

Cartographie de l'aléa recul du trait de côte pour la révision du PPR de la Guadeloupe

Rapport final

BRGM/RP-69282-FR

Octobre 2019

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM

MOISAN M. et GUILLEN L.

Vérificateur :

Nom : C. OLIVEROS

Fonction : Expert risques littoraux

Date : 09/10/2019

Signature :



Approbateur :

Nom : Y. DE LA TORRE

Fonction : Directeur Guadeloupe

Date : 23/10/2019

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : Littoral, Recul du trait de côte, Plan de Prévention des Risques, Guadeloupe

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Moisan M et Guillen L. (2019) – Cartographie de l'aléa recul du trait de côte pour la révision du PPR de la Guadeloupe. Rapport final. BRGM/RP-69282-FR, 41 p., 31 ill.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le littoral de l'archipel de la Guadeloupe est particulièrement exposé à l'aléa recul du trait de côte et en lien avec le transport des sédiments dans la zone côtière et le passage des cyclones qui peuvent provoquer des reculs brutaux. Les environnements les plus sensibles au phénomène d'érosion en Guadeloupe sont les côtes basses meubles.

Cette étude cofinancée par la DEAL Guadeloupe et le BRGM s'inscrit dans le cadre de la révision des Plans de Prévention des Risques (PPR) de la Guadeloupe. Elle vise à établir la cartographie de l'aléa recul du trait de côte sur l'ensemble des communes de l'archipel exposé à cet aléa. L'étude concerne donc les 31 communes littorales de la Guadeloupe.

Ce travail a été réalisé selon les recommandations du guide méthodologique national d'élaboration des Plans de Prévention des Risque Littoraux (PPRL) qui fixe le cadre général pour la réalisation des cartographies des aléas littoraux (DGPR, 2014).

Ainsi, la cartographie de cet aléa repose sur l'analyse des taux d'évolution du trait de côte sur une période pluri-décennale, la prise en compte du recul ponctuel et brutal en cas d'évènement de forte intensité.

Les données utilisées reposent sur l'étude de l'évolution historique du trait de côte à l'échelle régionale réalisée par le BRGM en 2017 (Guillen et al.). Elle permet de disposer d'une base de données sur la position du trait de côte sur la période 1950-2013. Conformément à la méthodologie nationale, la position du trait de côte a été projetée à l'horizon 100 ans à partir des taux d'évolution calculés sur la période d'observation. Par ailleurs, le recul ponctuel est estimé entre 10 et 20 m selon l'exposition du littoral.

La données et les résultats produits dans le cadre de cette étude sont restitués au format numérique et exploitable sous SIG, ils comprennent :

- les positions historiques du trait de côte sur la période 1950-2013 ;
- le trait de côte de référence lissé le plus récent (2013), divisé en tronçons homogènes;
- le taux d'évolution annuel moyen sur la période 1950-2013 calculé tous les 50 m ;
- la cartographie de l'aléa recul du trait de côte à échéance 100 ans réalisée à l'échelle du 1/10 000.

Ces résultats ont vocation à être exploités par la DEAL pour la cartographie du zonage réglementaire du PPR multirisque de la Guadeloupe.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Contexte de la zone d'étude	11
2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	11
2.2. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE.....	12
2.2.1. Géologie	12
2.2.2. Morphologie du littoral.....	12
2.3. CONTEXTE CLIMATIQUE ET HYDRODYNAMIQUE	15
2.3.1. Le vent.....	15
2.3.2. La houle.....	15
2.3.3. Les niveaux marins	16
2.3.4. Les évènements de fortes intensités.....	18
2.4. DYNAMIQUE DU TRAIT DE COTE A L'ECHELLE REGIONALE.....	19
3. Données utilisées	21
3.1. DEFINITION DE L'INDICATEUR DE TRAIT DE COTE.....	21
3.2. LIMITES TECHNIQUES A LA CARTOGRAPHIE DU TRAIT DE COTE	21
3.3. SOURCES DE DONNEES UTILISEES.....	22
3.4. IMPACTS DES EVENEMENTS EXTREMES SUR LE TRAIT DE COTE	23
4. Méthodologie	25
4.1. CARTOGRAPHIE DU TRAIT DE COTE DE REFERENCE.....	25
4.2. DETERMINATION DES TAUX ANNUELS MOYENS D'EVOLUTION	26
4.2.1. Calcul des taux d'évolution	26
4.2.2. Harmonisation des taux d'évolution	28
4.3. DETERMINATION DU REcul PONCTUEL LIE A UN EVENEMENT MAJEUR.....	29
4.4. PROJECTIONS DES TAUX D'EVOLUTION A ECHANCE 100 ANS	30
4.5. PRISE EN COMPTE DES AMENAGEMENTS DE PROTECTION.....	31
4.6. AJUSTEMENT ET CORRECTION DE LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA.....	33
4.7. QUALIFICATION DE L'ALEA.....	36
5. Descriptions des données et des résultats au format numérique	37

6. Conclusion	39
7. Bibliographie.....	41

Liste des figures

Illustration 1 – Carte de situation de l'archipel de Guadeloupe	11
Illustration 2 – Carte géologique simplifiée d'après le guide des curiosités géologiques de la Guadeloupe (Graviou et al. 2011).....	12
Illustration 3 – Morphologie du littoral de l'archipel de la Guadeloupe (Guillen et al., 2018)	13
Illustration 4 – Exemple de côtes à falaise (DEAL, 2009). A gauche : Falaise calcaire du nord de la Grande -Terre sur la commune d'Anse Bertrand. A droite : Falaise dans les formations volcanique du sud de la Basse-Terre sur la commune de Trois-Rivières	13
Illustration 5 – Exemple de côtes basses sableuses associées à une plate-forme récifale (DEAL, 2009). A gauche, commune de Saint-François. A droite côte sud de la Désirade.	14
Illustration 6 – Exemple de plage de poche de la côte sous le vent du littoral de la Basse-Terre (DEAL, 2009). A Gauche : Anse Caraïbe, commune de Pointe Noire. A droite : Plage de Nord de Saint-Rose	14
Illustration 7 – Exemple de côte à mangrove (DEAL, 2009). A Gauche : Grand Cul de Sac Marin. A Droite : Embouchure de la Lézarde sur la commune de Petit-Bourg.	15
Illustration 8 – Niveaux caractéristiques de la marée au port de référence de Pointe-à-Pitre exprimés en mètre par rapport au zéro hydrographique (SHOM, 2017).....	16
Illustration 9 – Surcote cyclonique de période de retour 100 ans (Krien et al., 2015)	17
Illustration 10 - Projections globales et locales du niveau moyen de la mer à l'horizon 2100 selon le scénario d'émission des gaz à effets de serre RCP 8.5 (Le Cozannet et al., à paraître).....	17
Illustration 11 - Trajectoire des cyclones à proximité de la Guadeloupe depuis 1950 (Guillen et al. 2018, d'après la base de données IBTRACS (2017)).....	18
Illustration 12 – Liste des principaux cyclones ayant affecté la Guadeloupe au XX et XXI eme siècle	19
Illustration 13 – Dynamique du trait de côte sur le long terme (1950-2013) exprimé en pourcentage selon les principaux faciès morphologiques rencontrés en Guadeloupe d'après Guillen et al. 2017	19
Illustration 14 : Caractéristiques des sources de données utilisées pour la digitalisation du trait de côte (Guillen et al., 2017)	22
Illustration 15 – Campagnes photographiques de l'IGN disponibles sur chaque territoire	22
Illustration 16 – Exemple du recul ponctuel du trait de côte et de l'érosion d'un remblai routier sur le littoral de la commune de Deshaies suite au passage de l'ouragan LENNY (BRGM, 1999	23
Illustration 17 - Carte des sites visités pour évaluer les impacts en termes d'érosion sur l'archipel suite au passage de Maria d'après Legendre et Guillen (2017).....	24

Illustration 18 : Exemple du recul de la plage évalué entre 5 et 10 m à partir de profil topographique sur la plage des Raisins Clairs (commune de Saint François) suite au passage de l'ouragan Maria (Guillen et al., 2018).....	24
Illustration 19 - Exemple de la cartographie du trait de côte de référence (2013) sur la commune de Saint-François avec utilisation de l'Otho HR IGN de 2017 et du modèle numérique de terrain Litto3D (SHOM et IGN).....	26
Illustration 20 – Mesure de la distance à partir de la ligne de base pour chaque intersection avec la position historique des traits de côte. (Thieler et al., 2009).....	27
Illustration 21 – Calcul de la régression linéaire pondérée sous DSAS (Thieler et al., 2009)	28
Illustration 22 – Exemple de représentation du taux d'évolution annuel moyen calculé sur chaque transect sur le site de Folle Anse sur la commune de Grand-Bourg à Marie-Galante	29
Illustration 23 - Exemple de cartographie de l'aléa recul du trait de côte sur la commune de Sainte-Anne.....	30
Illustration 24 – Estimation du taux moyen de recul annuel en présence d'ouvrage de protection (DGPR, 2014)	31
Illustration 25 – Exemple d'un perré en enrochement dans le bourg de Pointe Noire qui fige artificiellement l'évolution du trait de côte (DEAL, 2009)	32
Illustration 26 – Exemple d'un ouvrage co-existant avec la plage sans figer le trait de côte en haut de plage au niveau du Bourg de Saint-Anne (DEAL, 2009)	32
Illustration 27 – Exemple du découpage de l'enveloppe d'aléa. En jaune, l'enveloppe de l'aléa recul du trait de côte projeté à 100 ans à partir du trait de côte de référence (2013). En rouge, extension ou découpage de la cartographie de l'aléa par rapport aux limites cadastrales et communales.	33
Illustration 28 – Exemple de limites cadastrales sur la partie maritime à l'est de la pointe de la Caravelle. Le trait blanc représente les limites cadastrales et le trait noir en pointillé la limite communale et le fond de plan Ortho IGN 2017.	34
Illustration 29 – Exemple de correction appliquée afin de prendre en compte les contraintes topographiques à partir du MNT Litto3D (plage de la Perle, Deshaies).....	35
Illustration 30 – Exemple de lissage manuel appliqué dans les zones de transition entre deux secteurs de comportement homogène (Anse du Mancenillier, Saint-François)	36
Illustration 31 – Tableau de synthèse des données et résultats restitués au format numérique exploitable sous SIG	37

1. Introduction

D'après la DGPR (2014), le recul du trait de côte se définit comme le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental. Il est généralement la « *conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion littorale, induite par les forces marines (vagues et courant marins), combinée parfois à des actions continentales, ou d'une érosion générée ou accélérée par l'Homme (sur-fréquentation, extraction, aménagements et ouvrages de protection, urbanisation, etc.)* ».

Le littoral de Guadeloupe est particulièrement exposé à cet aléa en lien avec le passage des tempêtes tropicales ou des cyclones et l'élévation du niveau de la mer liée au réchauffement climatique. Récemment, l'ouragan MARIA (2017) est venu rappeler la vulnérabilité du littoral guadeloupéen aux aléas côtiers.

Dans ce contexte, les côtes basses meubles du littoral guadeloupéen apparaissent les plus sensibles au recul du trait de côte en lien avec le déplacement des sédiments dans la zone côtière. L'érosion peut dans certains cas déstabiliser les fondations des bâtiments et des infrastructures situées à proximité directe du littoral et ainsi mettre en péril des biens et des personnes.

