisco A. (2021). Manual for the ecological restoration of mangroves in the Mesoamerican Reef System and the Wider Caribbean. Integrated Ridge-to-Reef Management of the Mesoamerican Reef Ecoregion Project - MAR2R, UNEP-Cartagena Convention, Mesoamerican Reef Fund. Guatemala City, Guatemala.
- UNEP (2020). Out of the Blue: The Value of Seagrasses to the Environment and to people. UNEP, Nairobi, 96 pages.
- UNEP-WCMC, Short F T. 2021. "Global Distribution of Seagrasses (Version 7.1). Seventh Update to the Data Layer Used in Green and Short (2003).
- UNEP-WCMC, WorldFish Centre, WRI, and TNC. 2021. Global Distribution of Warm-Water Coral Reefs, Compiled from Multiple Sources Including the Millennium Coral Reef Mapping Project. Vol. 4. Cambridge (UK : UN Environment World Conservation Monitoring Centre.
- van Wesenbeeck, Bregje K.; IJff, Stephanie; Jongman, Brenden; Balog, Simone Andrea Breunig; Kaupa, Stefanie Magdalena; Bosche, Lauren Vuillemot; Lange, Glenn-Marie; Holm-Nielsen, Niels B.; Nieboer, Henk; Taishi, Yusuke; Kurukulasuriya, Pradeep H.; Meliane, Imen. Implementing nature based flood protection : principles and implementation guidance (English). Washington, D.C. : World Bank Group.
- Voudoukas, Michalis & Ranasinghe, Roshanka & Mentaschi, Lorenzo & Plomaritis, Theocharis & Athanasiou, Panagiotis & Luijendijk, Arjen & Feyen, Luc. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*. 10. 260-263.

- Wear, R., Tanner, J., et Venema, S. (2006). Seagrass Rehabilitation in Adelaide Metropolitan Coastal Waters III. Development of Recruitment Facilitation Methodologies. SARDI Research Report Series. South Australian Research and Development Institution, 48, 44.
- Zarranz, M. E., González-Henríquez, N., García-Jiménez, P., et Robaina, R. R. (2010). Restoration of *Cymodocea nodosa* seagrass meadows through seed propagation : germination in vitro , seedling culture and field transplants. *Botanica Marina*, 53, 173–181.

