



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Saison cyclonique 2024 – Impact de la houle cyclonique de l’ouragan BERYL (1er juillet 2024) sur le littoral martiniquais

Rapport final

BRGM/RP-73793-FR

Version 1 du 2 juillet 2024

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

Nebel T., Nachbaur A., Bouvier C., Gressier A., Maldan F.

Vérificateur :

Nom : Francois Longueville

Fonction : Chef de projet géologue -
littoral

Date : 01/08/2024

Signature :

Approbateur :

Nom : Vittecoq Benoit

Fonction : Directeur Régional Martinique

Date : 02/08/2024

Signature :

Le système de management de la qualité et de l’environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



**PRÉFET
DE LA
MARTINIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Direction
de l’environnement,
de l’aménagement et du logement



OLIMAR

OBSERVATOIRE DE LA DYNAMIQUE
DU LITTORAL MARTINICAIS

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Martinique, BERYL, houle, cyclone, érosion, submersion, littoral, trait de côte, OLIMAR

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

Nebel T., Nachbaur A., Bouvier C., Gressier A., Maldan F. 2024. Saison cyclonique 2024 – Impact de la houle cyclonique de l'ouragan BERYL (1er juillet 2024) sur le littoral martiniquais. Rapport final V1. BRGM/RP-73793-FR, 110 p.

© BRGM, 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

Le 25 juin 2024, au sud des îles du Cap-Vert, apparaît la dépression tropicale *BERYL*, se déplaçant rapidement vers l'ouest et atteignant la catégorie 4 de Saffir-Simpson le 30 juin avant d'atteindre le sud des petites Antilles le lundi 1^{er} juillet 2024. *BERYL* a atteint la catégorie 5 le 2 juillet, passant dans la mer des Caraïbes en direction de la Jamaïque. C'est un phénomène inhabituel pour une tempête de ce type durant un mois de juin (en raison des températures de surface de la mer exceptionnellement élevées et de l'humidité importante de l'atmosphère). Surpassant l'ouragan *EMILY* de 2005 de 15 jours, il est considéré comme l'ouragan le plus précoce jamais enregistré. Bien que son passage soit situé à 200 kilomètres de la Martinique cet ouragan génère de fortes vagues qui se propagent vers le littoral martiniquais avec un fort potentiel érosif.

Un diagnostic post-événement a été réalisé sur plusieurs plages sableuses et communes impactées par le passage de cet ouragan de catégorie 5 *BERYL*.

Sans viser un inventaire exhaustif des impacts de cet ouragan, l'objectif est de dresser un panorama le plus complet possible des effets de ce type d'évènement sur le littoral martiniquais. Plusieurs moyens ont donc été déployés pour collecter dans un laps de temps court (entre le 1^{er} et le 5 juillet 2024) un maximum d'information : des observations de terrain et mesures topographiques, une collecte de témoignages oraux ainsi que l'exploitation des réseaux sociaux et de la presse. De plus les analyses des conditions météorologiques (données in-situ et modèle) et du réseau de photo ©Solarcam ont été intégrés afin de capitaliser un maximum de données.

Le BRGM s'est focalisé sur l'appréciation des principaux indicateurs qui accompagnent une houle cyclonique, c'est-à-dire :

- L'érosion du stock sédimentaire (de la plage) ;
- L'inondation ;
- L'accumulation de sable ;
- Des projections ou débris ;
- Le choc mécanique des vagues.

et ne s'est donc pas attardé sur les dommages éventuels occasionnés sur les différents enjeux. De manière à pouvoir ensuite comparer les impacts de ce cyclone avec d'autres événements passés ou à venir, deux indicateurs complémentaires ont été utilisés :

- un indicateur d'impact érosif ciblé sur la dynamique du stock sédimentaire
- un indicateur d'impact lié à la submersion

Il ressort de cette analyse que les impacts de la houle cyclonique engendrée par *BERYL* se sont concentrés sur les côtes Sud et la côte Caraïbe, depuis la commune du Prêcheur jusqu'à Sainte Anne. Il n'y aurait pas eu d'impact (ou d'ampleur limitée) sur la façade Atlantique même provoqué par les houles qui auraient précédé le cyclone.

Parmi tous les sites inspectés, les plages présentant le niveau d'impact érosif le plus marqué sont celles d'anse Cafard et de Dizac sur la commune du Diamant compte tenu de leur exposition aux trains de houles générés par la trajectoire de *BERYL*. Des levés topographiques spécifiques y ont été conduits pour préciser l'ampleur de cette érosion (cf. 5. Analyse géomorphologique sur trois plages caractéristiques) : il ressort un recul du trait de côte atteignant presque 20 m au centre de la plage Dizac. Ce site est le seul à présenter un niveau d'impact érosif qualifié de « sévère »,

soit le niveau le plus élevé avec des répercussions sur l'arrière plage et sur les biens et infrastructures situés dans cette zone. Ce secteur s'avère de ce fait particulièrement exposé à de futurs coups de mer, puisque cette érosion sévère s'est tenue en début de saison cyclonique et limite de ce fait fortement la capacité de résilience pour d'éventuels prochains cyclones.

Parmi les autres cellules sédimentaires touchées, on trouve celles de la façade Caraïbe. Sur la commune du Prêcheur, l'érosion a entraîné un recul de la position du trait de côte de plusieurs mètres voire une dizaine de mètres dans le quartier de la charmeuse associé à un abaissement du profil de plage. Cette érosion affecte des stocks sédimentaires constitués de galets sur lesquels sont installées de nombreuses infrastructures et habitations.

Ce bilan a permis de mettre en évidence que cette houle cyclonique n'est pas la plus impactante de ces trente dernières années : les houles cycloniques provoquées par l'ouragan Lenny (1999) et Omar (2008) semblent avoir eu des impacts plus importants en particulier sur la côte Caraïbe. Cependant, il se pourrait que les houles cycloniques engendrées par le passage de l'ouragan BERYL puissent s'avérer être un événement de référence pour la côte Sud et notamment pour les communes de Saint Anne, du Diamant, du Marin et de Sainte Luce.

Les informations collectées pendant BERYL constituent un nouveau jeu de données pour améliorer la compréhension et la quantification des phénomènes de reculs événementiels majeurs du trait de côte associés aux événements météorologiques de fortes intensités. Ainsi, les différentes informations collectées au cours de cet événement viendront alimenter le dispositif de surveillance « érosion » en cours de déploiement et ainsi co-construire une base de données collaborative permettant d'archiver et quantifier les impacts des événements extrêmes à venir.

Sommaire

1. Cadre et objectif de l'étude	10
2. Caractérisation du phénomène cyclonique	11
2.1. Chronologie.....	11
2.2. Conditions météorologiques en Martinique.....	13
2.3. Houle cyclonique.....	14
2.4. Niveaux d'eau et surcote associée à l'évènement.....	19
3. Méthodologie.....	20
3.1. Moyens déployés	20
3.1.1. <i>Observations visuelles et collecte de témoignages</i>	20
3.1.2. <i>Mesures topographiques</i>	20
3.1.3. <i>Suivi par imagerie photo</i>	22
3.2. Indicateur d'impacts	24
3.2.1. <i>Indicateur d'impact érosif</i>	24
3.2.2. <i>Indicateur d'impact lié à la submersion</i>	25
4. Observations	27
4.1. Cote Atlantique.....	27
4.2. Façade Sud.....	29
4.2.1. <i>Commune de Sainte Anne</i>	29
4.2.2. <i>Commune de Rivière-Pilote</i>	32
4.2.3. <i>Commune de Sainte-Luce</i>	33
4.2.4. <i>Sur la commune du Diamant</i>	33
4.3. Façade CARAÏBE	35
4.3.1. <i>Commune des Anses-d'Arlet</i>	35
4.3.2. <i>Commune des Trois-Ilets</i>	38
4.3.3. <i>Commune de Fort-de-France</i>	38
4.3.4. <i>Commune de Schœlcher</i>	40
4.3.5. <i>Commune de Case-Pilote</i>	42
4.3.6. <i>Commune du Carbet</i>	44
4.3.7. <i>Commune du Prêcheur</i>	46
5. Analyse géomorphologique sur trois plages caractéristiques.....	48
5.1. Observations issues des levés topographiques.....	48
5.1.1. <i>Façade Sud-Caraïbe : plages du Diamant (anse Cafard et plage du Diamant)</i> ...	48
5.1.2. <i>Façade Caraïbe : plage du Coin au Carbet</i>	53
5.2. Observations issues du Suivi par imagerie photo	59
5.2.1. <i>Façade Caraïbe</i>	59
6. Synthèse des impacts provoqués par la houle cyclonique	60
6.1. Impacts érosifs.....	60
6.2. Impacts Submersifs.....	61
6.3. Comparaison avec d'autres houles cycloniques	63
7. Conclusion	67
8. Références.....	69

Liste des figures

- Figure 1 : Trajectoire du cyclone BERYL (Preliminary Best Track, <https://www.nhc.noaa.gov/>). Les points colorés illustrent la position du système et la pression atmosphérique associée. Les chiffres allant de 1 à 5 inscrits à l'intérieur des cercles indiquent la catégorie du cyclone (échelle de Saffir-Simpson) tandis que les vitesses de vent estimés sont présentées en nœud (kt). Fond de carte : en haut - bathymétrie (<https://www.gebco.net/>) ; en bas - Image satellite de l'évènement capturé le 1er juillet 2024 (source : Nasa/GSFC/EOSDIS/Terra MODIS, NHC) et heures de passage du système. 11
- Figure 2 : Chronologie des effets de BERYL (non-exhaustif) observés (issue des images solarcam et des témoignages recueillies) à l'échelle des communes de la Martinique. 12
- Figure 3 : localisation des différentes stations permettant de mesurer les conditions météorologiques (Sm, station météo), les caractéristiques de vagues (Sw, houlographe) et les hauteurs de niveaux d'eau (St, marégraphe). La bouée houlographe Sw3 est située dans le canal de Sainte-Lucie à environ 15 km au large. 13
- Figure 4 : évolution temporelle (heure locale) de la pression atmosphérique (P, en hPa) des vitesses moyennes (U10, en m/s) et de la direction du vent (Theta, en °) mesurée aux stations du Lamentin et de la Trinité (<http://donneespubliques.meteofrance.fr/>). 14
- Figure 5 : Cartographie des hauteurs significatives (Hs) et direction (vecteurs) des vagues sur la Martinique entre le 30 juin à 18h et le 2 juillet à 12h (heure locale). Les données illustrées proviennent des prévisions de vagues issues du modèle WAVEWATCH-III pour la zone Antilles (WW3-ANTILLES-UG). Plus d'informations sur <https://marc.ifremer.fr/resultats/vagues>. 15
- Figure 6 : Cartographie des hauteurs significatives (Hs) et direction (vecteurs) des vagues sur la Martinique le 2 juillet à 3h (heure locale). Les données illustrées proviennent des prévisions de vagues issues du modèle WAVEWATCH-III pour la zone Antilles (WW3-ANTILLES-UG). Plus d'informations sur <https://marc.ifremer.fr/resultats/vagues>. Ces données projetées sont limitées quant à la prévision lors d'évènement rapides et intenses, elles sont présentées à titre indicatif mais sous-estiment les paramètres énergétiques de l'évènement. L'ellipse noire représente la zone sur la façade caraïbe touchée par les vagues avec une direction induite par un phénomène de réfraction. 17
- Figure 7 : Hauteur significatives (Hs), maximales (Hmax), périodes (Tp) et directions pics (Dp) des vagues mesurées à la bouée houlographes de Basse Pointe. Seule bouée disponible lors du passage de BERYL, elle indique principalement que la façade nord atlantique a été préservée du passage de BERYL par sa position isolée à la trajectoire de l'ouragan. Les données de période ne sont pas disponibles durant le mois de juillet à l'écriture de ce rapport. 18
- Figure 8 : (en haut) évolution temporelle des niveaux d'eau aux stations marégraphiques de Fort-de-France (courbe noire), au Robert (courbe pointillée). (En bas) surcote calculée aux deux stations (différence entre la hauteur d'eau mesurée et la hauteur d'eau prédite par le modèle TPXO9). 19
- Figure 9 : (à gauche) localisation des profils de référence définis par l'observatoire Olimar sur la plage de Dizac et de l'anse cafard au Diamant. (A droite) réalisation des mesures topographiques sur la grande plage des Salines le 2 juillet 2024 après le passage de la tempête tropicale BERYL. 21
- Figure 10 : Localisation des plages ayant fait l'objet de mesures topographiques réalisées avant et après le passage du cyclone BERYL. 22
- Figure 11 : Localisation des sites équipés d'un dispositif ©Solarcam et qui ont fait l'objet d'une analyse suite au passage du cyclone BERYL. 23