Face à ce constat, la DEAL Guadeloupe souhaite donc intégrer le recul du trait de côte dans la révision des PPR afin de tenir compte de cet aléa dans l'aménagement du territoire.

Après une présentation générale du contexte physique du littoral de la Guadeloupe, ce rapport vise à détailler les données utilisées ainsi que la méthodologie employée afin de réaliser la cartographie de l'aléa recul du trait de côte.

2. Contexte de la zone d'étude

2.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La Guadeloupe appartient à l'ensemble géographique des Petites-Antilles au sein de l'archipel des Caraïbes. Elle est composée de deux îles principales, la Grande-Terre et la Basse Terre. Les Saintes qui regroupent Terre de Bas et Terre de Haut, Marie-Galante et la Désirade sont également rattachées administrativement à la Guadeloupe.

D'un point de vue topographique, les îles volcaniques de la Basse-Terre et des Saintes présentent des reliefs importants tandis que le relief des plates-formes calcaires de la Grande-Terre, de la Désirade et de Marie Galante est moins marqué (Illustration 1).



Illustration 1 – Carte de situation de l'archipel de Guadeloupe (IEDOM, 2008)

La Guadeloupe est le département d'outre-mer qui bénéficie du plus grand linéaire côtier avec près de 620 km de côtes. La cartographie de l'aléa recul du trait de côte couvre l'ensemble des communes de Guadeloupe à l'exception de Saint-Claude qui ne dispose pas de façade côtière.

2.2. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

2.2.1. Géologie

L'archipel de Guadeloupe est composé de deux grands ensembles géologiques distincts (Illustration 2).

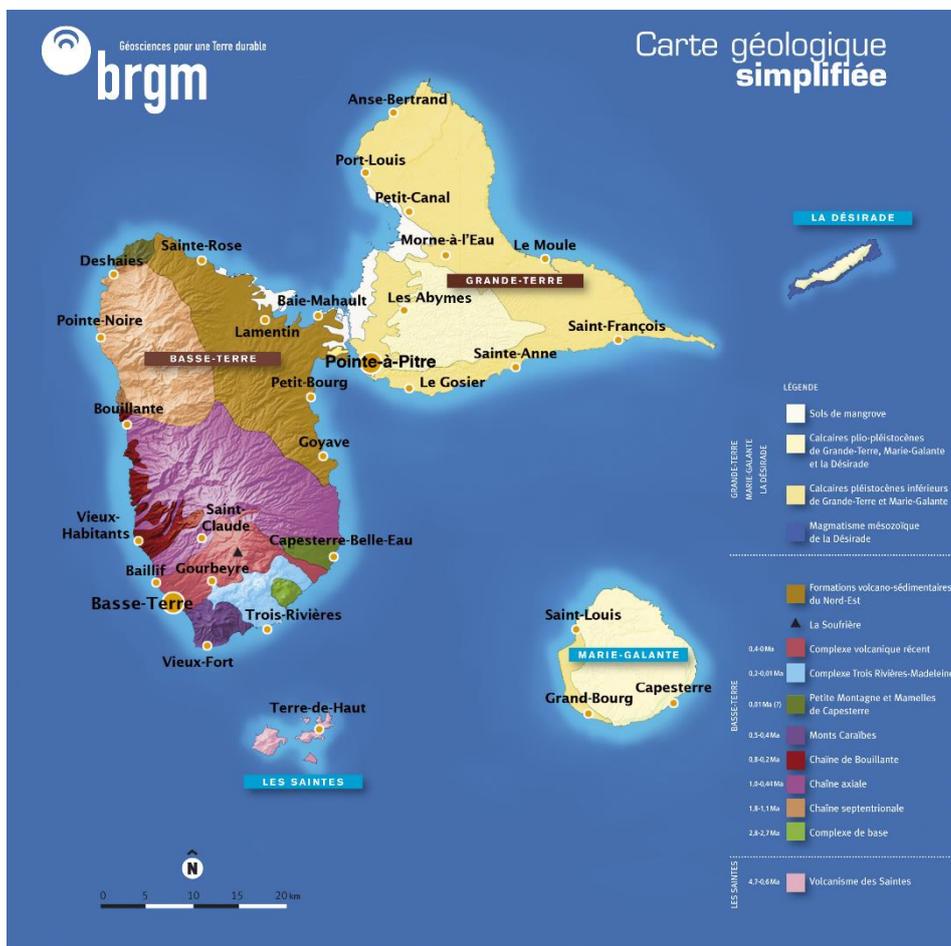


Illustration 2 – Carte géologique simplifiée d'après le guide des curiosités géologiques de la Guadeloupe (Graviou et al. 2011)

Le premier ensemble regroupant la Grande-Terre, Marie-Galante et la Désirade, est plus ancien, il s'agit d'anciennes îles volcaniques recouvertes de formations calcaires récifales. L'île de la Désirade est la plus ancienne (145 Ma), la Grande-Terre et Marie Galante datent de l'ère tertiaire et appartiennent à l'arc externe des petites Antilles qui n'est plus actif depuis le Miocène.

Le second ensemble, comprenant la Basse-Terre et les Saintes, appartient à l'arc interne, situé plus à l'ouest et actif depuis le Miocène. Le volcanisme de la Basse-Terre a débuté il y a environ 3 millions d'années. Le massif de la Soufrière est le seul volcan actuellement actif, il représente le point culminant de la Guadeloupe (1467 m).

2.2.2. Morphologie du littoral

Le littoral de la Guadeloupe présente une grande diversité morphologique (Roques et al., 2010 et Guillen et al., 2017). Les côtes rocheuses représentent plus de la moitié du linéaire côtier (côtes

basses rocheuses et à falaises). Les côtes basses meubles constituent environ 18% du littoral, les mangrove 17% et les côtes artificialisées 11% (aménagement de protection ou ouvrages portuaires). La morphologie du littoral à l'échelle de la Guadeloupe est présentée dans la figure suivante (Illustration 3).

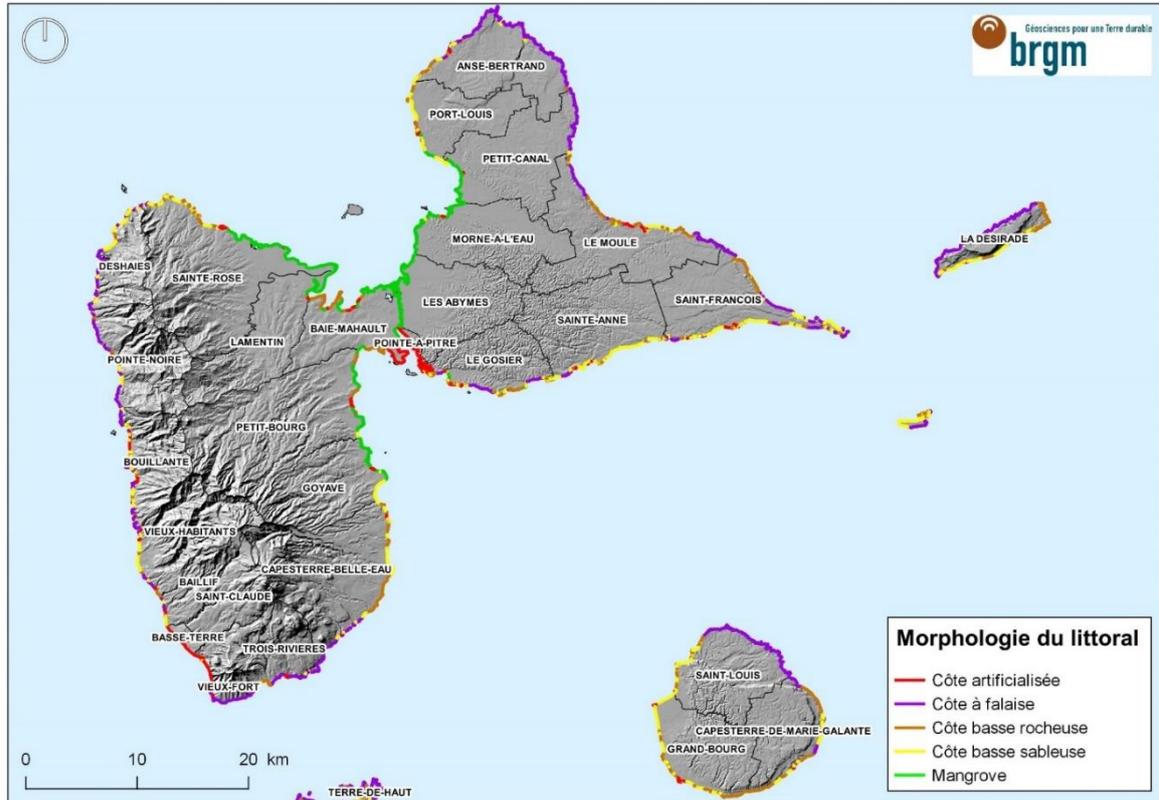


Illustration 3 – Morphologie du littoral de l'archipel de la Guadeloupe (Guillen et al., 2018)

Les côtes à falaises sont majoritairement représentées sur le nord Grande-Terre, au nord de Marie-Galante et de la Désirade (Illustration 4). Elles résultent des mouvements tectoniques ayant affecté ces plateformes calcaires. Les côtes à falaises sont également associées aux reliefs du sud et de la côte sous le vent de la Basse-Terre.



Illustration 4 – Exemple de côtes à falaise (DEAL, 2009). A gauche : Falaise calcaire du nord de la Grande -Terre sur la commune d'Anse Bertrand. A droite : Falaise dans les formations volcanique du sud de la Basse-Terre sur la commune de Trois-Rivières

Le littoral du sud de la Grande-terre, du sud de Marie Galante et de la Désirade ainsi que de la côte au vent du nord de la Basse-Terre est principalement dominé par la présence de côtes basses meubles et de côtes basses rocheuses souvent associées à des plates-formes récifales (Illustration 5).



Illustration 5 – Exemple de côtes basses sableuses associées à une plate-forme récifale (DEAL, 2009). A gauche, commune de Saint-François. A droite côte sud de la Désirade.

On retrouve également des plages de poches associées aux zones basses du littoral de la côte sous le vent de la Basse-Terre (Illustration 6).

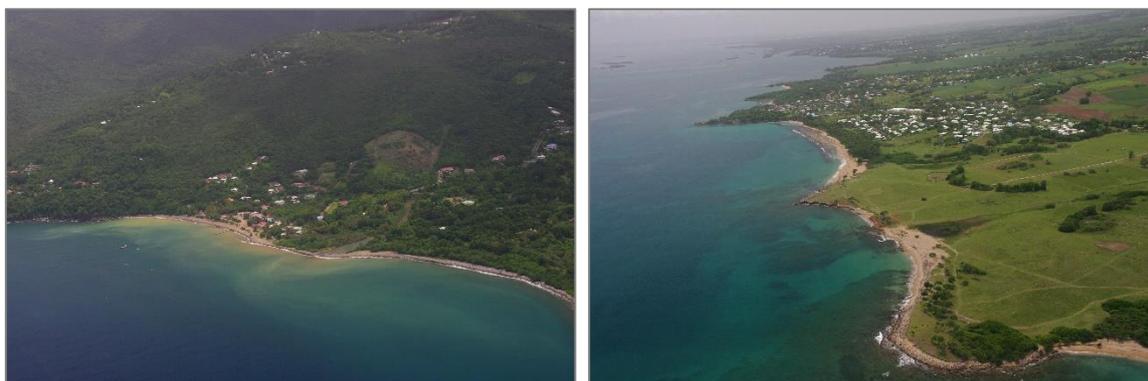


Illustration 6 – Exemple de plage de poche de la côte sous le vent du littoral de la Basse-Terre (DEAL, 2009). A Gauche : Anse Caraïbe, commune de Pointe Noire. A droite : Plage de Nord de Saint-Rose

Enfin, les zones basses et abritées du Grand et du Petit Cul de Sac Marin, soumises à une importante sédimentation, sont généralement associées à la présence de mangrove (Illustration 7). On retrouve également localement la présence de mangrove au droit des principales embouchures de la côte Atlantique de la Basse-Terre.



