

L'érosion des plages de Saint- Barthélemy



Causes, solutions déployées et alternatives possibles



LE NAGARD Maud
2016

RESUME : Saint-Barthélemy est une île de 21 km² appartenant aux petites Antilles, et plus particulièrement aux « îles du Nord ». Elle est située à 230 km au nord-ouest de la Guadeloupe et à 25 km de Saint-Martin. Le tourisme de luxe est le pilier économique de l'île et les plages en sont un des principaux attraits. Cependant celles-ci sont soumises à de nombreuses pressions, pouvant entraîner un déséquilibre dans le système sédimentaire et engendrer une érosion des plages. Cette érosion présente un risque de perte de l'attrait des plages vis-à-vis de touristes et d'impacter donc négativement l'économie de l'île. Pour compenser cette perte de surface des plages, la solution pour laquelle a opté Saint-Barthélemy est de procéder à des ré-ensablements, c'est-à-dire prélever du sable à un autre endroit, au large à l'aide d'une drague par exemple, et de le redéposer sur l'estran afin de lui rendre la surface souhaitée.

Cette étude permet de répertorier les causes probables de l'érosion des plages de Saint-Barthélemy ainsi que les efforts déjà fournis pour lutter contre l'érosion. Elle permet ainsi de regarder les conséquences environnementales des procédés utilisés. Une des plages les plus emblématiques de l'île, la plage de Saint-Jean, est particulièrement soumise au phénomène d'érosion et elle servira donc d'exemple sur les causes de l'érosion ainsi que sur l'impact des ré-ensablements. L'objectif est de déterminer une alternative durable et moins contraignante aux ré-ensablements et qui serait applicable à l'ensemble des plages de l'île.

ABSTRACT : Saint-Barthelemy is an island of 21 square meter, belonging to the Carribean islands and more specifically to the Northern islands. It is situated at 230 km North-West from Guadeloupe and at 25 km from Saint-Martin. Luxury tourism is its main economical pillar and the beaches are its main attraction. However the beaches are submitted to many pressures that may lead to an imbalance of the sedimentary system and, from that, to an erosion. This erosion threatens the island's economy with the risk of loss of interest of the beaches for tourists. To compensate the loss of area of the beaches, the solution which have been chosen by Saint-Barthelemy is beaches-renourishment. The principle is to collect sand on another place, using a dredge for example, and redeposit it on the foreshore to reconstituate the chosen shape.

This study helps to identify the probable causes of erosion of Saint-Barthelemy's beaches and the efforts provided to struggle against erosion. It allows to show the environmental consequences of the methods used. One of the most iconic beach of Saint-Barthelemy, Saint-Jean's beach, is particulary subjected to erosion and will be used as an example on the causes of erosion and impact of renourishment. The aim is to determine a sustainable alternative and less restrictive than renourishment and which would be feasible to all the beaches of the island.

Sommaire :

INTRODUCTION	5
I/ Les causes de l'érosion	6
1) Causes naturelles	6
a) Ouragans, tempêtes	6
b) Orientation des plages et des courants principaux	7
c) Granulométrie des plages	8
d) Beachrock	9
e) Etat des écosystèmes marins	10
2) Causes anthropiques	12
a) Urbanisation	12
b) Dégradation des écosystèmes littoraux	13
II/ Solutions déployées et historique des ré-ensablements	14
1) Techniques mises en œuvre	14
2) Historique des ré-ensablements	15
3) Prix des interventions	17
4) Commanditaires	18
III/ Conséquences des ré-ensablements	18
1) Modification des fonds marins	18
2) Impact sur les récifs et les herbiers	19
IV/ Cas d'étude : La baie de Saint-Jean	21
1) Courantologie et granulométrie	21
2) Dégradation des écosystèmes	23
3) Variation du trait de côte	24
4) Répercussions des procédés mis en œuvre	26
V/ Moyen de lutte alternative	27
1) Action sur les fonds marins	28
2) Action sur l'estran	28
3) Autres procédés	29
4) Solution préconisée pour Saint-Jean	29
CONCLUSION	31
ANNEXES	32
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	36
INDEX DES ILLUSTRATIONS	38
INDEX DES TABLEAUX	39

Introduction

Saint-Barthélemy est une île de superficie de 21km², appartenant aux petites Antilles, et plus particulièrement aux « îles du Nord ». Elle est située à 230 km au nord-ouest de la Guadeloupe et à 25 km de Saint-Martin.

La croissance démographique de l'île est très soutenue, avec une augmentation de 2,1% par an en moyenne, faisant passer la population de 6900 en 1999 à près de 9000 en 2010. Cela implique donc une pression anthropique importante sur une île de cette dimension.

Saint-Barthélemy a fondé son économie sur le tourisme et en particulier sur le tourisme de luxe, résidentiel et haut de gamme en hôtels ou en villas de location. Le tourisme représente ainsi le premier secteur économique de l'île, avec selon l'INSEE, 37% des emplois liés au tourisme, contre 6% dans les autres départements d'Outre-mer. La diversification de la nationalité des clients a permis d'allonger la saison touristique de 4 mois en 2000 à 8-10 mois en 2010.

Les plages sont l'un des atouts touristiques de l'île, celles-ci doivent être préservées afin de maintenir le pilier économique de Saint-Barthélemy. Or celles-ci sont soumises à de nombreuses pressions qui les affectent de manières différentes mais particulièrement en les soumettant à des phénomènes d'érosion qui diminuent la surface disponible des plages et donc l'attrait que représentent celles-ci pour les touristes.

La parade qui a été trouvée et appliquée depuis l'an 2000 est le processus de ré-ensablement de l'estran. Cependant, il faut soulever le fait que cette pratique n'est pas sans conséquences pour l'environnement écologique et sur les phénomènes naturels d'érosion-accumulation.

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les différentes causes à l'origine de l'érosion des plages de Saint-Barthélemy, de répertorier les efforts de ré-ensablement, qui a été la solution retenue dans ce cas particulier pour palier à ce problème, d'évaluer leur efficacité et les conséquences environnementales qui en découlent. Nous nous appuierons ensuite sur le cas d'étude de la baie de Saint-Jean et enfin nous regarderons les alternatives possibles au ré-ensablement et plus particulièrement sur l'alternative qui pourrait être proposée pour la plage de Saint-Jean.

I/ Les causes de l'érosion

Les apports et les pertes de sédiments sont des phénomènes naturels, cependant leurs équilibres peuvent être perturbés. Lorsque les pertes sont supérieures aux apports, le littoral s'érode. Les causes de l'érosion sont multiples, d'origine naturelle ou anthropique, et il est difficile de déterminer quelle cause précise est responsable. Il s'agit le plus souvent d'une combinaison de causes qui engendrent ce phénomène naturel.

On peut cependant regarder de manière séparée les différentes causes possibles, en commençant par les causes naturelles.

1) Causes naturelles

a) Ouragans, tempêtes

La première cause d'érosion, ponctuelle et d'intensité forte, est l'occurrence de tempêtes tropicales puissantes ainsi que des ouragans de classe importante passant à proximité de l'île de Saint-Barthélemy. Plus ceux-ci sont de classe importante, plus ils auront d'impact sur le paysage et l'environnement.

Ainsi, si on regarde les ouragans ayant eu le plus d'impact sur l'île depuis 1995, on a 7 ouragans principaux dont la date de passage à proximité de l'île, le nom ainsi que leur classe sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Date du passage	Nom de l'ouragan	Classe de l'ouragan
5 Septembre 1995	LUIS	4
20 Octobre 1999	JOSÉ	2
19 Novembre 1999	LENNY	2
22 Août 2000	DEBBY	1
15 Octobre 2008	OMAR	3
31 Août 2010	EARL	4
13 Octobre 2014	GONZALO	1

Tableau 1 : Historique des ouragans ayant touchés Saint-Barthélemy depuis 1995

En 1999, l'île a subi deux ouragans de classe 2, ce qui est d'ampleur moyenne, mais le fait que le deuxième soit survenu seulement 1 mois après le premier a démultiplié les impacts de Lenny.

L'ouragan Luis, de 1995, avait eu un impact très important sur l'île et en particulier sur les lignes de côtes et donc la longueur des plages. La résilience naturelle n'ayant pas permis aux plages de retrouver leur aspect originel en 4 ans, additionné aux deux ouragans de 1999, il a été décidé de rendre les aspects initiaux aux plages de manière artificielle.

Échelle de Beaufort	Vents soutenus sur 10 minutes (Nœuds)	Catégorie système tropical
0 - 6	< 28	Dépression tropicale
7	28-29	
		30-33
8 - 9	34-47	Tempête tropicale
10	48-55	
11	56-63	Ouragan Force 1
	64-72	
12	73-85	Ouragan F 2
	86-99	Ouragan F 3
	100-119	Ouragan F 4
	> 120	Ouragan F 5

Tableau 2 : Echelle de beaufort et dénomination associée en Atlantique Nord-Ouest

b) Orientation des plages et des courants principaux

La houle à Saint-Barthélemy est une houle d'Est et éventuellement de Nord-Est dans le cas de fortes houles dues à des tempêtes tropicales passant au large de l'île. Ajoutée à l'orientation, la morphologie même de la plage peut être un facteur important, ainsi les baies ouvertes telles que Saint-Jean ou Lorient sont plus impactées par ces houles que dans des anses étroites telles que Marigot ou Petit Cul-de-sac.

Orientation de la houle Nord-Est et plages exposées

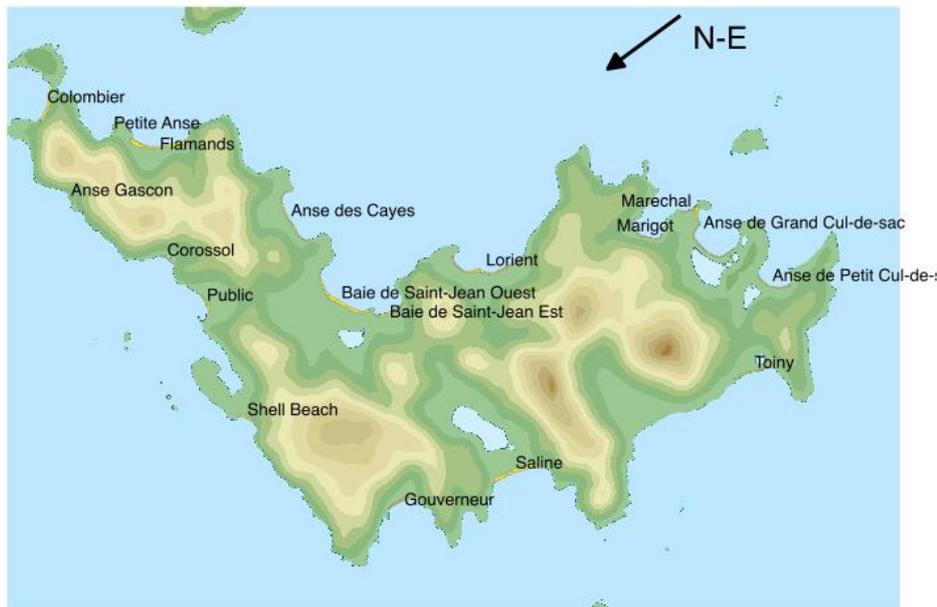


Figure 1 : Carte représentant l'île de Saint-Barthélemy et l'orientation de la houle dominante

Ainsi, les plages les plus vulnérables à l'action de la houle sont Lorient, Saint-Jean, Anse des Cayes, Marigot, Anse de Grand Cul-de-sac et Anse de Petit Cul-de-sac.

c) Granulométrie des plages

La granulométrie des plages est importante, particulièrement lorsqu'il s'agit de caractériser l'érosion des plages ainsi que la forme d'érosion principale.

Plus le sable est fin, plus celui-ci est susceptible de repartir sous l'action des vagues et des courants et de re-sédimer seulement au large. En revanche, un sable avec une granulométrie plus grosse aura une meilleure préhension sur la plage et une meilleure résistance à l'érosion.

Ainsi, de manière officielle en France, la granulométrie est définie, selon la norme française NF P18-560, en différentes catégories :

Taille maximale	Appellation	Taille minimale
200 mm	Cailloux	20 mm
20 mm	Graviers	2 mm
2 mm	Sables grossiers	0,2 mm
0,2 mm	Sables fins	20 µm
20 µm	Limons	2 µm
2 µm	Argiles	

Tableau 3 : Granulométrie selon la norme NFP18-560

La vitesse de sédimentation des grains de sable, et donc la distance parcourue lorsqu'ils sont en suspension, suit la loi de Stokes et dépend de plusieurs paramètres, dont le diamètre moyen des particules, c'est à dire leur granulométrie.