Figure 12 : échelle d’impact adaptée aux plages sableuses du littoral martiniquais et construite sur la base des travaux de Leaman et al. (2021).	25
Figure 13 : Séquence photo du réseau de prise de vue photo ©Solarcam illustrant la situation « avant l’évènement » sur a1). la plage de Petite Anse Macabou au Vauclin, b1). Pointe Savane au Robert et c1). Frégate Est au François. Les situations « après l’évènement » sont illustrées par les figures a3), b3) et c3) respectivement.	28
Figure 14 : Impact de la houle et dépôt de sargasses sur le centre-bourg de Sainte-Anne, photographie durant la matinée 2 juillet 2024 © BRGM	29
Figure 15 : Destruction de la crêperie située sur le front de mer du bourg, photographie avant (© crêperie Ti Cosy) et après datant du 2 juillet 2024 © BRGM.....	30
Figure 16 : Erosion sur la portion nord-ouest de la plage des salines avec : (a) Talus d’érosion et (b) chutes de cocotiers (photographie du 02/07/24 ©BRGM).	31
Figure 17 : Erosion de la plage des Salines (Photo du 01/07/24 ©Bondamajak TV).....	31
Figure 18 : Dépôts de Sargasses sur la partie sud-est de la grande plage des Salines (photographie post-tempête 02/07/24 © BRGM)	32
Figure 19 : Ensablement au niveau de la place des restaurateurs (02/07/24, ©M-F Calmo, la1ere)	33
Figure 20 : Erosion constaté et dépôts de sargasses sur la plage et l’arrière-plage de l’anse cafard (photographie post-tempête 02/07/24 © BRGM)	34
Figure 21 : Projection et accumulation de sédiments en haut de plage (au-dessus de la digue) et bas de plage submergée au lendemain du passage de BERYL à l’extrémité nord de la plage de l’Anse d’Arlet (WP 142, 02/07/2024 © BRGM).....	36
Figure 22 : Projection et accumulation sédimentaire au sud de la plage de Grande Anse (photographie du 02/07/2024 © BRGM)	37
Figure 23 : Projection sur le ponton en bois de l’hôtel Bakoua (photographie 02/07/24 ©BRGM)	38
Figure 24 : Dépôts vaseux et inondation au niveau des zones basses de l’avenue de la liberté (© France-Antilles)	39
Figure 25 : Aperçu du jet de rive sur a). la plage d’anse Madame (WP168) et b). la plage du bourg (WP172) le lundi 1er juillet à 18h donc avant que l’évènement ne soit à son maximum (© BRGM)	40
Figure 26 : Déplacement du sable sur le haut de plage de la plage du bourg recouvrant l’intégralité de la route du bord de mer (02/07/24, © BRGM).	41
Figure 27 : Aperçu des effets de BERYL dans le bourg pendant l’évènement (Photographie 01/07/24 © BRGM).....	42
Figure 28 : Vue vers le bourg depuis la digue de Case Pilote, dégâts visibles provoqués par les vagues les plus énergétiques (WP206, photographie 02/07/24 © BRGM)	43
Figure 29 : Formation d’un talus d’érosion au sud du ponton sur la plage du Carbet (Photographie 01/07/24 18h30)	45
Figure 30 : Talus d’érosion au nord du ponton (Wahoo Café) (Photographie 03/07/24 © BRGM)	45
Figure 31 : Deux habitations fortement endommagées dans le quartier de la charmeuse par l’érosion de la plage (WP 246 et 245 de l’annexe 2 © BRGM).....	46

Figure 32 : Projection de galets et de blocs observées au niveau d’une terrasse sur le littoral au sud du pont du prêcheur (09/07/24 © BRGM) (WP 258 de l’annexe 2) 47

Figure 33 : Localisation des profils de référence mesurés avant et après le passage de BERYL sur la plage de Dizac (profils rouge) et de l’anse Cafard (profils violets). Fond de carte : orthophoto 2022 (IGN). 48

Figure 34 : Variation relative (en m) de la position du trait de côte entre le 27 juin et le 8 juillet 2024 avec (a) : zoom sur la plage de l’anse Cafard et (b) : zoom sur le parking au niveau du profil P3. 49

Figure 35 : Evolution des profils topographiques de référence de la plage de l’anse cafard avant (tirets) / après (trait continu) BERYL en fonction de la distance depuis le haut de plage. Les lignes pointillés situent le niveau d’eau atteint à mi-marée et à marée haute (plus haute mer astronomique). 50

Figure 36 : Évolution des profils topographiques de référence de la plage de Dizac avant (tirets) / après (trait continu) BERYL en fonction de la distance depuis le haut de plage. Les lignes pointillés situent le niveau d’eau atteint à mi-marée et à marée haute (plus haute mer astronomique). 51

Figure 37 : Bilan de l’évolution morphologique des cellules sédimentaires de la commune du Diamant : Plage de Dizac et plage de l’anse Cafard, les forçages hydrodynamiques sont représentés avec des flèches en fonction de leur direction. 52

Figure 38 : Localisation des profils de référence mesurés avant et après le passage de BERYL sur la plage du Coin au Carbet. Fond de carte : orthophoto 2022 (IGN). 53

Figure 39 : Variation relative (en m) de la position du trait de côte entre le 25 juin et le 4 juillet 2024 avec (a) : zoom sur le profil P3 avec la formation d’un talus d’érosion (post-tempête) et (b) : zoom sur la partie Est de l’embouchure du Carbet et de l’espace culturel et associatif de la ville au niveau du profil P3. 54

Figure 40 : Evolution des profils topographiques de référence de la plage du Coin avant (tirets) / après (trait continu) BERYL en fonction de la distance depuis le haut de plage. Les lignes pointillés situent le niveau d’eau atteint à mi-marée et à marée haute (plus haute mer astronomique). 56

Figure 41 : Bilan de l’évolution morphologique de la plage du coin situé dans la commune du Carbet, la direction et l’intensité des houles sont évalués à dire d’expert via les vidéos et photos du lundi 1^{er} juillet. 57

Figure 42 : Photographies avant / après le passage de la tempête BERYL avec (a) photographie du 1^{er} juillet à 18h30 et (b) photographie du levé post-tempête du 4 juillet. 58

Figure 43 : Images issues de la solarcam sur la plage du carbet avec évolution de la position du trait de côte avant (01/07/24) et après (03/07/24) BERYL. En bleu le trait de côte observé le 1^{er} juillet avant l’événement et en rouge le trait de côte post-événement du 3 juillet, les pointillés rouges représentent une zone marquée par un affaissement de la plage. 59

Figure 44 : Images issues de la solarcam de la commune du Diaman avec : (a) Image du 30 juin à 10h30 (avant tempête), (b) image du 1^{er} juillet à 13h30 (pendant la tempête) et (c) image du mardi 2 juillet à 10h30 (post-tempête). 59

Figure 45 : Cartographie synthétique des impacts érosifs provoqués par les houles cycloniques associées au passage du cyclone BERYL du 1^{er} juillet 2024. L’échelle d’impact est décrite dans le § 3.2.2 61

Figure 46 : Cartographie synthétique des impacts submersifs provoqués par les houles cycloniques associés au passage du cyclone BERYL du 1 ^{er} juillet 2024. L'échelle d'impact associée est décrite dans le § 3.2.1.3.2.2.....	62
Figure 47 : Submersion prolongée de l'arrière plage de l'Anse Figuier, encore sous eaux le lendemain matin (©Facebook mairie de Rivière Pilote)	63
Figure 48 : Comparaison de l'ampleur de la submersion du haut de plage sur le front de mer du bourg de Case Pilote.....	65
Figure 49 : Comparaison de l'ampleur de la submersion du haut de plage sur la partie nord de la plage d'Anse Madame entre les houles cycloniques provoqués par le passage de a). Maria et b). BERYL.....	66

Liste des annexes

Annexe 1	Catalogue photo (façade Sud).....	70
Annexe 2	Catalogue photo (façade Caraïbe)	82
Annexe 3	Anse Cafard : Evolution morphologique visuel	102
Annexe 4	Plage Dizac : Evolution morphologique visuel.....	103
Annexe 5	Plage du Coin : Evolution morphologique visuel.....	104
Annexe 6	Bulletin tempête du 28/06/24.....	105

1. Cadre et objectif de l'étude

Le 28 juin 2024, une dépression tropicale se renforce dans l'Océan Atlantique à environ 2 000 km au large des petites Antilles dans un environnement exceptionnellement favorable à la formation de cyclones pour la fin juin (<https://www.nhc.noaa.gov/>). Le système entame alors une période d'intensification rapide et la dépression se renforce très brutalement (quelques heures) le 29 juin pour devenir la tempête tropicale BERYL puis un ouragan en fin de journée (Figure 1). Les observations (<https://www.nhc.noaa.gov/>) indiquent que le système se transforme en un ouragan majeur le 30 juin et poursuit son renforcement pour atteindre le stade de catégorie 4 (échelle de Saffir-Simpson) avec des vents de 113 kt (215 km/h). BERYL montre dans les heures qui suivent des variations d'intensité mais fini par se renforcer à nouveau et poursuit sa trajectoire vers le Sud des Petites Antilles avec des vents de 130 kt (240 km/h). Le 1^{er} juillet, BERYL s'est encore intensifié pour devenir un ouragan de catégorie 5 et atteint un pic d'intensité au cours de la journée avec des vents de 270 km/h. Tout au long de son déplacement vers le nord – nord-ouest en direction de la Jamaïque, l'ouragan BERYL va provoquer de fortes houles en direction de la Martinique. Ces houles vont impacter le littoral avec un fort potentiel érosif

Dans le cadre du suivi réalisé par l'Observatoire de la dynamique du littoral Martiniquais (Olimar, co-piloté par la Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement et le BRGM), un diagnostic post-événement a été réalisé sur plusieurs plages sableuses et communes impactées par le passage de l'ouragan. Des observations et des mesures avant et après l'évènement ont ainsi été conduites sur différents secteurs de manière à apprécier précisément la dynamique événementielle de ces environnements suite à un phénomène cyclonique de forte intensité.

Les investigations de terrain menées par le BRGM les jours qui ont suivis le passage de BERYL (entre le 1^{er} et le 8 juillet 2024) comprennent : des mesures topographiques sur 2 communes possédant des plages sableuses (Le Carbet et le Diamant), la collecte de témoignages et un inventaire photographique des principaux impacts observés sur le littoral. Afin de compléter ces observations, les données collectées par le dispositif de suivi par imagerie photo déployé (Solarcam) dans le cadre de l'observatoire Olimar ont également été utilisées sur plusieurs cellules sédimentaires ainsi que des photographies issues de nos partenaires, de la presse et des réseaux sociaux.

Les travaux présentés dans ce rapport ont pour objectifs de :

- décrire et analyser l'ensemble des données météorologiques, hydrodynamiques et morphologiques collectées relatives au cyclone BERYL sur la Martinique ;
- dresser un bilan des principaux impacts morphologiques générés par la houle (submersions marines, choc mécanique des vagues ou projection de matériaux) ;
- synthétiser les impacts de BERYL sur le territoire martiniquais.

En effet, dans la continuité des études déjà menées par le passé pour différents épisodes cycloniques ou de fortes houles (e.g. (rapport BRGM/RP-67298 2017), cyclone MARIA ;(rapport BRGM/RP-55954-FR 2008), cyclone DEAN ; rapport BRGM/RP-73011-FR, 2023, cyclone BRET), les observations collectées après un événement de ce type constituent un jeu de données pour améliorer la compréhension et la quantification des impacts et des aléas littoraux associés aux événements extrêmes en Martinique.

2. Caractérisation du phénomène cyclonique

2.1. CHRONOLOGIE

La deuxième dépression tropicale de l'année prend naissance dans l'océan Atlantique au large des côtes africaines le 28 juin 2024 et se déplace vers l'ouest en direction de l'arc des Petites Antilles (Figure 1). Le système se renforce progressivement et devient rapidement l'ouragan BERYL en fin de journée (Figure 1). Le système poursuit son renforcement pour devenir un ouragan de catégorie 5 le 1^{er} juillet. Situé à une distance de 230 kilomètres au sud de la Martinique, le centre du système traverse l'île de Carriacou (Grenade) dans la journée du 1er juin. L'ouragan poursuit son déplacement vers l'ouest-nord-ouest en direction de la Jamaïque dans les jours qui suivent. Tout au long de son parcours, le cyclone de catégorie 5 génère de fortes vagues qui se propagent vers le littoral la côte Caraïbe et Sud-Caraïbe de la Martinique avec un fort potentiel érosif et entraînant des impacts significatifs sur les secteurs les plus exposés.