Illustration 7 – Exemple de côte à mangrove (DEAL, 2009). A Gauche : Grand Cul de Sac Marin. A Droite : Embouchure de la Lézarde sur la commune de Petit-Bourg.

2.3. CONTEXTE CLIMATIQUE ET HYDRODYNAMIQUE

Le climat de la Guadeloupe est de type tropical. Il est caractérisé par deux saisons principales selon le régime des précipitations : la saison sèche de décembre à mai (carême) et la saison des pluies de juin à novembre (hivernage). Ces saisons sont séparées par des périodes de transition.

2.3.1. Le vent

Le régime d'alizé de secteur est-sud-est est relativement constant au cours de l'année, avec un renforcement observé pendant le carême.

2.3.2. La houle

En Guadeloupe, 3 principaux régimes de houle peuvent être rencontrés au large de l'archipel :

- la houle de secteur nord-est à sud-est dite d'alizé est la plus fréquente mais peu énergique (période inférieure à 10 sec) ;
- la houle de secteur nord à nord-ouest est peu fréquente (une dizaine d'occurrences par an) et d'énergie modérée à forte. Elle est en généralement associée aux dépressions des latitudes tempérées de l'Atlantique Nord pendant la période hivernale. Ces houles sont susceptibles d'affecter les secteurs côtiers exposés au nord ;
- la houle cyclonique est peu fréquente mais très puissante (période supérieure à 10 sec) et peut atteindre des hauteurs très importantes (8 à 10 m). Selon la trajectoire des cyclones, l'ensemble des secteurs côtiers de l'archipel sont susceptibles d'être impactés par ces houles.

Par ailleurs, dans la zone côtière, les houles subissent des déformations liées à la morphologie du plateau insulaire, la présence de récifs coralliens ou d'aménagements côtiers. L'exposition à la houle est donc très variable localement.

2.3.3. Les niveaux marins

La marée

La marée est de type semi-diurne à inégalité diurne. Le régime de marée est microtidal avec marnage moyen de 0,25 m relevé au port de Pointe-à-Pitre. Le tableau ci-dessous présente les niveaux de référence au port de Pointe à Pitre d'après le SHOM (2017). Le niveau moyen se trouve à +0,09 m du zéro IGN88.

Niveau moyen	Moyenne des plus hautes mers journalières	Moyenne des plus basses mers journalières	Plus basses mers astronomiques	Plus hautes mers astronomiques
0,55	0,70	0,45	0,15	0,86

Illustration 8 – Niveaux caractéristiques de la marée au port de référence de Pointe-à-Pitre exprimés en mètre par rapport au zéro hydrographique (SHOM, 2017)

Les surcotes marines

Outre le phénomène de marée, la pression atmosphérique, les vents et le déferlement des vagues affecte le niveau de la mer. Le passage de tempêtes tropicales et des cyclones à proximité de l'archipel peut générer une élévation temporaire et brutale du niveau de la mer. L'amplitude des surcotes est en lien avec la direction des vents d'afflux, la diminution de la pression atmosphérique (surcote atmosphérique) et la déformation du plan d'eau liée à la propagation et le déferlement de la houle près de la côte (surcote liée aux vagues ou *set-up*).

Selon Krien et al. (2015) les valeurs de surcote les plus importantes peuvent atteindre localement 2 m dans les fonds de baie du Grand et du Petit Cul de Sac Marin. L'illustration ci-après présente la surcote cyclonique de période de retour 100 ans à l'échelle régionale à partir des résultats de l'étude statistique réalisée par Krien et al. (2015) dans la cadre du projet TSUNAHOULE (Illustration 9).

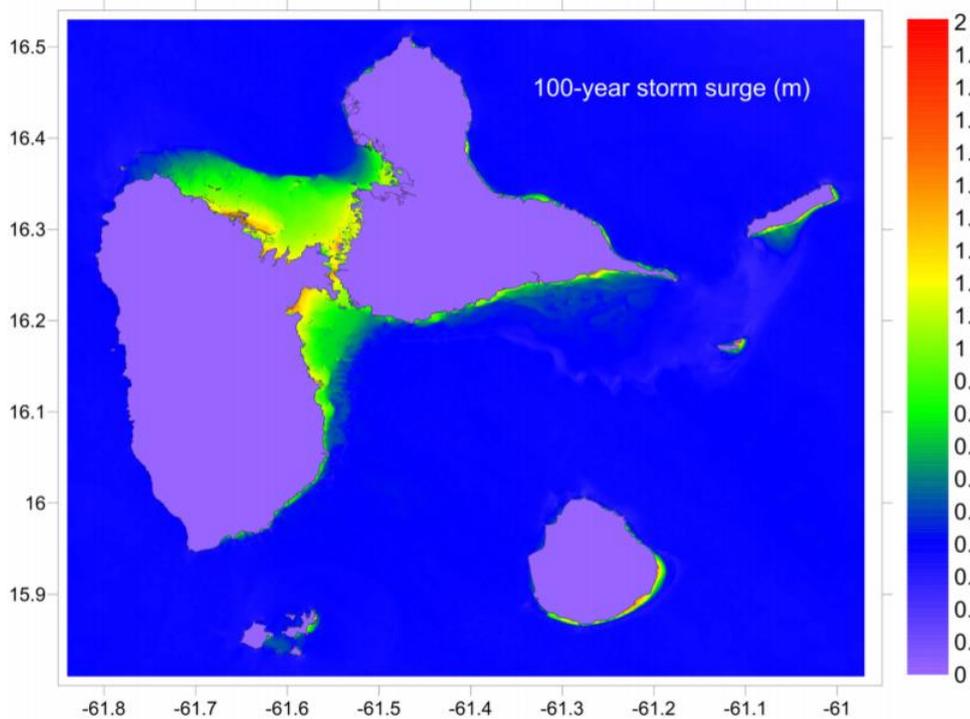


Illustration 9 – Surcote cyclonique de période de retour 100 ans (Krien et al., 2015)

L'élévation du niveau de la mer en lien avec le réchauffement climatique

Le tableau ci-après présente les projections d'augmentation du niveau moyen de la mer à l'horizon 2100 à l'échelle globale et des Antilles françaises. Les projections locales ont été estimées à partir des travaux récents du BRGM réalisés dans le cadre du projet de recherche C3AF¹ (Le Cozannet et al., à paraître).

Scénario d'émission des gaz à effet de serre GIEC (2013)	Projections	Élévation du niveau moyen de la mer à l'horizon 2100 par rapport à 1986-2005 (en m)		
		Minimum	Médiane	Maximum
RCP 8.5	Guadeloupe	0,20	0,76	3,44
	Mondiale	0,16	0,75	3,25

Illustration 10 - Projections globales et locales du niveau moyen de la mer à l'horizon 2100 selon le scénario d'émission des gaz à effets de serre RCP 8.5 (Le Cozannet et al., à paraître)

¹ Conséquences du Changement Climatique dans les Antilles Françaises

2.3.4. Les évènements de fortes intensités

Située dans la zone tropicale de l'Atlantique Nord, la Guadeloupe est particulièrement exposée au passage des perturbations cycloniques (Illustration 11). La saison cyclonique s'étend de juin à novembre.

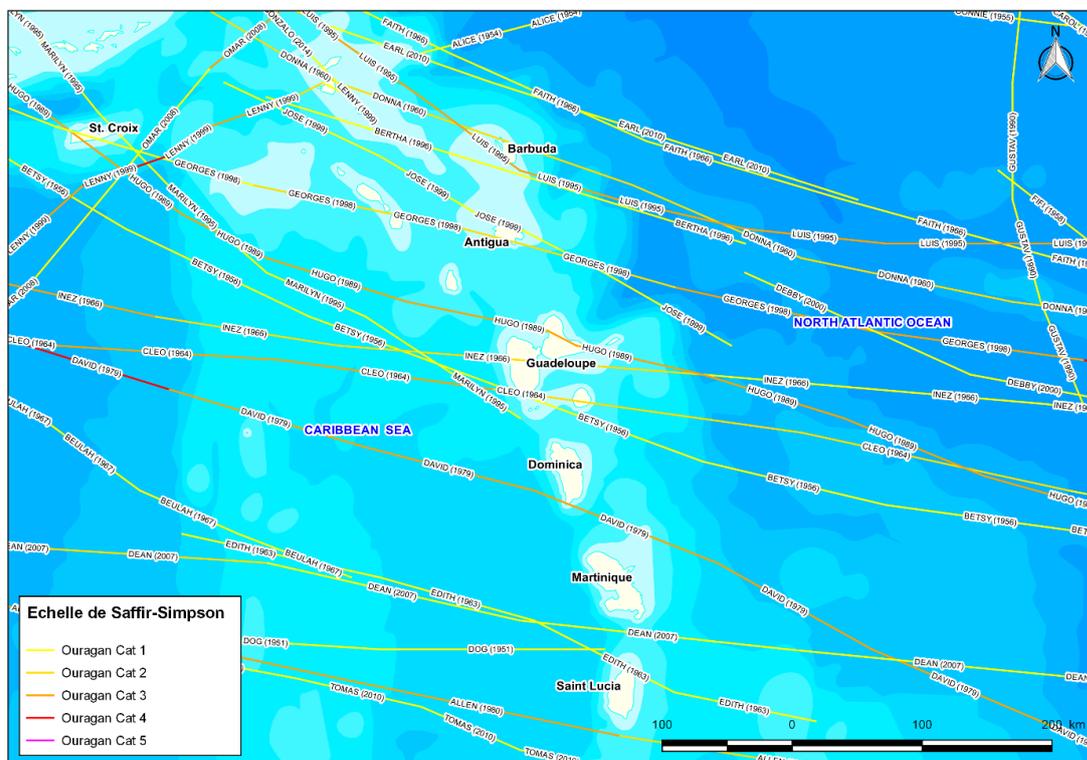


Illustration 11 - Trajectoire des cyclones à proximité de la Guadeloupe depuis 1950 (Guillen et al. 2018, d'après la base de données IBTRACS² (2017))

D'après Météo-France, on recense statistiquement un phénomène cyclonique tous les 3,5 ans (tempête tropicale ou ouragan) et un ouragan tous les 7,5 ans (cat. 3 à 5). Le tableau suivant présente les principaux évènements cycloniques historiques ayant impacté la Guadeloupe au XXe et XXIe siècle.

Septembre 1928	1928
Août 1956	BETSY
Aout 1964	CLEO
Septembre 1966	INEZ
Août 1979	DAVID
Septembre 1989	HUGO
Septembre 1995	LUIS

² International Best Track Archive for Climate Stewardship (NOAA)

Septembre 1995	MARILYN
Novembre 1999	LENNY
Août 2007	DEAN
Octobre 2008	OMAR
Septembre 2017	MARIA

Illustration 12 – Liste des principaux cyclones ayant affecté la Guadeloupe au XX et XXI eme siècle

Les phénomènes associés au passage des cyclones sont les vents forts, les précipitations importantes, les fortes houles et les surcotes marines. Les fortes houles peuvent provoquer des déplacements importants et rapides des sédiments à l'origine de l'érosion du littoral.