La vitesse de sédimentation donnée par la loi de Stokes est donc la suivante :

$$v = \frac{2r^2 g \Delta(\rho)}{9\eta}$$

avec v : la vitesse limite de chute (en m/s)

r : le rayon de la sphère (en m)

g : l'accélération de la pesanteur (en m/s²)

$\Delta(\rho)$: différence de masse volumique entre la particule et le fluide (en kg/m³)

η : viscosité dynamique du fluide (en Pa.s)

On peut donc résumer l'influence du diamètre des grains de sable sur leur distance avant sédimentation par un graphique :

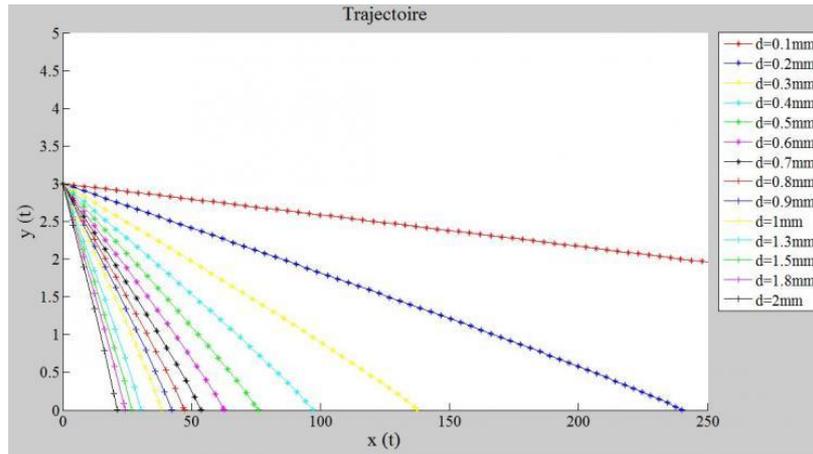


Figure 2 : Trajectoire de sédiments en fonction de leur diamètre

Plus le diamètre de la particule est important, plus la distance parcourue par celle-ci sera faible.

En outre, mis à part l'érosion marine, il y a aussi une érosion éolienne qui est non-négligeable, en particulier lorsque la granulométrie est très fine, comme c'est le cas à Saline, Gouverneur, Flamand et Saint-Jean. Il y a deux grands types d'érosion éolienne possible, qui dépendent de la taille de grain de sable et de la force du vent. Le premier est la saltation, qui concerne les particules fines, comprises entre 0,5 mm et 1,1 mm. Le sable se déplace par une série de sauts pouvant monter jusqu'à 1 mètre de hauteur et parcourir entre 0,5 et 1 mètre de longueur.

Le deuxième type d'érosion éolienne concerne un plus grand nombre de particules, celles comprises entre 0,5 mm et 2 mm. Il s'agit de la reptation. Les particules trop lourdes pour être soulevées, ou lorsque le vent n'a pas assez de force, roulent ou glissent à la surface.

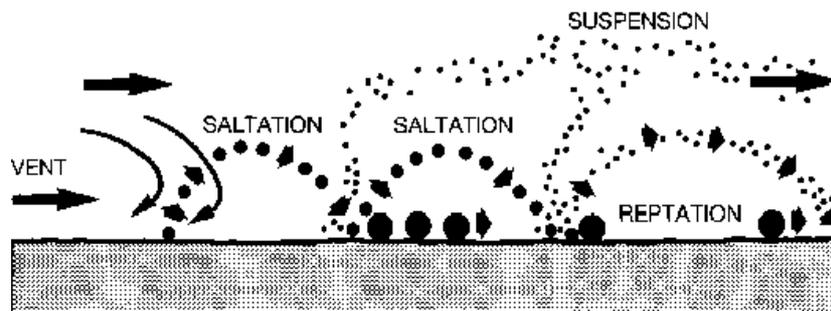


Figure 3 : Schéma des différents type d'érosion éolienne

d) Beachrock

Sur certaines plages, un autre paramètre peut aussi entrer dans l'équation de l'érosion des plages : la présence de beachrock.

Il s'agit de formations contemporaines des plages le plus souvent tropicales et coralliennes, sous forme de sédiments de plage consolidés par un sédiment calcaire, dont la formation n'est pas totalement élucidée, soit d'origine physico-chimique dans la zone soumise au reflux (zone intertidale), soit d'origine biologique, du à des bactéries ou des algues. Ces consolidations ne sont pas sur toutes les plages d'une île et s'étendent rarement à l'ensemble d'une plage.

L'impact de ces formations sur les plages est d'ordre physique. En effet, le sable étant consolidé, il ne peut pas partir avec la houle et les courants et, comme la pente de ces sédiments est identique à la pente naturelle de la plage, il y a conservation de l'amortissement naturel de la puissance de la houle et donc de la dissipation de la houle. En outre, ces structures jouent aussi le rôle de barrage naturel lorsqu'elles sont mises à nue suite à un démaigrissement de la plage, en formant des micro-cuestas qui retiennent le sable qui serait parti, dans le cas où elles n'existeraient pas, avec la houle.

Il peut naturellement y avoir une modification des bancs de beach-rock, ce qui est visible lorsqu'il y a des bancs superposés discordants, avec des pendages différents. On a ainsi la possibilité sur les plages présentant ces particularités de reconstituer l'évolution du profil de la plage.

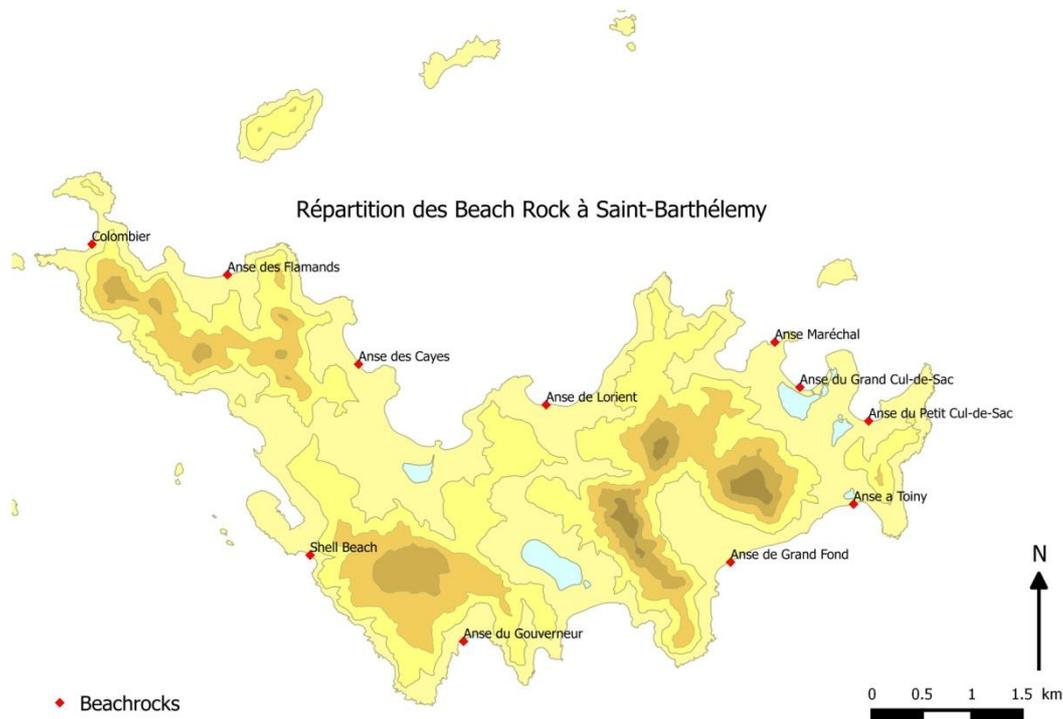


Figure 4 : Carte répertoriant les beachrocks de l'île de Saint-Barthélemy

On peut voir sur cette carte répertoriant les beachrocks présents sur l'île de Saint-Barthélemy que, parmi les plages les plus concernées par les ré-ensablement, seul Lorient possède un beachrock. Ainsi, les autres plages comme Saint-Jean ou Corossol ne bénéficient pas de cette protection physique supplémentaire.

e) Etat des écosystèmes marins

Enfin, un des facteurs ayant un impact majeur sur l'érosion est l'état des biocénoses marines. Plus un fond marin est en bon état écologique, plus il sera apte à « rendre ses services écosystémiques ». Les services écosystémiques sont les bénéfices que les humains retirent des écosystèmes sans avoir à agir pour les obtenir. A Saint-Barthélemy, l'évaluation économique des services écosystémiques des récifs coralliens et des écosystèmes associés ont été évalués par

IFRECOR en 2015 et on été estimés à environ 32 M€ annuels avec 10% de ce prix, soit près de 3 M€, qui est du à la protection côtière.

En effet, les écosystèmes côtiers rendent de nombreux services aux littoraux et c'est plus particulièrement vrai pour deux grands types d'écosystèmes : les herbiers de phanérogames marines et les récifs coralliens. Cependant pour des raisons multiples, ces écosystèmes peuvent être dégradés et dans ce cas leur rôle, mécanique notamment, est altéré et l'efficacité de ces services écosystémiques diminue.

Il y a deux services principaux que rendent ces deux écosystèmes qui nous intéressent dans le cadre de l'érosion des plages. Le premier est purement physique avec un phénomène d'atténuation de la houle et de rétention du sable tandis que le deuxième est biologique avec un phénomène de production de sable.

Tout d'abord, les récifs coralliens ont une influence importante sur l'équilibre sédimentaire des plages coralliennes. Ils permettent, par une action mécanique, l'atténuation de la force de la houle, ce qui diminue l'érosion. Ils peuvent atténuer jusqu'à 90% l'énergie des vagues générées par le vent. Ainsi, selon des études scientifiques menées sur des îles, dont le Sri-Lanka, un mètre carré de récifs corallien protégerait 2000 mètres cube de sable de l'érosion par an. Par ailleurs, ils alimentent aussi les plages en sable par leur grande richesse écologique. En effet, des poissons vivant dans ces récifs, tels que les poissons-perroquets, ainsi que des échinodermes, comme certains oursins à l'instar de l'oursin diadème (*Diadema antillarum*) ou de l'oursin perforant (*Echinometra lucunter*), produisent du sable de part leur régime alimentaire. Un poisson-perroquet produit en moyenne 100 kilogrammes de sable par an. Un poisson-perroquet à rayure (*Scarus croicensis*) produit en moyenne 0,49 kg/m²/an de sédiment tandis qu'un oursin diadème produit 4,6 kg/m²/an et qu'un oursin perforant produit 3,9 kg/m²/an.

Ensuite, les herbiers atténuent l'impact des vagues sur le rivage, en ralentissant aussi les courants et cassant la houle. Mais un deuxième avantage de ces écosystèmes pour les plages est du a leur morphologie. Les herbiers sont composés de phanérogames et ces plantes ont donc des racines qui peuvent se fixer de manière profonde et cela permet donc de stabiliser le substrat marin et aussi d'empêcher le sable de repartir vers le large. En outre, les herbiers abritent de nombreux juvéniles de poissons récifaux, qui permettent la création de sable. Ils favorisent donc l'entretien de la population et donc de manière indirect l'apport en sable permet par l'écosystème récifal.



Figure 5 : Schéma des interactions des milieux (par l'Agence Territoriale de l'environnement)

Un écosystème sain fonctionne ainsi comme un système clos pour les sédiments. La houle arrivant du large est amortie une première fois au niveau du récif corallien, puis une

seconde fois au niveau de l'herbier. La force de la houle achève d'être amortie lorsque les vagues cassent sur la plage. Du sable est malgré tout entraîné au large avec le ressac des vagues, mais il est capté en majorité par les phanérogames des herbiers, empêchant le récif d'être étouffé par le sable. Les juvéniles de poissons herbivores sont protégés par l'herbier puis, une fois adultes, vont coloniser à leur tour le récif coralliens, permettant la création de sable qui pourra se déposer sur la plage. Les sédiments sont donc dans un cycle, un système clos à plusieurs habitats.

