



# Diagnostic des risques littoraux et de l'aléa mouvements de terrain dans la baie de Tartane

Rapport final

BRGM/RP-70342-FR

Janvier 2021





# Diagnostic des risques littoraux et de l'aléa mouvements de terrain dans la baie de Tartane

Rapport final

**BRGM/RP-70342-FR**  
Janvier 2021

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

**C. Bouvier, V. Bellier, A. Nachbaur**

**Vérificateur :**

Nom : M. Moisan

Fonction : Ingénieur littoral

Date : 03/12/2020

Signature :



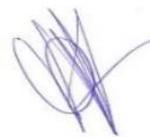
**Approbateur :**

Nom : B. Vittecoq

Fonction : Directeur Régional

Date : 20/01/2021

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](mailto:qualite@brgm.fr)

**Mots-clés** : littoral, érosion, submersion marine, dynamique sédimentaire, mouvements de terrain, Tartane, Martinique.

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

Bouvier C., Bellier V., Nachbaur A. (2021) – Accompagnement de la gestion des risques littoraux et de l'aléa mouvements de terrain dans la baie de Tartane. BRGM/RP-70342-FR, 56 p., 34 ill., 3 tabl.

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

A l'interface entre la terre et la mer, le littoral de la Martinique représente un linéaire côtier d'environ 450 km dont l'équilibre dynamique dépend des échanges et des transferts de sédiments sous l'effet des forçages météorologiques, marins et continentaux.

Dans la baie de Tartane (La Trinité, Martinique) et en particulier dans le secteur du quartier de Fonds Basil, l'érosion observée semble particulièrement importante et inquiète les services de l'Etat, les élus et la population. Les gestionnaires souhaitent notamment savoir comment faire face à cette problématique et quelles actions doivent être menées sur les secteurs qui présentent les plus gros enjeux (sécurité des personnes, bâti, voies de circulation).

Le travail d'expertise a été réalisé sur la base d'observations visuelles, de mesures prises sur le terrain et d'analyses de documents techniques. L'objectif de cette étude est l'élaboration d'un diagnostic des risques littoraux et de l'aléa mouvements de terrain sur la baie de Tartane et la mise en place de recommandations en termes de principe d'aménagement.

### **Les risques littoraux**

Alors que sur le long terme (entre 1951 et 2004), la position de la limite de végétation du haut de plage présente une variabilité assez faible dans la baie de Tartane (5 m au maximum), l'évolution de la position du trait de côte présente des évolutions significatives sur une période plus récente (2004 - 2019). Cette dynamique traduit notamment une érosion importante (entre 10 m et 20 m) sur le secteur Ouest de la baie, au niveau du quartier de Fonds Basil, entre la jetée et les enrochements plus au Nord. Ce même secteur reste également aujourd'hui la zone la plus sensible à la submersion marine.

Actuellement, cette portion du littoral est en partie protégée par des enrochements en mauvais état mis en place par les riverains. La route est très exposée au risque d'érosion par affouillement des fondations et de submersion par débordement. Compte tenu du contexte observé dans le quartier de Fonds Basil où la protection actuelle repose essentiellement sur des blocs de béton et des gravats, l'implantation ou la restauration d'un ouvrage de défense longitudinal (parallèle au trait de côte) dans la lignée de celui mis en place à l'extrémité Nord de la baie (blocs rocheux) reste la solution la plus pertinente pour la problématique de gestion de l'aléa érosion sur cette portion du littoral.

Afin de compléter le projet d'aménagement, en particulier sur les secteurs plus au Sud, des rechargements en sable sur l'avant côte et une restauration du niveau initial du sol (remblais) et de l'espace littoral terrestre par génie végétal restent des solutions de gestion pertinentes.

Les actions de remblais proposées ou de restauration du niveau initial du sol permettrait d'atténuer les phénomènes de submersion marine lors des événements cycloniques les plus impactant. Pour limiter le risque, la mise en place d'un muret vertical de protection en retrait du littoral pourrait également s'avérer pertinente afin de limiter la pénétration de l'eau sur la partie terrestre en cas de débordement.

### ***L'aléa mouvements de terrain***

Sur les hauteurs, la falaise du quartier Fonds Basil, située à l'extrémité Ouest de la baie de Tartane, présente une forte vulnérabilité où quatre instabilités de plusieurs centaines de mètres ont été relevées, confirmant sa forte prédisposition à l'éboulement. La partie instable de la falaise se limite aujourd'hui à la frange altérée en bordure de l'escarpement.

Etant donné qu'aucune habitation n'est située à moins de 15 m de la tête de falaise, nous n'avons pas identifié de danger imminent pour les enjeux situés en bordures. Néanmoins, des menaces à court et moyen terme sont à prendre à compte :

- à court terme pour la route communale ;
- à moyen terme pour la route, le portail, la coursive, voire la piscine de la parcelle OH 0159 (entre 10 et 50 ans) ;
- à plus long terme (> 50 ans) pour les maisons.

Les recommandations d'urgence ont été émises par le BRGM dans un mail transmis à la DEAL le 30 juillet 2020. Les mesures d'urgence ont été communiquées à l'oral au responsable de l'habitation lors de la visite du mardi 6 octobre 2020. Dans les plus brefs délais, le BRGM recommande la mise en place d'un dispositif de surveillance visuelle sur la chaussée et au niveau de l'habitation sous la forme de scellés bétons dans les fissures permettant d'identifier leurs éventuelles réouvertures.

Dans les semaines à venir, le BRGM recommande également de (1) vérifier l'absence de fuite d'eau au niveau de la canalisation qui traverse la chaussée ; (2) déplacer l'exutoire de cette canalisation en dehors de la niche d'escarpement pour réduire la vitesse de recul ; (3) de revoir l'installation de gestion des eaux de la parcelle OH159 pour que rien ne soit jeté librement dans la pente au risque d'accentuer un risque.

Par ailleurs, pour ne pas fragiliser davantage la paroi rocheuse, le stationnement doit être limité en bordure de falaise par un système dissuasif à l'image de celui qui était en place lors de la visite du 6 octobre 2020.

Un confortement de la falaise est envisageable sur les zones à protéger. Empêcher le recul de la falaise implique de renforcer la partie supérieure altérée sujette aux instabilités. Vu la faible résistance de ces horizons altérés, il pourrait s'agir d'établir une butée pour augmenter les efforts résistants. Ces ouvrages (piliers, contreforts) viseraient à s'opposer au détachement et à l'éboulement d'écailles rocheuses en réalisant un support rigide qui en assure le blocage. Ils pourront s'appuyer sur la partie rocheuse constituant la partie basse de la falaise.

# Sommaire

<b>1. Introduction.....</b>	<b>11</b>
1.1. CONTEXTE .....	11
1.2. ZONE D'ETUDE .....	12
1.3. OBJECTIFS.....	12
<b>2. Collecte des données et observations .....</b>	<b>13</b>
2.1. PHOTOGRAPHIES AERIENNES REFERENCEES.....	13
2.2. DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES .....	14
2.2.1. Cartes existantes .....	14
2.2.2. Levés topographiques.....	14
2.3. EXPERTISE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE.....	16
2.4. FORÇAGES PHYSIQUES METEO-MARINS.....	17
2.4.1. Données météorologiques .....	17
2.4.2. Données marégraphiques .....	18
2.4.3. Données et caractéristiques des vagues.....	19
<b>3. Synthèse des observations et analyses .....</b>	<b>21</b>
3.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE.....	21
3.1.1. Description topographique .....	21
3.1.2. Contexte géologique .....	21
3.2. TYPOLOGIE DU TRAIT DE COTE ET FONCTIONNEMENT HYDRO-SEDIMENTAIRE .....	25
3.3. CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE .....	27
3.3.1. Caractéristiques des vagues .....	27
3.3.2. Sensibilité et exposition aux tempêtes et houles cycloniques .....	28
3.3.3. Evolution des niveaux d'eau et surcote cyclonique .....	30
3.4. EVOLUTION DU TRAIT DE COTE ET SUBMERSION MARINE .....	31
3.4.1. Evolution du trait de côte et érosion .....	31
3.4.2. Sensibilité aux phénomènes de submersion marine .....	34
3.5. DESCRIPTION DES INSTABILITES SUR LA FALAISE DU QUARTIER FONDS BASIL.....	36
3.5.1. Historique.....	36
3.5.2. Un éboulement « récent » .....	36
3.5.3. Autres éboulements repérés sur la falaise littorale.....	39
3.5.4. Indice d'instabilité repéré sur images satellites .....	39
<b>4. Diagnostic et recommandation .....</b>	<b>41</b>
4.1. GESTION DE L'EROSION ET DES PHENOMENES DE SUBMERSION.....	41
4.1.1. Diagnostic .....	41
4.1.2. Recommandations en terme de principe d'aménagement .....	41

4.2. EROSION DE LA FALAISE .....	44
4.2.1. Diagnostic .....	44
4.2.2. Recommandations .....	47
4.2.3. Principe de confortement de la falaise .....	47
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>49</b>
<b>6. Bibliographie .....</b>	<b>51</b>

## Liste des figures

Illustration 1 : Plusieurs marqueurs d'érosion ont été observés sur terrain dans la baie de Tartane (quartier Fonds Basil). Photographie prise le 06 juillet 2020. ....	11
Illustration 2 : Plan de situation de la Baie de Tartane située sur la Presqu'île de la Caravelle (Trinité).....	12
Illustration 3 : Acquisition de données topographiques dans la baie de Tartane le 24 juillet 2020.	15
Illustration 4: Mesures réalisées dans la baie de Tartane (quartier Fonds Basil). Photographies aériennes de l'IGN (BD ortho 2017) où sont superposés la position du trait de côte et de la limite de végétation ainsi que les profils de mesures effectués p1 à p5.	15
Illustration 5: Profil d'altération d'une roche volcanique de type andésitique. Les deux colonnes de droite décrivent les horizons ou degrés de l'altération avec leur code cartographique associé (modifié de BRGM/RP-69150-FR). ....	17
Illustration 6 : Caractéristiques du vent à la Trinité depuis novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence des vitesses de vent moyen ( $W_v$ en m/s).	18
Illustration 7 : à gauche) Niveaux d'eau (nz) mesurés (en noir) et simulés (en rouge) à Fort-de-France depuis le 01 janvier 2019 (1 mois de mesures). A droite). Composantes principales diurnes et semi-diurnes déterminées par la méthode. Les niveaux d'eau sont données par rapport au zéro hydrographique. ....	19
Illustration 8 : Caractéristiques des vagues à Basse Pointe depuis Novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence de la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ). ....	19
Illustration 9 : Hauteur significative des vagues simulées le 27 juillet 2020 suite au passage de l'ouragan Isaias. Simulation extraite de la plateformes MARC-LOPS, <a href="https://marc.ifremer.fr/">https://marc.ifremer.fr/</a> ). Le point d'extraction est représenté par le cercle noir à proximité de la façade Nord Atlantique. ....	20
Illustration 10 : Topographie du secteur étudié. Source Litto3D de l'IGN (2010).....	21
Illustration 11 : Carte au 1/8 000ème du régolithe (formations géologiques de sub-surface) de la baie et du bourg de Tartane. Dernière modification le 30 octobre 2020. ....	23
Illustration 12 : Aperçu de la partie occidentale de la pointe à Bibi depuis la plage. L'altération hydrothermale dont témoignent les couleurs rougeâtres et brunâtres se développe jusqu'au pied de la falaise, là où l'altération supergène, habituellement, disparaît. Photos prises le 06 octobre 2020. ....	24
Illustration 13 : Plan de faille associé à la mise en place d'un dyke andésitique au niveau du point GPS VBE1019. Les stries observées sur le plan de la faille sont presque verticales. ....	25
Illustration 14 : Cellules et fonctionnement hydro-sédimentaire dans la baie de Tartane sur la Trinité (rapport RP-64499-FR). Photographies aériennes de l'IGN (BD ortho 2017) et typologie de la côte. ....	26
Illustration 15 : Photographies des ouvrages de défense sur la portion Ouest de la baie de Tartane (quartier Fonds Basil). ....	26
Illustration 16 : Régime de houle à l'entrée de la baie du Tartane (rapport BRGM/RP-64499-FR). ....	27
Illustration 17 : Diagramme en boîte mensuelle des hauteurs significatives de vague simulées au large de la baie de Tartane (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) entre le 01-01-12 et le 01-10-20 (8.8 ans). Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la hauteur significative des vagues observées au cours des évènements les plus extrêmes. ....	28

Illustration 18 : Série temporelle des données hydrodynamiques modélisées au large de la baie de Tartane. a) hauteur significative (Hs), b) période pic (Tp) et c) flux d'énergie (PI) des vagues. Simulation extraite de la plateformes MARC-LOPS, <a href="https://marc.ifremer.fr/">https://marc.ifremer.fr/</a>	29
Illustration 19 : à gauche) photographie capturée pendant le pic de l'évènement Isaias où la hauteur significative des vagues dépassent 3 m au large de la baie de Tartane. A droite) vagues de plus de 2.0 m déferlant au même moment sur la plage Anse l'Etang, située à quelques kilomètres de la baie de Tartane.	30
Illustration 20 : en haut) Niveaux d'eau (nz) mesurés (en noir) et simulés (en rouge) à Fort-de-France depuis le 01 janvier 2012 (8.8 ans de mesure). à gauche) Niveaux d'eau (nz) mesurés (en noir) et simulés (en rouge) à Fort-de-France pendant l'ouragan Maria en septembre 2017. A droite). Composantes principales diurnes et semi-diurnes déterminées par la méthode. Les niveaux d'eau sont données par rapport au zéro hydrographique.	31
Illustration 21 : Cellules et fonctionnement hydro-sédimentaire sur la baie de Tartane (rapport RP-64499-FR) avec la position de la limite de végétation selon les différentes années superposées (rapport RP-63238-FR). Photographies aériennes de l'IGN (BD ortho 2017).	32
Illustration 22 : Marqueurs d'érosion dans la baie de Tartane (quartier Fonds Basil). Photographie prise le 24 juillet 2020.	33
Illustration 23 : Evolution du trait de côte dans le secteur de Fonds Basil sur la période récente. Images obtenues via Google image.	34
Illustration 24 : Niveau altimétrique (référence par rapport au zéro hydrographique) sur la baie de Tartane (Shom, 2016). A titre d'indication, une surélévation temporaire des niveaux d'eau (ici 0.75 m) pendant une marée haute astronomique (0.90 m) est illustrée par la zone en bleu clair (0 m < Z < 1.65 m).	35
Illustration 25 : à gauche) niveau altimétrique (référence par rapport au zéro hydrographique) sur le quartier de Fons Basil (Shom, 2016). A titre d'indication, une surélévation temporaire des niveaux d'eau (ici 0.75 m) pendant une marée haute astronomique (0.90 m) est illustrée par la zone rouge (0 m < Z < 1.65 m). A droite) profil transversal dans la baie de Tartane où sont indiqués les niveaux à mi-marée et ceux atteint lors d'une surcote centennale à marée haute (référence par rapport au zéro hydrographique).	35
Illustration 26 : à gauche) extrait de la carte Mouvement de terrain sur le secteur étudié (PPR 2013). A droite) observations du BRGM au 06 octobre 2020.	36
Illustration 27 : Niche d'arrachement observée depuis le haut de la falaise. Photo BRGM prise le 03 septembre 2020	37
Illustration 28 : Reconstitution des évènements à partir de l'Orthophoto de l'IGN et des images satellites fournies par Google Earth.	37
Illustration 29 : Point bas topographique en amont de l'éboulement	38
Illustration 30 : Indices suspects à surveiller repérés sur le portail de l'habitation le 06 octobre 2020 Parcelle OH159 et OH160.	39
Illustration 31 : Observation d'un possible décapage végétal suite à une déstabilisation en tête de falaise sur la partie occidentale de la Pointe à Bibi entre 2010 et 2017 (modifié d'après le site IGN <a href="https://remonterletemps.ign.fr/">https://remonterletemps.ign.fr/</a> ).	40
Illustration 32 : Cellules et fonctionnement hydro-sédimentaire dans la baie de Tartane sur la Trinité (rapport RP-64499-FR). Photographie aérienne de l'IGN (BD ortho 2017) et typologie de la côte.	42
Illustration 33 : Profil de la falaise et mécanisme d'instabilité supposé. Sur le secteur de Fonds Basil, pour évaluer les risques de submersions, on considère des niveaux d'eau maximum	

de 1.65 m (par rapport au zéro hydrographique) matérialisant une marée haute astronomique de 0.90 m à laquelle s'ajouterait une surcote centennale (atmosphérique + hydrodynamique) de 0.75 m..... 45

Illustration 34 : Situation des zones d'éboulements privilégiés et de la tête de falaise aujourd'hui par rapport aux différents enjeux ..... 46



# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

A l'interface entre la terre et la mer, le littoral de la Martinique représente un linéaire côtier d'environ 450 km dont l'équilibre dynamique dépend des échanges et des transferts de sédiments qui se produisent latéralement et transversalement sous l'effet des forçages météorologiques (précipitations, vent), marins (houles, courants) et continentaux (ruissellement, rivières, contexte géologique). Au cours des 70 dernières années, plus d'un tiers des plages sableuses qui composent le littoral Martiniquais présentent un recul préoccupant, supérieur à 25 m (BRGM/RP-63238-FR, 2015).

L'érosion côtière ou le recul du trait de côte est un phénomène naturel qui peut parfois revêtir un caractère exceptionnel, notamment au cours de la saison cyclonique. Les impacts des houles cycloniques sur les systèmes côtiers sont nombreux et leurs caractéristiques soulèvent encore aujourd'hui des interrogations. Face à ces questionnements, l'amélioration de nos connaissances et la capitalisation de l'information nous permettent aujourd'hui de renforcer notre capacité d'adaptation, notamment pour nous aider à répondre efficacement aux nombreuses problématiques de gestion des risques littoraux.

Dans la baie de Tartane sur la commune de la Trinité et en particulier dans le secteur de Fonds Basil, l'érosion observée semble particulièrement importante et inquiète les services de l'Etat, les élus et la population (Illustration 1). Les gestionnaires souhaitent notamment savoir comment faire face à cette problématique et quelles actions doivent être menées sur les secteurs qui présentent les plus gros enjeux (sécurité des personnes, bâti, voies de circulation).