2.4. DYNAMIQUE DU TRAIT DE COTE A L'ECHELLE REGIONALE

L'analyse historique de l'évolution du trait de côte réalisée à l'échelle régionale par Guillen et al. (2017) sur la Basse-Terre et la Grande-Terre permet d'établir un panorama de la dynamique du littoral selon les principaux faciès morphologiques rencontrés en Guadeloupe. Ainsi, sur la période 1950-2013, les principales tendances observées sont les suivantes :

- un tiers des côtes basses meubles présente une tendance à l'érosion sur le long terme ; la majorité est relativement stable ou en équilibre dynamique ;
- 20% des mangroves présentent une tendance à l'avancée et 67% sont considérées comme stables ;
- les côtes rocheuses sont majoritairement stables, seulement un quart du linéaire présente une tendance à l'érosion sur le long terme.

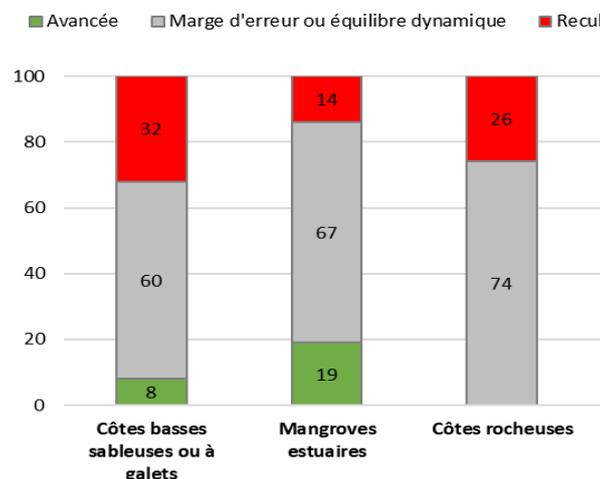


Illustration 13 – Dynamique du trait de côte sur le long terme (1950-2013) exprimé en pourcentage selon les principaux faciès morphologiques rencontrés en Guadeloupe d'après Guillen et al. 2017

Les côtes basses meubles apparaissent donc comme l'environnement le plus sensible à l'érosion littorale.

3. Données utilisées

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de l'analyse historique de l'évolution du trait de côte à l'échelle régionale réalisée par Guillen et al. (2017). Ce travail a notamment permis de réaliser la digitalisation de la position historique du trait de côte par photo-interprétation des ortho-photographies de l'IGN pour les années 1950, 1998, 2004, 2010 et 2013.

3.1. DEFINITION DE L'INDICATEUR DE TRAIT DE COTE

Les indicateurs utilisés par Guillen et al. (2017) pour définir la position du trait de côte par photo-interprétation sont les suivants :

- la limite de végétation pour les côtes basses meubles
- la limite de la mangrove côté mer;
- la limite de pied d'ouvrage pour les côtes basses aménagées ;
- la limite du jet de rive pour les côtes basses rocheuses
- le pied de falaises.

3.2. LIMITES TECHNIQUES A LA CARTOGRAPHIE DU TRAIT DE COTE

La digitalisation des indicateurs de la position du trait de côte par photo-interprétation des images aériennes peut présenter certaines incertitudes liées aux facteurs suivants :

- la qualité des images (résolution, surexposition, contraste, présence de nuage) ;
- les problèmes de calage des images liés à l'orthorectification et au géoréférencement ;
- les conditions océaniques et météorologiques au moment de la prise de vue ;
- les erreurs de digitalisation et d'interprétation des images liées à l'opérateur qui numérise les traits de côtes.

A ce propos, les indicateurs de pied de falaise et de limite du jet de rive utilisés pour caractériser la position du trait de côte pour les côtes rocheuses ne permettent pas d'analyser leur évolution en raison de la variabilité des conditions océaniques entre les campagnes de prise de vues aériennes, de la présence de végétation ainsi que de la qualité de l'ortho-rectification des images pour les environnements de falaise haute.

Les côtes rocheuses (basses et à falaises) ne seront donc pas traitées dans le cadre de cette étude car la position du trait de côte présente trop d'incertitudes pour analyser leurs évolutions passées et projeter leur évolution future. L'aléa associé à l'évolution des côtes rocheuses nécessite une analyse complémentaire qui relève pour les côtes à falaise de la caractérisation des mouvements de terrain non abordée ici.

Par ailleurs, l'indicateur utilisé concernant la limite d'extension des mangroves (front de végétation) ne traduit pas une évolution de la limite terrestre car ces forêts se développent directement sur la mer. L'aléa recul du trait de côte ne sera donc pas traité pour ce type d'environnement. A noter que les côtes à mangroves se développent dans des environnements relativement protégés et soumis à une sédimentation importante. Le front des mangroves guadeloupéennes est relativement stable ou en progression et protège naturellement la côte de l'érosion littorale.

En conformité avec la DEAL, les projections de recul du trait de côte seront appliquées uniquement aux côtes basses meubles aménagées ou non.

3.3. SOURCES DE DONNEES UTILISEES

Les principales caractéristiques des données sources utilisées pour la digitalisation du trait de côte et les incertitudes associées sont présentées dans le tableau ci-dessous d'après Guillen et al. (2017).

Année	Type	Colorimétrie	Source	Résolution (pixel en m)	Incertitude associée à la position du trait de côte (m)
1950	Photographies aériennes orthorectifiées et géoréférencées	Noir et Blanc	IGN	1 m	15
1998		Couleur	IGN	0,5 m	10
2004		Couleur	IGN	0,5 m	5
2010		Couleur	IGN	0,5 m	2,5
2013	Images satellites	Couleur	IGN d'après images PLEIADES	0,5 m	2,5

Illustration 14 : Caractéristiques des sources de données utilisées pour la digitalisation du trait de côte (Guillen et al., 2017)

Les îles de la Désirade, les Saintes et Marie-Galante ne sont pas couvertes par toutes les campagnes photographiques de l'IGN. Le tableau ci-dessous précise lesquelles sont disponibles pour chaque territoire.

Année	Basse-Terre	Grande-Terre	Les Saintes	Marie-Galante	La Désirade
1950	✓	✓		✓	✓
1998	✓	✓			
2004	✓	✓	✓	✓	
2010	✓	✓	✓	✓	✓
2013	✓	✓	✓	✓	✓

Illustration 15 – Campagnes photographiques de l'IGN disponibles sur chaque territoire

3.4. IMPACTS DES EVENEMENTS EXTREMES SUR LE TRAIT DE COTE

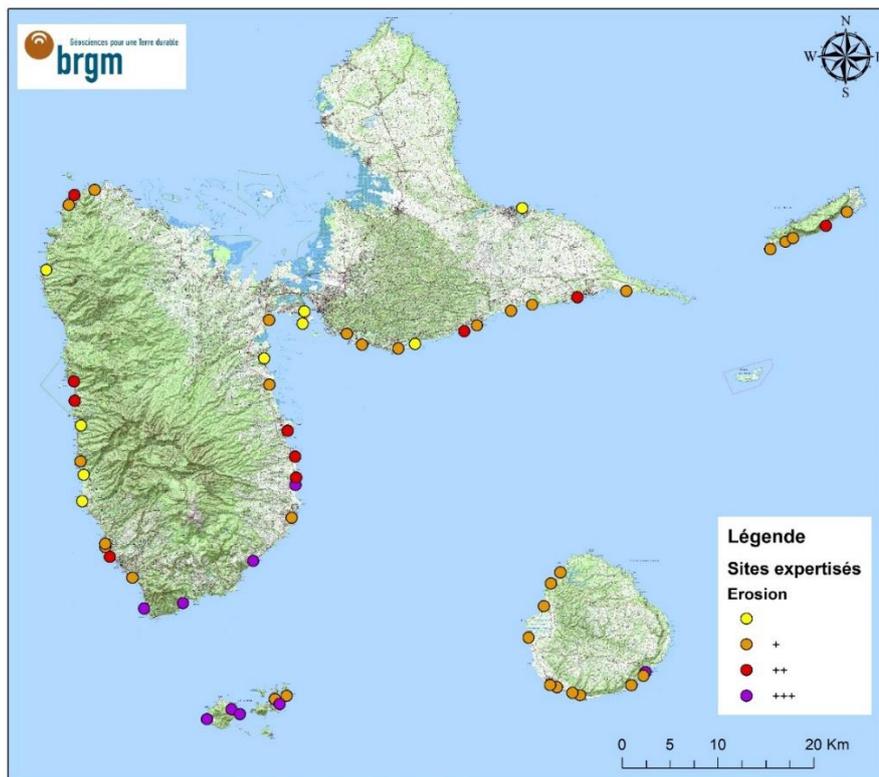
Les retours d'expérience post-cyclonique ont été analysés afin de caractériser les reculs ponctuels liés aux événements de fortes intensités. En effet, les événements cycloniques récents, tels que IRIS, LUIS et MARYLIN en 1995 (BRGM, 1995), LENNY en 1999 (Martin et Mompelat, 2000), DEAN en 2007 (Chauvet et al., 2007), OMAR en 2008 (Chauvet, 2008) ou MARIA en 2017 (Legendre et Guillen, 2017) ont fait l'objet, par le BRGM de rapports et d'observations de terrain visant à caractériser leurs impacts sur le littoral.

Ces rapports présentent généralement des observations, des photographies, parfois des mesures et des cartographies permettant de caractériser qualitativement le recul ponctuel lié à ces événements. Quelques éléments issus de ces rapports sont présentés ci-après à titre d'illustration (Illustration 16, Illustration 17 et Illustration 18).

Ces données seront utilisées pour caractériser le recul ponctuel et brutal associé aux événements de forte intensité.