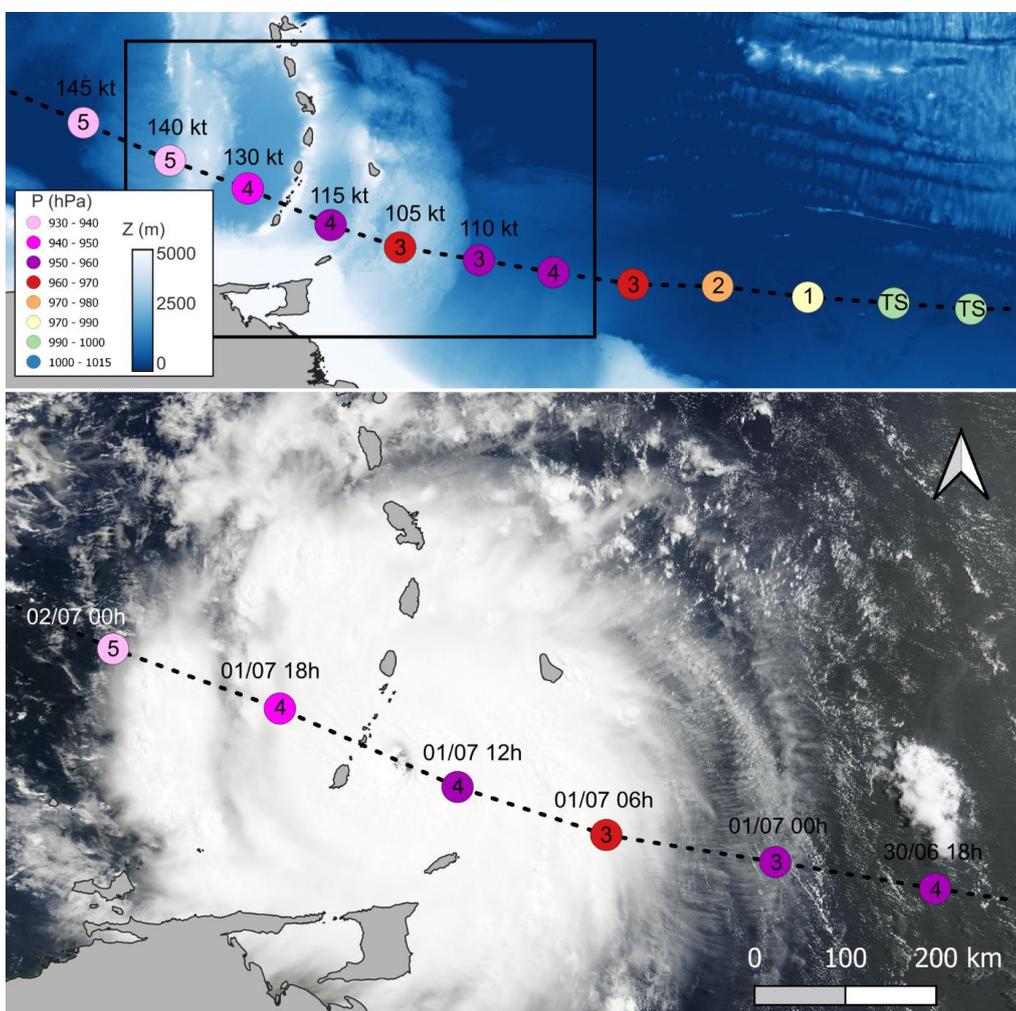


Figure 1 : Trajectoire du cyclone BERYL (Preliminary Best Track, <https://www.nhc.noaa.gov/>). Les points colorés illustrent la position du système et la pression atmosphérique associée. Les chiffres allant de 1 à 5 inscrits à l'intérieur des cercles indiquent la catégorie du cyclone (échelle de Saffir-Simpson) tandis que les vitesses de vent estimés sont présentées en nœud (kt). Fond de carte : en haut - bathymétrie (<https://www.gebco.net/>) ; en bas - Image satellite de l'évènement capturé le 1er juillet 2024 (source : Nasa/GSFC/EOSDIS/Terra MODIS, NHC) et heures de passage du système.

Les effets de BERYL se sont d'abord fait sentir sur la côte Atlantique. Sur les prises de vue du réseau Olimar, on perçoit en effet de l'agitation sur les plages du Robert dès le dimanche 30 juin vers 16h30, agitation qui pourrait être l'effet du cyclone avant qu'il ne traverse l'archipel des Grenadines. Cette agitation est observée au quartier Fregate Est (commune du François) par des échouages quantitatifs de sargasses. Sur la façade Caraïbe et la presqu'île des Trois Ilets, les conditions de mer pendant la matinée du 1^{er} juillet 2024 sont relativement calmes et n'entraînent pas de surverses (Figure 2).

Le cyclone recoupe ensuite l'axe des Petites Antilles (Figure 1) le 1^{er} juillet entre 12h et 18h entraînant des effets plus conséquents en Martinique. C'est en début de soirée que l'intensité des vagues va évoluer sur les façades Sud et Caraïbes. La synthèse des témoignages nous permet de reconstituer la chronologie des événements (Figure 2) :

- A Sainte Luce, les premières houles se manifestent vers 16h. A 22h30, une deuxième phase d'houle d'ouest énergétique est évoquée ;
- Entre les communes de Schœlcher et de Case pilote, vers 18h30, les plus hautes vagues atteignent déjà 2,5 à 3,5 m. La houle s'est intensifiée après dans la soirée et ceci jusqu'au 2 juillet ;
- Sur Fort de France, le 1^{er} juillet vers 20h, la mer a commencé à se déchaîner ;
- Sur la commune de Sainte Anne, d'après les témoignages recueillis sur place, des vagues puissantes avec phénomène de submersion sont arrivés dans la soirée autour de 22h ;
- Sur la commune des Anses d'Arlet (Petite Anse), des submersions par paquet de mer sont filmées à 22h au niveau de la digue

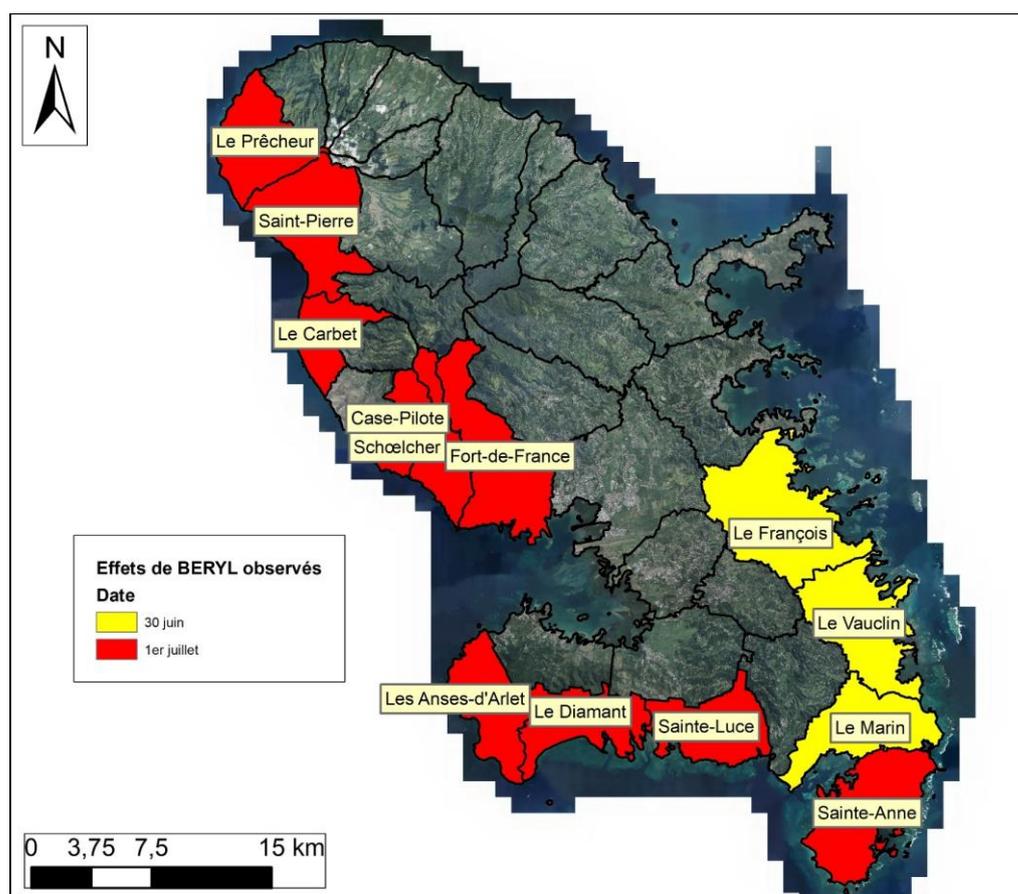


Figure 2 : Chronologie des effets de BERYL (non-exhaustif) observés (issue des images solarcam et des témoignages recueillies) à l'échelle des communes de la Martinique.

2.2. CONDITIONS METEOROLOGIQUES EN MARTINIQUE

Des instruments de mesure permanents, tels que des stations météorologiques, des houlographes et des marégraphes installés sur le territoire (Figure 3) permettent de suivre la chronologie de la tempête tropicale et surtout de mieux évaluer son intensité en Martinique et les phénomènes hydrodynamiques qui résultent de son passage (e.g. houle, surcote). Parmi les différents paramètres évalués, les stations météorologiques du Lamentin et de la Trinité (Sm, Figure 3) permettent de mesurer la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent.

L'évolution de la pression atmosphérique mesurée aux stations de la Trinité et du Lamentin montre des variations très similaires tout au long de la période analysée du 25 juin au 5 juillet (P, Figure 4). On observe des oscillations journalières (± 1 hPa) avec une augmentation de la pression en matinée (5h-11h) et en soirée (18h-23h) lorsque la température diminue. La pression baisse en général l'après-midi lorsque l'atmosphère se réchauffe. On observe également une légère baisse (~ 4 hPa) de la pression atmosphérique entre le 30 juin et le 2 juillet sur les deux stations de mesures (P, Figure 4), liée au passage de la tempête BERYL. La pression atmosphérique atteint une valeur minimale le 1 juillet à 17 h 30 avec 1010 hPa, c'est à ce moment que BERYL circulait au plus proche du littoral martiniquais. La pression retrouve des valeurs légèrement plus élevées dès le lendemain alors que la tempête tropicale poursuit son déplacement vers l'ouest.

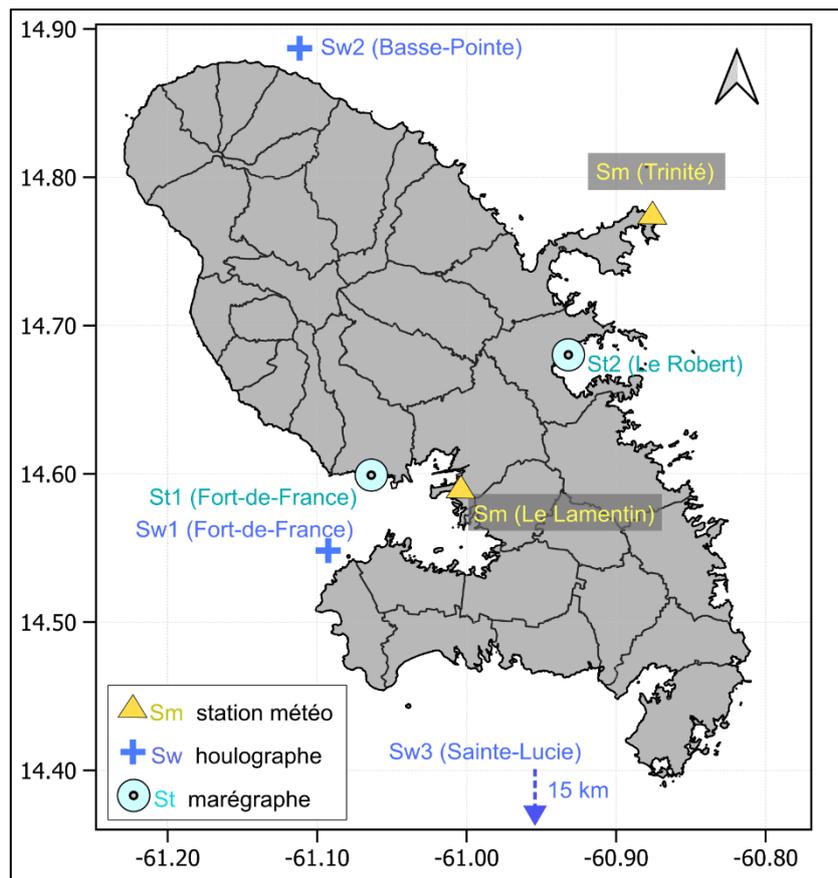


Figure 3 : localisation des différentes stations permettant de mesurer les conditions météorologiques (Sm, station météo), les caractéristiques de vagues (Sw, houlographe) et les hauteurs de niveaux d'eau (St, marégraphe). La bouée houlographe Sw3 est située dans le canal de Sainte-Lucie à environ 15 km au large.

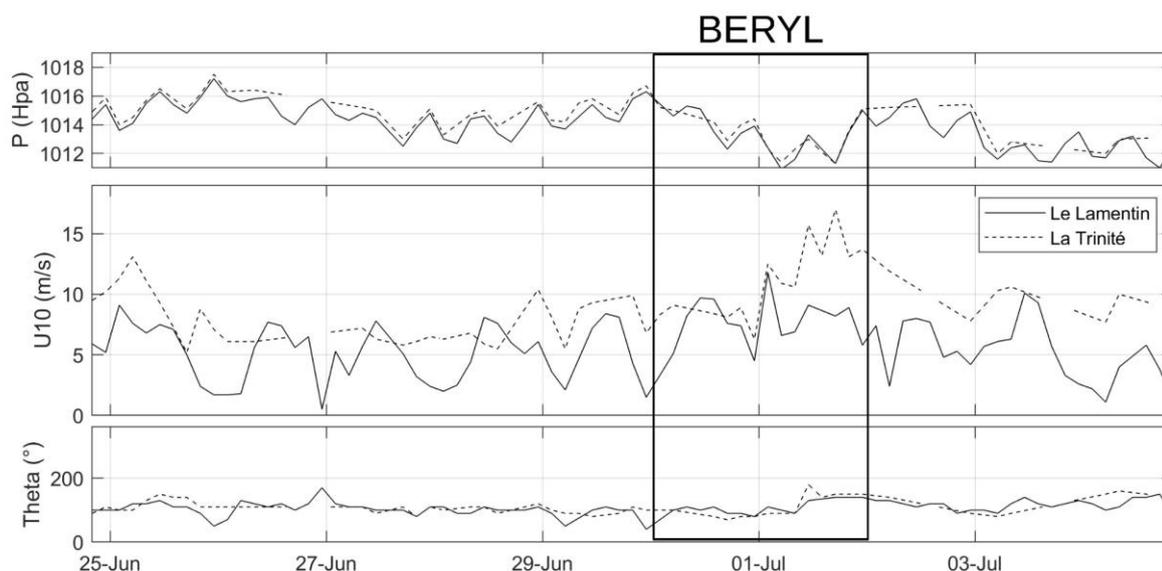


Figure 4 : évolution temporelle (heure locale) de la pression atmosphérique (P , en hPa) des vitesses moyennes (U_{10} , en m/s) et de la direction du vent (Θ , en $^{\circ}$) mesurée aux stations du Lamentin et de la Trinité (<http://donneespubliques.meteofrance.fr/>).