Dans la continuité des travaux précédents, la DEAL souhaite que le BRGM apporte son expertise et son appui technique dans les actions de prévention et d'amélioration de la connaissance du contexte hydro-morpho-sédimentaire de la baie de Tartane et en particulier dans le secteur de Fonds Basil.



*Illustration 1 : Plusieurs marqueurs d'érosion ont été observés sur terrain dans la baie de Tartane (quartier Fonds Basil). Photographie prise le 6 juillet 2020.*

## 1.2. ZONE D'ETUDE

Le quartier Fonds Basil est situé à l'extrémité Ouest de la Baie de Tartane sur la commune de La Trinité (presqu'île de la Caravelle). La baie de Tartane s'étend sur un linéaire côtier d'environ 1 km de long, délimitée par la Pointe à Bibi à l'Ouest et des ouvrages transversaux de type « épis » plus à l'Est, situés à l'entrée du bourg (Illustration 2). Orientée vers le Nord, la baie est exposée à un climat de vague modéré où l'énergie des vagues est en grande partie atténuée par la présence de récifs plus au large.

L'étude est réalisée à l'échelle de la cellule sédimentaire, soit sur l'intégralité de la Baie de Tartane entre la pointe à Bibi à l'Ouest et les épis transversaux à l'Est (Illustration 2). La problématique d'érosion littorale concerne plus particulièrement le quartier de Fonds Basil, secteur largement anthropisé situé sur le secteur Ouest et qui présente de nombreux enjeux (Illustration 2).

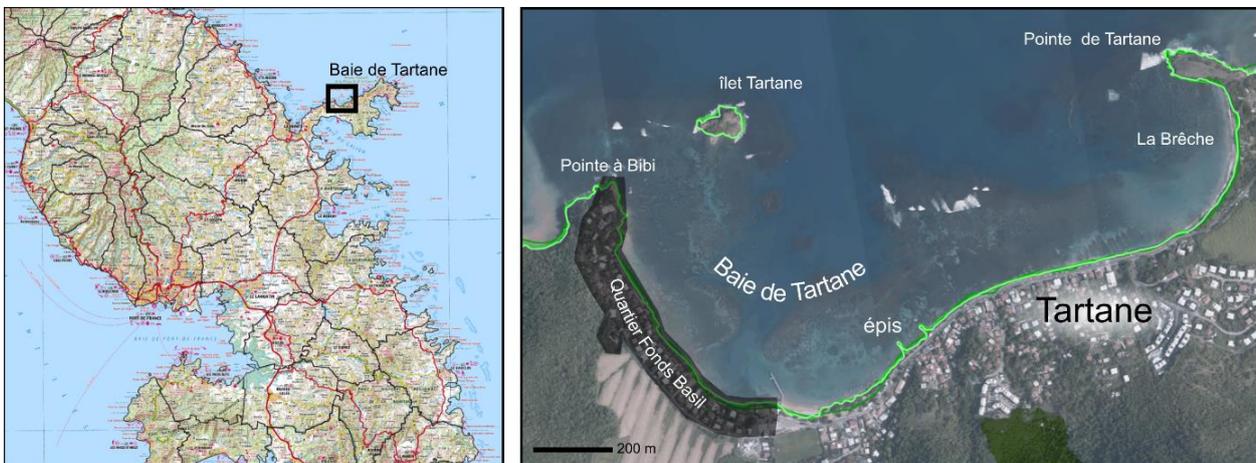


Illustration 2 : Plan de situation de la Baie de Tartane située sur la Presqu'île de la Caravelle (Trinité).

## 1.3. OBJECTIFS

Le travail d'expertise est réalisé sur la base d'observations visuelles, de mesures prises sur le terrain et d'analyses de documents techniques. Les objectifs spécifiques de ce projet sont les suivants :

- réaliser un état des lieux des connaissances existantes dans la baie de Tartane ;
- collecter des observations sur le terrain pour une expertise de l'érosion littorale, de l'aléa mouvements de terrain, ainsi que des phénomènes de submersion marine sur les zones basses notamment au cours d'épisodes de fortes vagues ;
- élaborer un diagnostic et des recommandations en terme de principe d'aménagement.

## 2. Collecte des données et observations

L'objectif est de réaliser un état des lieux des données et des connaissances existantes sur la baie de Tartane qui permettraient d'obtenir une meilleure vision de son exposition aux phénomènes d'érosion et de submersion marine. Ces données comprennent, les photographies aériennes géoréférencées de l'IGN, les cartes topo-bathymétriques existantes, l'acquisition de nouvelles données topographiques, des photographies prises sur le terrain, de nouvelles observations géologiques référencées et des conditions de forçages météo-marins à proximité de la zone d'étude.

### 2.1. PHOTOGRAPHIES AERIENNES REFERENCEES

L'analyse de la mobilité du littoral repose souvent sur l'évolution de la position du trait de côte, interface physique entre la terre et la mer, indicateur représentatif de l'état global du littoral du point de vue de son évolution sédimentaire. La digitalisation du trait de côte à partir des photographies aériennes géoréférencées de l'IGN permet de mesurer, de manière quantitative la dynamique du littoral sur des linéaires importants à différentes échelles temporelles.

Si la plupart des études se concentrent sur l'analyse de la position du trait de côte au sens « jet de rive » (interface physique entre la terre et la mer), d'autres indicateurs apparaissent complémentaires et apportent des informations indispensables pour la caractérisation de la dynamique littorale, notamment sur le long terme. Ainsi, les indicateurs utilisés pour cette étude sont :

- La limite de végétation, plus stable dans le temps, adaptée à l'analyse des phénomènes érosifs sur le long terme à une échelle décennale ou pluri-décennale.
- La limite du jet de rive, plus variable dans le temps pouvant traduire des évolutions de plus court terme du stock sédimentaire à l'échelle événementielle, saisonnière et interannuelle. La limite du jet de rive est un indicateur hydrodynamique qui correspond à la limite entre le sable sec et le sable mouillé, à un instant donné.

Ces deux indicateurs sont complémentaires. En effet, une portion où la limite de végétation est stable mais où l'interface terre-mer recule de manière chronique, voit sa vulnérabilité à l'érosion augmenter progressivement alors qu'une plage où la limite de végétation a reculé lors d'un événement, mais où la largeur de plage (ou stock sédimentaire) reste stable, indique un potentiel de résilience beaucoup plus important (BRGM/RP-63238-FR, 2015).

Les campagnes photographiques géoréférencées qui ont été utilisées sont celles de 1951, 2004, 2010 et 2017. Les caractéristiques des photographies sont résumées ci-après (Tableau 1). L'incertitude qui affecte la précision de la digitalisation comprend la résolution de la photographie, le géoréférencement et l'orthorectification de la prise de vue, la présence d'artéfacts diminuant localement la visibilité sur l'image et l'erreur commise par l'opérateur en digitalisant.

En complément, des images satellites et aériennes de sources différentes (e.g. *Google image*) peuvent être utilisées et permettent d'apporter une information qualitative pour les dates situées entre les différentes photographies aériennes de l'IGN à disposition.

Tableau 1 : Caractéristiques des campagnes photographiques

Année	Période	Type	Colorimétrie	Source	Résolution
1951	janvier - mars	Collection de mosaïques numériques	Noir et blanc	IGN	2 m
2004	janvier - mars	Collection de mosaïques numériques	Couleur	IGN	0.50 m
2010	janvier - mars	Collection de mosaïques numériques	Couleur	IGN	0.30 m
2017	janvier - mars	Collection de mosaïques numériques	Couleur	IGN	0.20 m

## 2.2. DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES

### 2.2.1. Cartes existantes

Les données exploitées proviennent des mesures topo-bathymétriques Litto3D ©IGN-SHOM, établies essentiellement à partir de levés LiDAR aéroportés. Ces données ont été utilisées sous la forme de dalles (1 km x 1 km) de résolution 1 m. Les traitements apportés aux levés LiDAR par l'IGN et le SHOM permettent d'aboutir à un MNT (modèle numérique de terrain) continu à l'interface terre-mer, avec une précision verticale de l'ordre de 40 à 50 cm pour la bathymétrie jusqu'à une profondeur de 30 m.

### 2.2.2. Levés topographiques

Les mesures ont été réalisées à partir d'un GPS<sup>1</sup> I (GNSS<sup>2</sup>) Trimble R6 en mode différentiel RTK<sup>3</sup> connecté en GSM<sup>4</sup> via le réseau ORPHEON<sup>5</sup> (Illustration 3).

L'acquisition des données topographiques comporte 2 types de levés GPS (GNSS) :

- la position du trait de côte (jet de rive) ;
- les profils de référence.

La position du trait de côte est principalement levée de manière continue (environ un point tous les mètres) à pied. L'antenne DGPS est fixée sur la partie supérieure du sac à dos Trimble et les points de levé sont enregistrés au fur et à mesure que l'opérateur parcourt la plage pour son acquisition. Le marqueur du trait de côte ainsi mesuré est la limite du jet de rive. Les marges d'erreur sur les données topographiques acquises sont estimées entre 5 et 10 cm en planimétrie et sur l'altitude (mouvements parasites de l'opérateur pendant la marche). Selon les variations de hauteur d'eau liées à la marée (section 2.4.2), les écarts maximums de la position du trait de côte sont estimés à environ 5 m. Afin de limiter ces écarts, un effort particulier a été réalisé pour que la position du trait de côte soit mesurée pour des niveaux d'eau proches de ceux de la mi-marée (~ 0.55 m NGM).

Les profils topographiques de référence sont levés à la canne en prenant un point à chaque inflexion de la pente, suivant des axes prédéfinis et invariables (Illustration 3 et 4). Les marges d'erreur sur les données topographiques acquises à la canne sont estimées à quelques cm en planimétrie et 5 cm sur l'altitude (enfouissement moyen de la canne dans le sable pris en compte).

<sup>1</sup> Global Positioning System

<sup>2</sup> GNSS : Global Navigation Satellite System

<sup>3</sup> Real Time Kinematic,

<sup>4</sup> GSM : Global System for Mobile communications

<sup>5</sup> <http://reseau-orpheon.fr/>



Illustration 3 : Acquisition de données topographiques dans la baie de Tartane le 24 juillet 2020.

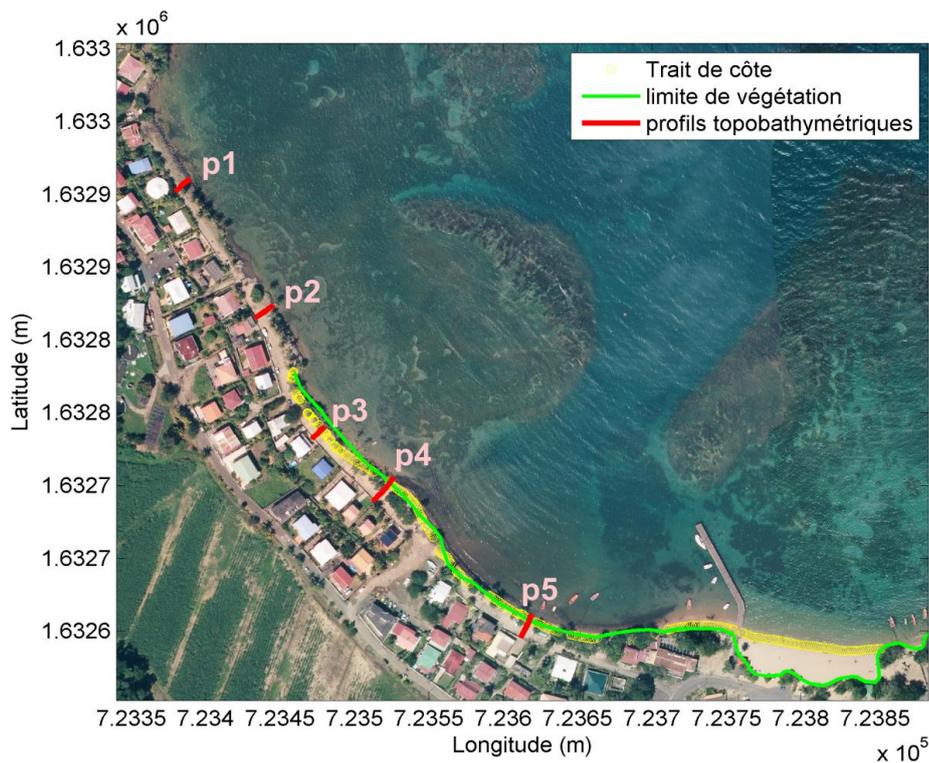


Illustration 4: Mesures réalisées dans la baie de Tartane (quartier Fonds Basil). Photographies aériennes de l'IGN (BD ortho 2017) où sont superposés la position du trait de côte et de la limite de végétation ainsi que les profils de mesures effectués p1 à p5.

### 2.3. EXPERTISE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE

Deux journées de reconnaissance de terrain ont été organisées dans les environs du bourg de Tartane afin de déterminer la nature géologique des formations de sub-surface sur la zone d'étude et d'identifier les facteurs d'instabilité de la falaise.

Une première expertise sur le terrain a été réalisée le 30 juillet 2020 et s'est concentrée sur la zone de la Pointe à Bibi où une déstabilisation de la falaise est observée sur son flanc Est. L'expertise associait reconnaissance géologique et diagnostic de stabilité dans un objectif de protection immédiate des riverains. La seconde journée de terrain a eu lieu le 6 octobre 2020 sous une approche cette fois purement géologique afin d'étendre la cartographie des formations géologiques de surface sur l'ensemble de la baie de Tartane.

Le travail du géologue sur le terrain s'organise suivant les tâches suivantes :

- prise d'un point GPS au droit de l'affleurement selon le système de coordonnées WGS 1984 UTM Zone 20N (code EPSG 32620) ;
- prise de photos de l'affleurement ;
- écriture du diagnostic géologique sur le carnet de terrain ;
- pointage du point sur une carte topographique de terrain (IGN) avec le numéro de l'arrêt associé et un code couleur correspondant au diagnostic.

Au total, 27 points GPS accompagnés d'observations ont été renseignés.

Le diagnostic d'un point dépend de l'observation du géologue à différentes échelles spatiales (de plusieurs kilomètres au minéral millimétrique). Il décrit la nature lithologique ou sédimentaire de la formation (andésites, alluvions, etc...) et son degré d'altération. Ce degré d'altération peut être hydrothermal (Westercamp, 1989), ou supergène. L'altération hydrothermale désigne le phénomène de transformation des minéraux d'une roche suite à la circulation de fluides chauds (jusqu'à plusieurs centaines de degrés) et minéralisés dans le sous-sol. L'origine de ce processus géodynamique appelé hydrothermalisme est d'origine magmatique dans le cas de la baie de Tartane. L'altération supergène correspond également à une transformation minéralogique d'une roche, mais cette fois sous l'effet d'agents atmosphériques tels que la pluie, l'humidité, la chaleur ou la couverture végétale (libération d'acide organique et carbonique).

Ces deux processus géodynamiques conduisent au développement d'horizons plus ou moins argileux regroupés sous le terme « d'altérites » au-dessus de la roche primitive ou « roche mère ». Les différents horizons du profil d'altération sont notés H1, H2, H3, H4A, H4B, H4C ou H5 en fonction du comportement du matériau. Ils sont aussi de bons indicateurs de la stabilité du terrain *in situ*. L'illustration 5 décrit les différents horizons d'altération avec leur code caractéristique. Cette coupe présente l'altération d'une roche volcanique de type andésitique (formation géologique la plus observée sur la zone d'étude).

La dernière étape de l'expertise de terrain consiste à dessiner sur des cartes papier géo-référencées (WGS 84 UTM 20N) les contours des ensembles géologiques de nature et d'altération uniforme sur un fond topographique IGN. Ces contours sont ensuite numérisés et géoréférencés à l'aide de logiciels SIG (ArcGIS principalement).

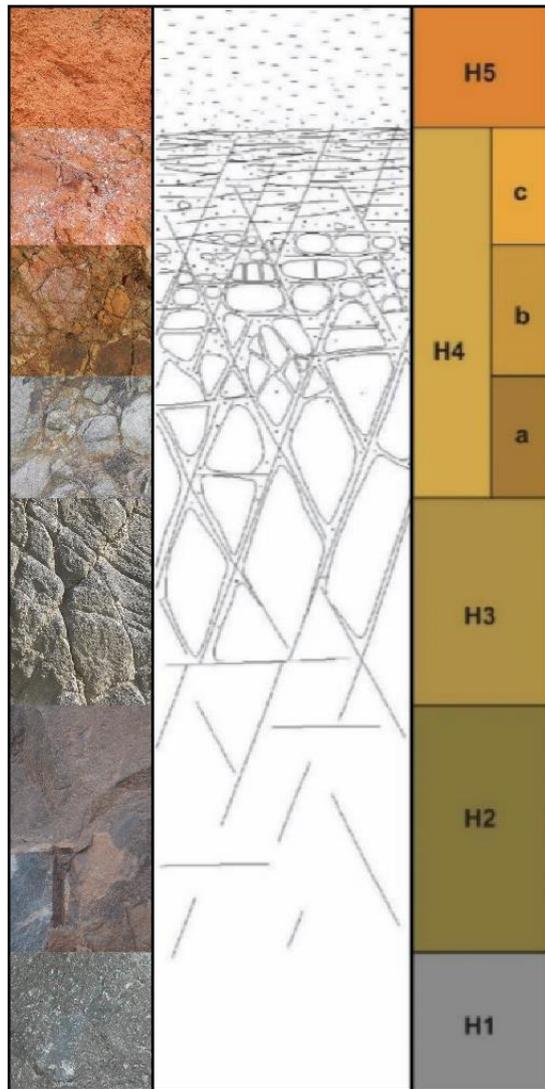


Illustration 5: Profil d'altération d'une roche volcanique de type andésitique. Les deux colonnes de droite décrivent les horizons ou degrés de l'altération du substratum avec H1 (non altéré), H2 (peu altéré), H3 (modérément altéré), H4 (fortement à complètement altéré), H5 (complètement altéré). Illustration adapté de BRGM/RP-69150-FR.

## 2.4. FORÇAGES PHYSIQUES METEO-MARINS

Afin d'enrichir les analyses, il convient de préciser le contexte météorologique et hydrodynamique particulier de la baie de Tartane et de présenter les différents instruments de mesure utilisés en parallèle des données déjà présentées plus haut.

### 2.4.1. Données météorologiques

La Martinique connaît un climat tropical, chaud et humide, présentant une saison sèche, le carême (de février à mai), centré sur le mois de mars et une saison humide, l'hivernage (de juillet à novembre). Ces conditions climatiques sont directement liées aux positions respectives de l'anticyclone des Açores et de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT).