Illustration 16 – Exemple du recul ponctuel du trait de côte et de l'érosion d'un remblai routier sur le littoral de la commune de Deshaies suite au passage de l'ouragan LENNY (BRGM, 1999)



+	++	+++
Pente forte, petite microfalaise et faible perte d'épaisseur (~1m), jusqu'à 5 m de recul du trait de côte	Microfalaise en haut de plage et perte d'épaisseur importante (2 m et plus), jusqu'à 10 m de recul du trait de côte	Érosion provoquant un affouillement, voire l'effondrement des bâtiments de première ligne, au-delà de 10 m de recul du trait de côte

Illustration 17 - Carte des sites visités pour évaluer les impacts en termes d'érosion sur l'archipel suite au passage de Maria d'après Legendre et Guillen (2017)

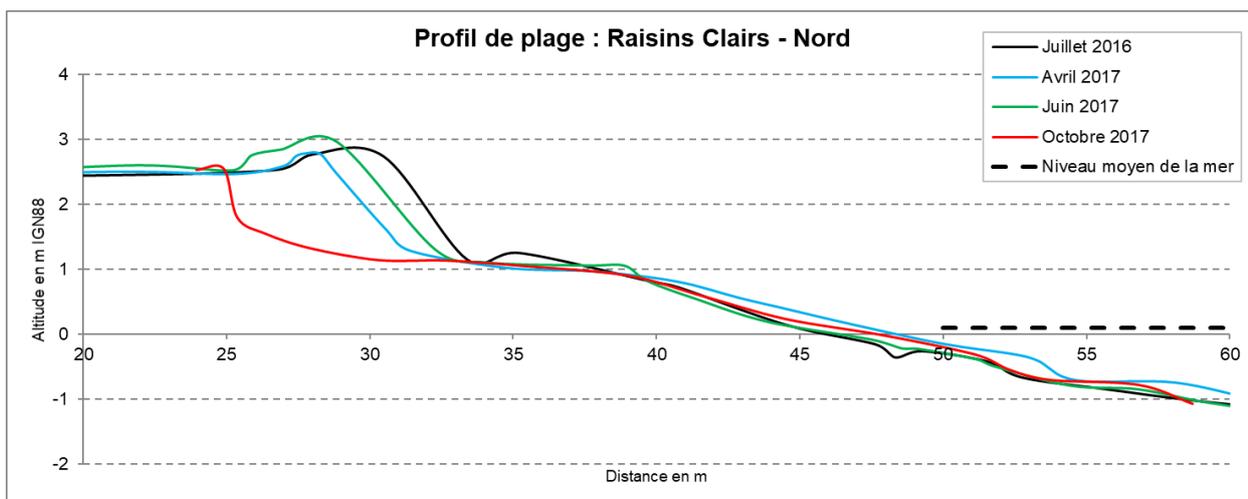


Illustration 18 : Exemple du recul de la plage évalué entre 5 et 10 m à partir de profil topographique sur la plage des Raisins Clairs (commune de Saint François) suite au passage de l'ouragan Maria (Guillen et al., 2018)

4. Méthodologie

La méthodologie utilisée pour cartographier l'aléa recul du trait de côte s'appuie sur le guide d'élaboration des PPRL publié par la DGPR (2014). Elle repose sur la projection des taux d'évolution du trait de côte à l'horizon 100 ans et le retour d'expérience sur les reculs instantanés liés aux événements majeurs.

4.1. CARTOGRAPHIE DU TRAIT DE COTE DE REFERENCE

Le trait de côte de référence correspond au trait de côte le plus récent disponible. Pour cette étude, il s'agit du trait de côte de l'année 2013 (Guillen et al., 2017). Ce trait de côte constitue la référence à partir de laquelle les projections futures sont réalisées.

Dans un premier temps le trait de côte de 2013 a été lissé de manière à créer une polygone unique. Le lissage est réalisé manuellement et permet d'éliminer les irrégularités liées à la digitalisation du trait de côte (chemin d'accès, dégradation de la végétation et aménagements sur le haut de plage).

Le trait de côte est ensuite divisé en tronçons homogènes selon les types de côte suivants :

- les côtes basses meubles ;
- les ouvrages de protection sur les côtes basses aménagées ;
- les ouvrages portuaires ;
- les côtes basses rocheuses ;
- les côtes escarpée à falaises hautes ;
- les côtes à mangroves.

La segmentation par type de côte a été réalisée à partir de l'orthophotographie Haute Résolution de IGN datée de 2017 afin de tenir compte des aménagements les plus récents. Le Modèle Numérique de Terrain Litto3D (IGN et SHOM, 2013) a également été utilisé en complément afin d'identifier les côtes basses (Illustration 19).

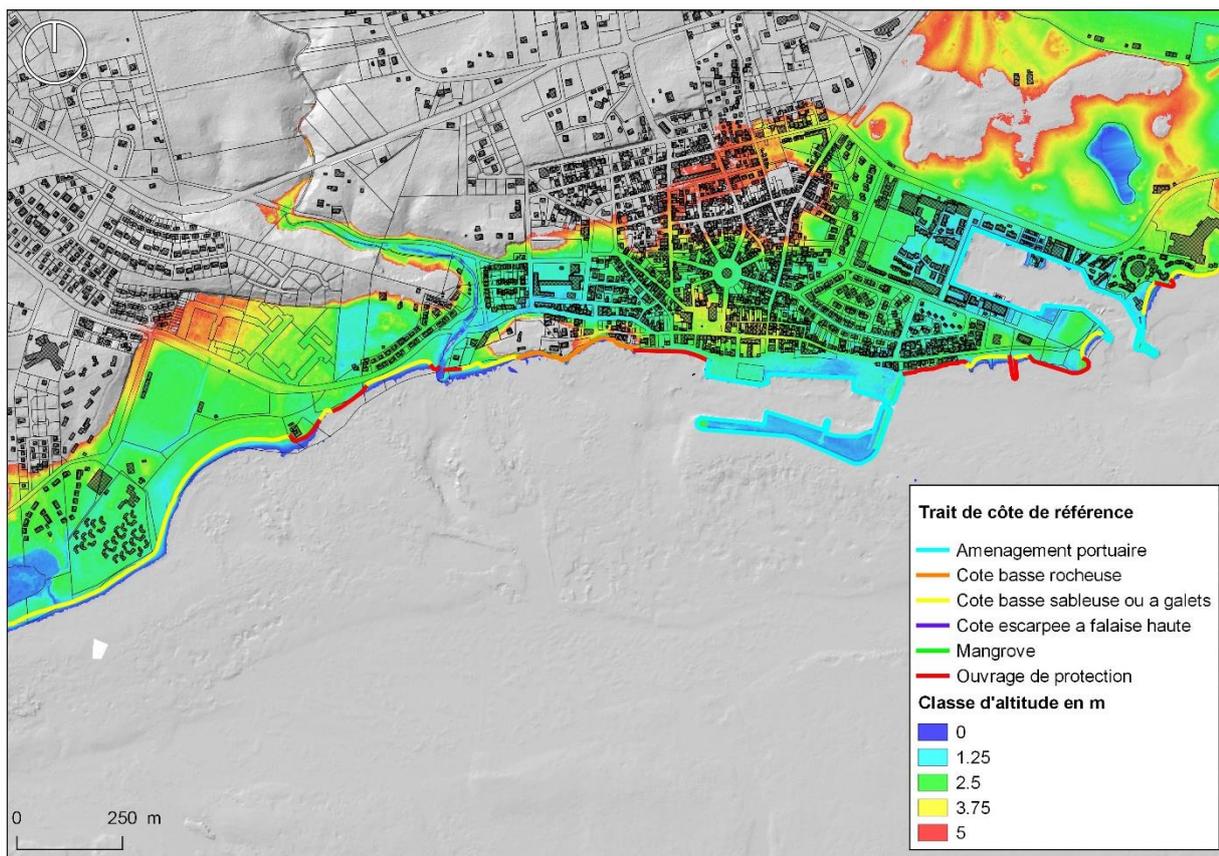


Illustration 19 - Exemple de la cartographie du trait de côte de référence (2013) sur la commune de Saint-François avec utilisation de l'Otho HR IGN de 2017 et du modèle numérique de terrain Litto3D (SHOM et IGN)

4.2. DETERMINATION DES TAUX ANNUELS MOYENS D'EVOLUTION

L'évolution du trait de côte peut être très variable dans le temps et présenter des phases de recul et d'avancée, elle doit donc être étudiée sur le long terme (plusieurs décennies) afin d'en dégager des tendances historiques.

4.2.1. Calcul des taux d'évolution

Le calcul des taux d'évolution a été réalisé à partir de l'outil DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) développé par l'USGS³ (Thieler et al., 2009). Le calcul des taux d'évolution a été réalisé par Guillen et al. (2017) et les résultats sont réutilisés dans cette étude.

Cet outil, spécialement développé pour l'analyse statistique des données de trait de côte, permet de calculer une série d'indicateur concernant l'évolution du littoral. A partir d'une ligne de base créée parallèlement au rivage, cet outil va générer une série de transects perpendiculaires venant recouper l'ensemble des traits de côte historiques (Illustration 20). Dans le cas de cette étude les transects ont été générés tous les 50 m.

³ United States Geological Survey

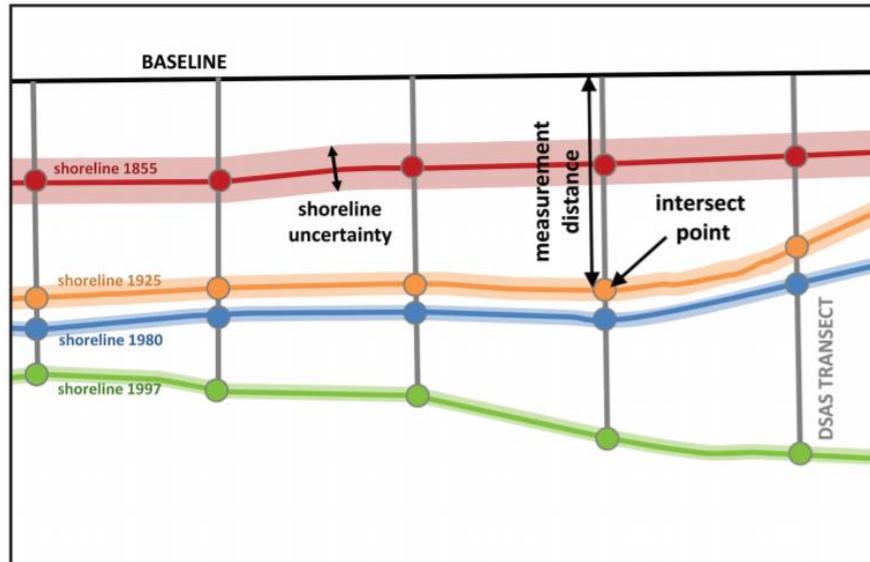


Illustration 20 – Mesure de la distance à partir de la ligne de base pour chaque intersection avec la position historique des traits de côte. (Thieler et al., 2009)

Sur chaque transect, l'outil DSAS va calculer automatiquement une série d'indicateurs présentés dans le tableau ci-dessous.

Mesure de la distance	Shorline Change Envelope (SCE)	Valeur absolue de l'amplitude maximale d'évolution du trait de côte sur l'ensemble de la période d'observation exprimée en m
	Net Shoreline Movement (NSM)	Valeur absolue de l'évolution entre la date de position la plus ancienne et la plus récente exprimée en m
Calcul statistique	End Point Rate (EPR)	Taux d'évolution annuel moyen calculé entre la date de position la plus ancienne et la plus récente exprimée en m/an
	Least Regression Rate (LRR)	Taux d'évolution annuel moyen calculé sur l'ensemble de la période d'observation exprimée en m/an
	Weighted Least Squares Regression (WLR)	Taux d'évolution annuel moyen calculé sur l'ensemble de la période d'observation avec prise en compte du poids de l'incertitude de la position exprimée en m/an

Tableau 1 – Description des paramètres calculés pour chaque transect par l'outil DSAS

Dans le cadre de cette étude, l'analyse a été réalisée à partir de l'ensemble des traits de côte disponibles sur la période 1950-2013.

Le paramètre statistique qui a été choisi pour calculer le taux d'évolution annuel moyen sur chaque transect est le *WLR* (régression linéaire pondérée). L'avantage de ce paramètre est de prendre en compte le poids de l'incertitude de la position du trait de côte pour le calcul du taux d'évolution (Illustration 21).