Cependant, lors de tempêtes importantes, les vagues peuvent passer au dessus des barrières coralliennes et déferler directement sur la plage, entraînant le sable au large. Puis, lorsque la mer retrouve son calme, le sable ne peut plus franchir le récif à cause de la morphologie de celui-ci et des conditions hydrodynamiques. Il n'y a donc pas résilience du système sédimentaire dans ce cas.

Cependant ces écosystèmes ont tendance à être dégradés ces derniers temps, et pour de raisons multiples. Or, une fois dégradés, les services écosystémiques rendus sont moins efficaces et l'équilibre sédimentaire est perturbé. Une barrière de corail qui est dégradée devient plus fragile, se casse lors de fortes houles et son effet de brise-lame face aux vagues qui déferlent est diminué. En outre, un récif dégradé offre moins d'abris et de ressources alimentaires aux poissons et autres animaux récifaux et donc la production de sable est diminuée en même temps que la santé globale du récif. Il y a ainsi une double perte d'efficacité de préservation des plages coralliennes avec l'altération des récifs.

L'altération des herbiers, quand à elle, fait perdre une nurserie aux juvéniles des poissons coralliens et donc diminue l'efficacité de l'écosystème récifal de manière indirecte et sur la durée. Mais il y a aussi une conséquence immédiate, car les phanérogames en mauvaise santé résistent moins aux tempêtes tropicales et se déracinent lors de ces phénomènes météorologiques et ne retiennent donc plus le sable qui peut donc être entraîné sans obstacle vers le large.

2) Causes anthropiques

a) Urbanisation

Si les causes naturelles, qu'elles soient physiques, biologiques ou issues d'évènements météorologiques exceptionnels ont leur part dans la probabilité d'érosion des plages, un autre type de cause est essentiel à soulever : il s'agit des causes anthropiques. En effet, les littoraux ont toujours été soumis à la pression humaine, quelle que soit l'époque et quel que soit le lieu. En revanche, cette pression anthropique augmente de manière très forte depuis quelques dizaines d'années. En particulier, l'île de Saint-Barthélemy, déjà de taille assez réduite, est soumise à une pression démographique très importante. Cependant, l'urbanisation doit suivre cette croissance et les constructions sortent de terre sur l'ensemble de l'île et les bords de plage, très attractifs, sont loin d'être épargnés.

Cependant, ces constructions en bord de mer ont de nombreux impacts sur les écosystèmes environnants. Tout d'abord, la construction des maisons, ou des villas, implique un défrichement des terrains. Lorsqu'elles sont un peu en retrait de la côte, l'impact n'est pas direct. En revanche, lorsque les propriétaires décident d'avoir vue sur la mer, la végétation littorale présente entre la construction et la mer est défrichée. Dans certains cas, la construction des propriétés peut même conduire jusqu'à la destruction de la dune.

Ainsi, ces deux actions principales ont un impact direct sur l'érosion des plages. En effet, les dunes permettent de maintenir l'équilibre du système « plage » en servant de réserve de sable et d'amortissement de houle, ainsi que de barrières en cas de fortes vagues, lors de fortes

marées ou d'ouragans. La végétation littorale a elle aussi un rôle de protection du bâti en son arrière, des rafales de vent notamment mais aussi en cas de fortes vagues, la puissance de celles-ci sera cassée par la présence des arbres en particulier.

L'urbanisation en bord de mer ayant comme effet de détruire les barrières naturelles pour protéger les constructions des fortes houles, les habitants ressentent le besoin de protéger leurs biens de manière artificielle. La solution la plus fréquemment retenue car la plus rapide et la plus « efficace » est la construction de murs devant leur terrain. Cependant ces murs, qui paraissent de premier abord la solution idéale, sont en fait une solution ayant l'effet parfois inverse à l'effet cherché. En effet, l'énergie des vagues, au lieu d'être dissipée progressivement lorsque la vague déroule vers le haut de la plage, est réfléchi sur les murs, entraînant avec elle le sable et pouvant aller jusqu'au déchaussement de l'ouvrage car cette augmentation de la réflexion de la houle sape ses propres fondations. La turbulence accrue au pied de l'ouvrage entraîne donc l'ablation du sable, donc un abaissement du profil de la plage et ainsi une avancée de la mer, soit l'exact opposé de ce qui était recherché avec la construction du mur.

L'urbanisation a donc un impact marqué et physique sur l'érosion des plages. Cependant, la destruction des dunes et la construction d'ouvrages littoraux ne sont pas les seuls facteurs amplifiant l'érosion amputables aux Hommes. Les activités humaines ont également un impact non négligeable sur l'état de santé des biocénoses.

b) Dégradation des écosystèmes littoraux

En effet, une des conséquences de l'urbanisation est la construction de maisons, donc le besoin d'évacuer des eaux usées domestiques. Cependant, il s'agit majoritairement d'assainissement non-collectif et donc le contrôle de l'eau rejetée est compliqué et cette eau se rejette ensuite dans la mer. Cependant, si les eaux usées vont se déverser dans les eaux littorales avec un courant faible qui ne permettent pas une dilution assez rapide, cela peut entraîner une pollution de l'eau, notamment par des bactéries fécales.

Une grande fréquentation des baies par les bateaux peut entraîner une pollution chimique que ce soit par les hydrocarbures ou des particules de métaux lourds, tels que le zinc ou le cuivre, qui proviennent de la peinture de la coque des bateaux ou des anodes sacrificielles.

Cette dégradation possible de la qualité de l'eau s'additionne à d'autres causes possibles qui entraînent la dégradation des herbiers et des récifs coralliens. En effet une eau de mauvaise qualité entraîne la maladie et donc la mort ou la dégénérescence des plantes et des animaux. Certaines maladies, telle que le blackband disease qui cause la mort des coraux, sont exclusivement dues à la présence de bactéries fécales, et donc dues à un mauvais assainissement des eaux usées. Les herbiers quand à eux sont particulièrement sensibles aux pollutions chimiques, en particulier au pétrole et aux engrais, et se dégradent rapidement dans le cas d'eau polluée par ces composants.

La dégradation des herbiers et des récifs peut être aussi due à une trop forte fréquentation des milieux par les humains avec notamment des ancrages en herbiers qui entraîne l'arrachage des phanérogames et donc une diminution de la densité des herbiers voir une disparition totale du fait d'un affaiblissement de la population. Les ancrages au niveau des zones de récifs coralliens entraînent souvent de la casse de coraux. Or la croissance de ces organismes étant très lente, un nombre conséquent d'ancrage au niveau des récifs ont un impact négatif très fort sur ce milieu. La surfréquentation des sites de plongée a aussi un impact, notamment sur la faune. En effet, les poissons, trop souvent dérangés, vont délaisser ces zones en faveur de zones plus calmes.

Enfin, une surpêche de certaines espèces, tels que des espèces de poisson-perroquet à l'aide de casiers par exemple, peut entraîner un déséquilibre de l'écosystème récifal, comme une invasion du récif par les algues, ce qui entraînerait le dépérissement de celui-ci.

Ainsi, une estimation a été faite sur les coraux et la probabilité d'être menacé à cause du développement littoral est mise en couleur sur cette carte. Les coraux désignés en bleu sont ceux qui sont peu menacés. En jaune, la menace subie est moyenne et en rouge, elle est élevée. On voit que la menace la plus grande qui pèse sur les coraux est au niveau de Saint-Jean, Anse des Cayes et de Flamands.

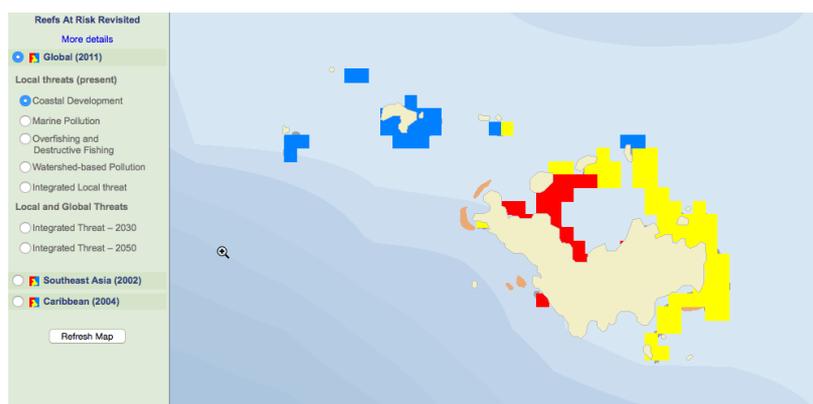


Figure 6 : Carte des coraux menacés par le développement littoral (Source : Reefgis)

Enfin, en plus de sa destruction partielle due à l'urbanisme, la présence anthropique peut aussi avoir un impact marqué sur l'écosystème des dunes. En effet, il y a généralement un piétinement de la végétation des dunes qui est associé à la fréquentation des plages par les humains, lors de leur accès à la plage. En outre, si l'accès à la plage n'est pas défini, le nombre d'accès à la plage se multiplie et le piétinement entraîne une dégradation de la végétation dunaire.

Pour répondre à l'érosion des plages, à Saint-Barthélemy, la solution qui a été retenue est le ré-ensablement. En effet, une disparition partielle ou complète des plages porterait préjudice au tourisme qui est pourtant vital pour l'économie de l'île. Ainsi lorsque la surface des plages a été trop impactée et que la résilience n'est pas assez rapide du point de vue touristique, le retour du sable sur la plage est fait artificiellement.

II/ Solutions déployées et historique des ré-ensablements

Le principe du ré-ensablement est de prélever du sable d'un endroit pour le redéposer sur la plage souhaitée afin de lui donner l'apparence choisie. Il y a donc plusieurs façons de procéder mais il est intéressant pour notre étude de regarder quels ont été les procédés utilisés ainsi que de faire un historique des ré-ensablements ayant eu lieu sur l'île.

1) Techniques mises en œuvre

Deux procédés ont été utilisés pour ré-ensabler les plages de l'île : les ré-ensablements par camions et les ré-ensablements par drague hydraulique stationnaire. La première technique est utilisée généralement dans le cas où les cubages à rajouter sont de volume relativement réduits, de l'ordre de quelques centaines ou d'un millier de mètres cubes. Il

s'agit de transférer du sable disponible sur l'île, ou du sable acheté sur des îles voisines, et de le transporter par camions sur la plage souhaitée afin d'allonger la surface sèche en plage disponible.

La deuxième technique est plus complexe et est utilisée dans le cas où la quantité à déposer sur l'estran atteint plusieurs milliers de mètres cubes.

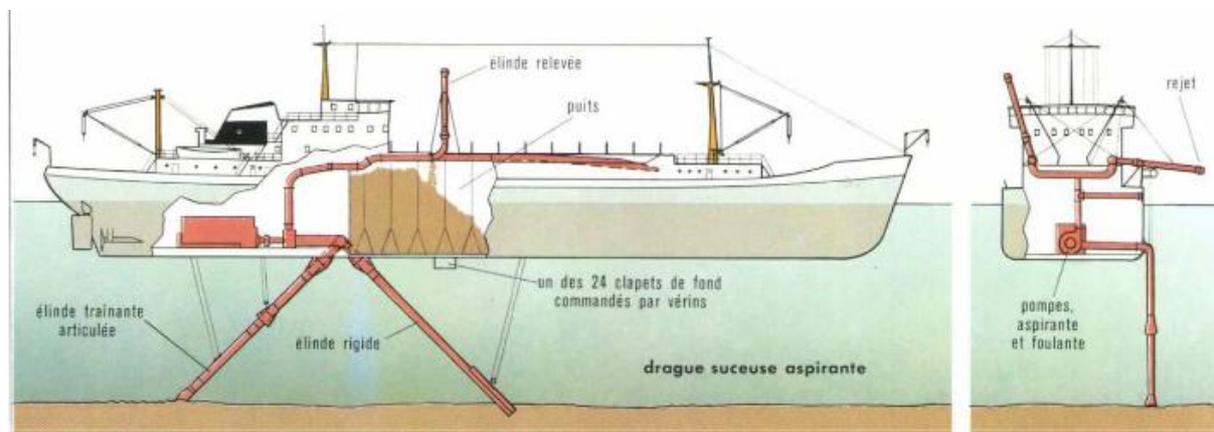


Figure 7 : Schéma de drague hydraulique stationnaire (source : Larousse)

Les dragues hydrauliques stationnaires, ou dragues aspiratrices, sont des dragues qui injectent de l'eau afin d'extraire les sédiments du fond en les mélangeant à l'eau. Le tuyau d'aspiration est porté par un tube appelé « élinde » qui est articulé. Les sédiments extraits sont ensuite rejetés sur la plage à l'aide de canalisations, flottantes dans le cas des ré-ensablements de Saint-Barthélemy.