Pendant le carême, l'anticyclone des Açores et la ZCIT migrent vers le Sud. Les alizés sont soutenus et réguliers, susceptibles notamment de se renforcer de janvier à février (11 à 19 m/s) et de générer ainsi de plus fortes houles. Pendant l'hivernage, l'anticyclone des Açores remonte vers l'Atlantique nord, les alizés diminuent. La ZCIT remonte vers 10° de latitude Nord et la Martinique est soumise à des pluies fréquentes. A cela s'ajoutent les cyclones qui peuvent parcourir l'arc caribéen pendant la saison cyclonique, de juillet à mi-novembre. Les vents peuvent alors dépasser les 150 km/h avec des précipitations qui peuvent atteindre des valeurs extrêmes de 1000 mm d'eau par jour.

A quelques kilomètres de la zone d'étude, sur la commune de la Trinité, une station de Météo-France (78922, Trinite-Caravel) permet de mesurer les différents paramètres météorologiques dont les vitesses et directions du vent (Illustration 6). Dans la baie de Tartane et de façon plus générale en Martinique, les alizés sont présents toute l'année. En provenance constante de l'est à l'est-sud-est (Illustration 6), ces vents soufflent en moyenne à une vitesse de 7 m/s (soit 25 km/h).

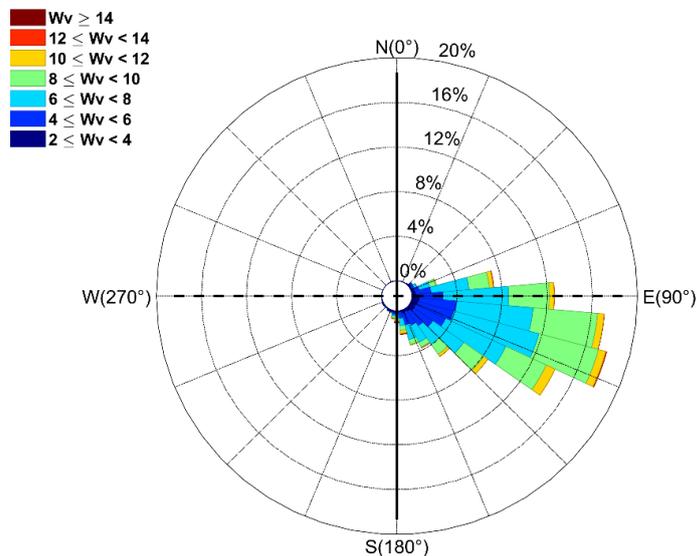


Illustration 6 : Caractéristiques du vent à la Trinité depuis novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence des vitesses de vent moyen ( $W_v$ , en m/s).

#### 2.4.2. Données marégraphiques

Les marées en Martinique sont d'amplitude microtidal avec un marnage moyen de 45 cm (SHOM, 2016) et une amplitude de marée aux équinoxes qui peut atteindre 90 cm. Le niveau moyen marin est de 55 cm (par rapport au zéro hydrographique). Les marées sont de type semi-diurne à inégalités diurnes avec deux pleines mers et deux basses mers par jour où les hauteurs d'eau sont différentes (Illustration 7). Plusieurs points de mesures sont disponibles autour de la Martinique et notamment sur la commune de Fort de France (Illustration 7).

En cas de disfonctionnement de la bouée, les données de niveau d'eau sont complétées par une marée théorique simulée, définie par la reconstitution des différentes composantes de l'onde de marée, déterminée à partir des données d'origines (Grinsted, 2020). Pour exemple, la méthode a été appliquée sur les données issues du marégraphe de Fort-de-France sur une période située entre le 1<sup>er</sup> janvier 2018 et le 1<sup>er</sup> janvier 2020. L'erreur quadratique moyenne entre les niveaux d'eau mesurés et simulés est de 0.06 m où les composantes principales diurnes et semi-diurnes

du signal de marée sont décrites par l'illustration 7. En Martinique les principales harmoniques de la marée océanique sont O1 et M2 (principales lunaire), P1 et S2 (principales solaire), K1 (déclinaison luni-solaire), N2 (majeure lunaire elliptique).

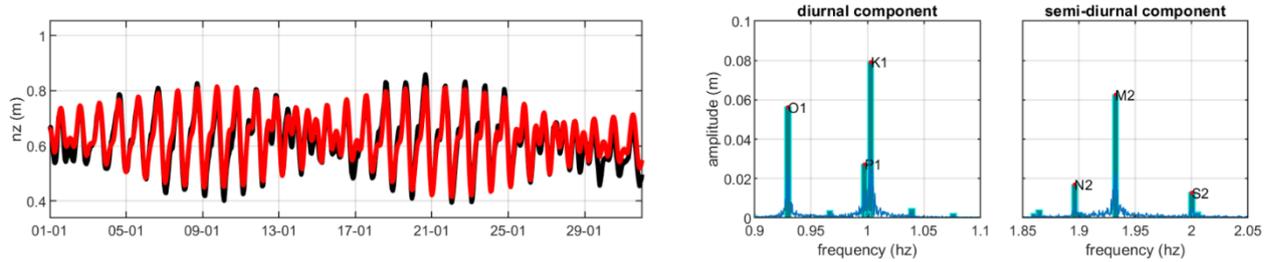


Illustration 7 : à gauche) Niveaux d'eau (nz) mesurés (en noir) et simulés (en rouge) à Fort-de-France depuis le 01 janvier 2019 (1 mois de mesures). A droite). Composantes principales diurnes et semi-diurnes déterminées par la méthode. Les niveaux d'eau sont donnés par rapport au zéro hydrographique.

### 2.4.3. Données et caractéristiques des vagues

Dans le cadre du projet IOWAGA piloté par l'IFREMER, le modèle WW3 (WaveWatch III®) a été utilisé pour reconstituer les chroniques de vagues à partir des données historiques de vents (<https://wwz.ifremer.fr/iowaga>). Ces données sont disponibles sur les Caraïbes avec plusieurs résolutions, permettant l'analyse des conditions au large ou à proximité des côtes. A partir de ces données, une analyse statistique des conditions de vagues a permis de simuler les régimes de houle sur tout le littoral de l'île (rapport BRGM/RP-64499-FR).

En Martinique, trois régimes de houle peuvent être rencontrés. (1) La houle d'Est à Nord-Est dite d'alizés est très fréquente avec une énergie modérée (période inférieure à 10 sec). (2) La houle de Nord à Nord-Ouest est peu fréquente (une dizaine d'occurrences par an environ) et d'énergie plus importante, généralement engendrée par des dépressions au Nord du bassin Atlantique. (3) La houle cyclonique est peu fréquente mais très énergique (période supérieure à 10 sec). Elle est susceptible de toucher tous les secteurs côtiers de l'île.

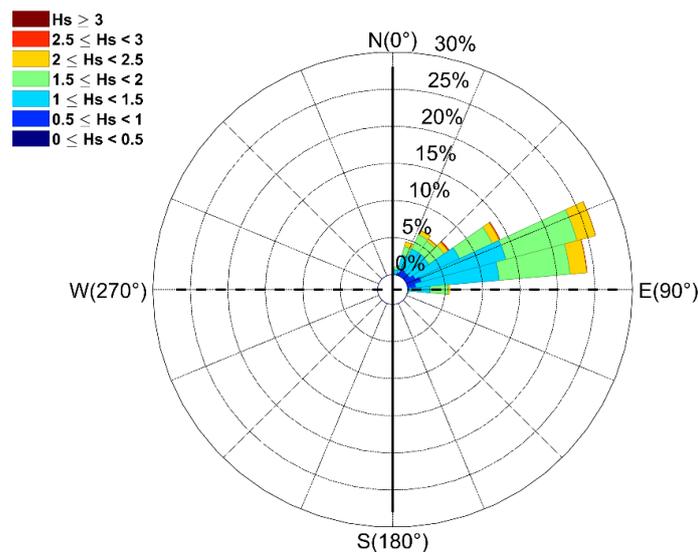
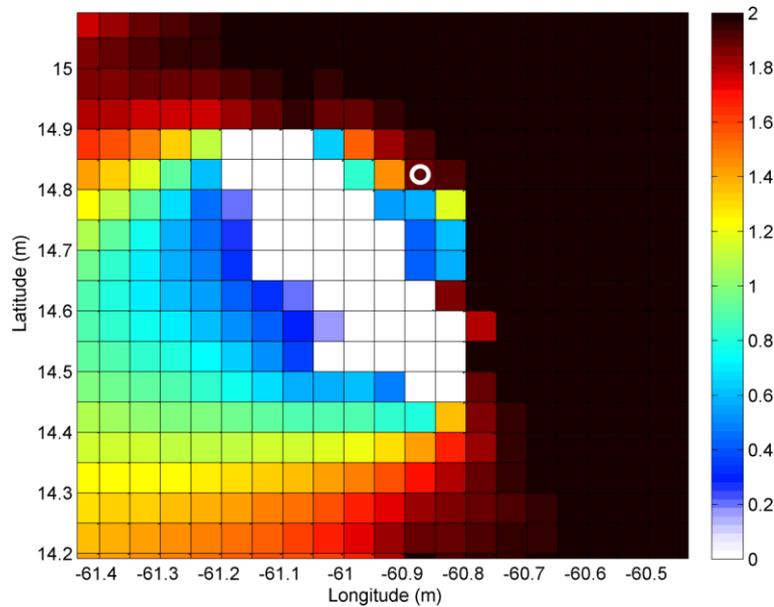


Illustration 8 : Caractéristiques des vagues à Basse Pointe depuis Novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence de la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ).

Il existe autour de la Martinique trois houlographes du réseau Candhis (Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ : <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>). Une bouée houlographe est mouillée au Nord de la Martinique dans le secteur de Basse Pointe (Illustration 8). La seconde est positionnée près de l'île de Sainte Lucie au Sud de la Martinique et la troisième au large de la Baie de Fort de France. Pour chacune de ces bouées, les caractéristiques des vagues sont mesurées en temps réel à une fréquence horaire.

Afin d'avoir une meilleure représentation des caractéristiques des vagues à proximité de la zone d'étude, les simulations issues du modèle de prévision océanographiques côtières (plateforme MARC-LOPS, <https://marc.ifremer.fr/>) ont été extraites à partir de la grille Antilles de résolution 3 min au large de la presqu'île de la Caravelle (Illustration 9).



*Illustration 9 : Hauteur significative des vagues simulées le 27 juillet 2020 suite au passage de l'ouragan Isaias. Simulation extraite de la plateforme MARC-LOPS, <https://marc.ifremer.fr/>. Le point d'extraction est représenté par le cercle blanc à proximité de la façade Nord Atlantique.*

## 3. Synthèse des observations et analyses

### 3.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

#### 3.1.1. Description topographique

Le quartier de Fonds Basil est installé dans une large plaine qui atteint jusqu'à 300 m de large, circonscrite par des reliefs qui culminent à 70 m d'altitude (Illustration 10). Le réseau hydrographique est limité voire inexistant dans cette plaine suggérant un transport de sédiment de la terre vers la mer relativement limité. La plupart des habitations sont situées à moins de 1 m d'altitude par rapport au niveau NGM.

Cette plaine est circonscrite au nord par la Pointe à Bibi, terminaison nord-sud du relief qui culmine à 34 m NGM. Une vingtaine d'habitations y sont installées. La hauteur de la falaise côtière est d'une trentaine de mètres côté Ouest et une quinzaine de mètres, côté Est.

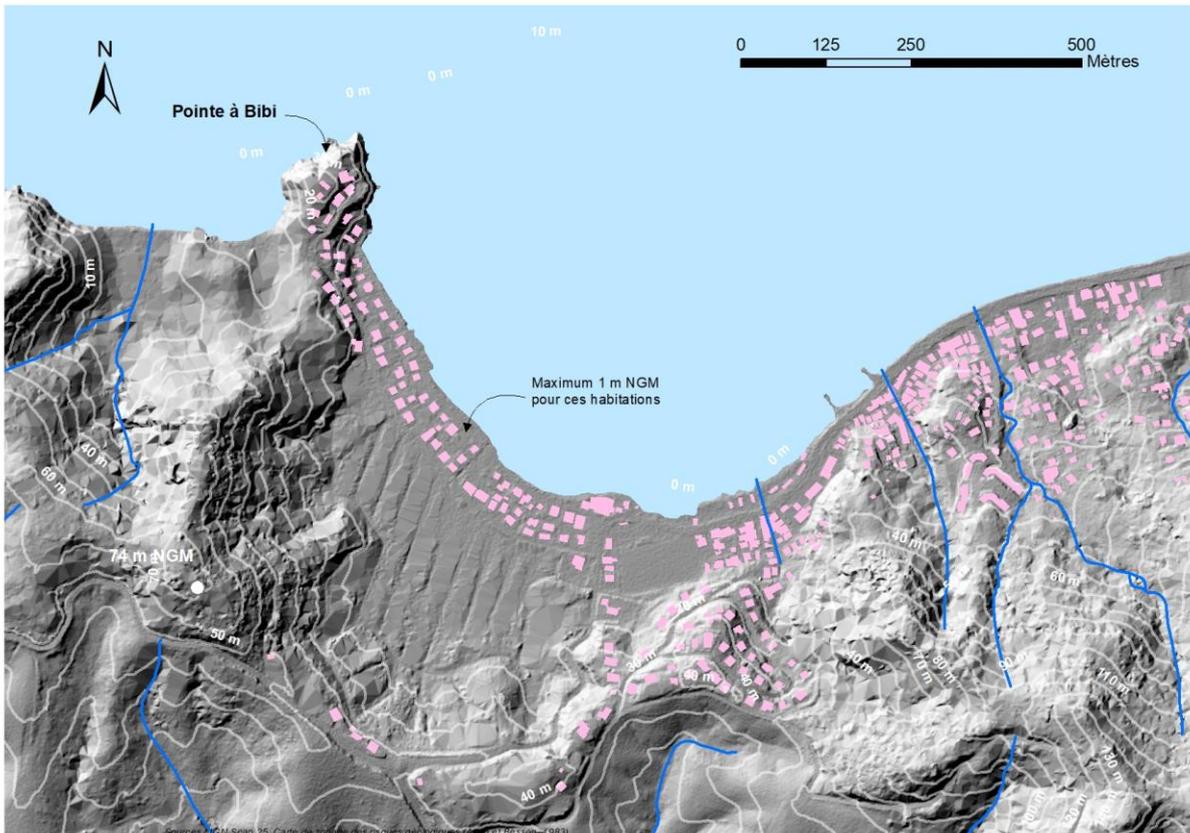


Illustration 10 : Topographie du secteur étudié. Source Litto3D de l'IGN (2010)

#### 3.1.2. Contexte géologique

L'ensemble des observations réalisées sur le terrain ont permis d'identifier les formations primaires du secteur d'étude avec leurs différents degrés d'altération ainsi que certains produits de remaniement. Le tableau 2, présenté ci-dessous, synthétise les observations référencées acquises sur le terrain.

Tableau 2 : Synthèse des points GPS pris sur le terrain et leur description.

N° du point	Latitude (WGS 84)	Longitude (WGS 84)	Altitude (m)	Lithologie surface	Altération	Lithologie sous-jacente	Altération sous-jacente
VBE1017	14,762643	-60,925032	29	Andésite	H4C	Andésite	H4B
VBE1018	14,762398	-60,925582	38	Andésite	H4A	Andésite	H4B
VBE1019	14,762161	-60,924927	18	Andésite	H4A	Andésite	H4B
VBE1020	14,761600	-60,925692	28	Andésite	H4C	Andésite	H4C
VBE1201	14,759714	-60,924881	18	Alluvions			
VBE1202	14,760416	-60,926122	37	Andésite	H4B		
VBE1203	14,759465	-60,926588	46	Andésite	H4C		
VBE1204	14,757808	-60,927726	79	Allotérite	H5	Andésite	H4C
VBE1205	14,756521	-60,926653	57	Andésite	H4C		
VBE1206	14,756643	-60,927660	58	Andésite	H4C		
VBE1207	14,756973	-60,929143	58	Brèche pyroclastique	H4A	Andésite	H4B
VBE1208	14,757684	-60,926394	49	Allotérite	H5	Andésite	H4C
VBE1209	14,761926	-60,926722	9	Andésite	H4C		
VBE1210	14,756102	-60,920112	42	Andésite	H4C		
VBE1211	14,757029	-60,920030	27	Andésite	H4C	Andésite	H4B
VBE1212	14,759241	-60,918296	13	Andésite	H4A		
VBE1213	14,756017	-60,923495	16	Andésite	H4C		
VBE1214	14,754840	-60,924915	44	Andésite	H4C		
VBE1215	14,755330	-60,925544	47	Allotérite	H5	Brèche pyroclastique	H4C
VBE1216	14,758301	-60,916735	40	Andésite	H4C	Andésite	H4B
VBE1217	14,759331	-60,916548	26	Andésite	H4A		
VBE1218	14,758575	-60,915213	38	Andésite	H4B		
VBE1219	14,765981	-60,912565	10	Andésite	H3	Andésite	H4A
VBE1220	14,761938	-60,910174	11	Andésite	H4B		
VBE1221	14,760711	-60,912852	25	Andésite	H4A		
VBE1222	14,754493	-60,919057	54	Andésite	H4C		
VBE1223	14,754788	-60,915504	113	Andésite	H4B		

Deux formations primaires ressortent dans la région de Tartane : des andésites et des brèches pyroclastiques andésitiques (brèches à ciment de cendres et à blocs d'andésites). L'altération des andésites et des brèches pyroclastiques est plutôt forte à complète puisque les degrés d'altération relevés sont majoritairement compris entre le H4A et le H5 (Illustration 11). Les observations d'altérations moyennes à faibles sont très ponctuelles comme le montre l'unique point GPS décrit en H3. A l'affleurement, l'altération se traduit chez les andésites par une décomposition progressive de la roche comme le montre l'illustration 11. Dans le cas des brèches pyroclastiques, le ciment cendreuse est rapidement transformé en une masse argileuse brune à ocre alors que les éléments andésitiques tardent plus à s'altérer d'un noyau dur au H4A à un état complètement argileux et rougeâtre en H4C.