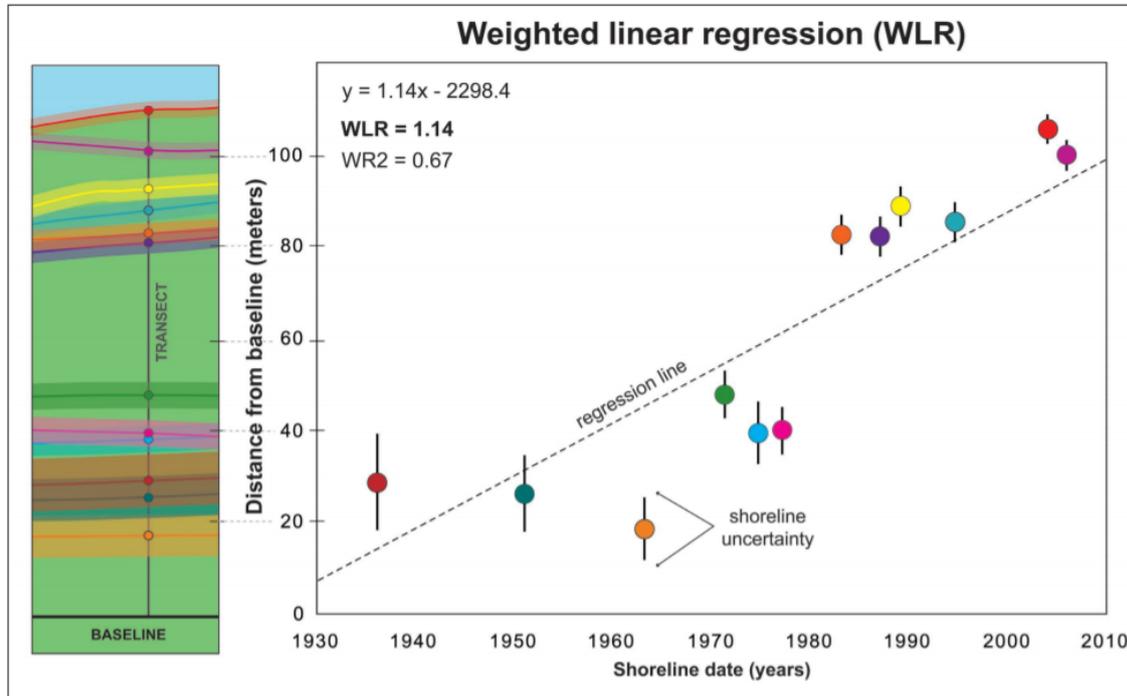


Illustration 21 – Calcul de la régression linéaire pondérée sous DSAS (Thieler et al., 2009)

Le taux de régression linéaire pondérée est déterminé par tracé de la position du trait de côte pour chaque date. La valeur d'incertitude est indiquée par des barres verticales autour de chaque point de données. Les plus petites valeurs d'incertitudes de position ont plus d'influence dans le calcul de la régression linéaire. La pente de la droite de régression représente le taux d'évolution annuel moyen exprimé en m/an.

4.2.2. Harmonisation des taux d'évolution

Les taux calculés tous les 50 m ont été harmonisés par secteurs d'évolution homogènes à l'échelle de la cellule sédimentaire. En effet, la cellule sédimentaire constitue l'unité physique de référence pour étudier les évolutions du littoral.

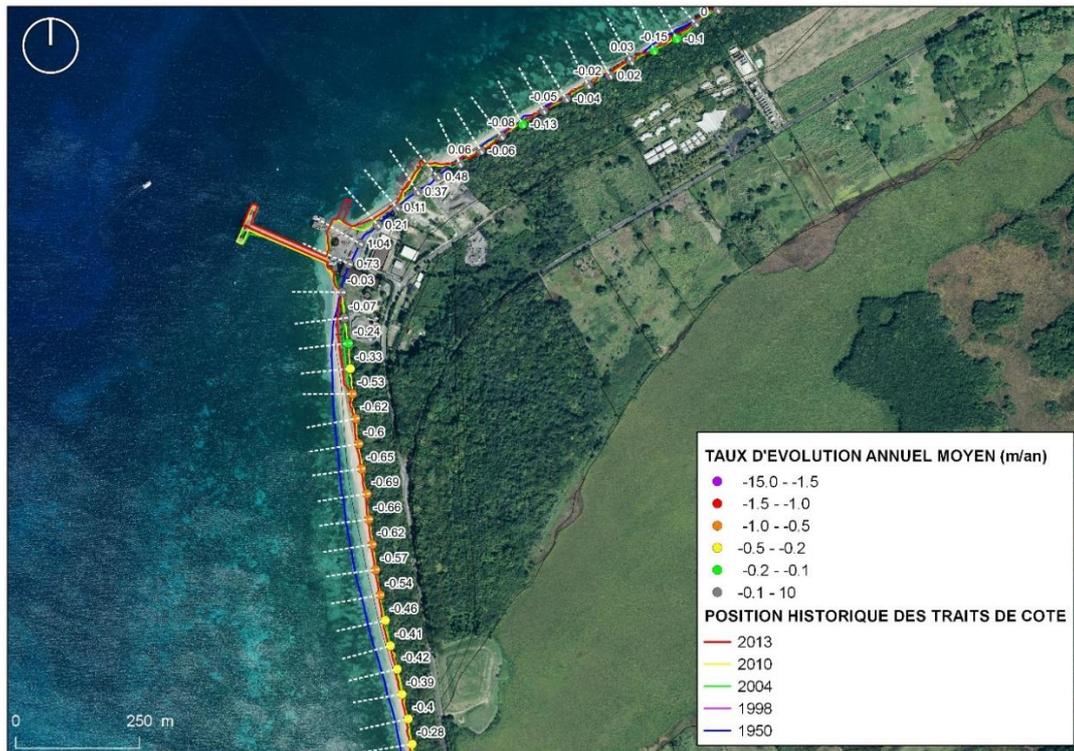


Illustration 22 – Exemple de représentation du taux d'évolution annuel moyen calculé sur chaque transect sur le site de Folle Anse sur la commune de Grand-Bourg à Marie-Galante

Une première analyse des taux d'évolution annuels moyens réalisée sous Excel permet de ramener les valeurs positive à 0, filtrer les valeurs aberrantes et calculer une moyenne sur chaque secteur d'évolution homogène. Les secteurs d'évolution homogène sont déterminés à dire d'expert à l'échelle de la cellule sédimentaire selon les variations observées des taux d'évolution et à la configuration du littoral (changement d'orientation et obstacle au transit sédimentaire).

Les taux harmonisés par secteur d'évolution homogène sont ensuite reportés sur le trait de côte de référence de 2013 et seront utilisés pour le calcul de la projection du recul du trait de côte à l'horizon 100 ans.

4.3. DETERMINATION DU RECUIL PONCTUEL LIE A UN EVENEMENT MAJEUR

Les valeurs de recul ponctuel ont été définies en conformité avec la DEAL et majorées selon l'exposition des sites à la houle. Suite à l'analyse historique réalisée à partir des retours d'expérience post-cycloniques, il a été décidé de retenir les valeurs de recul ponctuel suivantes :

- 10 m pour les côtes basse meubles et aménagées, protégées par la présence d'un récif ;
- 20 m pour les côtes basse meubles et aménagées exposées directement au déferlement de la houle.

Aucune valeur de recul ponctuel n'est appliquée dans les secteurs abrités, où l'agitation est considérée comme négligeable. Il s'agit principalement des bassins portuaires ainsi que des parties internes du Grand et du Petit Cul de Sac Marin.

Pour rappel, le guide méthodologique (DGPR, 2014) précise que « dans le cas d'une côte basse meuble protégée par un ouvrage longitudinal s'étant substitué à la morphologie pré-existante, la

défaillance probable de l'ouvrage doit dans tous les cas être envisagée » lors d'un événement tempétueux et doit être intégré à l'aléa de référence. S'il n'est pas possible d'évaluer ce recul ponctuel, le guide préconise d'appliquer un recul forfaitaire de 20 m à partir de la partie supérieure de l'ouvrage. Les valeurs retenues ici sont donc cohérentes avec les recommandations nationales.

4.4. PROJECTIONS DES TAUX D'EVOLUTION A ECHANCE 100 ANS

L'aléa de référence est défini à partir du recul estimé à l'horizon 100 ans. Il est issu de la projection des tendances passées auquel est ajouté le recul susceptible d'intervenir lors d'un événement ponctuel majeur. Il s'exprime alors de la manière suivante (DGPR, 2014) :

$$Lr = 100Tx + Lmax$$

Avec Lr la largeur de la zone l'aléa, Tx le taux de recul annuel moyen (en m/an), $Lmax$ la valeur du recul du trait de côte consécutif à un événement tempétueux majeur pour les côte basses meubles ou dû à un événement brutal majeur (en m).

Pour chaque secteur de comportement homogène, l'enveloppe de l'aléa est donc définie à partir de la projection du taux d'évolution annuel moyen harmonisés sur les 100 prochaines années par rapport à la position du trait de côte de référence (2013), auquel on ajoute le recul brutal en cas d'événement de forte intensité (Illustration 23).



Illustration 23 - Exemple de cartographie de l'aléa recul du trait de côte sur la commune de Sainte-Anne

4.5. PRISE EN COMPTE DES AMENAGEMENTS DE PROTECTION

La prise en compte des aménagements de protection suit les recommandations du guide méthodologique d'élaboration des PPRL (DGPR, 2014).

Le guide rappelle que les ouvrages de protection « **ne permettent pas de contrer les phénomènes d'érosion dans la durée mais permettent souvent uniquement de fixer le trait de côte temporairement ou de limiter ses fluctuations** ». Il précise qu'un littoral dont la ligne de rivage est en apparence fixée peut ainsi être soumis à d'autres phénomènes d'érosion pouvant se traduire un abaissement du profil, des affouillements en pied d'ouvrages, etc. Ainsi, une zone située derrière un trait de côte artificialisé reste une zone potentiellement exposée à l'érosion.

Donc, la défaillance de l'ouvrage doit dans tous les cas être envisagée, cette défaillance pouvant intervenir du fait de la dégradation ou de l'occurrence d'un évènement supérieur à l'évènement de dimensionnement de l'ouvrage.

Pour le cas des côtes basses meubles protégées, la méthodologie pour déterminer le taux de recul annuel (T_x) est donc adaptée (Illustration 24).