Au cours de l'évènement, les vitesses moyennes de vent enregistrées (U_{10} , Figure 4) atteignent des valeurs maximales de 12 m/s (~ 43 km/h) et 17 m/s (~ 61 km/h) aux stations du Lamentin et de la Trinité respectivement. A titre d'indication, les vents moyens enregistrés sur les stations de la Martinique au pic de l'évènement sont ceux d'une dépression tropicale (système au sein duquel les vents maximums de surface moyennés sur 10 minutes sont compris entre 63 à 87 km/h) et ne sont pas considérés comme des vents de tempêtes. Toutefois, d'après Météo France©, des rafales de vents de 100 km/h et de 119 km/h ont été enregistré à Tartane et au Robert respectivement. Les vents les plus violents, classés dans la catégorie ouragan ont touchés les îles au sud de l'arc antillais, comme des îles de la Grenade avec des vents de plus de 200 km.

2.3. HOULE CYCLONIQUE

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 large de la Baie de Fort-de-France par 55 m de fond (Sw1, Figure 3). La seconde est positionnée au nord de la Martinique dans le secteur de Basse Pointe par 51 m de fond (Sw2, Figure 3) tandis que la troisième se situe dans le canal de Sainte Lucie à environ 15 km au sud de la Martinique par 86 m de fond (Sw3, Figure 3). Malheureusement, pour des raisons techniques, les houlographes de Fort-de-France et de Sainte Lucie (Sw1 et Sw3) ne sont pas fonctionnels et n'ont pas collecté de données pendant le passage de la tempête *BERYL*. Seul le houlographe de Basse-Pointe (Sw2) a pu être utilisé pour caractériser la houle sur la façade nord (Figure 7).

Pour cette bouée, les caractéristiques des vagues sont mesurées en temps réel toutes les 30 min. Afin d'offrir un diagnostic plus complet de l'état de la mer pendant le passage de *BERYL*, les données issues du modèle de prévision océanographiques côtières (plateformes MARC-LOPS, <https://marc.ifremer.fr/>) ont également été utilisées (WAVEWATCH-III pour la zone Antilles, WW3-ANTILLES-UG). Il faut cependant rappeler que ce modèle est utilisé faute de mesures in situ mais qu'il présente de fortes limites pour représenter les évènements cycloniques.

Les simulations réalisées montrent une augmentation rapide de la hauteur significative des vagues dans la journée du 1^{er} juillet (Figure 5). Ainsi le 1^{er} juillet, à partir de 17h30 (heure locale), les hauteurs significatives des vagues atteignent des valeurs maximales qui dépassent 6 m au large de la façade sud Atlantique. Au pic de l'évènement (1^{er} juillet à 18h, Figure 5), sur l'ensemble de la façade sud (Atlantique et Caraïbe), les vagues proviennent du secteur est / sud-est et se propagent du large vers la côte en voyant parfois selon les secteurs une partie de l'énergie se dissiper par déferlement bathymétrique à la rencontre de récifs. Ainsi sur la façade Sud-Atlantique (entre Trinité et Sainte-Anne), l'énergie des vagues est atténuée par la présence de ces hauts fonds (Figure 5). Au contraire, la façade Nord-Atlantique semble totalement épargnée des houles à forte énergie en raison de leur provenance sud.

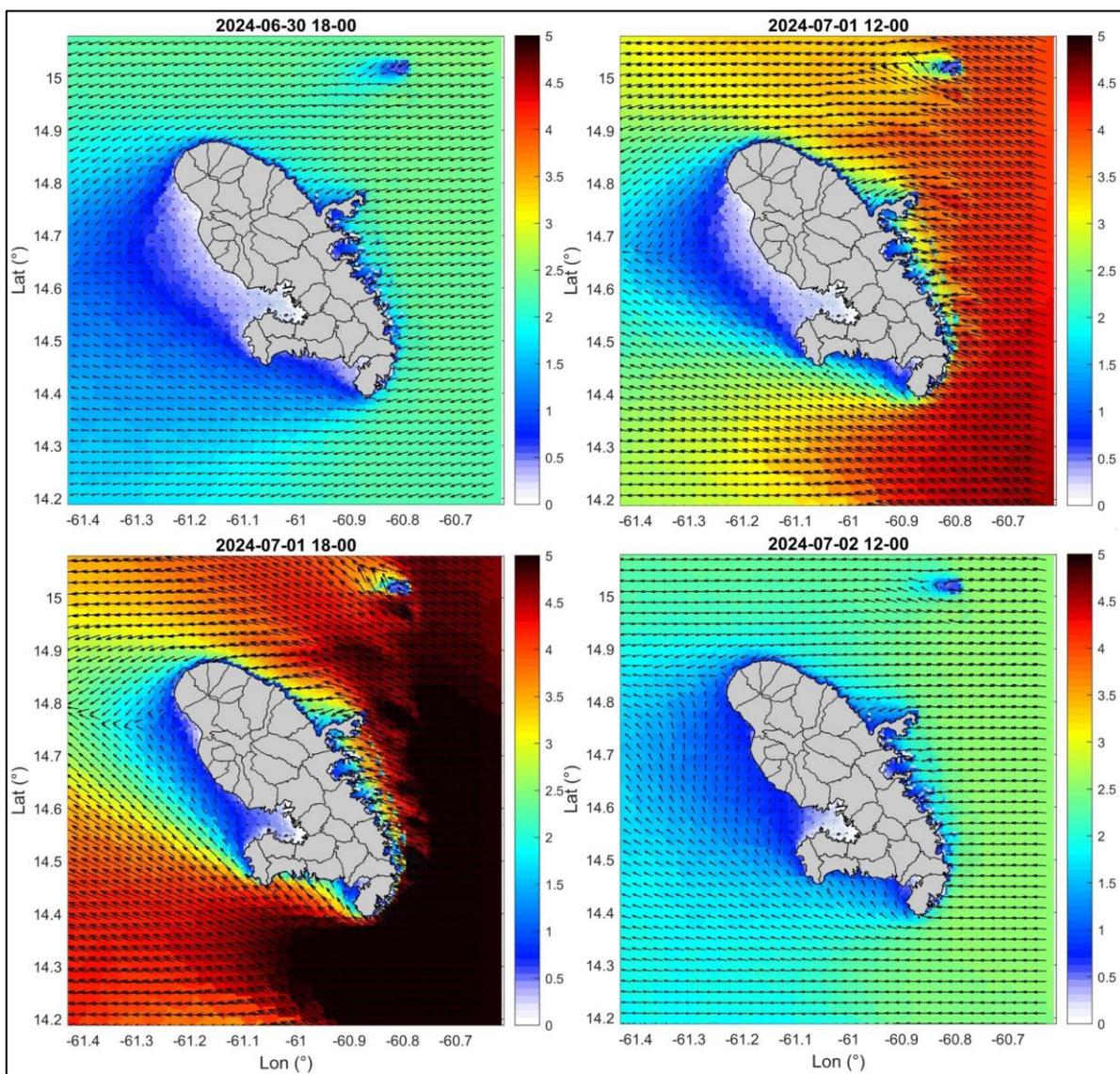


Figure 5 : Cartographie des hauteurs significatives (H_s) et direction (vecteurs) des vagues sur la Martinique entre le 30 juin à 18h et le 2 juillet à 12h (heure locale). Les données illustrées proviennent des prévisions de vagues issues du modèle WAVEWATCH-III pour la zone Antilles (WW3-ANTILLES-UG). Plus d'informations sur <https://marc.ifremer.fr/resultats/vagues>.

La façade Sud voit les vagues réfracter autour de la pointe Sud de l'île, à partir de la pointe des Salines (Sainte-Anne) où la houle parvient à atteindre la côte avec une énergie qui reste importante en particulier dans le secteur ouest du Diamant ($H_s > 3$ m au pic de l'évènement,

Figure 5). La façade Sud et la façade Caraïbe restent particulièrement touchées par cet épisode de forte houle. Sur ces façades, les vagues atteignent la côte sous le vent durant la soirée du 1^{er} juillet et pendant le pic de l'évènement. L'absence de hauts fonds et de récifs sur ces secteurs explique la forte énergie constatée au niveau des littoraux malgré le fait que les hauteurs significatives soient relativement faibles sur les données issues du modèle. On note toutefois, dans la nuit du lundi 1^{er} au mardi 2 juillet des orientations de houles à l'encontre de la côte Caraïbe (orienté sud – sud-ouest) ($H_s < 2$ m,

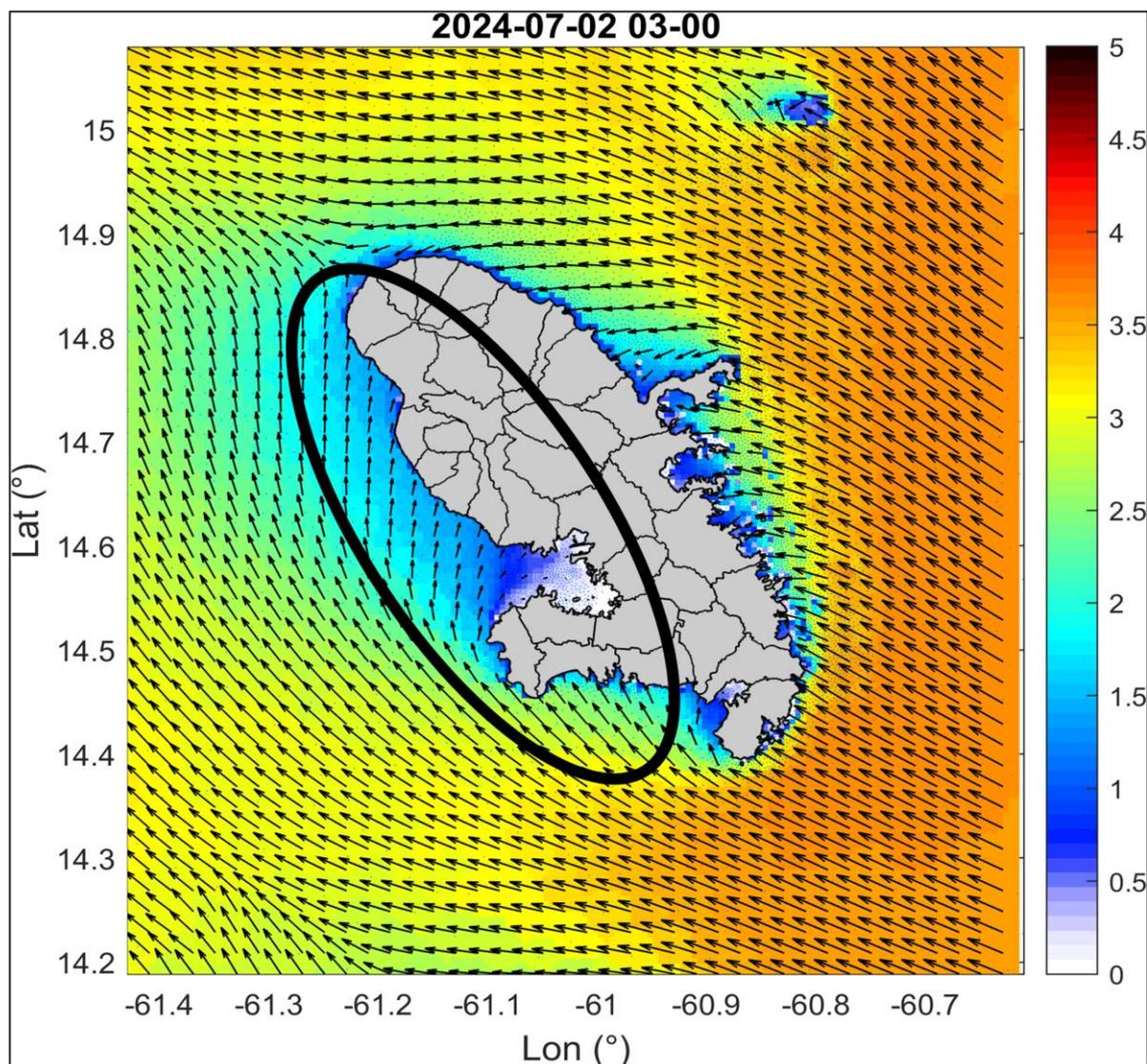


Figure 6). On suppose que les vagues ont touché les secteurs de la façade Caraïbe (dont les plages du nord-Caraïbe) via un phénomène de réfraction, qui a évolué en fonction de la direction et de la hauteur des vagues au fur et à mesure de la trajectoire de *BERYL* et de l'évolution de son intensité. Il est à noter que les données du modèle, de manière générale, sous-estiment les conditions énergétiques de la tempête *BERYL*, en particulier sur la façade Caraïbe.