Les formations remaniées sont les alluvions (sédiments formés par l'action de l'eau) et les colluvions avec ou sans blocs rocheux (sédiments de bas de pentes, de faible transport). Les alluvions et colluvions n'ont peu ou pas été enregistrés en raison de leurs identifications peu évidentes sur le terrain (couverts par la végétation, zones aplanies, etc...). Les alluvions regroupent le sable du littoral et un matériau argilo-sableux meuble de couleur sombre, parfois riche en blocs rocheux d'andésites arrondies (au sein des ravines surtout). Les colluvions sont composées d'éléments plus hétérogènes et anguleux variant de l'argile sombre au bloc pluri-décimétrique dans le cas de colluvions à blocs.

En couplant ces données ponctuelles à la morphologie topographique régionale sur le terrain ou à l'aide du MNT à 5 m de l'IGN, l'emprise des différentes formations géologiques de sub-surface a pu être interprétée sur une carte au 1/8 000<sup>ème</sup> (Illustration 11). Ce résultat s'appuie aussi d'une analyse des orthophotos disponibles sur la baie de Tartane (IGN, BD ORTHO®).

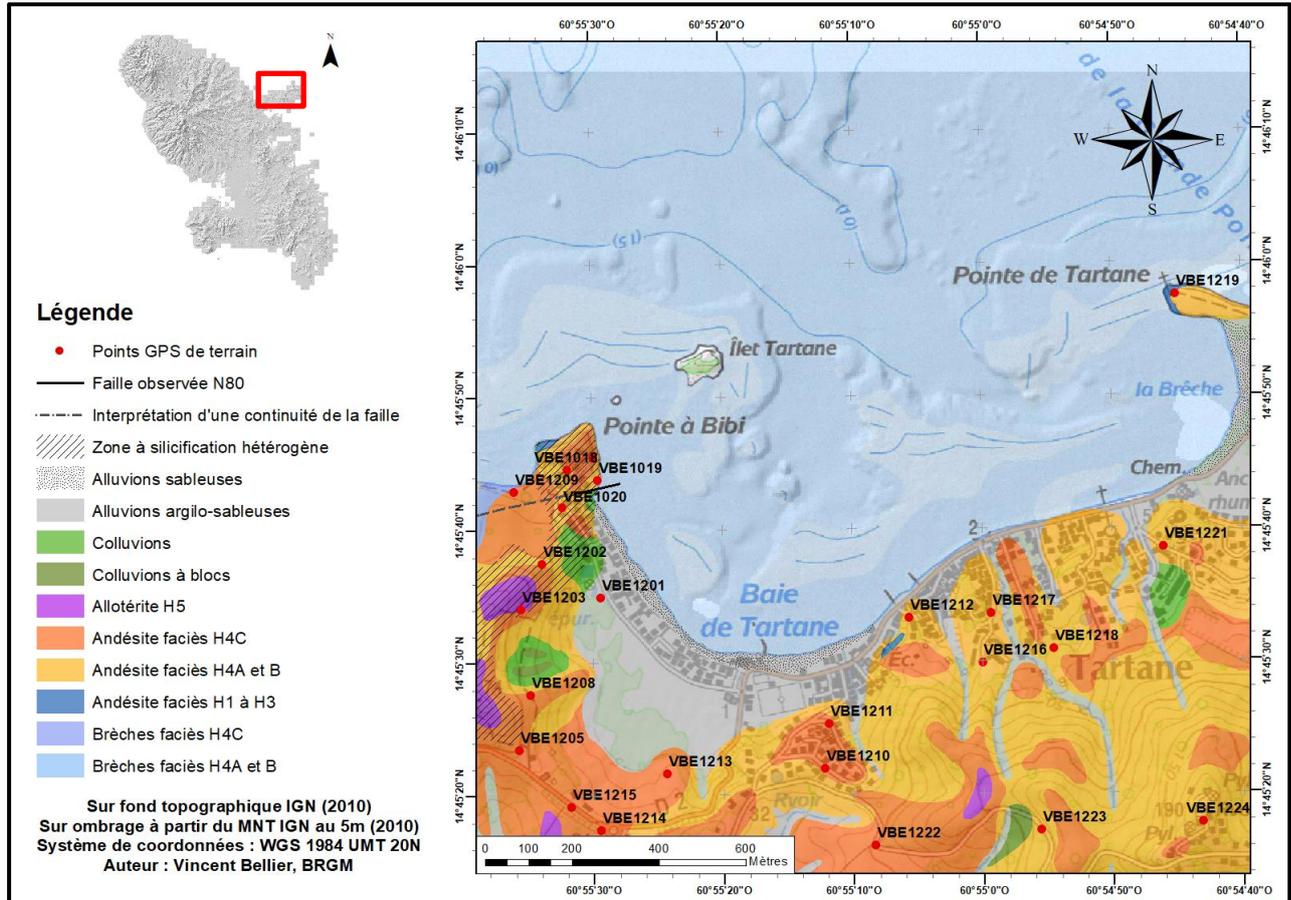


Illustration 11 : Carte au 1/8 000<sup>ème</sup> du régolithe (formations géologiques de sub-surface) de la baie et du bourg de Tartane. Dernière modification le 30 octobre 2020.

La carte montre une nette dominance des andésites par rapport aux brèches pyroclastiques représentées à l'ouest de la Pointe à Bibi (Illustration 11). Les faciès d'altération les plus fréquents sont classés en H4A et H4B. Ils forment la Pointe de Tartane et les reliefs qui bornent le sud du bourg de Tartane jusqu'à la route D2. Seules les zones aux pentes plus douces et le haut des crêtes sont propices au développement des horizons H4C et plus rarement H5. L'épaisseur de l'ensemble H4C et H5 est de l'ordre du mètre sauf au niveau des points VBE1214 et VBE1215 où elle augmente légèrement (2 mètres au plus).

Sur le relief partant de la route D2 jusqu'à la Pointe à Bibi, les variations de l'altération ne dépendent plus du relief. Des faciès de l'horizon H4C sont retrouvés jusqu'au niveau des falaises sur le littoral (Illustration 12). La différence du phénomène d'altération s'observe aussi à l'échelle de l'affleurement avec un matériau très hétérogène qui peut présenter des faciès du H4A au H4C sur une surface de 1 m<sup>2</sup>.



*Illustration 12 : Aperçu de la partie occidentale de la pointe à Bibi depuis la plage. L'altération hydrothermale dont témoignent les couleurs rougeâtres et brunâtres se développe jusqu'au pied de la falaise, là où l'altération supergène, habituellement, disparaît. Photos prises le 6 octobre 2020.*

Au niveau des zones planes de la baie de Tartane et de la Brèche, les alluvions s'accablent de la mer aux premiers reliefs (Illustration 11). Elles constituent également le fonds des ravines N-NO/S-SE du bourg de Tartane sous la forme de sédiments plus grossiers. Leur épaisseur maximale est de l'ordre de quelques mètres.

Les colluvions forment des zones de dépôts plus restreintes sur les pentes de la crête orientée N-S de la Pointe à Bibi et plus discrètement sur les reliefs en amont du bourg. L'épaisseur de colluvions est de l'ordre d'un ou deux mètres.

- **Interprétation de l'altération sur la baie de Tartane :**

La différence d'altération de la crête nord-sud passant par la Pointe à Bibi par rapport au reste de la zone d'étude est interprétée comme la conséquence d'une altération hydrothermale prédominante sur l'altération supergène.

L'hydrothermalisme régional a déjà été décrit dans la notice géologique de la Martinique rédigée par Westercamp en 1989. Présent à divers endroits sur la presqu'île de la Caravelle, il serait responsable de la mise en place de phases minéralogiques particulières telles que la barytine en filons ou encore la silice en imprégnation à travers la roche. La silicification est visible sur le terrain au sein de nodules indurés de l'andésite altérée ou sous forme de petits filons blanchâtres de la pointe à la route D2 (Illustration 11). Elle témoignerait donc d'une circulation de fluides minéralisés à cet endroit pendant, ou juste après, la mise en place du complexe de base de la Caravelle à l'oligocène (Westercamp et al., 1989).

La remontée des fluides hydrothermaux a pu être favorisée par la présence des failles verticales de direction O-E le long de la côte nord de la presqu'île de la Caravelle (Westercamp et al., 1989). La mesure d'une structure orientée N80 (80 degrés depuis le nord) au droit du point VBE1019 (Illustration 13) et la morphologie rectiligne de la côte à l'ouest de la zone d'étude soutiennent cette hypothèse.



*Illustration 13 : Plan de faille associé à la mise en place d'un dyke andésitique au niveau du point GPS VBE1019. Les stries observées sur le plan de la faille sont presque verticales.*

La Pointe à Bibi pourrait donc avoir une histoire géologique à la fois volcanique et hydrothermale ayant pour conséquence le développement d'une altération particulière déstructurant la roche de façon hétérogène. La présence d'une telle altération à un degré élevé sur des lieux escarpés comme en falaise aggrave la vulnérabilité du lieu.

L'origine volcanique et hydrothermale dont parle cette partie est retrouvée dans le sable de la baie de Tartane grâce aux minéraux qui le caractérisent. Ces minéraux se sont mélangés à des débris carbonatés (73 % de  $\text{CaCo}_3$  d'après Pons, 1987) tels que les coquillages ou les coraux pour donner au sable ses propriétés actuelles.

### **3.2. TYPOLOGIE DU TRAIT DE COTE ET FONCTIONNEMENT HYDRO-SEDIMENTAIRE**

Le BRGM a délimité en 2015 les « cellules sédimentaires » qui régissent le transfert sédimentaire le long du littoral martiniquais, c'est-à-dire les portions de côte indépendante les unes des autres en matière de circulations sédimentaires (rapport BRGM/RP-64499-FR). Sur les 57 km de côtes sableuses, 92 cellules sédimentaires ont ainsi été caractérisées. Ces unités sédimentaires circonscrivent le système à considérer pour la présente expertise et présentent les limites de cellules et le sens de la dérive littorale dominante. La façade qui compose la baie de Tartane est essentiellement constituée de petites cellules indépendantes, dont les plus grandes atteignent moins de 1 km de longueur.

La plage sableuse de la baie de tartane est délimitée par des enrochements à l'Ouest au bout desquels se trouve une côte à falaise escarpée qui atteint une quinzaine de mètres (Illustration 14). Les enrochements ont été mis en place au début des années 2000 afin de protéger la route située à quelques mètres en arrière de la côte. Les enrochements atteignent une hauteur de 1.60

m (zéro hydrographique) et offrent une protection locale contre le recul du trait de côte (Illustration 15). Plus récemment un système de remblais (bloc de bétons, gravats) a été mis en place par les riverains sur certains secteurs plus à l'Est afin de fixer le trait de côte et d'atténuer le phénomène d'érosion (Illustration 15). Ces aménagements (enrochements, remblais) ne permettent pas d'atténuer les phénomènes de submersion marine puisque la hauteur de crête de ces aménagements est approximativement égale à celle du niveau du sol. De l'autre côté, sur la portion la plus à l'Est de la baie, la cellule sédimentaire est délimitée par des ouvrages de défense transversaux de type épis.

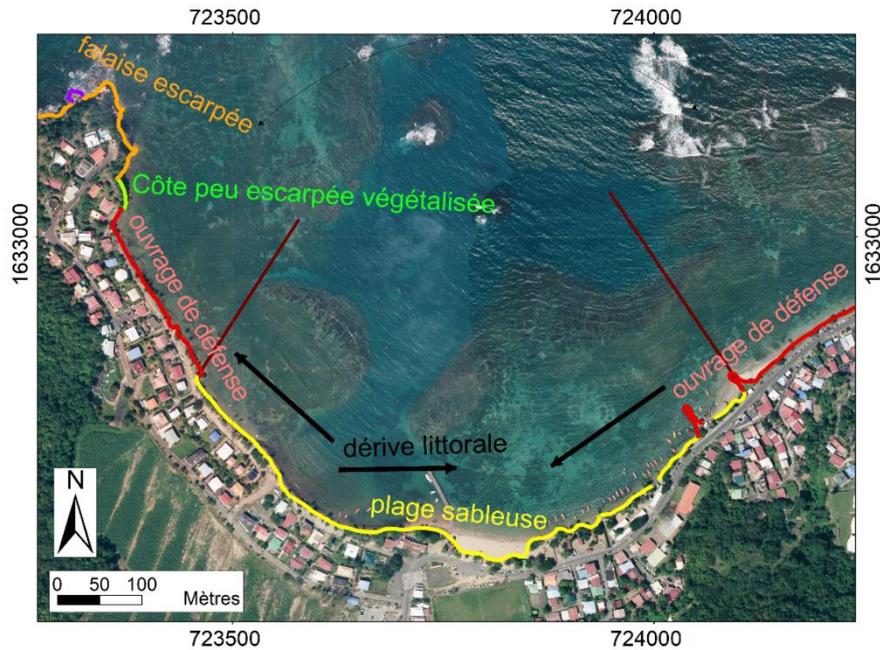


Illustration 14 : Cellules et fonctionnement hydro-sédimentaire dans la baie de Tartane sur la Trinité (rapport RP-64499-FR). Photographies aériennes de l'IGN (BD ortho 2017) et typologie de la côte.



Illustration 15 : Photographies des ouvrages de défense sur la portion Ouest de la baie de Tartane (quartier Fonds Basil).

La cellule sédimentaire de la baie de Tartane est exposée à des vagues peu énergétiques qui ont été en grande partie dissipées par les récifs plus au large (Illustration 14). Le sens de la dérive littorale peut varier selon la direction des vagues, mais reste généralement orientée vers l'Ouest. Néanmoins, certains indicateurs morphologiques, comme le déficit sédimentaire situé à proximité

du ponton (sur son bord Ouest), montrent que la dérive littorale peut être simultanément orientée vers l'Est. Cette encoche sédimentaire est bien visible au niveau du trait de côte qui apparaît alors de façon discontinue par rapport aux autres secteurs de la cellule. Ce déficit en sédiment est complètement relié à la présence du chenal situé au centre de la baie et pourrait également traduire les effets de la présence du ponton qui a tendance à bloquer le transport de sédiments vers l'Ouest. Au contraire, à l'Est du Ponton, on peut observer une plage constituée de sables fins dont la largeur varie entre quelques mètres et une vingtaine de mètres. Si cette portion du littoral présente un stock sédimentaire relativement important, le stock disponible sur les secteurs situés de part et d'autre de la cellule reste très limité. D'après la cartographie des plans de prévention des risques littoraux (<http://www.pprn972.fr/>), l'ensemble de la baie de Tartane présente une forte vulnérabilité aux phénomènes d'érosion et de submersion marine.

### 3.3. CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

#### 3.3.1. Caractéristiques des vagues

A l'entrée de la baie de Tartane, on enregistre en moyenne une hauteur significative et une période pic qui caractérise un climat de vague énergétique (1.72 m et 9.30 s, respectivement). Si l'énergie des vagues reste importante à quelques kilomètres au large de la baie, la largeur du plateau insulaire et la présence de récifs à proximité de la côte contraignent le déferlement et la dissipation des vagues avant que celles-ci ne parviennent jusqu'à la côte.

Les vagues proviennent la majorité du temps d'un secteur Nord-Est (64 % d'occurrences) avec des hauteurs significatives supérieures à 1 m et une période pic autour de 8 s et (C1 et C2, Illustration 16), reflétant un climat de vagues relativement énergétique, généré par les alizés. On note également une importante proportion (37 % d'occurrences) de vagues de secteur Nord à Nord-Nord-Est plus énergétique, induite par le passage de dépressions atmosphériques dans le bassin Nord Atlantique (C3, C4 et C5, Illustration 16). Les houles générées par ces systèmes dépressionnaires ont des hauteurs significatives autour de 1.7 m avec une période pic souvent supérieure à 10 s.

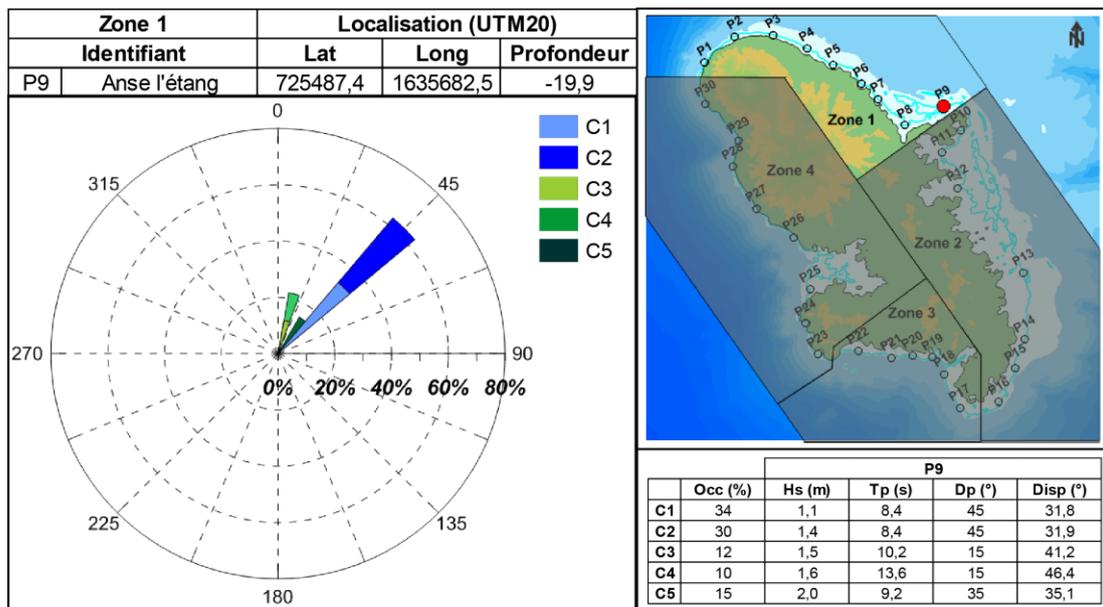


Illustration 16 : Régime de houle à l'entrée de la baie du Tartane (rapport BRGM/RP-64499-FR).