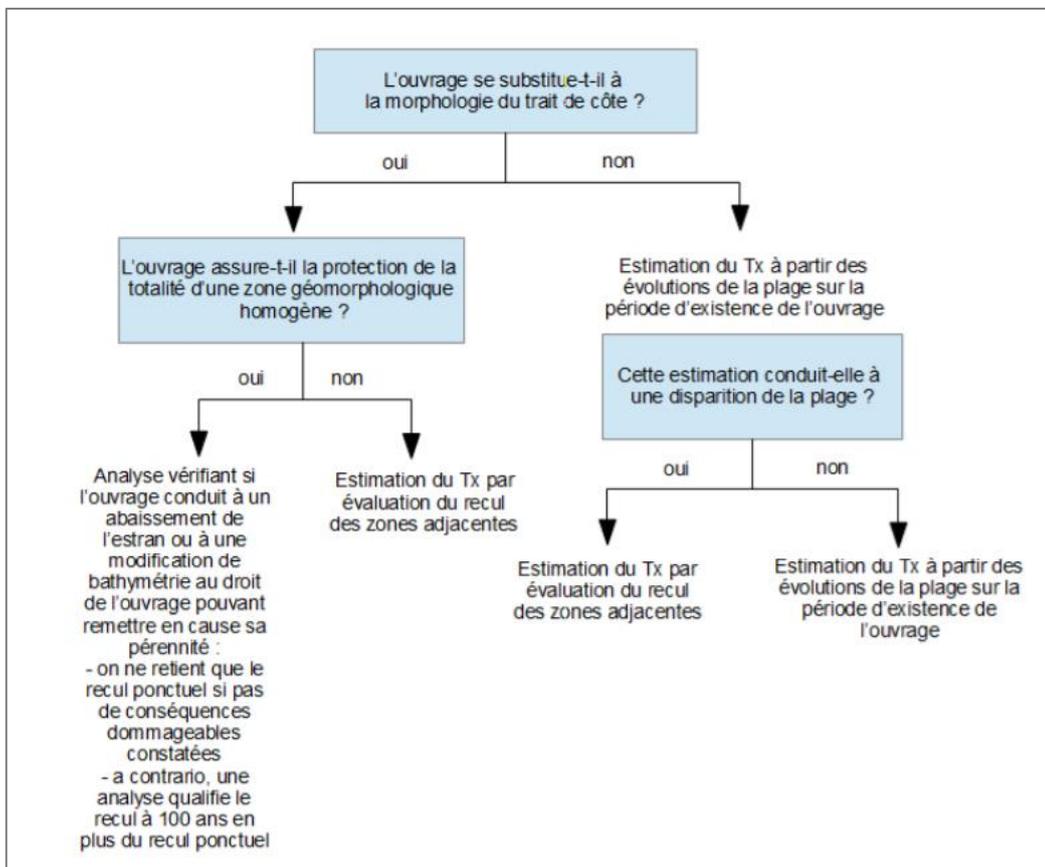


Illustration 24 – Estimation du taux moyen de recul annuel en présence d'ouvrage de protection (DGPR, 2014)

D'après le schéma précédent, on considère les deux cas de figure suivants :

- 1) l'ouvrage s'est substitué à la morphologie pré-existante. Dans ce cas, l'ouvrage sert à figer le trait de côte par artificialisation du haut de plage : perré en enrochement ou mur vertical par exemple (Illustration 25);

- 2) l'ouvrage et la plage co-existent, le trait de côte est en partie délimité par l'ouvrage et le haut de plage naturel. Dans ce cas, l'ouvrage sert à retenir les sédiments : brise lame et épis (Illustration 26).



Illustration 25 – Exemple d'un perré en enrochement dans le bourg de Pointe Noire qui fige artificiellement l'évolution du trait de côte (DEAL, 2009)



Illustration 26 – Exemple d'un ouvrage co-existant avec la plage sans figer le trait de côte en haut de plage au niveau du Bourg de Saint-Anne (DEAL, 2009)

Dans le premier cas, deux configurations peuvent se présenter :

- soit l'ouvrage assure la protection de la totalité d'une zone physiquement homogène (protection de l'ensemble de la cellule sédimentaire) donc on applique uniquement le recul ponctuel lié à un évènement majeur ;
- soit l'ouvrage protège seulement une partie de la cellule sédimentaire et l'évolution de la zone protégée sera similaire à celle des zones adjacentes en absence d'ouvrage (contournement possible de l'ouvrage).

Dans le second cas on détermine le taux d'évolution (T_x) sur la période d'existence de l'ouvrage :

- si la plage ne disparaît pas à l'échéance projetée, on applique le taux d'évolution sur la période d'existence de l'ouvrage,
- si la plage disparaît à l'échéance projetée, on applique le taux évalué à partir du recul des zones adjacentes (hypothèse d'un contournement possible de l'ouvrage).

4.6. AJUSTEMENT ET CORRECTION DE LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

Préalablement, les enveloppes de l'aléa projetées à l'horizon 100 ans sont découpées à partir de la fusion des couches des limites communales de la BD Topo et de la BD parcellaire de l'IGN afin de déterminer la limite de l'extension de l'aléa côté mer à la demande de la DEAL (Illustration 27).

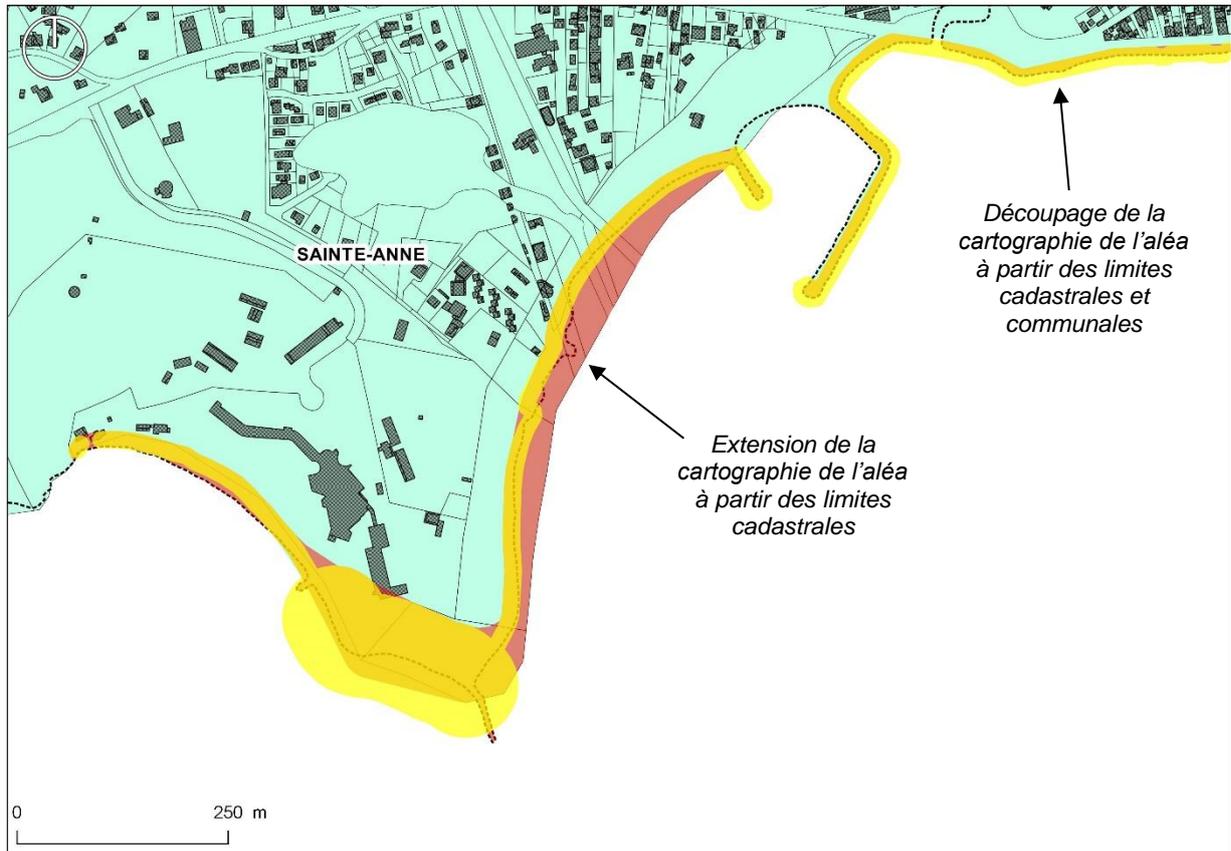


Illustration 27 – Exemple du découpage de l'enveloppe d'aléa. En jaune, l'enveloppe de l'aléa recul du trait de côte projeté à 100 ans à partir du trait de côte de référence (2013). En rouge, extension ou découpage de la cartographie de l'aléa par rapport aux limites cadastrales et communales.

A noter que dans certains cas la limite cadastrale est déjà située dans la partie maritime, les terrains indiqués dans la zone d'aléa sont donc déjà perdus (Illustration 28).

Par ailleurs, les ouvrages portuaires ou les épis, bien que situés sur la partie maritime, sont également cartographiés dans la zone l'aléa car faisant partie des limites communales ou cadastrales. Cependant cela ne préjuge pas de leur disparition à échéance 100 ans.



Illustration 28 – Exemple de limites cadastrales sur la partie maritime à l'est de la pointe de la Caravelle. Le trait blanc représente les limites cadastrales et le trait noir en pointillé la limite communale et le fond de plan Ortho IGN 2017.

Un ajustement cartographique de l'aléa est ensuite réalisé afin de prendre en compte les informations difficilement contraintes à partir de la simple analyse des taux d'évolution.

Par exemple, la prise en compte des contraintes géologiques et topographiques qui limitent l'extension du recul du trait de côte est réalisée à partir de l'interprétation des cartes géologiques et du modèle numérique de terrain Litto3D (Illustration 29).

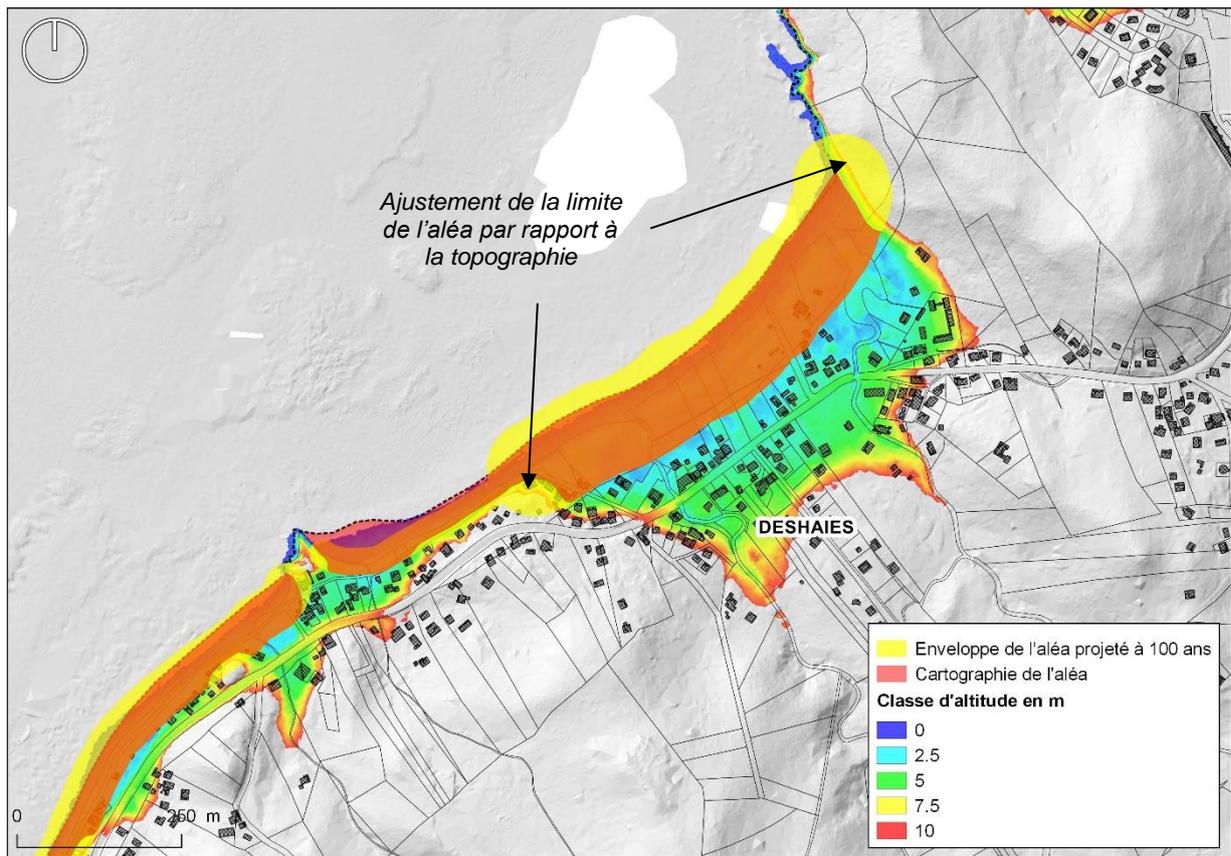


Illustration 29 – Exemple de correction appliquée afin de prendre en compte les contraintes topographiques à partir du MNT Litto3D (plage de la Perle, Deshaies)

Enfin, un lissage géomatique manuel est appliqué afin d'ajuster les discontinuités au niveau des zones de transitions entre deux secteurs de comportement homogène (Illustration 30).