Ce prélèvement de matériau laisse des marques sur le fond marin. Dans le cas des dragues hydrauliques stationnaires, les empreintes laissées sont des dépressions circulaires, avec une profondeur et un diamètre variable, pouvant aller jusqu'à plusieurs mètres de profondeur.

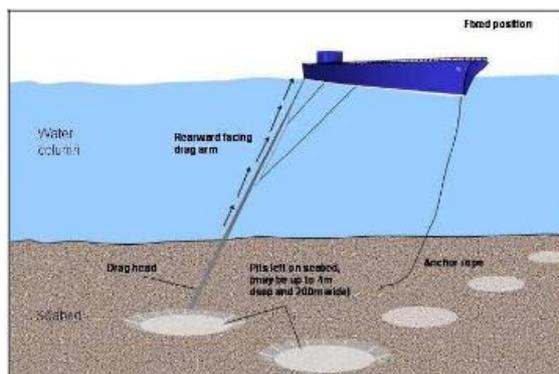


Figure 8 : Schéma des types d'empreintes laissées par une drague hydraulique stationnaire (source : Larousse)

Cette modification des fonds a un impact écologique mais aussi hydrodynamique et il est intéressant de regarder quelles conséquences elle engendre. Cependant, il faut d'abord regarder les caractéristiques des ré-ensablements des plages de Saint-Barthélemy.

2) Historique des ré-ensablements

Sur les 13 plages touristiques principales, depuis l’an 2000, un certain nombre ont subi des ré-ensablements. Il est intéressant de répertorier lesquelles sont concernées par ce phénomène et les quantités de sable déposées à chaque fois.

Plage	Année de ré-ensablement	Cubage ajouté (en m ³)	Période des travaux
Colombier	2000	12 000	Mai
Corossol	2000	6 000	Mai
	2009	300	Début Août
	2010	entre 3 000 et 8 000	9 Juillet au 15 Août
	2014	Δ	Δ
Gouverneur	2000	13 500	Mai
Lorient	2014	Δ	Δ
	2015	Δ	13 au 27 Avril
Public	2000	7 000	Mai
	2009	300	Début Août
	2010	Δ	Δ
Saint-Jean	2000	8 000	Mai
	2007	Δ	Décembre
	2010	15 000	Δ
	2014	Δ	Δ
Shell Beach	2000	8 000	Mai
	2010	Δ	18 août-5 septembre

Δ : Pas de renseignements

Tableau 4 : Historique des ré-ensablements

Ainsi on peut remarquer sur ce tableau que toutes les plages n’ont pas subi un nombre de ré-ensablement identique. Les plages les plus concernées par cette pratique sont les plages de Saint-Jean et de Corossol avec 4 ré-ensablements.

Il faut cependant noter que cette liste n’est pas totalement exhaustive car des ré-ensablements de faible ampleur ont parfois eus lieu directement par camion et ceux-ci peuvent ne pas avoir été répertoriés dans les archives disponibles.

Pour avoir un aperçu de manière plus explicite, les plages ont été mises en évidence sur la carte qui suit, avec une couleur correspondant au nombre de ré-ensablements qu’elles ont subies.

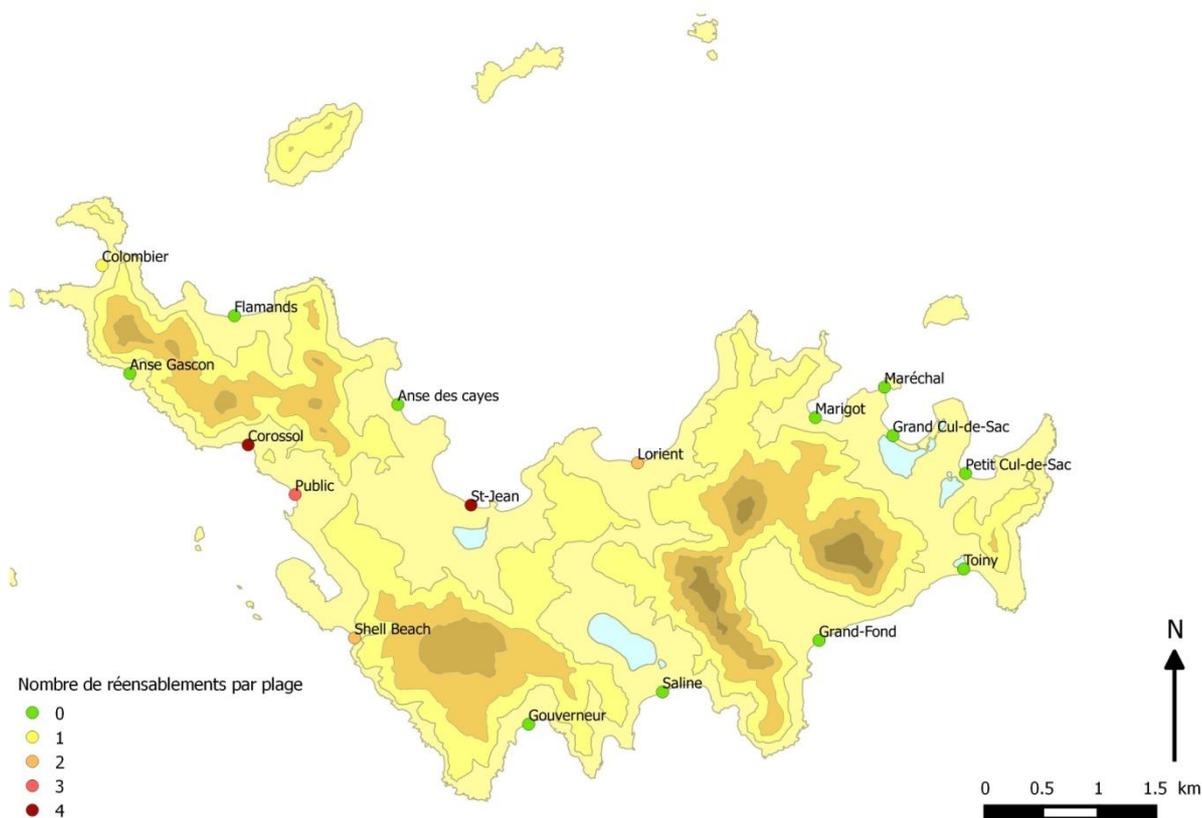


Figure 9 : Carte représentant le nombre de ré-ensablements par plage sur l'île de Saint-Barthélemy

3) Prix des interventions

Les ré-ensablements sont donc une solution rapide pour redonner l'aspect souhaité à une plage, souvent un aspect précédent en tempête, mais ces actions ne sont pas sans conséquences. La première conséquence que nous pouvons souligner est la conséquence financière. En effet, les ré-ensablements ont un coût et pour procéder à cette technique, il faut que des gens investissent. Il est intéressant de regarder les coûts qui ont été nécessaire pour procéder aux travaux de ré-ensablement.

Le budget global qui a été accordé en 2000 pour restaurer un total de 6 plages est de 335 292\$, soit environ 406 000€, pour une quantité totale de 28 000 m³, soit un coût de 14,5€ par mètre cube.

Le budget global de 2007 à été de 160 000 euros pour 15 000 m³ de sable déposé, soit environ 10,7 € le mètre cube. Celui de 2010 est de 475 000€ avec un prix au mètre cube de 15€ pour le sable pompé.

Année	Prix total	Prix par m ³ (en €)	Nombre de plages
2000	335 292 \$	14,5	6
2007	160 000 €	10,7	1

2010	475 000 €	15	3
------	-----------	----	---

Ainsi, entre 2000 et 2016, le coût total des ré-ensablements connus représente 1 041 316 €. Il ne faut cependant pas oublier que les prix ci-présentés ne représentent que le prix du sable pompé. Il faut inclure les études topographiques préalables ainsi que les suivis post-ré-ensablement ; ce qui peut devenir un budget conséquent dans le cas où les rechargements ont lieu à une fréquence plus importante et s'ils sont de grande ampleur.

Tableau 5 : Récapitulatif des budgets des 3 ré-ensablements principaux

Ainsi, ces travaux ont nécessité un fort investissement, qui dans certains cas n'a pas été utile car le sable déposé a été enlevé 2 semaines plus tard par une tempête tropicale, comme ce fut le cas pour le ré-ensablement des plages de Corossol et de Lorient en 2014.

4) Commanditaires

Ces opérations représentent donc un coût financier conséquent et il est intéressant de regarder qui les financent, totalement ou en partie.

En 2000, lors des premiers ré-ensablements ayant eu lieu sur l'île de Saint-Barthélemy, une campagne de financement avait été lancée, faisant appel aux dons des associations de commerçants, des socioprofessionnels tels que les hôteliers ainsi qu'à la générosité des habitants. En 2008, la demande de ré-ensablement de la plage de Saint-Jean avait émané uniquement de la part de l'association des hôteliers de St-Barth.

Il n'y a, dans toutes les opérations menées de 2000 jusqu'en 2016, aucune subvention de l'État qui ont été accordées. Les coûts des ré-ensablements ont donc été entièrement supportés par la population de l'île, et en particulier par les associations socioprofessionnelles, avec le support parfois de donateurs extérieurs.

Cependant, la conséquence économique et financière pour les habitants et les professionnels n'est pas la seule conséquence qui résulte des activités de dragage. Des conséquences touchant des domaines plus vastes sont aussi concernés.

III/ Conséquences des ré-ensablements

1) Modification des fonds marins

La méthode de ré-ensablement par drague hydraulique aspiratrice a, comme vu dans le paragraphe précédent, comme conséquence de générer des dépressions de diamètre plus ou moins important et de profondeur de 1m50 environ. Cette modification de la profondeur a un impact sur l'hydrodynamisme de la zone concernée. Ainsi, les mouvements de masses d'eau (courants, houle, marées, turbulences) vont être perturbés par les modifications morphologiques des fonds marins et cela va avoir un impact sur les processus sédimentaires locaux. En effet, les dragages avec approfondissement, comme c'est le cas ici avec prélèvement de matériaux pour les redéposer sur l'estran, sont les plus susceptibles de modifier l'hydrodynamisme local. Ainsi, ils peuvent rompre l'équilibre des processus de transit sédimentaire.

Les effets sur le milieu peuvent cependant s'étendre à un périmètre supérieur à celui où se déroule le pompage en lui-même et affecter le régime du système hydro-sédimentaire dans lequel l'opération de dragage s'insère.

Ainsi, dans un système clos de plages coralliennes un déséquilibre dans la quantité de sable et sa position va entraîner une multitude de conséquence, comme le glissement d'autre portions de plage pour combler la dépression causée par un pompage au milieu du système. Le ré-ensablement d'une partie de plage peut ainsi provoquer l'érosion d'une autre portion dans le cas où l'évaluation des risques d'incidence du dragage n'a pas été fait correctement.

2) Impact sur les récifs et les herbiers

Les dragages ont des impacts multiples sur les milieux environnants les lieux de pompage et les lieux de dépôt.

Les dragages ont tout d'abord un impact sur la qualité des milieux environnants. En effet, lorsque les matériaux qui vont être redéposés sur l'estran sont prélevés, il y a une turbidité qui se crée et une remise en suspension des sédiments qui étaient enfouis depuis des temps variables.



Figure 10 : Photo prise lors du ré-ensablement de la plage de Saint-Jean en 2010

Cette turbidité peut être très importante et est marquée au niveau de la zone de pompage et de la zone de dépôt. Or une turbidité importante diminue la quantité de lumière qui atteint les fonds marins. Cependant il se trouve que les phanérogames composant les herbiers ont besoin de lumière pour faire de la photosynthèse et remplir leurs fonctions vitales. De même, les coraux sont des animaux qui vivent en symbiose avec des algues et dont l'accès à la lumière est une des conditions de leur survie, ce qui explique le fait que les colonies coralliennes soient situées en zones de faible profondeur. Ainsi, une forte turbidité qui se développe au niveau des zones tels que les herbiers et les récifs coralliens empêche les organismes principaux de remplir leur fonctions vitales et donc entraîne un dépérissement de l'habitat.