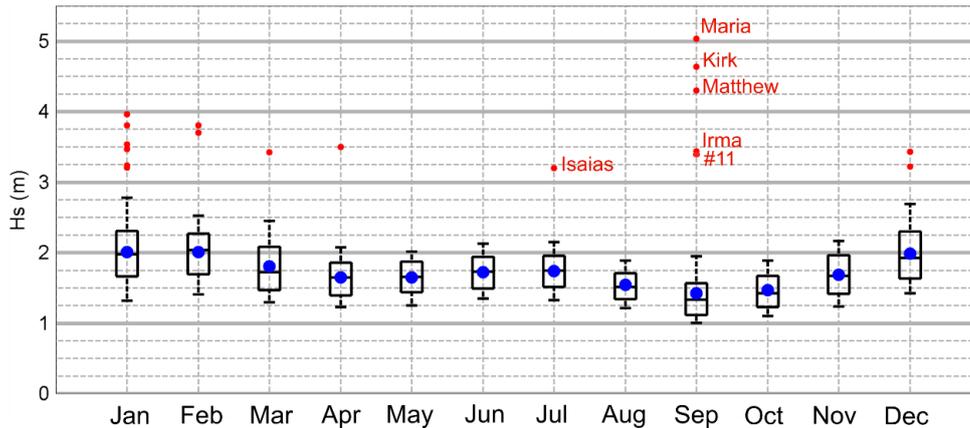


Illustration 17 : Diagramme en boîte mensuelle des hauteurs significatives de vague simulées au large de la baie de Tartane (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) entre le 01-01-12 et le 01-10-20 (8.8 ans). Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la hauteur significative des vagues observées au cours des événements les plus extrêmes.

La variabilité saisonnière des conditions de vagues apparaît sur toute la gamme statistique (médiane, quartile, percentiles 10 et 90). Les vagues présentent des caractéristiques similaires chaque année entre avril et juillet, pendant la période de carême, caractérisées par des hauteurs significatives moyennes comprises entre 1.7 et 1.8 m. Paradoxalement, entre août et octobre, au cœur de la saison cyclonique, si certains événements très énergétiques apparaissent ponctuellement en particulier pendant le mois de septembre (80 % des événements), les hauteurs significatives moyennes restent faibles et varient entre 1.4 et 1.60 m. De novembre à mars, pendant la période d'hivernage, les hauteurs significatives moyennes sont plus élevées et varient entre 1.70 et 2.0 m. De la même manière, la variabilité saisonnière apparaît nettement sur les quartiles et percentiles supérieurs avec les mois situés entre novembre et mars où les conditions de vague sont les plus énergétiques.

### 3.3.2. Sensibilité et exposition aux tempêtes et houles cycloniques

Alors que les événements de type ouragan, qui surviennent de façon événementielle généralement pendant la période cyclonique entre juillet et novembre, sont bien connus pour provoquer des épisodes de fortes vagues (houles cycloniques) atteignant parfois des hauteurs supérieures à 4 m, le passage de dépressions dans le bassin Nord Atlantique entre décembre et février peut aussi générer des fortes vagues très énergétiques qui atteignent parfois plus de 3 m. Au cours du suivi réalisé entre janvier 2012 et octobre 2020, 18 événements classés comme énergétiques ( $H_s > 3$  m pendant au moins 12 h) ont été analysés dont 30 % correspondent à des ouragans ou à des tempêtes tropicales (Illustration 18 et Tableau 3). Les vagues générées pendant les tempêtes proviennent de la bande Nord à Nord-Est selon la direction des vents qui les alimentent avec des périodes comprises entre 9 et 17 s.

Le flux d'énergie (PI) des vagues, disponible par unité de longueur de plage (Longuet-Higgins, 1970) est calculé en fonction des conditions au large :

$$Pl = \frac{gT_p}{4\pi} \frac{\rho g H_s^2}{16},$$

avec  $g$  la gravité ( $9.81 \text{ m.s}^{-2}$ ) et  $\rho$  la masse volumique de l'eau ( $1028 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Les flux d'énergie permettent de visualiser simplement les différentes tempêtes et de les relier aux différents

événements historiques potentiellement impactant (Illustration 18 et Tableau 3). Avec parfois plus de  $100 \text{ kW.m}^{-1}$ , les épisodes les plus énergétiques observés pendant les 8 dernières années sont ceux du 14 janvier 2013, généré par une dépression dans le bassin Nord atlantique et du 19 septembre 2017 pendant l'ouragan Maria. Pendant l'ouragan Maria, la hauteur significative au pic de la tempête atteint 5 m avec une période de 11 s (Illustration 18 et Tableau 3).

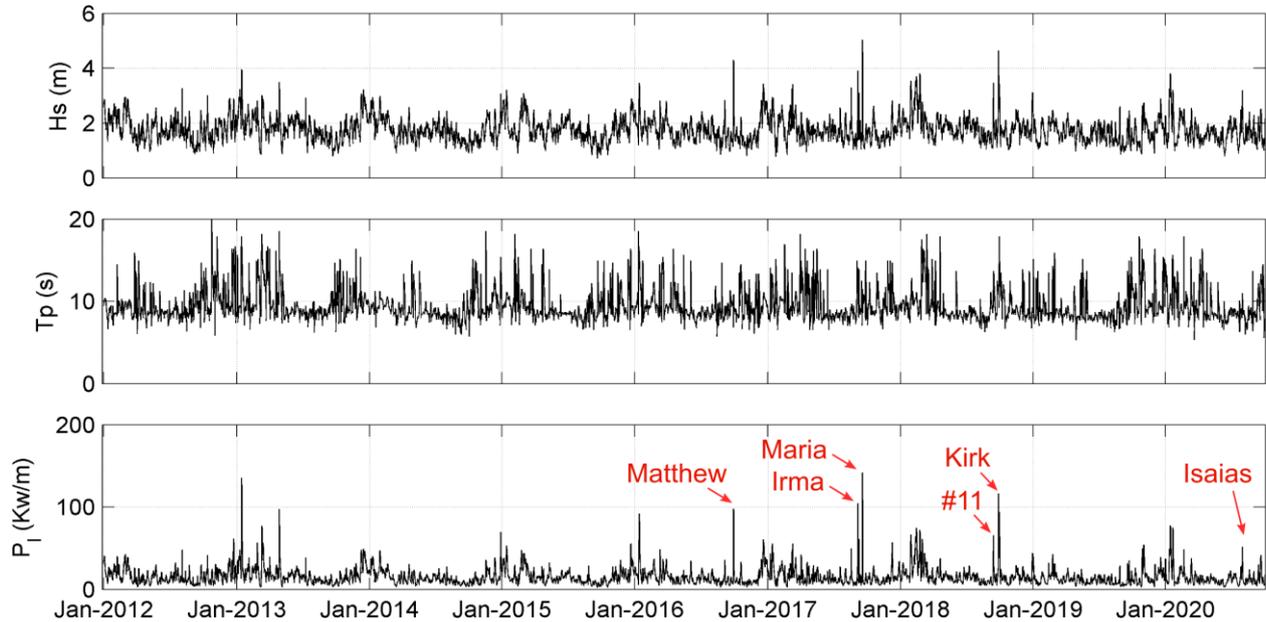


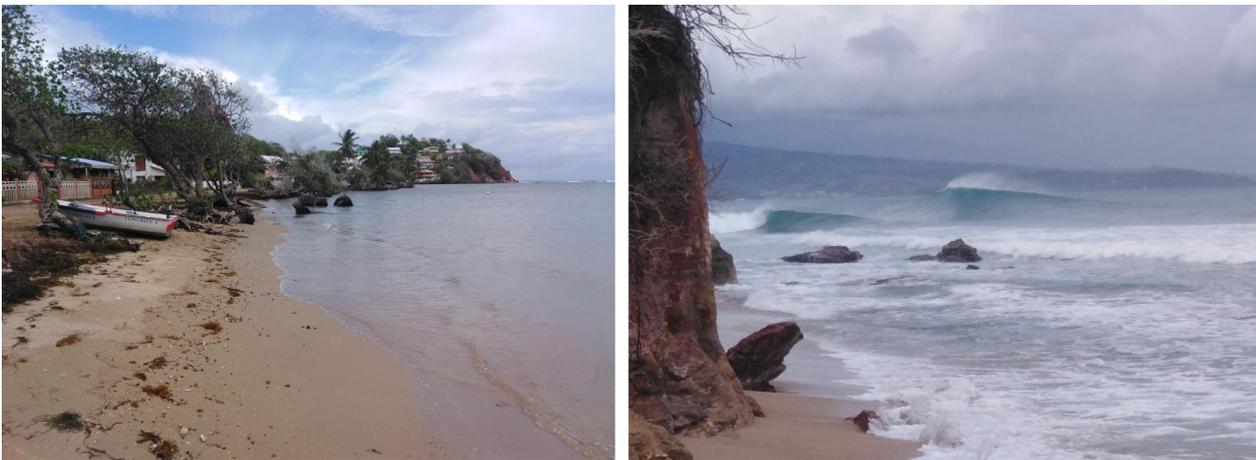
Illustration 18 : Série temporelle des données hydrodynamiques modélisées au large de la baie de Tartane. a) Hauteur significative (Hs), b) période pic (Tp) et c) flux d'énergie (PI) des vagues. Simulation extraite de la plateforme MARC-LOPS, <https://marc.ifremer.fr/>

Tableau 3 : 18 tempêtes ont été répertoriées du 01 janvier 2012 au 1 octobre 2020..

Début	Fin	Durée (h)	Pic	Hs pic (m)	Tp pic (s)	Hs moy (m)	P moy (kW/m)
09/01/2013 01:00	09/01/2013 20:00	19	09/01/2013 09:00	3,24	9,35	3,14	45,66
13/01/2013 15:00	15/01/2013 02:00	35	14/01/2013 09:00	3,96	16,95	3,57	102,20
27/04/2013 14:00	28/04/2013 13:00	23	28/04/2013 00:00	3,50	16,13	3,31	86,44
15/12/2013 03:00	15/12/2013 15:00	12	15/12/2013 09:00	3,22	9,62	3,15	46,27
12/01/2015 17:00	13/01/2015 18:00	25	13/01/2015 00:00	3,21	10,53	3,11	51,15
13/01/2016 01:00	14/01/2016 11:00	34	13/01/2016 15:00	3,47	15,15	3,25	76,86
28/09/2016 11:00	29/09/2016 08:00	21	28/09/2016 21:00	4,30	10,75	3,80	73,97
18/12/2016 18:00	21/12/2016 16:00	70	19/12/2016 15:00	3,43	10,42	3,22	53,81
09/03/2017 19:00	10/03/2017 21:00	26	10/03/2017 06:00	3,42	9,62	3,25	49,85
18/09/2017 05:00	19/09/2017 00:00	19	18/09/2017 18:00	5,04	11,36	4,25	99,58
28/01/2018 22:00	31/01/2018 00:00	50	29/01/2018 12:00	3,54	10,75	3,31	56,69
10/02/2018 15:00	15/02/2018 11:00	116	13/02/2018 21:00	3,70	10,99	3,41	60,46
22/02/2018 05:00	24/02/2018 12:00	55	23/02/2018 06:00	3,81	10,00	3,48	60,30
27/09/2018 14:00	28/09/2018 14:00	24	27/09/2018 21:00	4,64	10,99	3,69	70,47
29/09/2018 13:00	30/09/2018 10:00	21	30/09/2018 00:00	3,44	16,13	3,24	83,54
10/01/2020 09:00	15/01/2020 02:00	113	13/01/2020 12:00	3,81	10,87	3,32	55,36
19/01/2020 22:00	20/01/2020 20:00	22	20/01/2020 00:00	3,21	14,49	3,12	71,67
29/07/2020 05:00	30/07/2020 00:00	19	29/07/2020 09:00	3,20	10,00	3,10	49,60

Dans le cadre de ce projet, des mesures (profils topographiques, niveaux d'eau) ont été réalisées pendant le passage de l'ouragan Isaias le 27 juillet 2020 et sont analysées et discutées section 3.4. L'ouragan Isaias est le neuvième cyclone tropical à se former durant la saison cyclonique 2020 dans l'océan Atlantique Nord et le deuxième évènement de la saison cyclonique de l'année 2020 classé comme ouragan par le NHC (National Hurricane Center). Ce système est né d'une onde tropicale issue de la côte ouest-africaine qui a traversé l'Atlantique avant de devenir un cyclone tropical le 28 juillet à l'est des Petites Antilles. Le système a causé des inondations dévastatrices et des dégâts importants principalement à cause des vents violents à Porto Rico, en République dominicaine et le long de la côte Est des États-Unis.

En Martinique, au large de baie de Tartane, l'épisode de fortes vagues ( $H_s > 3$  m) généré par le passage de l'ouragan Isaias s'étale sur une durée de 19 h, avec au pic de l'évènement une hauteur significative de 3.20 m et une période de 10 s (Tableau 3). La puissance des vagues atteint environ 50 kW/m en moyenne pendant la durée de l'évènement. Sur la Presqu'île de la Caravelle, alors que des vagues très énergétiques viennent déferler sur les plages les plus exposées comme à Anse l'étang ou Anse Bonneville, la hauteur des vagues observées dans la baie de Tartane reste très faible en raison du déferlement de la houle sur les récifs plus au large (Illustration 19).



*Illustration 19 : à gauche) photographie capturée pendant le pic de l'évènement Isaias où la hauteur significative des vagues dépassent 3 m au large de la baie de Tartane. A droite) vagues de plus de 2.0 m déferlant au même moment sur la plage Anse l'Étang, située à quelques kilomètres de la baie de Tartane.*

### **3.3.3. Evolution des niveaux d'eau et surcote cyclonique**

Afin d'évaluer l'exposition de la baie de Tartane (et plus particulièrement sur le quartier de Fonds Basil) aux phénomènes de submersion, les niveaux d'eau et de surcotes associés aux épisodes les plus énergétiques ont été caractérisés. Pendant la période de suivi entre janvier 2012 et octobre 2020, les niveaux d'eau mesurés à Fort-de France ont été analysés et sont comparés avec les niveaux d'eau schématiques, simulés et calculés avec la reconstitution des différentes composantes de l'onde de marée, déterminée à partir des données d'origines (section 2.5.2). En comparant les niveaux mesurés et simulés, une estimation de la surcote atmosphérique peut alors être calculée.

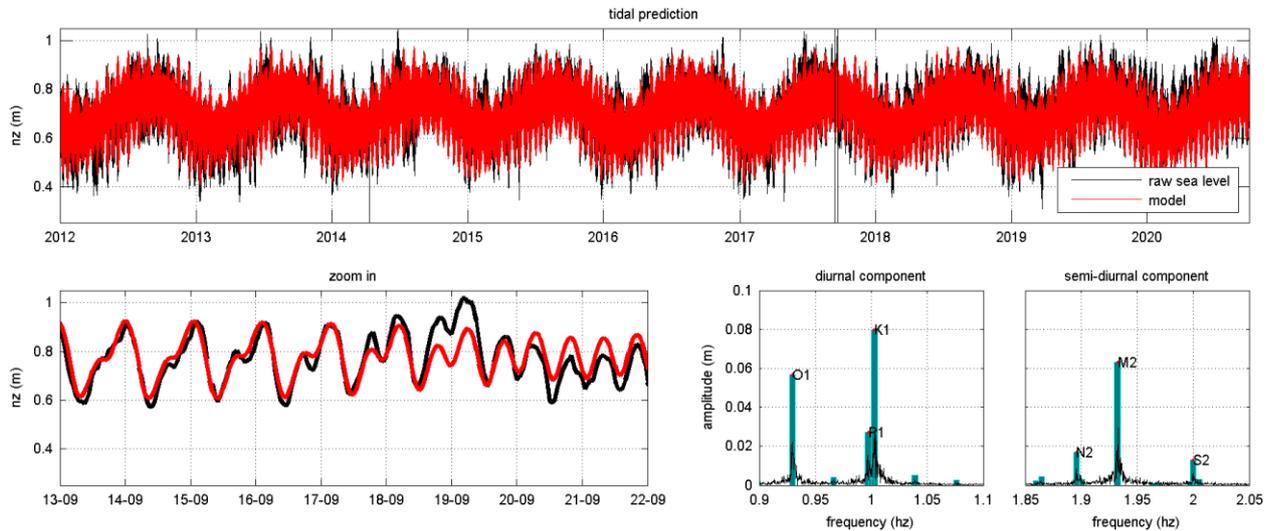
Pendant l'ouragan Maria, le 19 septembre 2017, les niveaux d'eau mesurés à la bouée de Fort-de-France atteignent 1 m par rapport au zéro hydrographique pour une marée schématiquement prévue à 90 cm (Illustration 20). La surcote atmosphérique estimée est alors de 10 cm. A cela pourrait s'ajouter localement dans la baie de Tartane une surélévation temporaire du niveau de

la mer liée aux masses d'eau poussées par le vent vers la côte et une surélévation supplémentaire provoquée par le déferlement des vagues au large.

A titre d'exemple, les travaux de modélisation réalisés par Météo-France sur le secteur de Anse l'Etang (Trinité), situé à proximité de la baie de Tartane, ont pu montrer que le niveau de surcote induit par le déferlement des vagues pendant l'ouragan Dean était de 0.30 m. Au cours de l'évènement la surcote totale a été estimée à 0.80 cm (Météo-France\DIRAG/EC-MPF, 2017).

La vulnérabilité du littoral face aux phénomènes de submersion sera analysée par la suite (section 3.4) pour des niveaux d'eau schématiques de 1.65 m (par rapport au zéro hydrographique) matérialisant une marée haute astronomique de 0.90 m à laquelle s'ajouterait une surcote centennale de 0.75 m (Météo-France\DIRAG/EC-MPF, 2017).

Afin d'appuyer l'expertise locale, les niveaux d'eau ont été mesurés par mer calme le 24-07-2020 à 16h00 et le 27-07-2020 au pic de l'évènement cyclonique Isaias pour des niveaux de marée équivalent. La surcote locale estimée pendant l'ouragan Isaias (au pic de l'évènement) reste inférieure à 10 cm. A ce stade, un modèle numérique reste indispensable pour estimer plus précisément les niveaux d'eau pendant les évènements extrêmes de type cyclonique.



*Illustration 20 : en haut) Niveaux d'eau (nz) mesurés (en noir) et simulés (en rouge) à Fort-de-France depuis le 01 janvier 2012 (8.8 ans de mesure). à gauche) Niveaux d'eau (nz) mesurés (en noir) et simulés (en rouge) à Fort-de-France pendant l'ouragan Maria en septembre 2017. A droite). Composantes principales diurnes et semi-diurnes déterminées par la méthode. Les niveaux d'eau sont données par rapport au zéro hydrographique.*

### 3.4. EVOLUTION DU TRAIT DE COTE ET SUBMERSION MARINE

#### 3.4.1. Evolution du trait de côte et érosion

##### **Evolution multi-décennale à décennale du trait de côte**

Dans la baie de Tartane, l'analyse des positions successives de la limite de végétation met en évidence une dynamique contrastée de la cellule depuis 1951 avec un recul plus marqué dans le secteur de Fonds Basil à l'extrémité Ouest de la baie (Illustration 21). Dans ce secteur, la position de la limite de végétation a connu un recul sur environ 5 m entre 1951 et 2004. Au contraire, la

position de la limite de végétation montre une avancée très significative sur le secteur Est de la cellule (~ 15 m), probablement associé à un remblai.