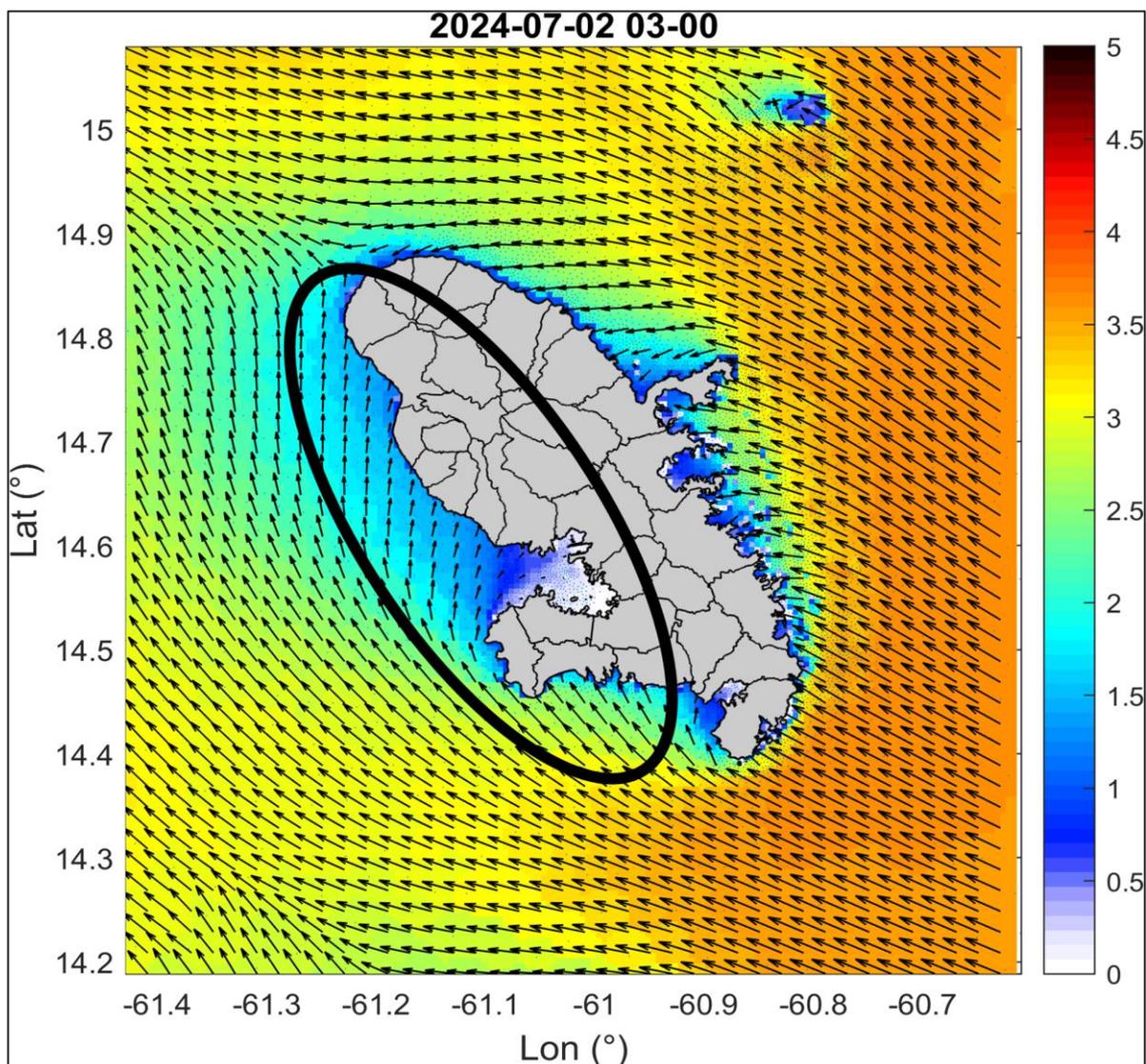


Figure 6 : Cartographie des hauteurs significatives (H_s) et direction (vecteurs) des vagues sur la Martinique le 2 juillet à 3h (heure locale). Les données illustrées proviennent des prévisions de vagues issues du modèle WAVEWATCH-III pour la zone Antilles (WW3-ANTILLES-UG). Plus d'informations sur <https://marc.ifremer.fr/resultats/vagues>. Ces données projetées sont limitées quant à la prévision lors d'événement rapides et intenses, elles sont présentées à titre indicatif mais sous-estiment les paramètres énergétiques de l'événement. L'ellipse noire représente la zone sur la façade caraïbe touchée par les vagues avec une direction induite par un phénomène de réfraction.

Les conditions de houles pour la façade Nord de la Martinique sont représentées par les mesures de la bouée houlographe de Basse-Pointe. Les hauteurs significatives des vagues mesurées pendant l'événement BERYL ne dépassent pas 2,5 m et témoignent de conditions cycloniques limitées sur cette façade de l'île (Figure 7).

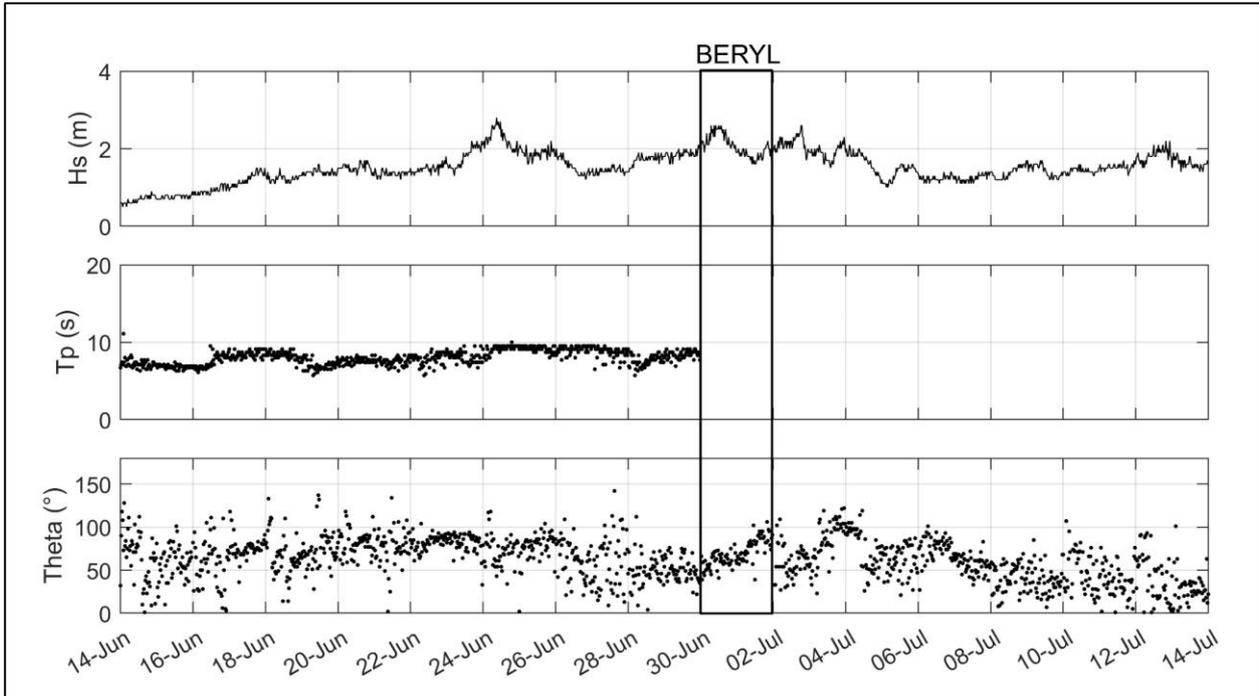


Figure 7 : Hauteur significatives (H_s), maximales (H_{max}), périodes (T_p) et directions pics (D_p) des vagues mesurées à la bouée houlographes de Basse Pointe. Seule bouée disponible lors du passage de BERYL, elle indique principalement que la façade nord atlantique a été préservée du passage de BERYL par sa position isolée à la trajectoire de l'ouragan. Les données de période ne sont pas disponibles durant le mois de juillet à l'écriture de ce rapport.

2.4. NIVEAUX D'EAU ET SURCOTE ASSOCIEE A L'EVENEMENT

Les mesures de niveau d'eau disponibles sont collectées par les marégraphes de Fort-de-France (St1, Figure 3) et du Robert (St2, Figure 3) issus du réseau de référence REFMAR ([Missions & objectifs | Réseaux marégraphiques français](#)). La surcote associée à l'évènement a été évaluée aux deux stations en calculant la différence entre la hauteur d'eau observée et la hauteur d'eau prédite par le modèle global de marée TPXO9 ([www.tpxo.net](#)). La Figure 8 présente l'évolution temporelle des niveaux d'eau mesurés à Fort-de-France (traits pleins) et au Robert (traits pointillés).

Des écarts de niveaux d'eau (dz, Figure 8) relativement faibles ($dz < 0.12$ m) sont visibles aux deux stations de mesure et montrent des oscillations journalières, probablement reliés aux variations de pression décrites section 2.2. On note toutefois une légère surcote au marégraphe de Fort-de-France (~ 20 cm) induite par le passage de *BERYL* dans la soirée du 1^{er} au 2 juillet. Aucune surcote significative n'a pu être identifiée au marégraphe Le Robert. La surcote identifiée à Fort-de-France est bien supérieure à la surcote barométrique introduite par le passage de la dépression et résulte principalement de la « poussée » des vents sur la surface de la mer. Il est très probable que des valeurs de surcote plus importantes puissent avoir été observées localement sur d'autres secteurs, en particulier sur les façades Sud et Caraïbe, à proximité du centre du phénomène cyclonique et de la zone de basse pression.

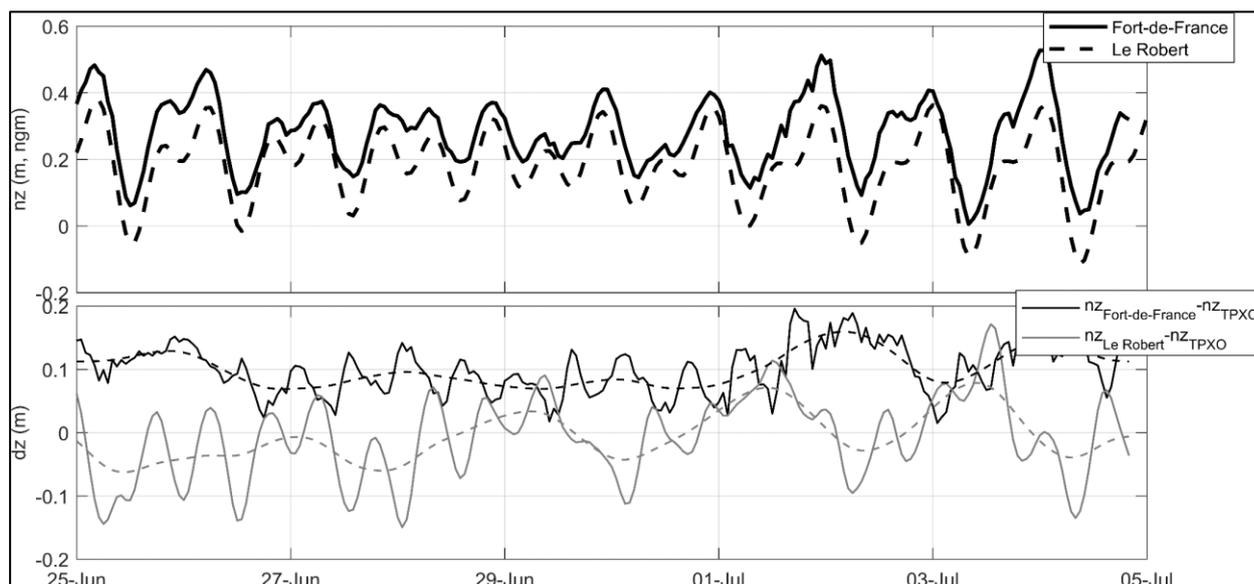


Figure 8 : (en haut) évolution temporelle des niveaux d'eau aux stations marégraphiques de Fort-de-France (courbe noire), au Robert (courbe pointillée). (En bas) surcote calculée aux deux stations (différence entre la hauteur d'eau mesurée et la hauteur d'eau prédite par le modèle TPXO9).

3. Méthodologie

Sans viser l'exhaustivité des impacts de BERYL, l'objectif de ce rapport est de dresser un panorama des effets de ce type de cyclone sur le littoral martiniquais. Plusieurs moyens ont donc été déployés pour collecter dans un laps de temps court, le maximum d'informations concernant les impacts de BERYL sur le littoral martiniquais : une collecte d'informations qualitatives (photographies, témoignages auprès des acteurs locaux), des mesures topographiques avant et après l'évènement et une exploitation du réseau de photo ©Solarcam. Les moyens déployés sont détaillés dans la section 3.1 tandis que la section 3.2 présente les indicateurs utilisés pour caractériser de manière homogène, les impacts morphologiques.

3.1. MOYENS DEPLOYES

3.1.1. Observations visuelles et collecte de témoignages

La campagne de terrain s'est déroulée entre le 1^{er} juillet et le 8 juillet 2024 pour le levé post-tempête. Elle s'est concentrée sur les sites visiblement exposés.

Il s'agit de réaliser sur l'ensemble des sites visités un relevé d'observations permettant d'apprécier les indicateurs des principaux phénomènes qui accompagnent une houle cyclonique :

- des photographies géoréférencées des manifestations des principaux phénomènes qui accompagnent une houle cyclonique soit :
 - o L'érosion du stock sédimentaire (de la plage) ;
 - o L'inondation ;
 - o L'accumulation de sable ;
 - o Des projections ou débris ;
 - o Le choc mécanique des vagues ;
- Une mesure de la hauteur d'inondation maximale atteinte ;
- Le relevé des principaux dommages.

A ces observations de terrain s'est ajouté l'ensemble des informations et images collectés auprès des réseaux sociaux ou des médias (*La 1ere, France Antilles, rci Martinique, francetv*). Un certain nombre de mairies ont également été consultées.