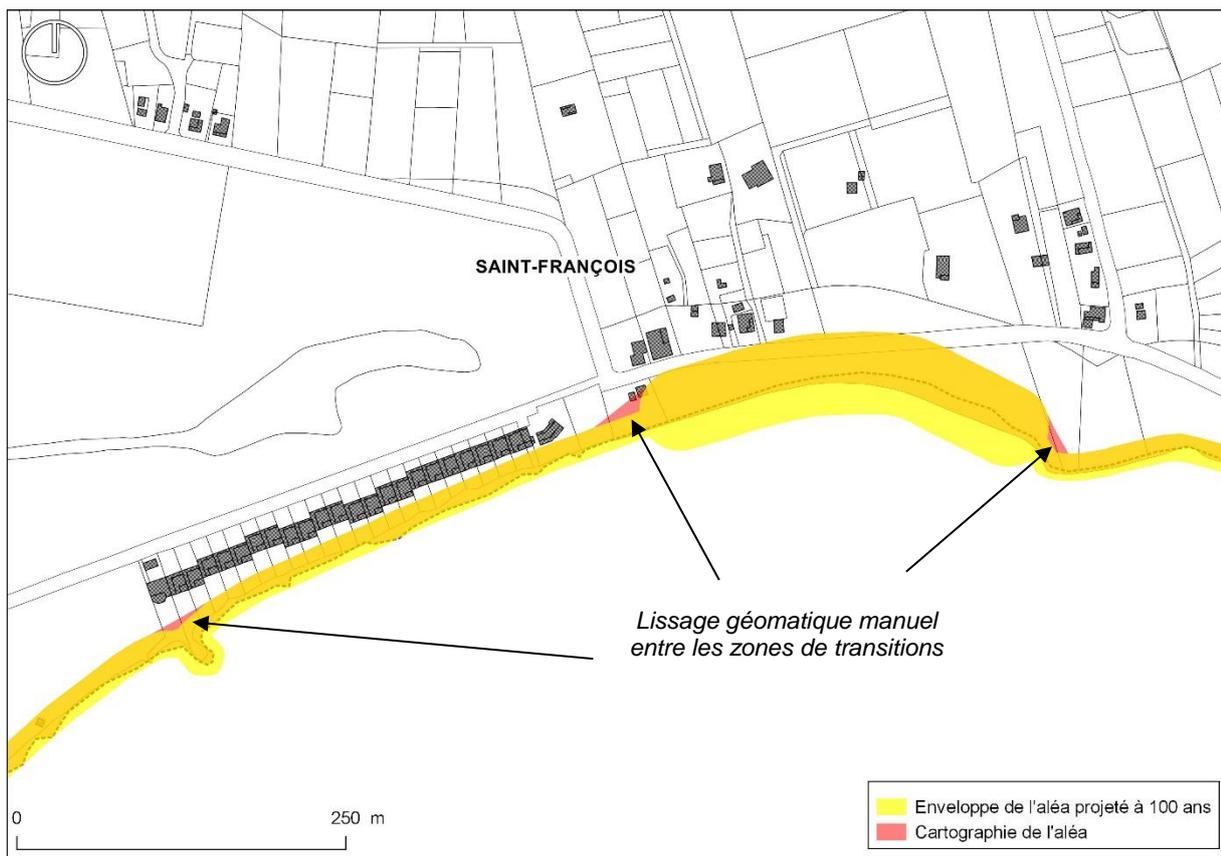


Illustration 30 – Exemple de lissage manuel appliqué dans les zones de transition entre deux secteurs de comportement homogène (Anse du Mancenillier, Saint-François)

4.7. QUALIFICATION DE L’ALEA

Conformément au guide méthodologique (DGPR, 2014), il n'existe qu'un seul niveau d'aléa pour le recul du trait de côte, l'aléa fort. Il précise que l'aléa implique une disparition du terrain concerné qui ne pourrait se voir appliquer des prescriptions réglementaires.

5. Descriptions des données et des résultats au format numérique

A la demande de la DEAL, les données et les résultats de cette étude sont restitués dans un format numérique exploitable sous SIG afin de faciliter leurs intégrations dans le PPR multirisque de la Guadeloupe pour une exploitation dans le zonage réglementaire.

Les données sont fournies au format « .shp » avec le système de coordonnées de référence WGS84 UTM20N.

Les résultats sont organisés par dossier dans quatre répertoires en fonction du type de données. Chaque dossier comprend les données et résultats présentés dans la tableau ci-dessous :

Description de la couche	Format vecteur	Nombre de couches	Noms des couches de données
Position du trait de côte par année	Polyligne	4	TDC_GUA_ORTHOIGN_1950.shp TDC_GUA_ORTHOIGN_1998.shp TDC_GUA_ORTHOIGN_2004.shp TDC_GUA_ORTHOIGN_2010.shp TDC_GUA_ORTHOSATIGN_2013.shp
Trait de côte de référence	Polyligne	1	TDC_REF_PPR_GUA_WGS84_UTM20N.shp
Taux d'évolution du trait de côte	Point	3	TX_DSAS_Guadeloupe_1950_2013_Point_WGS84_UTM20N.shp TX_DSAS_Desirade_1950_2013_Point_WGS84_UTM20N.shp TX_DSAS_Marie_Galante_1950_2013_Point_WGS84_UTM20N.shp TX_DSAS_Saintes_1950_2013_Point_WGS84_UTM20N.shp
Aléa recul du trait de côte	Polygone	1	Alea_RTC_100ans_WGS84_UTM20N.shp

Illustration 31 – Tableau de synthèse des données et résultats restitués au format numérique exploitables sous SIG

6. Conclusion

Le littoral de Guadeloupe est particulièrement exposé aux aléas côtiers de submersion marine et de recul du trait de côte en lien avec le transport des sédiments dans la zone côtière et le passage des cyclones. Les secteurs les plus sensibles du littoral à l'aléa recul du trait de côte sont les côtes basses meubles. En Guadeloupe, d'après Guillen et al. (2017) on considère qu'environ un tiers des plages de sables et de galets sont en érosion sur le long terme (1950-2013).

Ce travail a été réalisé selon les recommandations du guide méthodologique national d'élaboration des Plans de Prévention des Risque Littoraux (PPRL) qui fixe le cadre général pour la réalisation des cartographies des aléas littoraux (DGPR, 2014).

Ainsi, la cartographie de cet aléa repose sur le calcul des taux d'évolution du trait de côte sur une période pluri-décennale et la prise en compte du recul ponctuel et brutal en cas d'évènement de forte intensité.

Les données utilisées reposent sur l'étude de l'évolution historique du trait de côte à l'échelle régionale réalisée par le BRGM en 2017 (Guillen et al.). Elle permet de disposer d'une base de données sur la position du trait de côte sur la période 1950-2013 et son taux d'évolution. Conformément à la méthodologie nationale, la position du trait de côte a été projetée à l'horizon 100 ans à partir des taux d'évolution calculés sur la période d'observation. Par ailleurs, le recul ponctuel et brutal associé à un évènement de forte intensité est estimé entre 10 et 20 m selon l'exposition du littoral.

Différents ajustements et corrections cartographiques ont ensuite été réalisées afin de tenir compte des contraintes topographiques ou géologiques et de lisser les discontinuités observées entre deux secteurs d'évolution homogène.

La cartographie de l'aléa ne porte que sur les côtes basses meubles protégées ou non par des ouvrages. Les côtes basses rocheuses, les côtes à falaises et les mangroves sont exclues. Pour ces types d'environnement l'incertitude sur les données et la nature des indicateurs ne permettent pas de caractériser le recul du trait de côte.

La données et les résultats produits dans le cadre de cette étude sont restitués au format numérique et exploitable sous SIG, ils comprennent :

- les positions historiques du trait de côte sur la période 1950-2013 ;
- le trait de côte de référence le plus récent (2013), divisé en tronçons homogènes selon le type de côte ;
- le taux d'évolution annuel moyen sur la période 1950-2013 calculé tous les 50 m ;
- la cartographie de l'aléa recul du trait de côte à échéance 100 ans réalisée à l'échelle du 1/10 000.

Ces résultats ont vocation à être utilisés par la DEAL pour la mise à jour du zonage réglementaire du PPRN multirisque de la Guadeloupe. La mise en forme cartographique de l'aléa sera réalisée par un prestataire externe de la DEAL sur l'ensemble de la Guadeloupe au format A0 et à l'échelle du 1/10 000.

7. Bibliographie

- BRGM.** (1995). Conséquences du passage des cyclones Iris, Luis et Marylin aux Antilles française (Guadeloupe et Martinique). Rapport BRGM/R38790.
- Chauvet M., Bodéré G., Mompelat J.M., Oliveros C. et Bozorgan A.** (2007). Caractérisation des impacts de la houle cyclonique sur le littoral de Guadeloupe au passage de Dean. Rapport BRGM/RP-55911-FR.
- Chauvet, M.** (2008). Caractérisation des impacts de la houle liée à l'ouragan « Omar » sur la Côte sous le Vent de la Guadeloupe (Octobre 2008). Rapport BRGM-RP-56869-FR.
- DGPR** (2014). Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. 169p.
- Graviou P., Bes De Berc S., Bourdon E.** (2011) Guides des curiosités géologiques de la Guadeloupe. BRGM éditions.
- Guillen L., Moisan M., Pallardy M., Legendre Y., Loireau C.** (2018) – Morphodynamique du littoral Guadeloupéen. Phase 1 : Définition et mise en place d'un réseau d'observation et de suivi du trait de côte. Rapport Final. BRGM/RP-67962-FR, 128 p., 117 fig.
- Guillen L., Pallardy M., Legendre Y., De La Torre Y. et Loireau C.** (2017) – Morphodynamique du littoral Guadeloupéen. Phase 1 : Définition et mise en place d'un réseau d'observation et de suivi du trait de côte. Evaluation historique du trait de côte Guadeloupéen. Rapport Final. BRGM/RP-66653-FR, 107 p.
- Krien Y., Dudon B., Roger J., et Zahibo N.** (2015) Probabilistic hurricane-induced storm surge hazard assessment in Guadeloupe, Lesser Antilles. Natural Hazards Earth System Sciences, 15, 1711-1750.
- Legendre Y. et Guillen L.** (2017). Caractérisation des impacts liés à la houle sur le littoral guadeloupéen au passage de l'ouragan Maria. Rapport final. BRGM/RP-67519-FR.
- Martin R., Mompelat J.M.** (2000). Les conséquences de la houle générée par le cyclone Lenny sur la côte sous le vent de la Guadeloupe. Rapport BRGM/RP50169-FR.
- Roques C., Bengouhbou-Valerius M., Le Cozannet G.** (2010). Evolution et dynamique du trait de côte de l'archipel guadeloupéen. Etude de 1956 à 2004. Rapport BRGM/RP-58750-FR.
- Service Hydrographique et Océanographique de la Marine** (2017). Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. 118 p.
- Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L. et Ergul, Ayhan** (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Guadeloupe
Parc d'activités de Colin
La Lézarde
97170 – Petit-Bourg – France
Tél. : 05 90 41 35 48