Par ailleurs, on note également sur la partie centrale de la baie, à proximité immédiate du ponton, une dynamique particulière avec une avancée de la limite de végétation sur le bord Ouest du ponton et un recul sur son côté Est. Ce mécanisme semble être provoqué par la mise en place de l'aménagement qui entraîne le blocage du transport sédimentaire. Ce phénomène peut être également observé au niveau de la limite du jet de rive et se manifeste par un élargissement de la plage dans ce secteur.

La position de la limite de végétation est restée relativement stable entre 2004 (trait vert, Illustration 21), 2010 (trait orange, Illustration 21) et 2017 (photographies en fond, Illustration 21) sur l'ensemble de la cellule. Plus récemment, les observations réalisées sur le terrain montrent une végétation d'arrière plage en mauvais état sur la portion Ouest de la baie dans le quartier Fonds Basil (Illustration 22). Plus particulièrement, le secteur situé entre la jetée et les enrochements plus au Nord présente des marqueurs d'érosion significatifs (arbres ou palmiers déracinés).

Si le stock sédimentaire semble avoir légèrement augmenté sur la portion centrale de la baie avec un élargissement de la plage dans le secteur à proximité du ponton, la position du trait de côte (jet de rive) montre un certain recul dans le secteur de Fonds Basil. L'image capturée en 1951 met en évidence une plage qui semble atteindre entre 1 et 3 m de large. Aujourd'hui, sur le même secteur, la plage est inexistante.

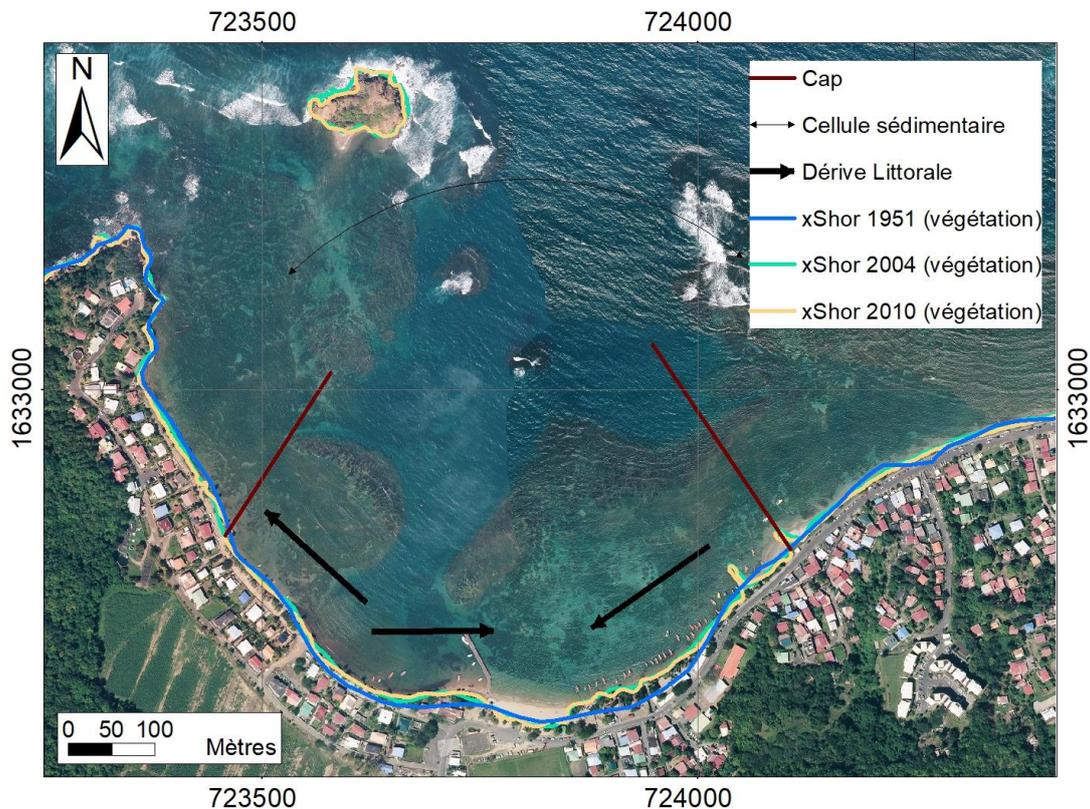


Illustration 21 : Cellules et fonctionnement hydro-sédimentaire sur la baie de Tartane (rapport RP-64499-FR) avec la position de la limite de végétation selon les différentes années superposées (rapport RP-63238-FR). Photographies aériennes de l'IGN (BD ortho 2017).



*Illustration 22 : Marqueurs d'érosion dans la baie de Tartane (quartier Fonds Basil). Photographie prise le 24 juillet 2020.*

### **Evolutions morphologiques récentes et érosion marine**

Alors que sur le long terme la position de la limite de végétation présente une variabilité assez faible (5 m au maximum sans considérer le remblai probablement effectué à l'Est de la cellule), l'évolution de la position du jet de rive présente des évolutions significatives sur une période plus récente (2004 - 2019), traduisant des oscillations importantes de la largeur de plage (Illustration 23). Ainsi, sur la partie Ouest de la plage, on constate un recul très important (~ 10 m) entre 2004 et 2013. Si le couvert végétal n'a pas encore été impacté par cette dynamique de plage, l'état de la végétation observée sur le terrain montre des marqueurs d'érosion évidents. Entre les deux dates, la dynamique du trait de côte est caractérisée par des vitesses de recul très élevées de l'ordre 0.90 m/an dans le secteur de Fonds Basil.

D'après les images satellites à disposition (Illustration 23), ce recul apparaît essentiellement après 2004 et après 2014. Plus précisément, la largeur de la plage située entre la jetée et les enrochements plus au Nord réduit très fortement (entre 10 m et 20 m sur toute la période), et illustre un recul significatif du trait de côte. Ce recul n'est pas homogène sur toute la plage et est plus important à proximité des enrochements qui favorisent le blocage du transport sédimentaire, la réflexion des vagues et une érosion plus marquée sur les secteurs adjacents. Cette dynamique pourrait également traduire l'activité cyclonique particulièrement intense entre 2004 et 2013 avec le passage des cyclones et tempêtes tropicales Dean, Thomas, Emily ou Raphael et entre 2016 et 2018 avec le passage de Matthew et de Maria. Au contraire, à l'Est de la jetée, au centre de la cellule sédimentaire, la position du trait de côte reste stable sur toute la durée du suivi et la plage présente un stock sédimentaire relativement important.

La dynamique observée dans le quartier de Fonds Basil semble alors indiquer une sensibilité plus importante aux épisodes de vagues énergétiques. L'érosion mise en évidence ne semble pas être associée à un transport sédimentaire transversal mais plutôt à des échanges longitudinaux induits par la dérive littorale vers l'Est et vers le centre de la baie. Ce recul est plus important à proximité des enrochements qui favorisent le blocage du transport sédimentaire et entraînent une érosion plus marquée sur les secteurs adjacents. Suite à ces événements, la reconstruction naturelle de la plage, qui pourrait se traduire par une avancée du jet de rive sur la partie marine, n'est pas observée.



Illustration 23 : Evolution du trait de côte dans le secteur de Fonds Basil sur la période récente. La ligne rouge en pointillé indique retrospectivement la position du trait de côte à la date du 30-12-2004 (en train plein sur la prise de vue correspondante). Images obtenues via Google image.

### 3.4.2. Sensibilité aux phénomènes de submersion marine

Concernant le phénomène de submersion, une surélévation temporaire du niveau de la mer peut être induite lors des épisodes de type ouragan, bien que l'énergie des vagues soit largement dissipée par les récifs plus au large. Sur ce secteur, la surcote atmosphérique, caractérisée par une chute de la pression atmosphérique et un vent fort reste le principal facteur susceptible d'entraîner une submersion marine par mécanisme de débordement. La vulnérabilité de la baie de Tartane, et plus particulièrement sur le secteur de Fonds Basil, face aux phénomènes de submersion est analysée pour des niveaux d'eau schématisés de 1.65 m (par rapport au zéro hydrographique) matérialisant une marée haute astronomique de 0.90 m à laquelle s'ajouterait une surcote centennale de 0.75 m (Météo-France\DIRAG/EC-MPF, 2017).

A titre d'indication les niveaux d'élévations par rapport au zéro hydrographique sont représentés Illustration 24 sur la baie de Tartane. Si à ce stade, un modèle numérique reste indispensable pour estimer plus précisément les niveaux d'eau pendant les événements extrêmes de type cyclonique, la surélévation temporaire du niveau de la mer au cours d'un événement cyclonique induisant une surcote centennale (0.75 m) lors d'une marée haute astronomique est schématiquement représenté par la zone en bleu clair ( $0 < Z < 1.65$  m, Illustration 24). Sur l'ensemble du littoral de Fonds Basil (flanc Ouest de la baie de Tartane), les habitations sont situées sur un cordon de faible altitude protégeant naturellement la zone basse cultivée à l'arrière. Pour une surcote d'une telle amplitude, de nombreuses parcelles pourraient alors être affectées par le phénomène de submersion avec une sensibilité plus marquée pour les parcelles situées en front de mer à une distance d'environ 50 m du trait de côte (Illustration 25). Pour de tels niveaux de surcote, une vingtaine d'habitations pourraient alors être menacées (Illustration 25).

Il faut néanmoins rappeler que les observations réalisées lors du passage de l'Ouragan Isaias, qui reste un événement cyclonique modéré, ont montré que les niveaux de surcote mesurés restaient inférieurs à 0.10 m pendant toute la durée de l'évènement avec aucune conséquence ni menace pour les habitations situées en front de mer. Ainsi, le retour d'expérience a montré que la vulnérabilité de la baie de Tartane au cours d'un événement cyclonique d'intensité moyenne (les vagues ont atteint moins de 4 m au large de la baie) est modérée.

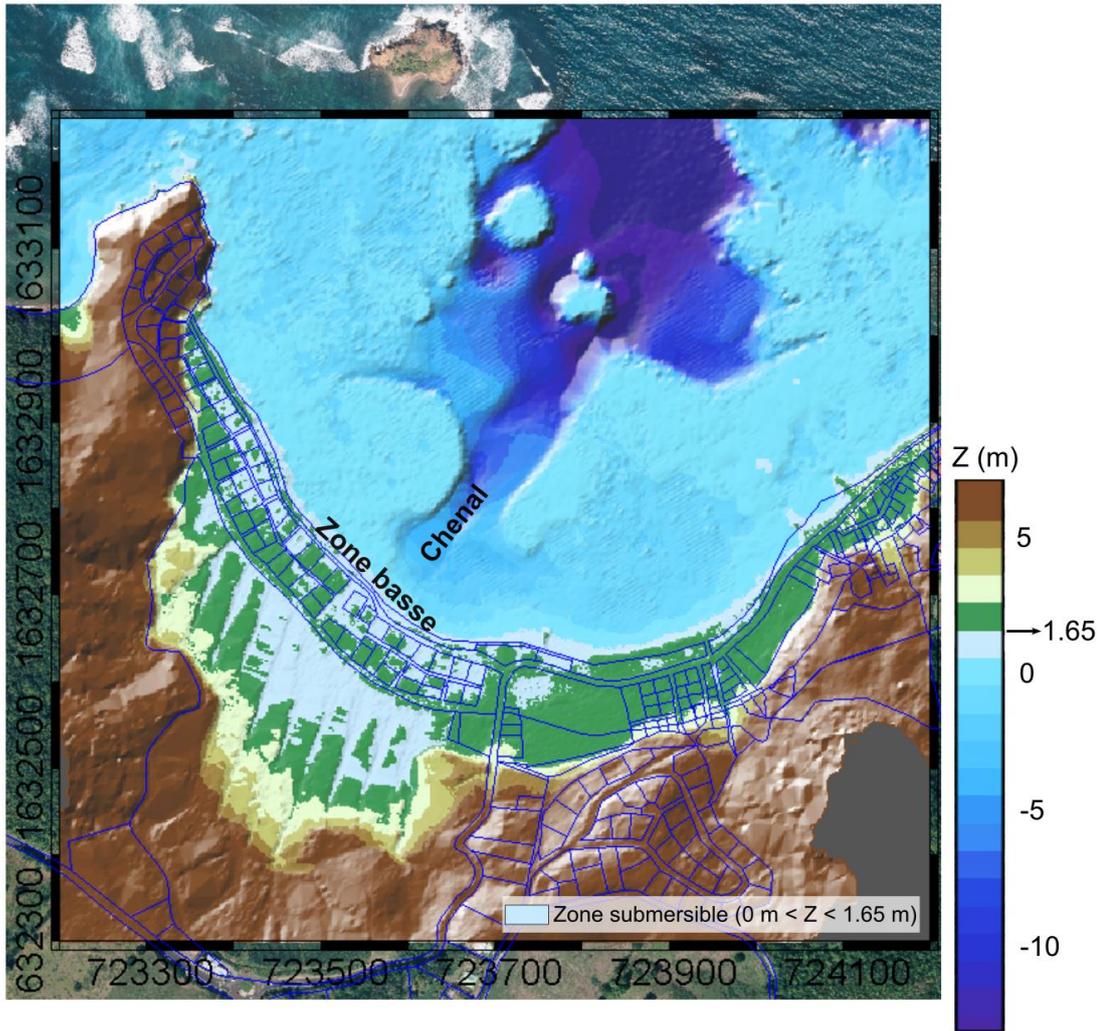


Illustration 24 : Niveau altimétrique (référence par rapport au zéro hydrographique) sur la baie de Tartane (Shom, 2016). A titre d'indication, une surélévation temporaire des niveaux d'eau (ici 0.75 m) pendant une marée haute astronomique (0.90 m) est illustrée par la zone en bleu clair ( $0\text{ m} < Z < 1.65\text{ m}$ ).

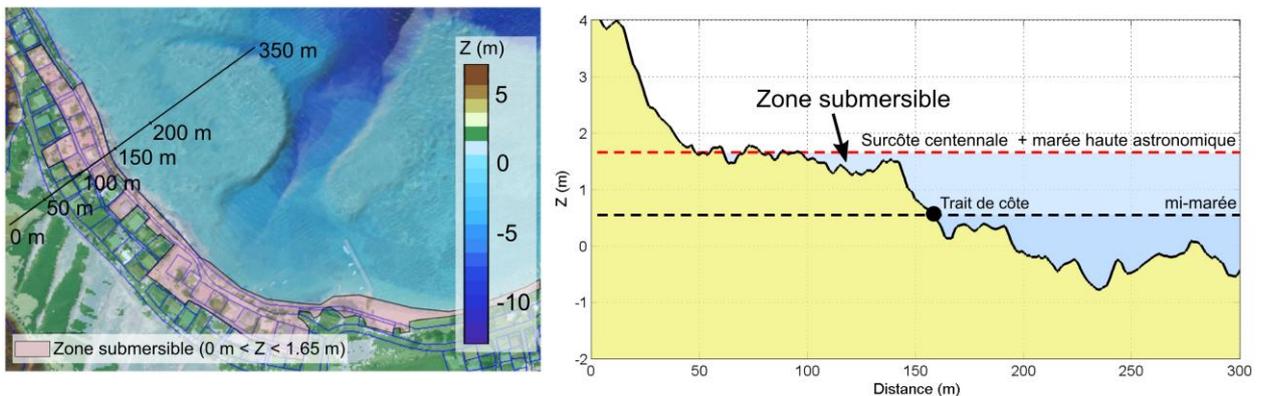


Illustration 25 : à gauche) niveau altimétrique (référence par rapport au zéro hydrographique) sur le quartier de Fonds Basil (Shom, 2016). A titre d'indication, une surélévation temporaire des niveaux d'eau (ici 0.75 m) pendant une marée haute astronomique (0.90 m) est illustrée par la zone rouge ( $0\text{ m} < Z < 1.65\text{ m}$ ). A droite) profil transversal dans la baie de Tartane où sont indiqués les niveaux à mi-marée et ceux atteints lors d'une surcote centennale à marée haute (référence par rapport au zéro hydrographique).

### 3.5. DESCRIPTION DES INSTABILITES SUR LA FALAISE DU QUARTIER FONDS BASIL

#### 3.5.1. Historique

Dans l'inventaire des mouvements de terrain (consultable sur <https://infoterre.brgm.fr/>), aucun mouvement de terrain n'est répertorié sur la Falaise de la Pointe à Bibi ni sur la presqu'île de la Caravelle. Néanmoins, le site expertisé se trouve en zone d'aléa moyen à fort vis-à-vis des mouvements de terrain d'après le Plan de Prévention des Risques Naturels (PPRN) révisé en 2013 (Illustration 26).

Plusieurs éboulements ont été repérés sur la falaise littorale lors des visites de terrain du 3 septembre 2020 et du 6 octobre 2020 (Illustration 26). Le § 3.5.2 détaille l'évènement le plus récent ainsi que les dommages suspects repérés sur l'entrée de la Parcelle OH159. Il est possible que ces éboulements soient séparés les uns des autres par des dykes.