3.1.2. Mesures topographiques

L'acquisition de données topographiques a été réalisée avant et après la tempête tropicale le long de profils de référence (définis par l'observatoire Olimar) orientés perpendiculairement à la côte (Figure 9). Ces levés au DGPS¹ (GNSS²) très précis sont réalisés à la canne en mesurant l'altitude d'un point à chaque inflexion de la pente, suivant des axes prédéfinis et invariables sur toutes les campagnes de mesure. Ainsi les points mesurés le long de ces profils permettent une comparaison du profil de plage avant et après le passage de la tempête tropicale. Les marges d'erreur sur ce type de données topographiques sont estimées à quelques centimètres en

¹ GPS : Differential Global Positioning System

² GNSS : Global Navigation Satellite System

planimétrie et à 5 cm en altimétrie (enfoncement moyen de la canne dans le sable pris en compte).

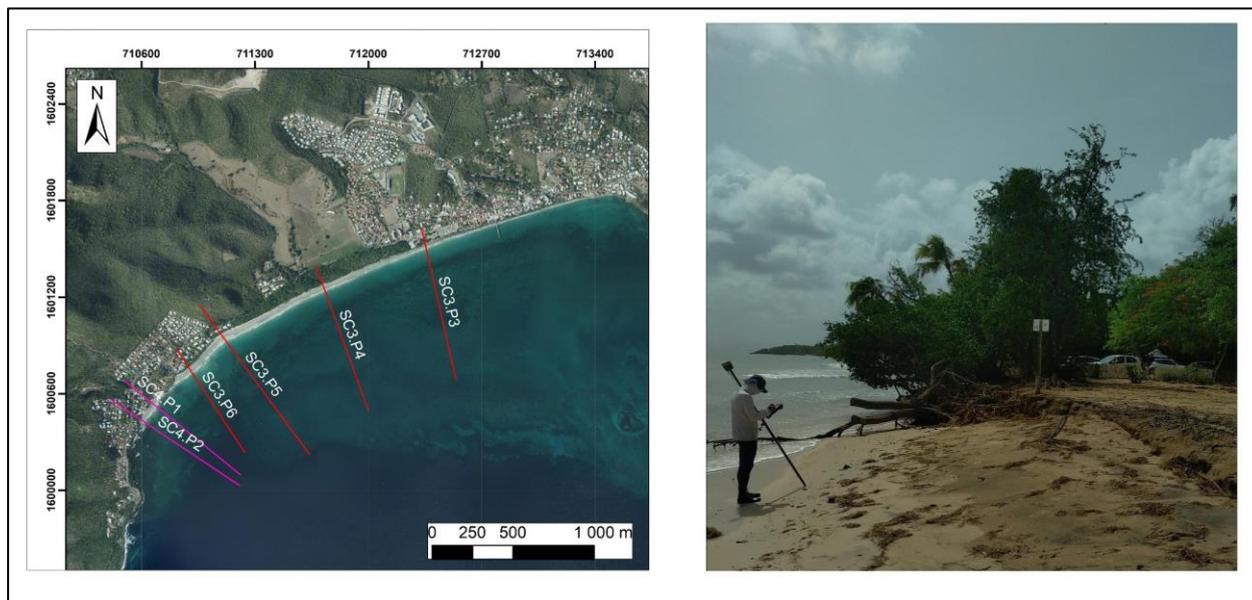


Figure 9 : (à gauche) localisation des profils de référence définis par l'observatoire Olimar sur la plage de Dizac et de l'anse cafard au Diamant. (A droite) réalisation des mesures topographiques sur la grande plage des Salines le 2 juillet 2024 après le passage de la tempête tropicale BERYL.

En plus des levés des profils topographiques de référence, la position du trait de côte est mesurée à pied de manière continue avec un point environ tous les mètres. 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 lors de l'acquisition.

Le marqueur du trait de côte ainsi levé est la limite du jet de rive. Les marges d'erreur sur les données topographiques acquises estimées entre 5 et 10 cm en planimétrie et entre 10 et 20 cm en altimétrie en fonction des mouvements parasites de l'opérateur pendant la marche.

Ces types de levé ont été réalisés sur deux plages suivies par l'observatoire Olimar, représentatives respectivement de la façade Caraïbe et Sud-Atlantique (Figure 10). Les cellules sédimentaires de la façade Atlantique n'ont pas fait l'objet d'un suivi spécifique lié au passage de BERYL étant donné leurs faibles expositions à la houle générée par le phénomène (section 2.3 et § 4.1).

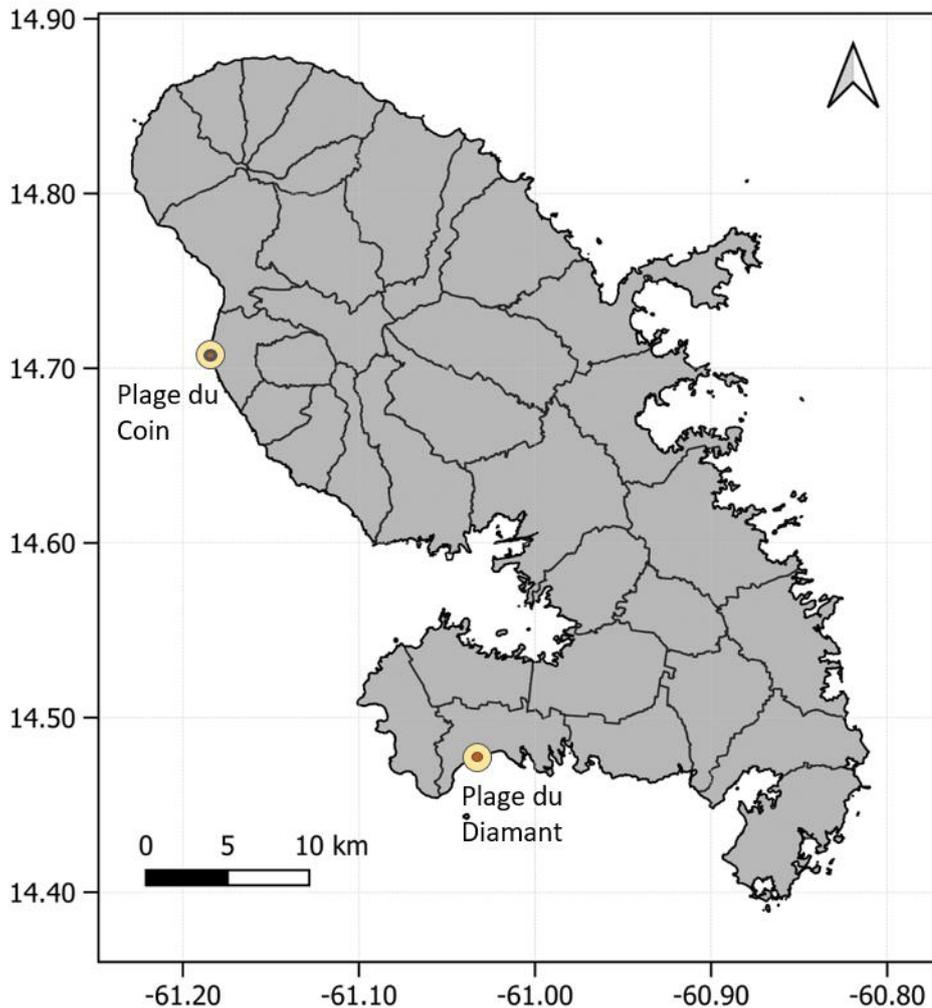


Figure 10 : Localisation des plages ayant fait l'objet de mesures topographiques réalisées avant et après le passage du cyclone BERYL.

Afin de permettre une évaluation de la mobilité de l'interface terre-mer suite au passage de l'ouragan, la position du trait de côte a été mesurée sur ces deux plages, avant et après le passage de BERYL. Ces levés permettent de compléter les mesures des profils topographiques de référence afin de qualifier l'évolution morphologique de la plage en réponse à un événement de forte intensité.

3.1.3. Suivi par imagerie photo

Les mesures topo-bathymétriques traditionnelles ne permettent pas de capturer toute la complexité de la dynamique sédimentaire, principalement pour des raisons de temporalité, de coûts mais aussi à cause des difficultés pratiques rencontrées pour suivre l'évolution de la zone côtière, notamment pendant les tempêtes.

D'autres outils se sont développés avec les méthodes de photogrammétrie qui permettent de suivre à une fréquence élevée certaines caractéristiques morphologiques des plages à partir

d’images capturées par un appareil photo (Harley et al. 2019; Clement Bouvier et al. 2020; C Bouvier et al. 2023). L’identification des paramètres morphologiques, ici la position du trait de côte (limite terrestre atteinte pour une hauteur d’eau proche du niveau moyen), n’est pas directe mais elle est estimée par des singularités visibles à la surface de l’eau, comme par exemple l’interface entre la terre et la mer. Un suivi par appareils photos fixes est parfaitement adapté à la thématique étudiée ici et constitue un outil essentiel de compréhension et de caractérisation des effets induits par le passage d’un cyclone comme celui de BERYL sur les plages sableuses.

Depuis 2017, plusieurs dispositifs de suivi par imagerie photo ont été mis en place sur différents secteurs par le BRGM pour étudier l’évolution des plages ou la dynamique des échouages de sargasses (e.g. (BRGM/RP-70659-FR 2021; BRGM/RP-69651-FR 2020)). L’acquisition des images est réalisée à intervalles réguliers selon une fréquence déterminée par l’utilisateur. La fréquence des prises de vue est généralement fixée à 1 photo/heure avec une résolution entre 8 et 12 mégapixels pour une taille d’environ 1 100 ko par image. Une fois la caméra activée, les images sont transférées via la 3G ou 4G vers un serveur ftp (File Transfer Protocol). Elles sont ensuite archivées sur un serveur du BRGM.

Ainsi, les images capturées pendant le passage de BERYL ont été exploitées dans le cadre de ce rapport sur la plage du Coin au Carbet, sur celle du Diamant, à Petite Anse Macabou au Vauclin, dans la baie de Frégate Est au Francois, dans la baie de Pointe Savane au Robert, sur la plage au nord du bourg de Sainte-Marie et sur la plage d’Anse Charpentier sur les communes de Marigot et Sante Marie. La Figure 11 localise ces 7 sites.

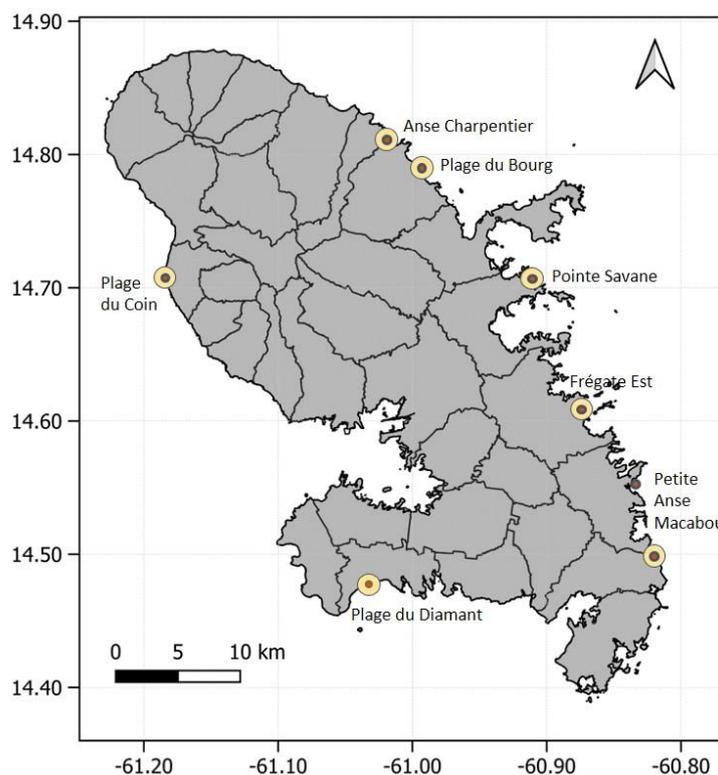


Figure 11 : Localisation des sites équipés d’un dispositif ©Solarcam et qui ont fait l’objet d’une analyse suite au passage du cyclone BERYL.

3.2. INDICATEUR D'IMPACTS

De manière à pouvoir mesurer l'importance de ce cyclone en termes d'impact sur le territoire, deux indicateurs complémentaires ont été utilisés :

- un indicateur d'impact érosif ciblé sur la dynamique du stock sédimentaire
- un indicateur d'impact lié à la submersion

Ces indicateurs permettent aussi de pouvoir comparer les impacts de ce cyclone avec d'autres cyclones passés ou à venir au moyen d'une grille homogène.

3.2.1. Indicateur d'impact érosif

Les événements les plus énergétiques engendrent des fortes houles qui sont parfois à l'origine d'importantes modifications du littoral. Dans ce contexte, les acteurs de l'aménagement et de la gestion du littoral ont besoin de disposer d'informations synthétiques sur les impacts morphologiques enregistrées suite au passage d'un événement extrême.

De nombreux indicateurs peuvent être utilisés pour décrire ces évolutions morphologiques ((Sallenger Jr 2020; Ferreira, Plomaritis, et Costas 2017; Leaman et al. 2021)). Construits sur la base des travaux de Leaman et al. (2021), les paramètres suivants ont été sélectionnés et adaptés au littoral martiniquais pour refléter l'impact érosif d'un événement extrême.