En outre, cette remobilisation de particules peut avoir des conséquences pour l'environnement dans le cas où ces particules sont contaminées par des apports du bassin versant ou des activités maritimes. En effet, si les particules de métaux provenant des bateaux, comme du cuivre de leurs peintures anti-salissure, ou du zinc de leurs anodes sacrificielles, ou des traces de carburant fossile ont eu le temps de sédimenter, leur remise en suspension va de

nouveau avoir des impacts, notamment sur la faune. Par exemple, certains mollusques, tels que les huîtres, sont des bioaccumulateurs de cuivre, ce qui fait que lorsque la concentration en ce métal est trop importante dans le milieu, ces organismes y sont particulièrement sensibles. Ainsi, selon une étude menée dans le bassin d'Arcachon sur les huîtres *C. gigas*, une espèce non locale de Saint-Barthélemy, avec des teneurs de 50 µg.l⁻¹, le développement embryonnaire des larves d'huîtres est totalement perturbé. Enfin, bien que le seuil de toxicité dépend des espèces considérées, de la salinité, de la solubilité de ses sels, du degré d'oxydation et de l'état de complexation du cuivre, une remise rapide du cuivre en suspension provoquera invariablement une augmentation de la concentration en cuivre dans le milieu et donc un risque de dépassement de la concentration létale pour certaines espèces marines.

Cependant, ce qui est valable pour le cuivre et aussi valable pour d'autres métaux. La remise en suspension de tout ces éléments qui avaient sédimentés augmente donc la probabilité que le seuil de toxicité d'au moins un élément soit dépassé pour au moins une espèce et un des éléments. Par ailleurs, il a été mis en évidence dans d'autres îles que le dragage pouvait entraîner des risques sanitaires notamment en provoquant une augmentation des cas de ciguatera.

Les dragages ont aussi un impact direct sur les populations faunistiques et floristiques des habitats où se déroulent les opérations. En effet, il y a un prélèvement immédiat du benthos, qui est l'ensemble des organismes vivants sur ou dans le fond des eaux (Cabane, 2012), qui colonise principalement les premiers centimètres du substrat visé par l'extraction. Les organismes arrachés ou aspirés sont détruits en quasi-totalité (Vega, 1999) avec une chance de survie uniquement pour les espèces les plus mobiles. En outre de la destruction directe des organismes, il peut y avoir une perturbation des niches écologiques. En effet, la nature des communautés benthiques dépend intrinsèquement de nombreux facteurs, dont les caractéristiques sédimentaires et les conditions hydrodynamiques locales. Ainsi, la modification de ces composantes peut entraîner des modifications dans la composition des communautés en place.

Ensuite, il y a une modification tout d'abord temporaire de la population ichthyologique. En effet, le dérangement des populations de poissons par la présence de la turbidité, décrite précédemment, est complété par un dérangement acoustique. Les opérations de dragage entraînent un dérangement acoustique avec des sons et des vibrations engendrés par le fonctionnement de la barge (moteur, rotation des hélices...) ainsi que par l'action directe de l'excavation (système de pompage, raclage des fonds...). Les poissons étant des organismes mobiles, ils fuient ces zones dérangées pour aller dans les zones moins perturbées. A la fin des opérations de dragages, la turbidité de l'eau va diminuer au cours du temps et donc la zone devient une niche écologique vacante qui va être recolonisée, notamment par des poissons. La recolonisation se fait au travers de différentes successions écologiques : la première étape est une phase de recolonisation rapide caractérisée par l'arrivée d'espèces opportunistes. Cette étape est suivie d'une phase de transition où les espèces opportunistes entrent en compétition avec les espèces initiales qui recolonisent le milieu. Cette étape implique une diminution de l'abondance en espèces opportunistes. Puis au bout d'un temps variable selon le milieu, un équilibre dynamique est atteint, avec une abondance caractéristique du type d'habitat. Cependant, le nouveau peuplement peut être différent de celui initial. En outre, la fréquence des opérations ainsi que le moment où elles sont réalisées détermine l'intensité des dérangements occasionnés aux organismes aquatiques. En effet des dragages sont répétés engendrent une diminution de la diversité des organismes aquatiques et de la biomasse globale (Wildish et Thomas, 1985). Ainsi, si les dragages se répètent à une fréquence excédant la résilience de la population initiale ichthyologique, la communauté des zones impactées par le dragage sera essentiellement dominée par des espèces opportunistes.

Les dragages engendrent donc une dégradation des herbiers et des récifs coralliens, ce qui, comme vu précédemment, augmente les processus d'érosions des plages situées en arrière

de ces habitats. En outre, la destruction du benthos et la perte de la diversité spécifique en poissons implique la diminution de la densité d'oursins et de poisson-perroquets qui sont des producteurs de sable qui entre ensuite dans le système hydro-sédimentaire clos des plages coralliennes et participe à l'engraissement des plages.

Ainsi, les dragages engendrent une dégradation des écosystèmes et de la biodiversité locale, ce qui engendre à la fois une augmentation de l'érosion sur les plages concernées, à cause de l'augmentation de leur vulnérabilité face aux causes engendrant cette érosion, ainsi qu'une diminution des apports sédimentaires qui auraient pu contrebalancer cette érosion intensifiée, à cause du dérangement des populations productrices de sable. En outre, une modification du régime hydro-sédimentaire peut être engendrée du fait de la modification des fonds marins, ce qui peut entraîner des modifications radicales des profils des plages à vitesse accélérée.

Les dragages sont cependant utilisés sur l'île de Saint-Barthélemy depuis l'an 2000, avec comme plage la plus concernée par les ré-ensablements la plage de la baie de Saint-Jean, totalisant 4 ré-ensablements de grande ampleur entre 2000 et 2016. Il est intéressant de regarder les caractéristiques physiques et biologiques pouvant expliquer la fréquence de ces opérations sur cette plage ainsi que d'essayer de regarder l'impact des ré-ensablements sur son profil.

IV/ Cas d'étude : La baie de Saint-Jean

La plage de Saint-Jean est une plage de sable corallien de 1,6 kilomètre de long, orientée plein nord. Un récif corallien frangeant est situé vers le centre de la baie, à une distance de 160 mètres de la côte. Une passe est située à l'intérieur de ce récif, mesurant environ 60 mètres de largeur. La plage est séparée en 2 par la présence d'une avancée rocheuse, située environ aux deux tiers de la plage à partir de l'ouest.

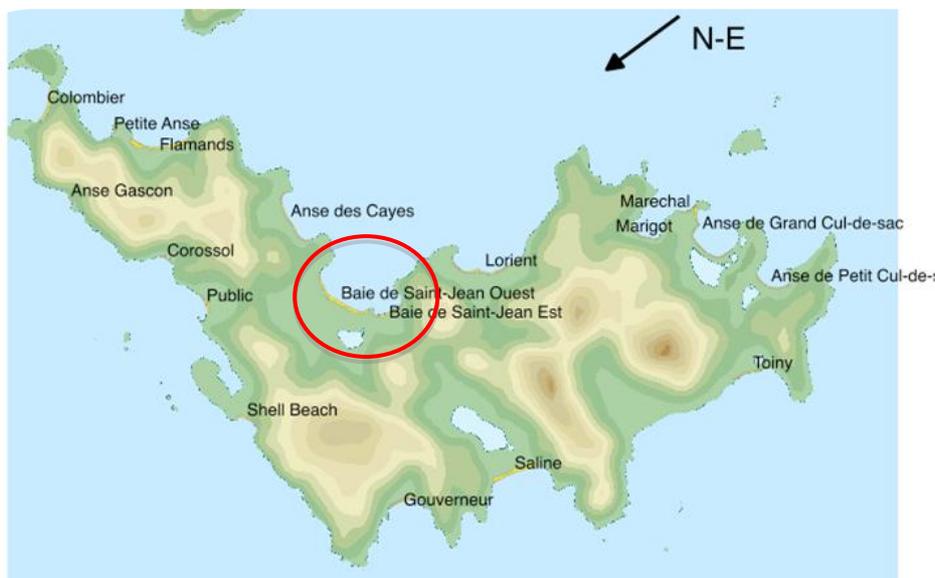


Figure 11 : Localisation de la plage de Saint-Jean

1) Courantologie et granulométrie

La houle principale de Saint-Barthélemy est une houle provenant du Nord ainsi que du Nord-Est. La baie de Saint-Jean est une baie ouverte et orientée direction Nord-Nord-Est et est

donc particulièrement sensible à des entrées de fortes houles dedans. Les courants marins de la baie sont ainsi créés principalement par la houle et sont donc soumis à des variations selon l'évolution de celle-ci, que ce soit au court d'une année ou bien au court d'une journée. Il y a cependant un courant dominant qui semble exister dans la baie. Le courant entrerait du large vers la baie par la passe située entre les deux principaux récifs coralliens. Le courant principal serait ensuite orienté de l'ouest de la baie vers l'est, au niveau de l'avancée rocheuse, de manière parallèle à la côte. Au niveau de la partie est de la baie, un courant parallèle à la côte et de direction ouest-est est aussi présent.

L'impact érosif des courants sur la plage est donc maximal en face de la passe où s'engouffre la houle sans être freinée par le récif et où le courant est donc maximal.

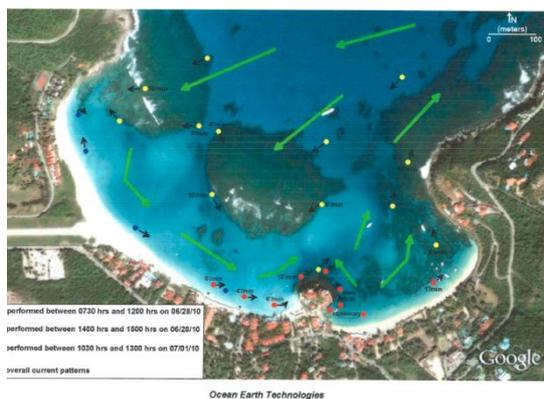


Figure 12 : Schéma de la courantologie de la baie de Saint-Jean (source : Ocean Earth Technologies)

Le sable composant la baie de Saint-Jean est un sable corallien et donc il est fin principalement, ou moyen, avec même la présence de grain très fins. On remarque une disparité de la distribution de la granulométrie suivant la localisation du sable sur la plage. En effet, vers l'arrière-plage, le sable a tendance à avoir des proportions plus importantes de grain à forte granulométrie que s'il est situé dans la zone de déferlement des vagues.

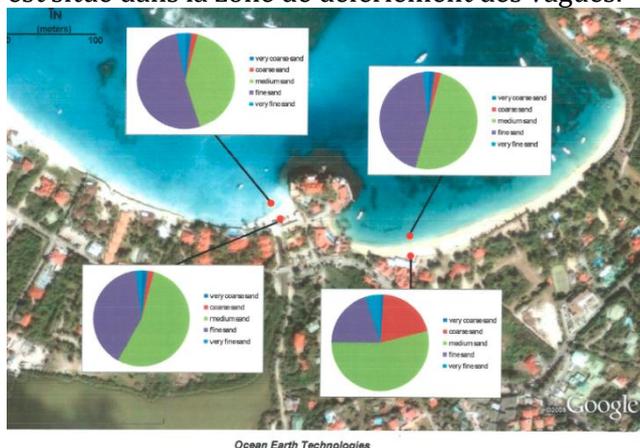


Figure 13 : Schéma de la répartition de la granulométrie sur la plage de Saint-Jean (source : Ocean Earth Technologies)

Cette combinaison de la granulométrie fine et de la forte exposition de la plage aux courants créés par la houle explique la sensibilité de la plage aux transports sédimentaires. Cependant, cela seul n'explique pas le déséquilibre du système sédimentaire « clos » de la baie.

2) Dégradation des écosystèmes

En effet, si la plage est une plage sensible aux mouvements sédimentaires, le dégraissement de l'estran est du à une modification du système sédimentaire fermé de la baie.

Une des causes de la perturbation du système hydro-sédimentaire est la dégradation des biocénoses marines de la zone. En effet, une forte dégradation des écosystèmes marins a eu lieu entre 1988 et 2016.