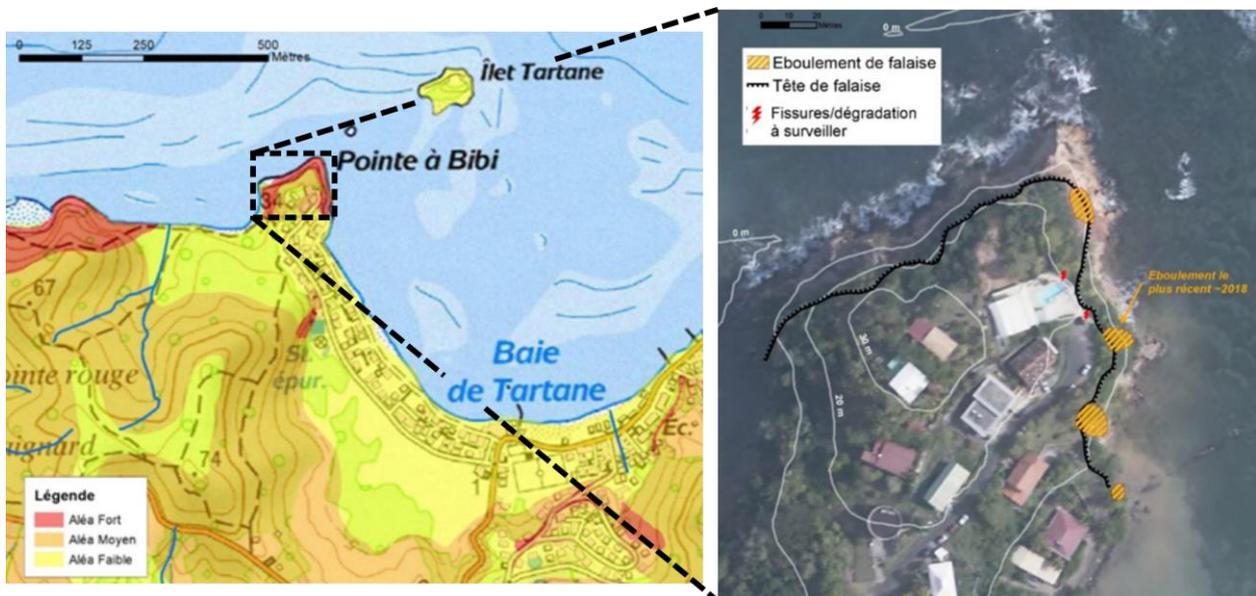


Illustration 26 : à gauche) extrait de la carte mouvements de terrain sur le secteur étudié (PPR 2013). A droite) observations du BRGM au 06 octobre 2020.

#### 3.5.2. Un éboulement « récent »

Un éboulement « récent » a emporté une partie de la falaise à l'extrémité du chemin communal. La falaise atteint 15 m de hauteur à cet endroit et l'éboulement a mobilisé au moins les 10 premiers mètres (partie supérieure) étant donné que la partie inférieure est toujours en place. Large d'une dizaine de mètres, avec un recul maximal de 2 à 3 m environ et 8 à 10 m de hauteur, son volume est estimé à 300 m<sup>3</sup>. Plusieurs niveaux d'altération (de type hydrothermal principalement) se succèdent dans la paroi rocheuse sachant que l'éboulement mobilise les deux plus altérés : H4C et H4B (Illustration 27). Les terrains d'altération H4B sont découpés en dièdre par des structures verticales sans doute associés à l'activité structurale décrite dans la partie 3.1.2.

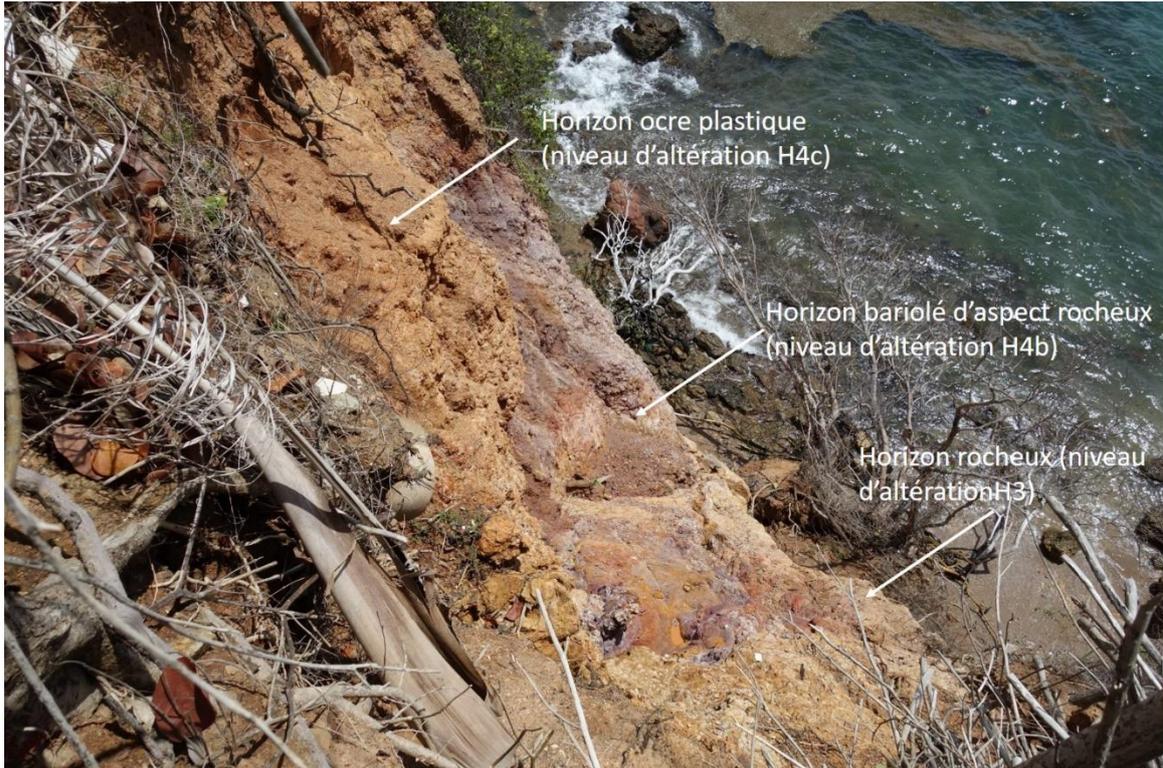


Illustration 27 : Niche d'arrachement observée depuis le haut de la falaise. Photo BRGM prise le 3 septembre 2020

En comparant l'Orthophoto 2017 de l'IGN et les images satellites disponibles (Illustration 28), il ressort que cet éboulement se serait initié entre début février 2017 et le 16 septembre 2017, soit sans doute pendant la saison cyclonique particulièrement active de 2017. Sur ces images, on peut également supposer une reprise ou une accentuation de l'instabilité entre fin 2017 et début 2019.



Illustration 28 : Reconstitution des événements à partir de l'Orthophoto de l'IGN et des images satellites fournies par Google Earth.



Illustration 29 : Point bas topographique en amont de l'éboulement

La canalisation d'eau pluviale (diamètre 30 cm) qui collecte les eaux en amont de la chaussée, circule ensuite dessous pour se déverser dans la falaise au milieu de la niche d'arrachement, soit à l'endroit exact où l'évènement s'est déclenché (cf. Illustration 29). Le tuyau s'interrompt aujourd'hui au niveau de la paroi rocheuse. La chaussée à cet endroit présente de nombreuses fissures mais pas de signes d'activité récente. Cette zone correspond à un point bas topographique où convergent les écoulements.

Plusieurs dégradations affectent le portail donnant accès à la parcelle 0H 0159 (cf. Illustration 30) :

- un décalage de 5 cm en partie haute du portail présentant un basculement de l'ensemble vers la falaise.
- la rupture localisée de l'extrémité du carrelage, la plus proche de la falaise
- des fissures ouvertes qui délimitent l'ensemble du portail et qui désolidarisent le carrelage au sol du mur ; ces dommages sont réguliers et s'apparentent à des défauts lors de la pose.

Malgré ces indices, le portail continue à fonctionner normalement d'après le responsable du site ; l'ensemble ne présentant pas d'autres indices de dégradation. Aucun indice marqué au sol n'a été repéré.

Le soubassement de la coursive en béton, faisant office de chemin d'accès à la maison et qui contourne la piscine, est en mauvais état. Les fers à béton apparaissent et le béton est éclaté à plusieurs endroits.



Illustration 30 : Indices suspects à surveiller repérés sur le portail de l'habitation le 06 octobre 2020  
Parcelle OH159 et OH160.

### 3.5.3. Autres éboulements repérés sur la falaise littorale

Plusieurs autres éboulements du même type ont affecté la falaise littorale ; ils mobilisent systématiquement le même horizon altéré (H4B et H4C) dont l'épaisseur cumulée est estimée entre 5 et 7 m.

### 3.5.4. Indice d'instabilité repéré sur images satellites

En complément des observations récentes réalisées sur la partie Est de la Pointe à Bibi, le secteur situé sur la partie occidentale semble avoir perdu une partie de sa végétation au cours d'une éventuelle déstabilisation superficielle (Illustration 34). Cette information justifie le caractère « fragile » des zones altérées de la falaise. Toutefois, il se pourrait que ce constat soit aussi issu d'un angle de prise de vue différent entre les deux photographies aériennes de l'IGN (<https://remonterletemps.ign.fr/>). Les photographies plus anciennes disponibles ne montrent pas d'autres mouvements de terrain sur le secteur étudié.



Illustration 31 : Observation d'un possible décapage végétal suite à une déstabilisation en tête de falaise sur la partie occidentale de la Pointe à Bibi entre 2010 et 2017 (modifié d'après le site IGN <https://remonterletemps.ign.fr/>).

## 4. Diagnostic et recommandation

### 4.1. GESTION DE L'ÉROSION ET DES PHÉNOMÈNES DE SUBMERSION

#### 4.1.1. Diagnostic

Alors que sur le long terme, la position de la limite de végétation présente une variabilité assez faible (5 m au maximum), l'évolution de la position du jet de rive présente des évolutions significatives sur une période plus récente (2004 - 2019), traduisant une érosion importante (entre 10 m et 20 m) sur le secteur Ouest de la baie, entre la jetée et les enrochements plus au Nord (secteur 1 et secteur 2, Illustration 32). Nos observations sur le terrain montrent que la végétation d'arrière plage est en mauvais état sur cette même portion et présentent des marqueurs d'érosion évidents (arbres ou palmiers déracinés). Au contraire, à l'Est de la jetée, au centre de la cellule sédimentaire, la position du trait de côte reste stable sur toute la durée du suivi et la plage présente un stock sédimentaire relativement important.

Cette dynamique peut être expliquée en partie par la morphologie de l'avant côte où la présence d'un chenal plus profond situé sur la partie centrale de la baie se répercute sur la morphologie du trait de côte. Dans l'axe du chenal, l'exposition à la houle et aux vagues résiduelles pourrait être plus importante que sur les autres secteurs du littoral provoquant alors une érosion pouvant plus significative pendant les événements les plus énergétiques (tempête, cyclone).

La dynamique d'érosion observée sur le secteur Ouest de la baie de Tartane (quartier Fonds Basil) semble surtout subir les effets de la présence d'aménagements sur l'ensemble du littoral. En particulier, les enrochements et les remblais situés sur la portion Ouest de la baie empêchent le retour du sable lorsque les conditions hydrodynamiques sont favorables, c'est-à-dire pour des vagues ou une agitation modérée. De plus, la présence de la jetée favorise le blocage du transport sédimentaire vers les autres secteurs du littoral, en particulier vers la portion située à l'Ouest de cette même jetée. Ainsi, le littoral de Fonds Basil est faiblement réalimenté par les échanges sédimentaires transversaux et latéraux.

Enfin, les habitations de ce même secteur du littoral sont situées sur des zones basses et restent exposées au débordement en cas de submersion marine liée au passage d'un cyclone induisant une surcote exceptionnelle. Pour une surcote centennale (0.75 m), de nombreuses parcelles pourraient alors être affectées par le phénomène de submersion avec une sensibilité plus marquée pour les parcelles situées en front de mer. Il faut néanmoins rappeler que les observations réalisées lors du passage de l'Ouragan Isaias, montre que la vulnérabilité de la baie de Tartane au cours d'un événement cyclonique d'intensité moyenne est modérée.

#### 4.1.2. Recommandations en terme de principe d'aménagement

Dans le secteur le plus impacté par l'érosion (secteur 1, Illustration 32), la restauration du trait de côte sous la forme d'un rechargement de plage pourrait montrer une efficacité limitée et ne s'avère pas pertinente au vu du stock sédimentaire actuel (quasiment inexistant) et des ouvrages de défense (blocs de béton, gravas) déjà présents sur le site, mis en place par les riverains.

Par ailleurs, la mise en place d'une protection côté mer qui prendrait la forme d'un ouvrage atténuateur de houle (renforcement du récif naturel) n'apparaît pas être une solution très adaptée

au vu du contexte hydro-sédimentaire dans lequel se trouve la baie de Tartane. Ces dispositifs sont à privilégier sur les cellules sédimentaires où la puissance de la houle est importante et pour des secteurs où l'amortissement des vagues sur l'avant-côte est limité en raison de l'absence de récif ce qui n'est pas le cas dans la baie de Tartane. Ici, le récif joue naturellement ce rôle de protection.

Actuellement, cette portion du littoral (secteur 1, Illustration 32) est en partie protégée par des enrochements en très mauvais état mis en place par les riverains. La route est très exposée au risque d'érosion par affouillement des fondations et de submersion par débordement. Compte tenu du contexte observé dans le quartier de Fonds Basil où la protection actuelle se repose essentiellement sur des blocs de béton et des gravats, l'implantation ou la restauration d'un ouvrage de défense longitudinal (parallèle au trait de côte) dans la ligné de celui mis en place à l'extrémité Nord de la baie (blocs rocheux) reste la solution la plus pertinente pour la problématique de gestion de l'érosion côtière sur cette portion du littoral.

Si la mise en place de ce type d'aménagement entrainera inévitablement un durcissement de l'avant côte sur ce secteur et pourrait favoriser le départ des sédiments situés en pied de l'aménagement vers le large, cette solution devrait se montrer efficace pour atténuer le phénomène d'érosion sans pour autant avoir de répercussions significatives sur les secteurs adjacents (secteur 2, Illustration 32). En effet, étant donné le stock sédimentaire quasiment inexistant sur le secteur à aménager et les ouvrages de défense actuels (blocs de béton, gravats), les échanges sédimentaires latéraux entre les deux secteurs sont déjà très limités. D'un point de vue des impacts attendus sur la dynamique hydro-sédimentaire, on peut donc s'attendre à un abaissement altimétrique au pied de l'ouvrage. Cependant cet impact devrait être limité à l'emprise de l'aménagement.

Pour garantir son efficacité, cette protection devra respecter les principes de conception et dimensionnement appliqués aux ouvrages de génie côtier. Il faudra également veiller à ce que l'érosion ne s'accroisse pas à l'extrémité sud de l'ouvrage (secteur 2, Illustration 32). En effet, selon le sens de la dérive littorale, une érosion localisée est possible à cet endroit. Cet impact peut être atténué en adaptant le profil de l'ouvrage au niveau de son extrémité sud.

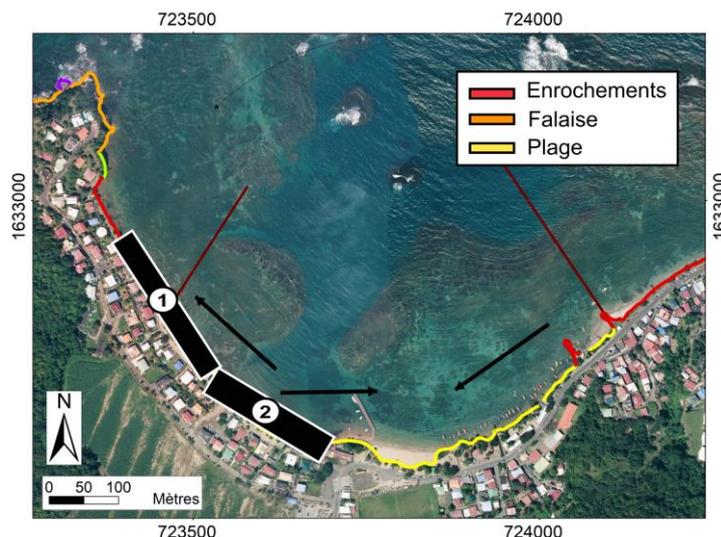


Illustration 32 : Cellules et fonctionnement hydro-sédimentaire dans la baie de Tartane sur la Trinité (rapport RP-64499-FR). Photographie aérienne de l'IGN (BD ortho 2017) et typologie de la côte.

Afin de compléter le projet d'aménagement, en particulier sur les secteurs plus au Sud (secteur 2, Illustration 32), des rechargements en sable sur l'avant côte et une restauration du niveau initial du sol (remblais) et de l'espace littoral terrestre par génie végétal combinée à une meilleure gestion des espaces (mise en place d'une circulation balisée pour les véhicules) restent des solutions de gestion pertinentes.

Quelques recommandations peuvent alors être formulées :

(1) La restauration du trait de côte sous la forme d'un rechargement de plage

Cette méthode a pour objectif de compenser le déséquilibre du stock sédimentaire, qu'il soit d'origine naturelle ou liée à une action humaine, en alimentant la plage aménagée en matériaux sédimentaires (sables, galets). Le rechargement de plage n'a pas pour but de stopper le phénomène d'érosion mais de l'accompagner et d'en limiter les impacts. La durabilité du dispositif consiste à s'assurer de ne pas entraîner un déficit sédimentaire sur les lieux de prélèvements, qui peuvent être en dehors de la cellule sédimentaire. Dans ce contexte, la mise en place d'un « Plan de gestion des sédiments » permet d'identifier les ressources et les besoins potentiels en respectant les transits en action, les modalités de rechargement et la sensibilité des écosystèmes marins.

Ce rechargement doit être précédé :

- d'une étude technique pour évaluer la compatibilité granulométrique et chimique du sable prélevé avec les sédiments de l'endroit à recharger ;
- d'une demande à la Police de l'Eau (dossier loi sur l'Eau) et d'une évaluation environnementale le cas échéant pour évaluer les effets d'un apport, même local sur le reste du littoral et notamment la faune et la flore présente (notamment herbier, coraux, qui peuvent être affectés par l'augmentation de la turbidité lors des travaux).

(2) La restauration du niveau initial du sol

Le reprofilage de l'arrière plage a pour objectif de limiter les impacts des tempêtes ou des houles cycloniques. Il est également utilisé pour atténuer la pénétration des eaux en cas de submersion. Ce reprofilage doit être bien dimensionné pour éviter d'accentuer la propagation de l'eau dans les terres. Il est préférable de l'accompagner de dispositifs complémentaires (rechargement, replantation).

(3) La gestion des espaces avec la mise en place d'une circulation balisée

Pour les plages fréquentées, le piétinement anthropique et la circulation des véhicules sont des facteurs accentuant l'érosion et freinent le développement de la végétation. La mise en place d'une circulation balisée favoriserait la reprise de la végétation en la protégeant du piétinement anthropique ou de la circulation des véhicules.