- **L'évolution de la largeur de la plage** est définie comme la distance horizontale entre les positions du trait de côte (limite terrestre atteinte pour une hauteur d'eau proche du niveau moyen) avant et après la tempête. Un seuil d'évolution de la largeur de plage permet de distinguer les rétrécissements "modéré" et "fort" de la largeur de la plage. Ce seuil est défini à dire d'expert, reste spécifique à chaque façade du littoral martiniquais et peut varier localement selon le site étudié.
- En l'absence de morphologie dunaire, **la limite dans les terres de l'arrière-plage**, définie souvent comme la limite de végétation, constitue également un élément important du profil de plage pour caractériser l'impact morphologique d'une tempête. L'action érosive des vagues peut s'étendre vers l'intérieur des terres jusqu'à entraîner un recul de la limite de végétation. Ce paramètre indique si la protection contre l'érosion et/ou les inondations côtières fournie par la limite de végétation a été compromise.

En suivant les critères ci-dessus, une échelle d'impact a été construite basée sur la mesure de la translation horizontale (vers l'intérieur des terres) du profil de plage. Quatre niveaux d'impacts ont finalement été distingués (Figure 12) :

- **Impact érosif non significatif (limité)** : Erosion non visible sur le haut et le bas de plage. Aucun recul significatif de la position du trait de côte n'est observé.
- **Impact érosif modéré** : érosion visible ayant entraîné un recul de la position du trait de côte. Les impacts se concentrent sur le bas de plage. La diminution de la largeur de la plage ne dépasse pas le seuil défini par l'opérateur et aucune modification du système d'arrière plage n'est observée.
- **Impact érosif fort** : la réduction de la largeur de la plage dépasse le seuil défini par l'utilisateur, mais l'arrière plage reste intacte. La zone tampon fournie par la plage est réduite et le système d'arrière plage est vulnérable aux prochains coups de mer.
- **Impact érosif sévère** : ce régime se produit lorsque le système situé en arrière plage est touché. Il s'agit du niveau de risque d'érosion le plus élevé avec des répercussions sur le couvert végétal en arrière plage ou sur tous les biens ou autres infrastructures situés dans cette zone.

Impact érosif sur les plages sableuses

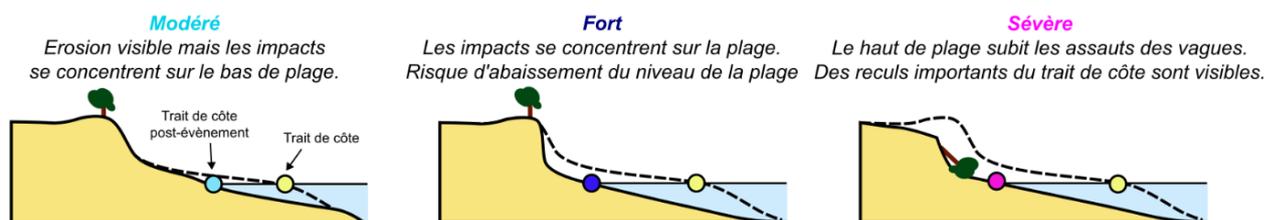


Figure 12 : échelle d'impact adaptée aux plages sableuses du littoral martiniquais et construite sur la base des travaux de Leaman et al. (2021).

3.2.2. Indicateur d'impact lié à la submersion

Afin de décrire le phénomène de la manière la plus complète possible, une classification des impacts associés aux submersions marines a également été proposée, adaptée de l'échelle d'impact des tempêtes de Sallenger (2000), bien connue et largement appliquée. Avec ce cadre existant comme point de départ, l'indicateur « impact des submersion » (SI) utilisée ici est basée sur les mêmes critères à savoir le niveau d'eau et le régime de submersion associée et s'appuie principalement sur des observations de terrain, photographies, articles de presse, émission de radio, reportage, témoignage et autres médias incluant notamment pour les cyclones les plus récents les réseaux sociaux. Ainsi, quatre niveaux d'impacts ont finalement été distingués :

- **SI = 0** : aucune submersion marine observée pendant l'évènement : ce régime se produit lorsque le niveau d'eau au pic de l'évènement n'atteint pas l'arrière plage ou la berme et que le jet de rive reste confiné à l'estran. Ce régime représente le niveau le plus bas de risque de submersion malgré qu'une érosion significative puisse malgré tout être observée sur le bas de plage.
- **SI = 1 : Régime de collision** : le niveau d'eau a un impact sur l'arrière plage, entraînant la submersion intermittente ou continue de la zone de plage adjacente. Cela représente le deuxième niveau de risque d'inondation car la zone tampon entre l'arrière côte et le littoral est temporairement supprimée. Ce régime entraîne également une érosion significative de l'ensemble du cordon sableux.
- **SI = 2 : Régime de submersion** : Ce régime se produit lorsque l'arrière plage est recouverte par intermittence. En conséquence, les biens et les propriétés situés en arrière peuvent être soumis à des inondations potentielles. Les risques peuvent également être exacerbés lors d'évènements de longue durée ou si le drainage est inadéquat. Le sable est généralement transporté vers les terres sur plusieurs dizaines de mètres contribuant à une érosion nette de l'estran.
- **SI = 3 : Régime d'inondation** : l'arrière plage, la berme et la première ligne de défense sont constamment submergées. Cela représente le niveau le plus élevé et le plus grave de risque d'inondation. Des communautés côtières entières peuvent être sujettes à des inondations avec des impacts conséquents sur les infrastructures.

4. Observations

Ce chapitre dédié aux « observations » s'intéresse à décrire les impacts observés de la BERYL sur le littoral. L'analyse se déroule par façade et par plage, selon la trajectoire du cyclone, soit du sud-est vers le nord-ouest, avec une première partie sur la côte atlantique. Rappelons que tous les sites n'ont pas été expertisés, il s'agit d'une liste non exhaustive des impacts.

Pour chacun des sites, des photographies ('WP' annexes) correspondant à des points ou des impacts ont été recensés.

4.1. COTE ATLANTIQUE

La côte atlantique depuis la commune de Grand Rivière au nord jusqu'à celle du Vauclin au sud semble n'avoir pas été impacté par la houle cyclonique de BERYL. Aucun impact significatif n'a été relevé dans la presse ou les réseaux sociaux. Par ailleurs, les services communaux du Lorrain et du Vauclin ont confirmé l'absence d'impact sur leur commune.

Le réseau de prise de vue photo ©Solarcam déployé dans le cadre de l'Observatoire Olimar et décrit au § 3.1.3, a permis de confirmer l'absence d'impact sur cette côte autre que des dépôts de sargasses. En effet, sur les instruments installés entre le Robert et le Vauclin, les séquences photos (rapportées sur la Figure 13) mettent seulement en évidence :

- 1) Un arrivage de sargasses supplémentaire apporté par la houle
- 2) Un déplacement de ces dépôts vers le haut de plage suggérant des conditions hydrodynamiques plus intenses ;



Figure 13 : Séquence photo du réseau de prise de vue photo ©Solarcam illustrant la situation « avant l'évènement » sur a1). la plage de Petite Anse Macabou au Vauclin, b1). Pointe Savane au Robert et c1). Frégate Est au François. Les situations « après l'évènement » sont illustrées par les figures a3), b3) et c3) respectivement.

4.2. FAÇADE SUD

4.2.1. Commune de Sainte Anne

a) Bourg de Saint Anne

Les impacts les plus importants sont concentrés au centre du bourg de part et d'autre de la place principale (espace Vincent Placoly), entre le cimetière et le marché (Figure 14). Des submersions par paquet de mer ont pénétré l'espace Vincent Placoly en y déposant du sable et ont inondé largement la rue du front de mer (sur un total de 20 m de distance perpendiculaire à la cote) en y déposant une grande quantité de sargasse (Annexe 1, WP115). Au sud de la Dunette, la plage du bourg (plage anse Tonnoir) a également été affectée.

De nombreux commerces en front de mer ont été touchés par la houle cyclonique. Le choc des vagues a entraîné la destruction de plusieurs infrastructures (Figure 14) comme le parapet en béton au centre de l'espace Placoly (WP112) et la terrasse et du ponton du restaurant 'la Dunette' de la place municipale (WP113). Citons également la terrasse couverte de la crêperie Ti Cosi avec une destruction totale provoquée par les projections liées à la houle (Figure 15 et WP 114).

D'après des témoignages recueillis auprès des riverains sur place, un ou plusieurs navires au mouillage face à la commune se sont décrochés durant l'événement

a). Inondation rue du front de mer (©Mairie)



b). Vue vers le sud depuis l'espace Placoly. Dommages causés par le choc des vagues



Figure 14 : Impact de la houle et dépôt de sargasses sur le centre-bourg de Sainte-Anne, photographie durant la matinée 2 juillet 2024 © BRGM



Figure 15 : Destruction de la crêperie située sur le front de mer du bourg, photographie avant (© crêperie Ti Cosy) et après datant du 2 juillet 2024 © BRGM

b) Plage des Salines

La plage des salines a subi une forte érosion sur la partie nord-ouest, marqué par un talus d'érosion de plus de 1 m (point WP 121 en annexe 2). Les réseaux racinaires de la végétation dunaire sont apparents et témoignent de la forte énergie mise en œuvre durant BERYL et du déficit sédimentaire sur cette portion de la plage. Des cocotiers ont basculé à la suite de cette érosion et les fondations de certaines infrastructures situées sur la plage sont menacées (Figure 16 et Figure 17).



Figure 16 : Erosion sur la portion nord-ouest de la plage des salines avec : (a) Talus d'érosion et (b) chutes de cocotiers (photographie du 02/07/24 ©BRGM).



Figure 17 : Erosion de la plage des Salines (Photo du 01/07/24 ©Bondamajak TV)

La zone du parking se trouvant au centre de la plage (annexe 1, WP122,) possède également des marqueurs d'érosion avec notamment un recul de la berme et un petit talus d'érosion, bien que moins marqué que sur la partie nord. De plus, la végétation présente entre le haut de plage (parking) et le jet de rive a permis de limiter les dégâts sur ce secteur.

La partie sud-est de la plage est marquée par un dépôt important de sargasses (Figure 18). La position de ces dépôts est cohérente vis à vis de la provenance sud - sud-ouest des houles cycloniques, en effet, de par son orientation, cette partie de la plage est moins exposé au train de houle ce qui permet le dépôt de sargasse via une dérive Est-Ouest.



Figure 18 : Dépôts de Sargasses sur la partie sud-est de la grande plage des Salines (photographie post-tempête 02/07/24 © BRGM)

4.2.2. Commune de Rivière-Pilote

Sur la plage d'Anse Figuier, les laisses de mer ont pénétré de plusieurs dizaines de mètres sur le haut de plage atteignant les bâtiments (restaurant/musée) et s'étendant bien au-delà dans les zones basses.

La plage stricto sensu ne présente pas de talus d'érosion mais on devine un léger abaissement généralisé du profil de plage. Plus précisément, on constate :

- une accumulation de sables en arrière plage (estimé à une vingtaine de cm) en témoigne l'ensablement au niveau des kiosques de plages (Annexe 1, WP101) ;
- des projections de débris et des galets qui jonchent la quasi intégralité du haut de plage témoignant d'un jet de rive atteignant le haut de plage (Annexe 1, WP105) ;
- A 9h, le mardi 2, l'arrière-plage était toujours inondé sur quelques centimètres dans les zones basses d'arrière plage (WP 103 et 100). L'inondation représente une surface d'une cinquantaine de mètres au niveau du terre-plein de jeu derrière les latrines publiques et d'une trentaine de mètres à l'extrémité est coté ravine.

A l'extrémité ouest de la plage, le choc des vagues a provoqué la destruction du soubassement du restaurant (Annexe 1, WP 102).

4.2.3. Commune de Sainte-Luce

La houle déferle directement sur le front de mer du bourg. Les restaurants en bois situés coté plage, le long de la rue principale subissent tous des dégâts significatifs (destructions de terrasse et de plancher notamment). Les dégâts constatés sont impressionnants le lendemain de l'événement (Figure 19).



Figure 19 : Ensablement au niveau de la place des restaurateurs (02/07/24, ©M-F Calmo, la1ere)

Le jet de rive arrive jusqu'aux bâtiments situés de l'autre côté de la route du bord de mer endommageant certaines devantures ou rideaux métalliques (annexe 1, WP 196) et déposant une importante épaisseur de sable estimé à plusieurs dizaines de centimètre. Des témoignages rapportent 1 m de sable sur le front de mer (source RCI, annexe 1, WP 190). Le directeur des services techniques de la municipalité évoque 300m³ de sables à évacuer (Article RCI web, 02/07/24).

A l'ouest du bourg, de multiples projections sont visibles sur le sentier du littoral et on trouve de nombreux débris de coraux notamment au niveau de la plage de Gros Raisins située à l'ouest du bourg (Annexe 1, WP 251). Ces marqueurs témoignent de l'exposition des fortes conditions hydrodynamiques de l'événement dans ce secteur. L'érosion est présente mais moins marquée, on note l'absence de talus d'érosion sur la plage de Gros Raisin mais on trouve des talus d'érosion sur des sédiments meubles affectant les sentiers du littoral (Annexe 1, WP 253).

4.2.4. Sur la commune du Diamant

La commune du Diamant présente de forts marqueurs d'érosion et de submersion marine, notamment au niveau de la plage de l'anse Cafard (profil P5) ou de la roche est affleurantes à certains endroits et plusieurs cocotiers ont chutés face au restaurant le « Ernest ». Les

infrastructures présentes en front de mer dans ce secteur ont subi des projections de sargasses sur leurs terrasses, et un logement a particulièrement été touché par l'érosion au centre de l'anse (Figure 20 et WP229, annexe 1).