Figure 14 : Mise en évidence de la disparition des herbiers de la baie de Saint-Jean

Il y avait en effet en 1988 et avant la présence d'un herbier marin entre la plage et le récif corallien central de la baie. Cependant, en 2016, cet herbier a entièrement disparu. De même, un herbier qui était présent dans la partie est de la baie n'existe plus. Il y a donc une perte des services écosystémiques que rendaient les herbiers à l'ensemble de l'environnement, c'est-à-dire la perte de l'action atténuatrice de houle, de fixation des sédiments par les racines ainsi que de la fonction de nurserie pour les espèces aquatiques telles que les oursins et les poissons. Les récifs coralliens de la baie ont aussi subi une dégradation très marquée. En effet, les coraux de la baie de Saint-Jean, à majorité de type *Acropora palmata*, sont pour la plupart morts. Les zones les plus dégradées sont situées sur les zones du côté de la côte du récif central et celles au bord de l'avancée rocheuse. Certaines zones sont ainsi couvertes jusqu'à 90% d'algues. Les populations coralliennes ont en particulier connu un fort déclin au milieu des années 1980 suite à une maladie qui a touché les coraux du genre *Acropora*.

Or bien que des récifs morts amortissent aussi la houle, ils sont deux fois moins efficaces que les récifs vivants. En outre ils sont aussi plus fragiles donc plus facilement cassés, notamment par les vagues lors des tempêtes de forte ampleur.



Figure 15 : Photo de débris d'*Acropora cervicornis*, récif corallien central de la baie de Saint-Jean (22/07/16)

En outre, il y a eu en 1983 une mortalité massive d'oursins diadèmes (*Diadema antillarum*) dans l'ensemble des Caraïbes et qui a donc touché Saint-Barthélemy et la baie de Saint-Jean. La cause de cette mortalité est inconnue. Elle peut aussi bien être due à une maladie bactérienne qu'à une pollution ou une autre raison.

En 1998, une étude de l'Université des Antilles et de la Guyane décrivait le récif de Saint-Jean de très dégradé et fortement colonisé par les macroalgues.

La dégradation marquée des habitats voir même la disparition pour le cas des herbiers a engendré une perturbation dans l'équilibre du système côtier. Certes il reste une action physique contre la houle et son action érosive par les récifs coralliens mais moins forte que si les récifs étaient en bonne santé. En outre la biodiversité et la densité des organismes marins sont fortement diminuées par ce mauvais état de santé du récif. La disparition des herbiers implique que les sédiments situés entre la plage et les récifs ne sont plus fixés par des racines et donc plus sensibles à l'érosion. Le rôle de nurserie pour les juvéniles de poissons producteurs de sable n'est plus rempli non plus.

Ainsi la dégradation de ces deux écosystèmes entraîne la perte de leurs services écosystémiques dans la prévention contre l'érosion des plages alors que la plage de Saint-Jean est particulièrement vulnérable à l'érosion du fait de son orientation et de sa granulométrie.

3) Variation du trait de côte

Cependant pour avoir un aperçu plus global de ce qu'il en est réellement, le plus fiable est de regarder la superficie de sable sec composant la plage depuis 1950 jusqu'à 2016.

Année	Surface de sable sec sur la plage (En m ²)	
	Ouest	Est
1950	17 773	5 078
1969	8 048	4 470
1984	7 387	3 725
1988	10 777	3 585
1999	16 152	5094
2004	10990	3520



Figure 17 : Longueur et surface de la plage perdue depuis 1950

4) Répercussions des procédés mis en œuvre

Les moyens de lutttes mis en place ont pour objectif de limiter l'érosion du littoral afin de conserver la surface en sable sec, qui est attractive d'un point de vue touristique et qui assure une protection des propriétés face à la houle. Cependant, ces solutions ont parfois des effets secondaires qui ont l'effet inverse de ce qui est recherché.

D'après les orthophotos disponibles, la partie Nord de la plage de Saint-Jean a commencé à disparaître entre 1988 et 1999. Il est intéressant de noter que la disparition des herbiers a eu lieu durant ce même laps de temps. Cependant, il n'était pas possible d'obtenir des photos entre ces deux années et donc la date du début de la perte de cette portion de plage n'est pas déterminable de façon précise. Il semblerait cependant qu'il y ait une corrélation entre la construction d'un mur en 1995 en bordure de plage à cet endroit et le début de la disparition de la plage. Ce mur aurait donc été construit pour protéger les habitations en arrière de la plage mais il aurait eu pour conséquence de répercuter l'action de la houle et aurait favorisé l'érosion à son pied.

Le ré-ensablement de 2007 qui été décidé afin de rétablir une forme plus homogène à l'estran a eu des effets secondaires très négatifs. En effet, le sable qui a été déposé sur la plage a été dragué entre la plage et les récifs coralliens, perturbant de ce fait l'équilibre sédimentaire du système. Les dépressions causées par la drague ont engendrées des glissements de sable de la partie nord de la plage créant une érosion massive et soudaine. L'ensemble de l'estran avait ainsi disparu et cela avait eu des répercussions jusque dans les propriétés littorales en provoquant la chute et le déracinement d'arbres situés en bordure de plage, des effondrements de sol ainsi que la destruction de murs.

Ainsi, ce ré-ensablement « d'urgence », comme il a été qualifié, a engendré des dégâts plus importants que s'il n'y avait pas eu de ré-ensablement et que l'on eut attendu le temps de résilience du système.



Figure 18 : Photos de dégâts causés par l'érosion suite au ré-ensablement de 2007

En outre, le pompage s'étant fait entre le récif et la plage, les herbiers ont subi l'impact des turbidités lors du dépôt du sable pompé sur la plage mais aussi celui des turbidités lors du dragage. Les écosystèmes ont donc été fortement perturbés par les turbidités, dérangeant les populations ichthyologiques, mais aussi par les mouvements de sable qui ont eu lieu pour remplir les dépressions créées par le dragage. Ce qui était censé être une solution, temporaire, contre l'érosion s'est révélé être une amplification du phénomène.

Si les ré-ensemblés de 2000 et de 2010 n'ont pas eu d'effets secondaires aussi néfastes que le ré-ensablement de 2007, c'est que les points de dragage ont été sélectionnés à l'extérieur du système récifal. Ainsi, le sable a été rajouté au système et non juste déplacé en engendrant un déséquilibre. Le sable déposé remplace donc le sable qui a été entraîné en-dehors du système lors des ouragans. En outre, prélever le sable à l'extérieur de la barrière permet d'aspirer moins de benthos et de limiter l'impact des turbidités du pompage sur les herbiers.

Ainsi, les ré-ensemblés peuvent avoir des conséquences différentes selon la façon dont ils sont menés. Les conséquences peuvent être soit minimisées dans le cas où les études d'impact sont faites correctement, soit, dans le cas d'erreur d'appréciation, amplifier le phénomène d'érosion ainsi que les conséquences sur l'écosystème.

Si les ré-ensemblés peuvent être fait de manière à limiter les impacts environnementaux en réengraissant l'estran, ce n'est cependant pas une solution durable car, malgré les précautions prises, les biocénoses littorales sont dégradées par ces opérations.

Pourtant, même si le choix de Saint-Barthélemy pour lutter contre l'érosion s'est porté sur les ré-ensemblés, il existe d'autres solutions alternatives qui ont moins d'impacts négatifs sur l'environnement.

V/ Moyen de lutte alternative

Il est intéressant de mettre en évidence quelques solutions alternatives pour lutter contre l'érosion et le dégraissage des plages. La liste de solutions décrites dans cette partie

n'est pas exhaustive et seules les solutions semblant présenter le moins d'impact sur l'environnement sont citées. En outre, nous avons étudié Saint-Jean et les phénomènes d'érosion rencontrés sur cette plage, la solution préconisée comme alternative au ré-ensablement de cette plage est proposée à la suite de ces présentations.

1) Action sur les fonds marins

Le principe de l'action sur les fonds marins est de restituer l'amortissement naturel des vagues par les récifs coralliens et les herbiers ainsi que de préserver ou restaurer la biodiversité de ses habitats. Cette solution agirait donc de manière physique et biologique contre les phénomènes d'érosion des plages. Elle peut cependant se mettre en place de manières différentes, soit individuellement, soit combinées.

Une des façons d'agir sur les fonds marins si les coraux ont été dégradés, de façon mécanique par ancrage sur les récifs par exemple, est la restauration des récifs. Cela peut se faire de trois façons principales : le recrutement de larves de coraux, à l'aide de plaques d'argile par exemple, ou le ramassage de morceaux de coraux cassés pour diverses raisons, ou le bouturage de morceaux prélevés sur les récifs. Ces coraux sont ensuite mis en pépinière et cultivés plusieurs semaines ou plusieurs mois à l'abri des prédateurs et de la sédimentation, puis ils sont refixés sur le récif. Ces pépinières sont déjà mise en place dans les régions tropicales avec des récifs coralliens, comme à Moorea par exemple.

Une deuxième façon est l'installation de récifs artificiels. Ils reproduisent l'action physique des récifs et sont construits de telle sorte qu'ils peuvent être colonisés par la faune et la flore aquatique, restaurant ainsi les fonctions biologiques de l'habitat. Il s'agit d'une alternative à la restauration corallienne. En effet, les récifs peuvent être dégradés pour de multiples raisons. Dans le cas où la dégradation est due à une cause mécanique, la restauration des récifs ne sera pas compromise. En revanche, si la dégradation est due à la qualité du milieu, avec une pollution des eaux, que ce soit par des rejets d'eaux usées, une augmentation de la turbidité par exemple, remettre des coraux ne servirait à rien car ils mourraient de la même façon que les coraux précédents et pour les mêmes raisons. Il s'agit donc d'une alternative.

Cependant, les deux possibilités peuvent être combinées, car l'action des récifs artificiels est immédiate et il y a ensuite la possibilité de fixer les coraux de pépinières sur les récifs artificiels pour que des récifs naturels se reconstruisent avec le temps.

Enfin, des actions peuvent aussi être entreprises pour préserver ou restaurer les herbiers. La pose de corps morts pour permettre aux bateaux de s'amarrer sans jeter l'ancre dans les herbiers, ce qui a pour conséquence d'arracher les phanérogames, permet de limiter les dégâts causés par une grande fréquentation par les bateaux. La transplantation d'herbier pourrait aussi être une solution mais elle est encore peu utilisée et le taux de succès n'est pas encore satisfaisant.

2) Action sur l'estran

Si des mesures peuvent être prises pour essayer de limiter l'érosion en agissant sur la force de la houle entraînant le sable au large, certaines peuvent aussi être prises pour limiter la vulnérabilité de la plage à l'érosion.

La première option est le reprofilage de l'estran. Il s'agit d'une sorte de ré-ensablement, mais le profil de la plage est défini de telle sorte à limiter l'action érosive de la houle et des courants et donc limite le nombre de ré-ensablements qui seraient nécessaires si c'était l'unique option choisie pour limiter l'érosion.

La deuxième option est une solution plus coûteuse et nécessitant des installations. Il s'agit d'un dispositif de drainage de la plage. Le principe est que le sable sec est moins soumis à l'érosion lors du ressac des vagues et donc l'installation d'un système de drainage permettrait de garder le sable sec en continu et de diminuer le départ de sable et même favoriser l'engraissement de la plage par temps calme, sans impacter les plages voisines.

La troisième option est plus discutable. Il s'agit de recouvrir la plage d'un géotextile puis le recouvrir du sable initial. Le principe est que lors des ouragans, les vagues entraînent le sable au dessus du géotextile mais ne peut pas entamer plus le profil de la plage. Ainsi, le sable se redéposera après soit de manière naturelle, soit de manière artificielle, mais la quantité pour redonner à l'estran son aspect initial. Cependant, lorsque le sable est retiré, la plage perd son aspect esthétique et il y a une dégradation de l'écosystème intertidal qui peut être engendré.

La dernière solution est le by-passing. Le principe est de rétablir le transit sédimentaire lorsque celui-ci a été bloqué par la construction d'un ouvrage tel qu'un port ou un chenal, afin que la plage en aval ne s'érode pas à cause de la diminution des apports en sédiments provenant à l'origine de l'amont de l'ouvrage. Saint-Barthélemy n'est cependant pas concerné dans le cas ci-présenté car il n'y a pour l'instant aucun ouvrage de grande ampleur bloquant le transport des sédiments.

3) Autres procédés

Si les actions sur les fonds marins et l'estran sont particulièrement indiquées pour lutter contre le phénomène d'érosion des plages, il y a d'autres solutions qui peuvent être appliquées en complément pour augmenter l'efficacité des mesures citées précédemment. Ces solutions concernent l'arrière-plage, le contrôle de la qualité de l'eau ainsi que la préservation des espèces productrices de sable.