(4) La restauration de l'espace littoral terrestre par génie végétal

Les espèces à planter doivent être adaptés au littoral martiniquais et respecter l'organisation transversale naturelle. En effet, deux strates de végétation colonisent les plages martiniquaises. Une végétation rampante aussi appelée végétation pionnière, dont l'important réseau racinaire fixe efficacement le sable des plages. Sur l'arrière plage se trouve la végétation dite « pérenne » ou « forêt littorale » stricto sensu qui comprend des espèces variées comme le résinier, le mancenillier, le catalpa, le galba, le poirier pays, où l'oseille de bord de mer.

La couverture de la plage par des débris-végétaux est également un moyen de protection efficace. De manière générale, lors des campagnes de nettoyage entreprises par les communes, notamment pour la collecte des sargasses, il est conseillé de ne retirer que les macro-déchets d'origine humaine et de laisser les déchets verts qui contribuent à l'équilibre de la plage et la régénération de la végétation littorale. Cependant, le dépôt des sargasses sur les plages martiniquaises a entraîné des contraintes sanitaires rappelant qu'il n'est pas toujours envisageable de conserver ces débris-végétaux. De manière générale, le nettoyage des plages doit être encadré de manière à conduire à une pratique raisonnée.

Concernant le phénomène de submersion, les actions de remblais proposées ou de restauration du niveau initial du sol restent pertinentes pour atténuer cet aléa. Afin de compléter ces aménagements et de réduire l'exposition du site, la mise en place d'un muret vertical de protection en retrait du littoral est une solution qui pourrait être efficace pour limiter la pénétration de l'eau sur la partie terrestre en cas de débordement (type mur de couronnement). Des passages « battardables » peuvent également être réalisés afin de garantir un accès au littoral selon les usages du secteur en condition normale.

Enfin, vis-à-vis des projections d'élévation du niveau de la mer (> 0.5 m d'ici 2100, scénario AR5-RCP2.6, <https://sealevelrise.brgm.fr/>), le quartier deviendra de plus en plus vulnérable à la submersion avec des phénomènes plus intenses et plus fréquents d'ici la fin du siècle. Sur le long terme, des réflexions sur la relocalisation pourraient être envisagées.

## **4.2. EROSION DE LA FALAISE**

### **4.2.1. Diagnostic**

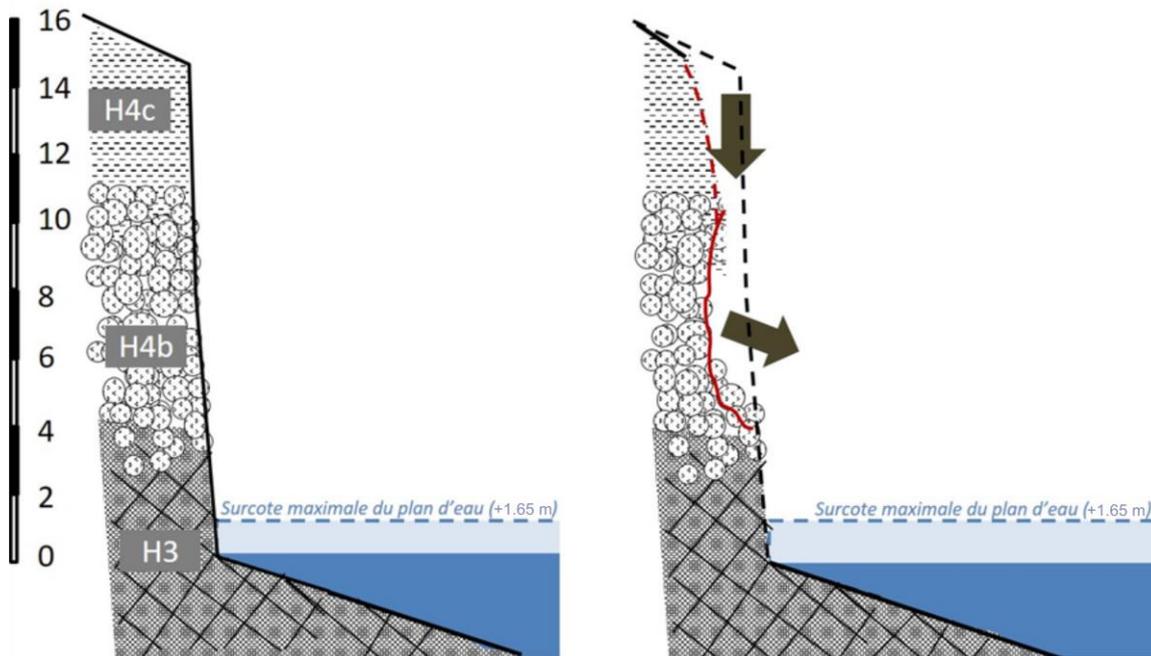
La falaise armant la Pointe à Bibi présente un profil d'altération hydrothermal marqué dont la couleur rouge vif donne son nom au secteur (Pointe Rouge).

Quatre instabilités de plusieurs centaines de m<sup>3</sup> ont déjà affecté la falaise confirmant la forte prédisposition à l'éboulement de la falaise. Les conditions hydrodynamiques à cet endroit sont limitées avec des vagues qui sont largement dissipées par les hauts-fonds plus au large. La partie instable se limite à la frange altérée de la falaise sans contact avec la mer. Le forçage marin n'est donc pas un facteur aggravant retenu en priorité. La déstabilisation s'initie dans l'horizon H4b (d'aspect rocheux qui se désagrège facilement) et qui entraîne avec lui l'horizon supérieur (H4c) comme le schématise l'illustration 33. L'horizon H4b est fragilisé par des discontinuités structurales identifiées dans ce secteur.

L'infiltration des eaux de surface dans cet horizon participe à réduire les caractéristiques mécaniques des deux horizons, en particulier le rejet d'eaux pluviales repéré à l'endroit de l'éboulement mais également les eaux de ruissellement et d'infiltration guidées par les inflexions topographiques sans doute liées aux discontinuités structurales identifiées.

Ainsi, la forte vulnérabilité du linéaire de falaise du quartier Fonds Basil est expliquée par la fragilité « géologique » apportée par le système de fractures dont des failles qui expliquerait une altération (échelle géologique) et une circulation d'eau (échelle géologique et échelle actuelle) plus intense le long d'axes privilégiés perpendiculaires au trait de côte (globalement NNO-SSE).

On peut donc redouter que les déstabilisations se poursuivent, dans cet axe là notamment (et dans l'axe des autres éboulements) (cf. les flèches indiquées dans l'illustration 34). Les événements redoutés sont des éboulements localisés d'une dizaine de mètres de largeur.



*Illustration 33 : Profil de la falaise et mécanisme d'instabilité supposé. Sur le secteur de Fonds Basil, pour évaluer les risques de submersions, on considère des niveaux d'eau maximum de 1.65 m (par rapport au zéro hydrographique) matérialisant une marée haute astronomique de 0.90 m à laquelle s'ajouterait une surcote centennale (atmosphérique + hydrodynamique) de 0.75 m*

Aucune habitation n'est située à moins de 15 m de la tête de falaise. Si on considère que le prochain évènement puisse être de la même taille que le dernier (recul de falaise de l'ordre de 2 à 3 m), il faudrait la répétition, au même endroit, de cinq évènements pour menacer l'une d'entre elle. Par ailleurs, le pied de falaise est armé par un socle rocheux beaucoup plus stable, moins apte à reculer.

La piscine et la coursive béton sont, quant à elles, beaucoup plus près de la falaise et menacées par un éventuel éboulement de la falaise à cet endroit.



Illustration 34 : Situation des zones d'éboulements privilégiés et de la tête de falaise aujourd'hui par rapport aux différents enjeux

#### 4.2.2. Recommandations

Nous n'avons pas identifié de danger imminent pour les enjeux situés en tête de falaise, mais des menaces à court et moyen terme :

- dans l'immédiat pour la route communale ;
- à moyen terme pour la route, le portail, la coursive voire la piscine (entre 10 et 50 ans) ;
- à long terme pour les maisons.

Les recommandations d'urgence ont été émises par le BRGM dans un mail transmis à la DEAL le 30 juillet 2020. Les mesures d'urgence ont été communiquées à l'oral au responsable de l'habitation lors de la visite du mardi 6 octobre. Dans les plus brefs délais, le BRGM recommande la mise en place d'un dispositif de surveillance visuelle :

- sur la chaussée. Pour cela, des scellés bétons doivent être installés sur les fissures fermées qui lézardent la chaussée (repartis largement derrière la niche d'arrachement et jusqu'à 5 voire 10 m derrière), pour être en mesure d'identifier une réouverture de ces fissures ;
- au niveau de l'habitation par la pose de scellé béton sur les principales fissures par exemple (celle du carrelage) et la mesure régulière de l'écartement du portail.

Dans les semaines à venir, le BRGM recommande également :

- de vérifier l'absence de fuite de la canalisation d'eaux pluviales qui traverse la chaussée ;
- de déplacer l'exutoire de cette canalisation en dehors de la niche d'escarpement pour réduire la vitesse de recul ;
- de revoir l'installation de gestion des eaux de la parcelle OH159 pour que rien ne soit jeté librement dans la pente au risque d'accentuer un risque ;
- par ailleurs, pour ne pas fragiliser davantage la paroi rocheuse, le stationnement doit être limité en bordure de falaise par un système dissuasif à l'image de celui qui était en place lors de la visite du 06/10/2020.

#### 4.2.3. Principe de confortement de la falaise

Un confortement de la falaise est envisageable sur les zones à protéger. Empêcher le recul de la falaise implique de renforcer la partie supérieure sujette aux instabilités, soit les horizons H4b et H4c. Vu la faible résistance de ces horizons altérés, il pourrait s'agir d'établir une butée pour augmenter les efforts résistants. Ces ouvrages (piliers, contreforts) viseraient à s'opposer au détachement et à l'éboulement d'écaillés rocheuses en réalisant un support rigide qui en assure le blocage. Ils pourront s'appuyer sur la partie rocheuse constituant la partie basse de la falaise.



## 5. Conclusion

L'érosion côtière ou le recul du trait de côte est un phénomène naturel qui peut parfois revêtir un caractère exceptionnel, notamment au cours de la saison cyclonique. Dans la baie de Tartane et en particulier dans le secteur de Fonds Basil, l'érosion observée est significative sur une période récente (2004 - 2019), que ce soit sur la partie strictement littorale où les vitesses de recul sont importantes (entre 10 et 20 m) ou sur la falaise (Pointe à Bibi) qui présente de nombreuses marques d'altérations.

Sur la partie strictement littorale, compte tenu du contexte observé dans le quartier de Fonds Basil où la protection actuelle repose essentiellement sur des blocs de béton et des gravats, l'implantation ou la restauration d'un ouvrage de défense longitudinal (parallèle au trait de côte) dans la lignée de celui mis en place à l'extrémité Nord de la baie (blocs rocheux) reste la solution la plus pertinente pour la problématique de gestion des risques côtiers sur cette portion du littoral. Pour garantir son efficacité, cette protection devra respecter les principes de conception et dimensionnement appliqués aux ouvrages de génie côtier.

Afin de compléter le projet d'aménagement, en particulier sur les secteurs plus au Sud, des rechargements en sable sur l'avant côte et une restauration du niveau initial du sol (remblais) et de l'espace littoral terrestre par génie végétal restent des solutions de gestion pertinentes.

Les actions de remblais proposées ou de restauration du niveau initial du sol permettraient d'atténuer les phénomènes de submersion marine lors des événements cycloniques les plus extrêmes. Pour limiter le risque, la création d'un mur vertical en retrait du littoral pourrait s'avérer pertinente afin de limiter la pénétration de l'eau sur la partie terrestre en cas de débordement.

Enfin, vis-à-vis des projections d'élévation du niveau de la mer (> 0.5 m d'ici 2100, scénario AR5-RCP2.6, <https://sealevelrise.brgm.fr/>), le quartier deviendra de plus en plus vulnérable à la submersion avec des phénomènes plus intenses et plus fréquents d'ici la fin du siècle. Sur le long terme, des réflexions sur la relocalisation pourraient être envisagées.

Sur la falaise, quatre instabilités de plusieurs centaines de mètres carrés ont déjà été relevées confirmant sa forte prédisposition à l'éboulement. La forte vulnérabilité du linéaire de falaise du quartier Fonds Basil est expliquée par la fragilité « géologique » apportée par le système de fractures et une circulation des eaux de surfaces le long d'axes privilégiés perpendiculaires au trait de côte. On peut donc redouter que les déstabilisations se poursuivent, dans cet axe-là notamment sous la forme d'éboulements localisés d'une dizaine de mètres de largeur.

Etant donné qu'aucune habitation n'est située à moins de 15 m de la tête de falaise, nous n'avons pas identifié de danger imminent pour les enjeux situés en bordure mais des menaces à court et moyen terme.

Les recommandations d'urgence ont été émises par le BRGM dans un mail transmis à la DEAL le 30 juillet 2020. Dans les plus brefs délais, le BRGM recommande la mise en place d'un dispositif de surveillance visuelle sur la chaussée et au niveau de l'habitation sous la forme de scellés bétons dans les fissures permettant d'identifier leurs éventuelles réouvertures.

Dans les semaines à venir, le BRGM recommande également de (1) vérifier l'absence de fuite d'eau au niveau de la canalisation qui traverse la chaussée ; (2) déplacer l'exutoire de cette canalisation en dehors de la niche d'escarpement pour réduire la vitesse de recul ; (3) de revoir l'installation de gestion des eaux de la parcelle OH159 pour que rien ne soit jeté librement dans

la pente au risque d'accentuer un risque. Par ailleurs, pour ne pas fragiliser davantage la paroi rocheuse, le stationnement doit être limité en bordure de falaise.

Un confortement de la falaise est envisageable sur les zones à protéger. Empêcher le recul de la falaise implique de renforcer la partie supérieure altérée sujette aux instabilités. Vu la faible résistance de ces horizons altérés, il pourrait s'agir d'établir une butée pour augmenter les efforts résistants. Ces ouvrages (piliers, contreforts) viseraient à s'opposer au détachement et à l'éboulement d'écailles rocheuses en réalisant un support rigide qui en assure le blocage. Ils pourront s'appuyer sur la partie rocheuse constituant la partie basse de la falaise.

## 6. Bibliographie

- Aarninkhof, S.G.J., Turner, I.L., Dronkers, T.D.T., Caljouw, M., Nipius, L., 2003. A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coast. Eng.* [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(03\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(03)00064-4)
- Belon, R., Bodéré, G., 2016. Réseau d'Observation du Littoral de la Corse – Rapport d'observations 2015.
- Bouvier, C., Castelle, B., Balouin, Y., 2019. Modeling the Impact of the Implementation of a Submerged Structure on Surf Zone Sandbar Dynamics. *J. Mar. Sci. Eng.* <https://doi.org/10.3390/jmse7040117>
- BRGM/RP-63238-FR, 2015. Nachbaur A., Paulineau M., Le Roy M. (2015). Evolution multidécennale (1951 - 2010) et décennale (2004 - 2010) du trait de côte de la Martinique.
- BRGM/RP-64499-FR, 2015. Nachbaur A., Balouin Y., Nicolae Lerma A., Douris L., Pedreros R. (2015). Définition des cellules sédimentaires du littoral martiniquais. Rapport final.
- BRGM/RP-68341-FR, 2019. Nachbaur A., Lalubie G., Garcin M., Legendre Y. (2019). Evolution pluri décennale d'un littoral en contexte volcanique actif : constats et projection autour de la Montagne Pelée (Martinique). Rapport final. BRGM/RP-68341-FR, p 93, 80 illustrations, 4 annexes.
- BRGM/RP-68470-FR, 2019. Nachbaur A., Lombard M. et Longueville F. (2019). Suivi de la mobilité du trait de côte de la Martinique – Résultats de mesures de terrain 2017- 2018 concernant les plages du Carbet, des Salines, de Coco l'Echelle et de onze plages soumises aux échouages 83.
- BRGM/RP-69150-FR, 2019. Nachbaur A., Lombard M., Lacquement F., Reninger P.-A., Thierry Y. et Roule A. (2019). Définition d'une méthodologie pour la révision de la cartographie d'aléa mouvement de terrain en Martinique. Rapport final BRGM/RP-69150-FR, 166 p.
- BRGM/RP-69071-FR, 2019. Lombard M., De Cathelineau T., Nachbaur A. (2019) . Suivi des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Bilan de la phase d'installation du dispositif photographique. Rapport final. 41.
- BRGM/RP-69651-FR, 2020. Bouvier C., De Cathelineau, T. et Valentini, N. (2020). Suivi de la dynamique des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Développement et application des algorithmes. Rapport final.
- Grinsted, A., 2020. Tidal fitting toolbox (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19099-tidal-fitting-toolbox>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved August 10, 2020.
- Holland, K.T., Holman, R. a, Lippmann, T.C., Stanley, J., Plant, N., 1997. Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies - *Oceanic Engineering*, IEEE Journal of. IEEE J. Ocean. Eng. 22, 81–92. (Westercamp, 1989)
- Institut National de l'Information Géographique et Forestière. (2020, Novembre 27). Remonter le Temps. Récupéré sur Portail IGN: <https://remonterletemps.ign.fr/>

- Lippmann, T.C., Holman, R.A., 1989. Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. *J. Geophys. Res.* 94, 995. <https://doi.org/10.1029/JC094iC01p00995>
- MEEM, 2017. Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Programme d'actions.
- Météo-France, 2017. Mise à jour des études de durée de retour de houles et surcotes cycloniques.
- Pons J.C., 1978. Génèse et répartition des produits détritiques dans un contexte volcano-sédimentaire tropical : exemple de la Martinique et de ses bassins adjacents. Thèse doctorat d'Etat, université de Bordeaux I, 332 p.
- Shom, 2018. MNT bathymétrique de façade de la Guadeloupe et de la Martinique (Projet Homonim).
- Van Enckevort, I.M.J., Ruessink, B.G., 2001. Effect of hydrodynamics and bathymetry on video estimates of nearshore sandbar position. *J. Geophys. Res.* 106979, 969–16. <https://doi.org/10.1029/1999JC000167>
- Vos, K., Harley, M.D., Splinter, K.D., Simmons, J.A., Turner, I.L., 2019. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coast. Eng.* 150, 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>
- Westercamp, D. A. (1989). Carte géologique à 1/50 000 - Département de la Martinique - Martinique - Notice explicative. Orléans: Editions du BRGM.





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemain  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale de Martinique**

4, lot Miramar

Route Pointe des Nègres

97200 – Fort de France – Martinique

Tél. : 05 96 71 17 70