La première solution consiste à restaurer les dunes s'il en reste, en les revégétalisant, ou à en créer si elles ont été rasées, tout en les végétalisant de manière à les stabiliser. Le principe est de rétablir entièrement le système sédimentaire fermé des baies coralliennes. Cependant pour que le système soit entièrement fonctionnel, il faut que les dunes soient stabilisées. Il faut donc qu'il y ait une végétation qui permette de fixer le sable avec ses racines et de capter le sable qui est sensible à la forme éolienne de l'érosion avec sa partie aérienne. Pour cela, il faut utiliser des plantes locales afin d'éviter d'éviter les plantes invasives et de respecter la flore initiale.

La deuxième solution consiste à augmenter la qualité de l'eau de la baie pour limiter son impact sur les coraux. Ainsi le contrôle des installations d'assainissement des eaux domestiques usées permet de s'assurer que les rejets des particuliers ont le moins d'impact possible sur l'environnement. En outre, cela a aussi un aspect sanitaire et assure des eaux de baignades plus saines aux habitants.

Enfin, la troisième solution consiste à protéger un certain nombre d'espèces nécessaires à la bonne santé des herbiers et des récifs, comme les herbivores empêchant les algues de recouvrir et d'étouffer les coraux, et productrices de sables. Certaines espèces de poissons-perroquets et d'oursins peuvent ainsi être protégées de la surpêche et continuer à remplir leur rôle biologique.

4) Solution préconisée pour Saint-Jean

La plage de Saint-Jean est fortement soumise à l'érosion du fait de ses caractéristiques physiques et de la dégradation de ses écosystèmes. Pour permettre de lutter contre l'érosion de manière plus naturelle et durable que les ré-ensablements, il faut rétablir les services écosystémiques qui ont été perdus en même temps que les habitats ont été dégradés. Saint-Jean avait une dune dans les années 1960 et 1970 et cet habitat à presque entièrement disparu. Ainsi, comme la plage est particulièrement vulnérable, une combinaison de solution pour limiter l'érosion de la plage est à privilégier.

La première action à entreprendre serait d'autoriser les constructions uniquement derrière la dune littorale afin de limiter les risques pour les propriétés en cas de forte houle et donc éviter la construction de murs littoraux qui amplifie le phénomène d'érosion de la plage à

leurs pieds. La deuxième action serait de remettre en place des dunes végétalisées qui amortiraient la houle, et donc limiteraient l'érosion marine, et capteraient le sable, en limitant ainsi l'érosion éolienne. Les plantes utilisées pour replanter doivent être des plantes locales, et il faut respecter l'agencement des plantes. Ainsi, la frange herbacée de Saint-Barthélemy peut être composée de patates bord-de-mer, de verveines bord-de-mer (*Héliotropium curassavicum*) et de soleils (*Wedelia spp*). La strate arbustive est ensuite localement composée de Prune de bord-de-mer (*Scaevola plumieri*), Romarin de bord-de-mer (*Argusia gnaphaloides*). La strate arborescente est composée de Raisin de bord-de-mer (*Coccoloba uvifera*) et de Katalpa (*Thespesia populnea*). La troisième mesure à prendre est de canaliser les zones d'accès à la plage. Cela recoupe la deuxième solution en permettant de protéger la végétation du piétinement. La mesure suivante serait de limiter les sources des écosystèmes. Par exemple, s'assurer de la conformité des installations d'assainissement des eaux usées, afin d'améliorer la qualité de l'eau de la baie. Une fois la qualité des milieux stabilisée, voir améliorée, la dernière action à entreprendre peut avoir lieu. Il s'agit de la restauration des herbiers et des récifs, afin de finir de restaurer le système entier. Cependant il faut que cette restauration soit menée en dernier afin de minimiser la perte des coraux refixés. Aussi, limiter l'ancrage dans les zones sensibles tels que les herbiers ou les récifs permet de limiter la dégradation mécanique et interdire la pêche de certaines espèces productrices de sable permet de maintenir un apport biologique de sédiments. A Saint-Barthélemy, une interdiction de pêcher 3 espèces de poissons-perroquets ainsi que toutes les espèces d'oursins est déjà instaurée. Pour les autres espèces de poissons-perroquets, un quota journalier plafonne leurs captures.

Conclusion

Les mouvements des sédiments sont des phénomènes naturels, mais l'érosion peut être amplifiée lorsqu'il n'y a plus résilience du système sédimentaire. Cela peut engendrer des conséquences néfastes, notamment du point de vue économique, lorsque l'économie du territoire touché par les phénomènes d'érosion repose essentiellement sur le tourisme. A Saint-Barthélemy, la solution choisie pour lutter contre l'érosion est le ré-ensablement des plages. Cependant, les ré-ensablements enclenchent un cercle vicieux en empirant l'état des écosystèmes, parfois déjà affaiblis, et en les empêchant donc de remplir leur rôle physique et biologique. En outre, il y a un risque que les ré-ensablements amplifient l'érosion en créant des dépressions et en modifiant la courantologie, comme ce fut le cas en 2007 à Saint-Jean. Afin de limiter l'érosion des plages en minimisant les risques d'effets secondaires, des solutions restaurant les services écosystémiques des milieux littoraux peuvent être mis en place. La solution alternative proposée pour Saint-Jean pourrait ainsi être adaptée à l'ensemble des plages de Saint-Barthélemy, en prenant en compte les caractéristiques initiales de chacune, bien que certaines plages nécessiteront moins d'étapes, comme la plage de Saline qui possède déjà une dune bien végétalisée et qui n'a jamais eu d'herbier dans sa baie. Ainsi Saint-Jean, de par sa multiplicité d'écosystèmes et sa sensibilité à l'érosion, serait un excellent site pilote pour mettre en place l'ensemble de ces préconisations ainsi qu'un suivi pour évaluer leur efficacité.

Annexes

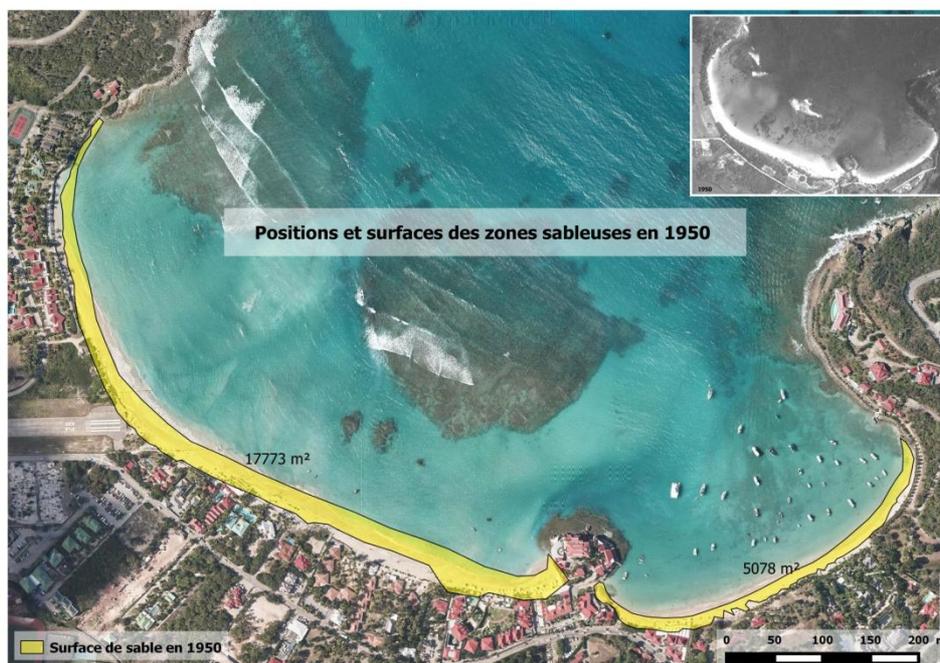


Figure 19 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1950

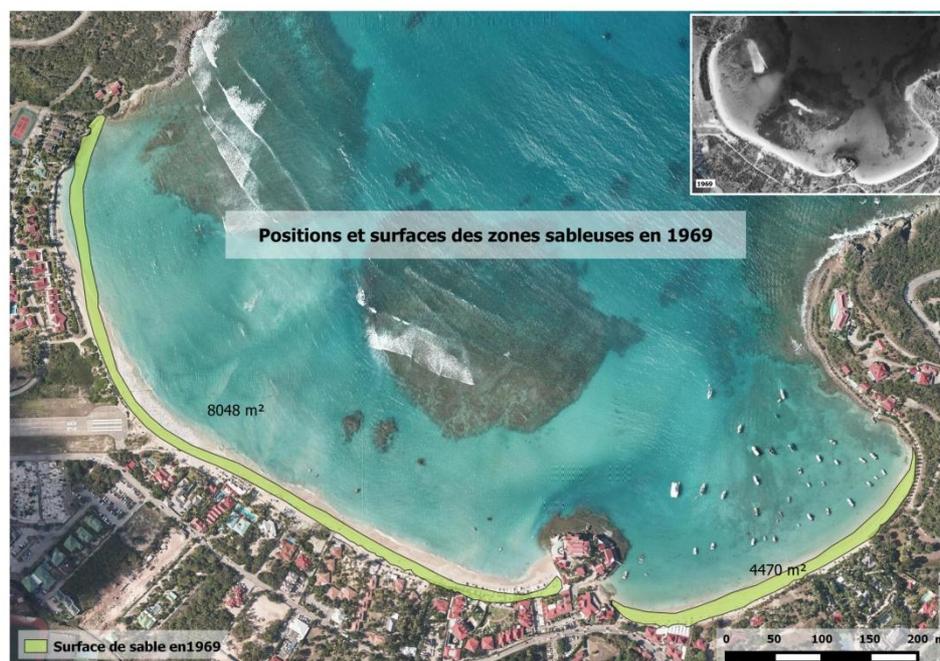


Figure 20 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1969

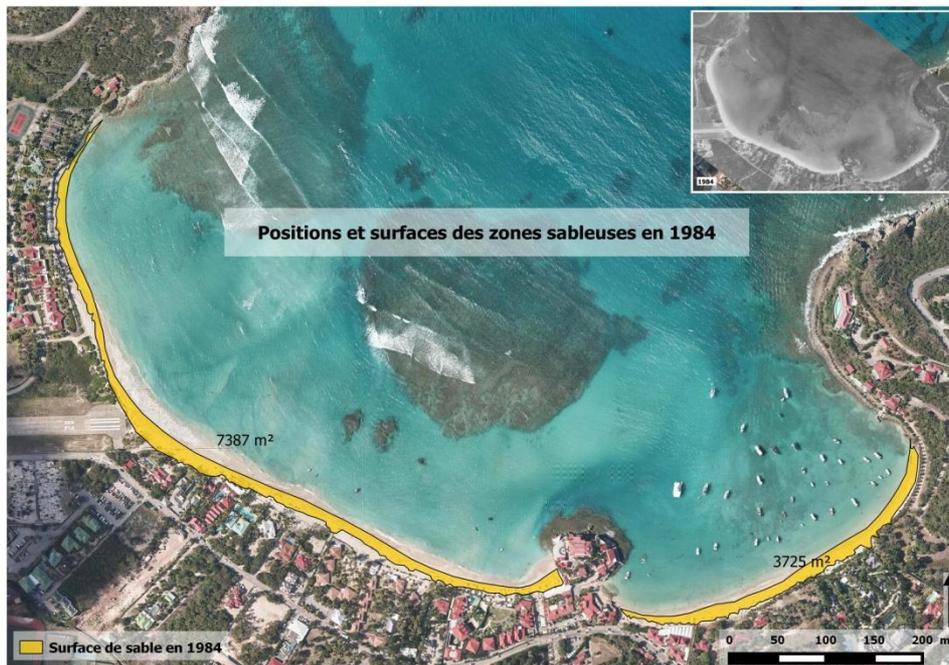


Figure 21 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1984

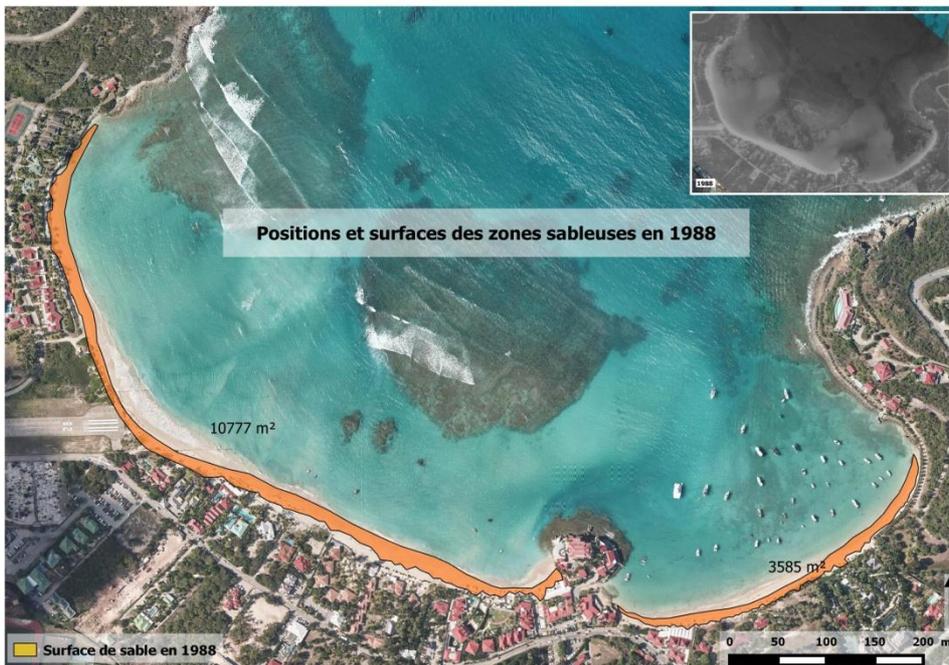


Figure 22 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1988

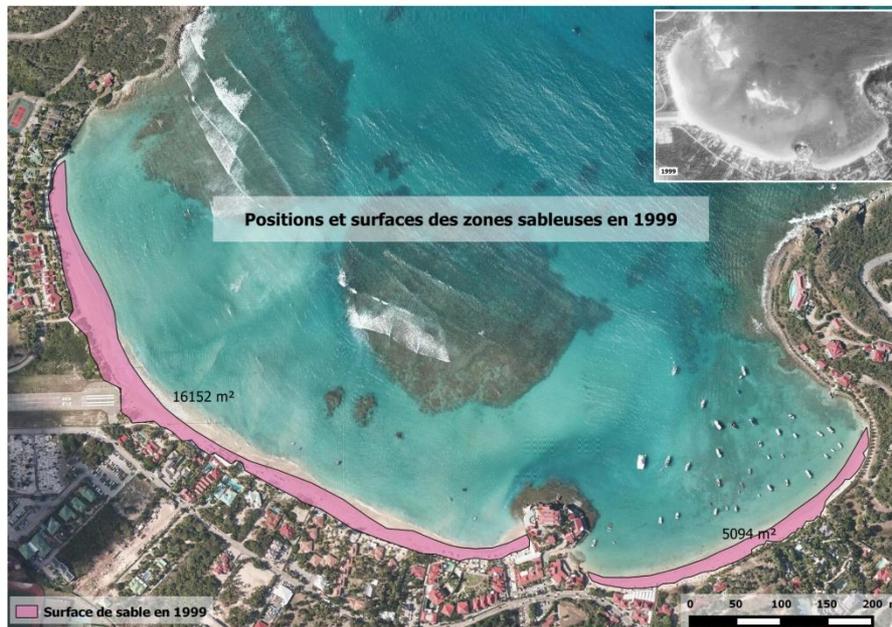


Figure 23 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1999

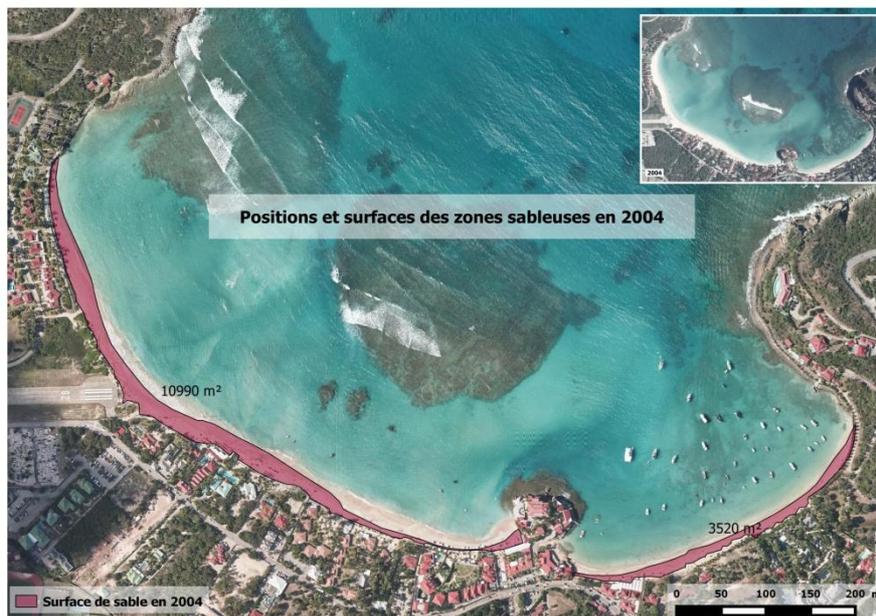


Figure 24 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 2004



Figure 25 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 2013



Figure 26 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 2016

Références bibliographiques

Bruggemann, J., van Kessel, A., van Rooij, J. and Breeman, A. (1996). Bioerosion and sediment ingestion by the Caribbean parrotfish *Scarus vetula* and *Sparisoma viride*: implications of fish size, feeding mode and habitat use. *Marine Ecology Progress Series*, 134, pp.59-71.

Cambert Harold, "Synthèse bibliographique des impacts biologiques et écophysologiques de la pollution par les hydrocarbures sur les coraux constructeurs, les mangroves et les herbiers à phanérogames," *Documentation Ifreco*, consulté le 21 juin 2016, <http://ifreco-doc.fr/items/show/1507>.

Cazes-Duvat Virginie, "Étude de vulnérabilité des plages de l'île de La Réunion," *Documentation Ifreco*, consulté le 23 juin 2016, <http://ifreco-doc.fr/items/show/1380>

De Sèze, N. and Paugam, J.-M. (2014). *Estimation du PIB par habitant de Saint - Barthélemy*. [PDF] IEDOM. Available at: http://www.cerom-outremer.fr/IMG/pdf/note_cerom_pib_saint-barthelemy_-_octobre_2014.pdf [Accessed 26 Jun. 2016].

ENVIRONNEMENT CANADA (1994). Répercussions environnementales du dragage et de la mise en dépôt des sédiments. Document préparé par Les Consultants Jacques Bérubé inc. Pour le Section du développement technologique. Direction de la protection de l'environnement, régions du Québec et de l'Ontario. N° de catalogue En 153-39/1994F. 109 pages

Guilcher André. Le « beach-rock » ou grès de plage. In: *Annales de Géographie*, t. 70, n°378, 1961. pp. 113-125.

His E., Robert R., 1983-1985. Développement des véligères de *Crassostrea gigas* dans le bassin d'Arcachon. Etude sur les mortalités larvaires. *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, 47, 1-2, 63-88.

Horn MH (1989) Biology of marine herbivorous fishes. *Oceanogr Mar Boil A Rev* 27 167-272

Hubbard DK, Scaturro D (1985) Growth rates of seven species of scleractinian corals from Cane Bay and Salt River, St. Croix. *Bull Mar Sci* 36:325-338

Insee.fr. (2008). *Insee - économie - Actualités : 2008, An 1 de la collectivité de Saint-Barthélemy*. [online] Available at: http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=26&ref_id=15245 [Accessed 25 Jun. 2016].

Job Sandrine et Schrimm Muriel, "La restauration récifale - Guide pratique à l'usage des décideurs et aménageurs," *Documentation Ifreco*, consulté le 22 juin 2016, <http://ifreco-doc.fr/items/show/1367>.

Lewis, S. (1986). The Role of Herbivorous Fishes in the Organization of a Caribbean Reef Community. *Ecological Monographs*, 56(3), pp.183-200.

Perry CT, Murphy GN, Kench PS, et al. Changing dynamics of Caribbean reef carbonate budgets: emergence of reef bioeroders as critical controls on present and future reef growth potential. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2014;281(1796):20142018. doi:10.1098/rspb.2014.2018.

Salvat B, Aubanel A, Adjeroud M, Bouisset P, Calmet D, Chancerelle Y, Cochenne Nathalie, Davies N, Fougerousse A, Galzin R, Lagouy E, Lo C, Monier Christele, Ponsonnet C, Remoissenet G, Schneider D, Stein A, Tatarata M, Villiers L (2008). **Le suivi de l'état des récifs coralliens de Polynésie Française et leur récente évolution.** *Revue d'Ecologie de la Terre et de la Vie*, 63(1-2), 145-177. Open Access version : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/4558/>

SASTRE C., BREUIL A., 2007 – Plantes, milieux et paysages des Antilles françaises
Écologie, biologie, identification, protection et usages. Biotope, Mèze, (collection Parthénope), 672 pages

Stearn CW, Scoffin TP, Martindale W (1977) Calcium carbonate budget of a fringing reef on the west coast of Barbados. Part I. Zonation and productivity. *Bull Mar Sci* 27: 479-510

Université des Antilles et de la Guyane., 1998 - Diagnostic écologique des étangs de Saint-Barthélemy, 57 pages

Vue d'ensemble régionale des problèmes et priorités environnementaux ayant un effet sur les ressources côtières et marines de la région des Caraïbes. Rapport technique du PEC No. 2 PNUE Programme pour l'environnement des Caraïbes, Kingston, Jamaïque, 1989

Index des illustrations

Figure 1 : Carte représentant l'île de Saint-Barthélemy et l'orientation de la houle dominante.....	7
Figure 2 : Trajectoire de sédiments en fonction de leur diamètre.....	9
Figure 3 : Schéma des différents type d'érosion éolienne.....	9
Figure 4 : Carte répertoriant les beachrocks de l'île de Saint-Barthélemy.....	10
Figure 5 : Schéma des interactions des milieux (par l'Agence Territoriale de l'environnement).....	11
Figure 6 : Carte des coraux menacés par le développement littoral (Source : Reefgis) ..	14
Figure 7 : Schéma de drague hydraulique stationnaire (source : Larousse).....	15
Figure 8 : Schéma des types d'empreintes laissées par une drague hydraulique stationnaire (source : Larousse).....	15
Figure 9 : Carte représentant le nombre de ré-ensablements par plage sur l'île de Saint-Barthélemy.....	17
Figure 10 : Photo prise lors du ré-ensablement de la plage de Saint-Jean en 2010.....	19
Figure 11 : Localisation de la plage de Saint-Jean.....	21
Figure 12 : Schéma de la courantologie de la baie de Saint-Jean (source : Ocean Earth Technologies).....	22
Figure 13 : Schéma de la répartition de la granulométrie sur la plage de Saint-Jean (source : Ocean Earth Technologies).....	22
Figure 14 : Mise en évidence de la disparition des herbiers de la baie de Saint-Jean	23
Figure 15 : Photo de débris d' <i>Acropora cervicornis</i> , récif corallien central de la baie de Saint-Jean (22/07/16).....	24
Figure 16 : Plage de Saint-Jean devant le Filao en 2004.....	25
Figure 17 : Longueur et surface de la plage perdue depuis 1950.....	26
Figure 18 : Photos de dégâts causés par l'érosion suite au ré-ensablement de 2007	27
Figure 19 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1950.....	32
Figure 20 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1969.....	32
Figure 21 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1984.....	33
Figure 22 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1988.....	33
Figure 23 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 1999.....	34
Figure 24 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 2004.....	34
Figure 25 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 2013.....	35
Figure 26 : Surface de sable de la plage de Saint-Jean en 2016.....	35

Index des tableaux

Tableau 1 : Historique des ouragans ayant touchés Saint-Barthélemy depuis 1995	6
Tableau 2 : Echelle de beaufort et dénomination associée en Atlantique Nord-Ouest.....	7
Tableau 3 : Granulométrie selon la norme NFP18-560	8
Tableau 4 : Historique des ré-ensablements	16
Tableau 5 : Récapitulatif des budgets des 3 ré-ensablements principaux.....	18
Tableau 6 : Evolution des la surface de sable sec en fonction des années	25