Figure 20 : Erosion constaté et dépôts de sargasses sur la plage et l'arrière-plage de l'anse cafard (photographie post-tempête 02/07/24 © BRGM)

Au niveau du centre de la plage Dizac, entre le cimetière et la poissonnerie, le phénomène de submersion marine s'est étendu sur le haut de plage plusieurs mètres derrière le talus d'érosion au niveau du parking (zone plane et non végétalisée). Ces débordements intermittents ont causé des dégâts matériels sur les infrastructures présentes en front de mer avec la destruction des terrasses (WP 231 et 232, annexe1).

Des projections causées par le choc mécanique des vagues ont touchés l'est de la plage de Dizac et atteint certaines habitations, avec pour conséquence des dépôts massifs de sargasses et de sédiments. Certains riverains ont été contraints d'évacuer leur domicile durant l'événement (WP 226, annexe 1).

Une analyse détaillée de l'évolution morphologique des plages (anse cafard et Dizac) de la commune du Diamant est réalisée dans la suite du rapport (section 5.1.1).

4.3. FAÇADE CARAIBE

Au vu de la trajectoire et de l'intensité de BERYL, la houle de provenance sud – sud-ouest atteint frontalement les littoraux d'un grand nombre de bourgs et d'anses à enjeux de la côte Caraïbe entre le 1^{er} et le 2 juillet 2024.

4.3.1. Commune des Anses-d'Arlet

Sur la commune des Anses d'Arlet plusieurs bâtiments sont submergés et quelques dommages aux infrastructures attenantes (clôture, escalier et ponton privé) sont constatés. Les impacts sont considérés comme modérées sur cette commune.

De manière générale, le bas des plages présente des signes d'érosion tandis qu'une accumulation de sable a été repérée sur le haut de plage. Le talus d'érosion n'apparaît que localement mais l'abaissement du profil de plage en pied est matérialisé par la chute de plusieurs cocotiers (sur la plage du bourg notamment, WP 141, annexe 2) ou la déstructuration de certains aménagements.

Les épisodes de submersion par franchissement se sont propagés au-delà du haut de plage sur la totalité des trois anses ; ces débordements (appelés cône de débordement dans le cas des submersions) ont pénétré l'intérieur des bourgs et touché plusieurs habitations et les routes situées en front de mer. Seules les plages de Grande Anse et du bourg ont été investiguées : cependant les témoignages recueillis ainsi que les photos/vidéos montrent que Petit Anse a subi les mêmes types de dommages.

Au bourg, une accumulation conséquente de sédiments et de débris est retrouvée dans la rue parallèle au front de mer sur la totalité de la chaussée (WP 147, annexe 2). La submersion a parcouru une centaine de mètres perpendiculairement au front de mer dans la rue principale (WP148, annexe 2).

Dans la partie la plus au nord, près du cimetière, les maisons ont été inondées et la mer a pénétré jusqu'au point bas à proximité de la ravine avec une accumulation de sable dans les bâtiments. A l'extrémité nord, une importante quantité de sable a été déposée sur le haut de plage au-dessus de la digue face aux habitations du front de mer (Figure 21).



Figure 21 : Projection et accumulation de sédiments en haut de plage (au-dessus de la digue) et bas de plage submergée au lendemain du passage de BERYL à l'extrémité nord de la plage de l'Anse d'Arlet (WP 142, 02/07/2024 © BRGM)

Parallèlement aux submersions recensées au bourg , le choc des vagues a dégradé plusieurs aménagements attenants à des habitations. Une des planches du ponton principal du bourg s'est déchaussée (WP 145) et les volets roulants d'un des restaurants au nord du cimetière ont été abimés (WP 149).

Au sud de la plage de Grand Anse, on relève une couche de dépôts allant jusqu'à 60 cm dans la rue qui borde la mer. Plusieurs habitations et commerces situés en haut de plage (Avenue Robert Deloy) ont ainsi été ensevelis avec ces accumulations de sables observables contre les bâtiments et/ou obstacles de bord de mer (Figure 22). Un habitant évoque une accumulation d'1m d'épaisseur.



Figure 22 : Projection et accumulation sédimentaire au sud de la plage de Grande Anse (photographie du 02/07/2024 © BRGM)

Au nord de la plage de Grand Anse, la submersion n'a pas atteint les habitations (éloignées du haut de plage) mais seulement les infrastructures attenantes (clôture, escalier et ponton privé).

D'après les témoignages recueillis et les informations des médias, la plage de Petite anse a subi des submersions par paquets de mer avec des vagues s'élevant au-dessus de la digue. Plusieurs bateaux ont été déplacés de quelques mètres sur le haut de plage. Le courant de retour formé durant l'événement derrière la digue a endommagé de nombreux bateaux.

4.3.2. Commune des Trois-Ilets

Les impacts liés à la submersion sont limités sur l'ensemble de la commune. A notre connaissance, il n'y a pas eu de dommages.

Des projections et déplacements ont pu être constatés sur les plages artificielles de la Pointe du Bout mais ils se limitent globalement à des dépôts de débris (type galets, coraux morts, coquilles) sur le cordon sédimentaire, notamment celui de l'hôtel Bakoua et sur le ponton en bois attenant (Figure 23 et WP 152, annexe 2).



Figure 23 : Projection sur le ponton en bois de l'hôtel Bakoua (photographie 02/07/24 ©BRGM)

Les plages présentent des signes d'érosion globalement limités sachant que la plage présentant les signes les plus marqués est celle de l'Anse Mitan avec une érosion générale du « bas » de plage et une accumulation de sable sur le « haut » de plage. Environ 50 cm se sont accumulés contre les bâtiments et les obstacles situés en bord de mer comme en témoigne les photos (WP 151, annexe 2). En effet, les observations, réalisées juste après le passage de la houle montrent que le jet de rive atteignait largement le haut de plage et les bâtiments du bord de mer.

4.3.3. Commune de Fort-de-France

La houle de secteur sud – sud-ouest atteint frontalement le front de mer de Fort-de-France à plusieurs endroits. Elle déferle notamment sur les ouvrages de protection de la route de Texaco au niveau du terre-plein sans engendrer de surverse ainsi que sur la place du Cénacle. Un restaurant situé sur les enrochements du front de mer du quartier de Bokanal est fortement endommagé (WP 226). Plusieurs familles du quartier de la Pointe des Nègres menacées par la houle ont dû être mises en sécurité pendant la nuit.

Les vagues ont entraîné des surverses par franchissement de paquet de mer sur le front de mer entraînant la submersion du Malecon entre la Fort Saint-Louis et le rond-point de la gare des taxis. Accompagnée de dépôt de vase, cette submersion a endommagé certaines infrastructures du Malecon comme le marché des artisans (WP 224, annexe 2). La submersion a pénétré ensuite sur plus de 200 m dans le centre-ville empruntant notamment la rue de la liberté jusqu'à la cathédrale et jusqu'au bord de l'Impératrice sur la Savane (WP 221, annexe 2). L'eau a atteint 40 cm à certains endroits et est encore visible au lendemain de l'événement (Figure 24).



*Figure 24 : Dépôts vaseux et inondation au niveau des zones basses de l'avenue de la liberté
(© France-Antilles)*

La plage de la Française présente une érosion limitée marqué par la submersion avec un abaissement du bas de plage, un voilier s'est échoué au niveau de cette plage (WP 225, annexe 2).

4.3.4. Commune de Schœlcher

La houle de secteur sud/sud-ouest atteint frontalement le front de mer à plusieurs endroits. Les vagues qui atteignaient déjà 2.50 m à 3.50 m (observation Anse Madame) le 01/07/24 à 18h30 ont entraîné des submersions par franchissement de paquet de mer. Les portions du littoral particulièrement affectées sont l'anse Madame, la plage du bourg et le front de mer de Fond Lahaye (cf. aperçu du jet de rive dans les premières heures Figure 25).



Figure 25 : Aperçu du jet de rive sur a). la plage d'anse Madame (WP168) et b). la plage du bourg (WP172) le lundi 1er juillet à 18h donc avant que l'évènement ne soit à son maximum (© BRGM)

Sur la plage d'Anse Madame, le jet de rive atteint les restaurants du front de mer : de fortes vagues déferlent sur la plage, des lames d'eau d'une hauteur de 10 à 15 cm franchissent l'arrière-plage. Au nord du Sénah beach, la plage s'est érodée et un talus d'érosion se dessine en limite des aménagements (WP 167, annexe 2). Le sable s'est accumulé sur le haut de plage à l'intérieur du restaurant Sénah beach (WP 169, annexe 2). Au sud du restaurant, les signes d'érosion sont plus limités, un dépôt de sable de quelques centimètres s'observe sur le haut de plage.

Au bourg et à Fond Lahaye, le jet de rive atteint la première rangée des habitations de l'autre côté de la route du bord de mer. Au bourg, l'intégralité de la route du front de mer est recouverte d'une dizaine de centimètres de sable (Figure 26). A Fond Lahaye, ce sont des dépôts de sables mélangés à une quantité importante de sargasses qui recouvrent la route du bord de mer (WP 255, annexe 2). D'après Martinique la 1ere, le port aurait été fortement dégradé et une habitation aurait été endommagée par les inondations à l'extrémité ouest du front de mer de Fond Lahaye (Martinique la 1ere, 02/07/2024).

Le jet de rive a recouvert l'intégralité de la place des Arawaks pénétrant ainsi une cinquantaine de mètres dans les terres au niveau du canal de la rivière Case Navire (WP 177, annexe 2). La place est recouverte de débris végétaux, de sables en provenance de la plage mélangés à de la terre en provenance du terre-plein de la place.

Les vagues déferlent frontalement à plusieurs endroits du littoral comme sur la falaise située entre anse Madame et anse Colas. Le choc des vagues a détruit plusieurs planches du ponton du bourg (WP 164, annexe 2) et a affouillé le terre-plein de la place des Arawaks entraînant la destruction de l'intégralité du chemin en béton qui longeait les enrochements (WP 163, annexe 2). La plage du bourg présente un talus d'érosion de quelques dizaines de centimètres, le départ de sable en bas de plage a entraîné la destruction de l'avancée de terrasses du restaurant le Tiki. La houle a épargné les autres restaurants situés un peu plus en retrait (WP 165, annexe 2).



Figure 26 : Déplacement du sable sur le haut de plage de la plage du bourg recouvrant l'intégralité de la route du bord de mer (02/07/24, © BRGM).

4.3.5. Commune de Case-Pilote

Comme à Schoelcher, la houle de secteur sud/sud-ouest atteint frontalement le front de mer du centre-bourg de Case Pilote. D'après les observations d'un agent du BRGM sur place dans la soirée du 1^{er} juillet, les vagues qui atteignaient déjà 2.50 m à 3.50 m à 19h, ont entraîné des submersions par franchissement de paquets de mer sur tout le front de mer. La Figure 27 donne un aperçu des effets de BERYL pendant l'évènement : inondation et projection dans le bourg, submersion de la plage et dépôts de sables.

a). Un jet de rive qui recouvre le haut de plage (photo du 01/07/2024 à 18h)



b). Une inondation qui atteint son maximum la nuit du 01 au 02/07 (photo du 01/07/2024 à 21h)



c). Déferlement maximal contre la digue (photo du 01/07/2024 à 17h30)



d). Dépôts de sable atteignant 50 cm dans ce restaurant de front de mer (photo du 01/07/2024 à 21h)



Figure 27 : Aperçu des effets de BERYL dans le bourg pendant l'évènement (Photographie 01/07/24 © BRGM)

Pendant la nuit, les vagues viennent déferler contre la digue, générant une lame d'eau qui s'élève à plusieurs mètres de haut (cf. Figure 27.c). Le passage de BERYL aurait provoqué une brèche sous la digue (interview du maire de la commune).

Les blocs projetés par la houle derrière l'ouvrage atteignent des tailles significatives (0,050 m³) (cf. Figure 28). Dans le port, le niveau d'eau est monté. Malgré les effets de la tempête constatés derrière la digue, les bateaux à l'intérieur du port n'ont pas subi de dommages, à notre connaissance.



Figure 28 : Vue vers le bourg depuis la digue de Case Pilote, dégâts visibles provoqués par les vagues les plus énergétiques (WP206, photographie 02/07/24 © BRGM)

Des submersions atteignent les différents restaurants du front de mer endommageant les infrastructures légères de ces établissements et déposant du sable et des galets. Une quantité importante de galets viennent notamment s'accumuler dans les rues et envahir les terrasses des restaurants de part et d'autre de l'embouchure de la rivière Case Pilote, témoignant du fort hydrodynamisme durant l'événement (WP 200 / 213, annexe 2).

Au niveau de la clinique vétérinaire, les surverses sont nombreuses et le niveau d'eau atteint au minimum 30 à 40 cm. C'est notamment dans ce secteur que la submersion est la plus marquée et remonte jusqu'à 50 mètres le long de cette rue (WP 214, annexe 2). De l'autre côté du bourg au niveau de la jetée, les surverses sont également importantes et très fréquentes. Les niveaux d'eau atteints semblent être similaires à ce devant la clinique vétérinaire.

La plage de Vétiver a subi une érosion non négligeable et le bâtiment communal situé sur le haut de plage a subi des dommages importants notamment sur sa façade exposée côté mer (salle des fêtes de Vetiver annexe 2).

4.3.6. Commune du Carbet

Sur la commune du Carbet, les dommages se concentrent sur les infrastructures situées sur la plage.

La plage du Coin est durement frappée par cette houle cyclonique, on note une forte érosion sur l'ensemble de la plage avec des projections de sables et de débris en haut de plage, liées à des phases de submersions marines par paquets de mer.

La submersion s'est propagée au-delà du haut de plage sur plusieurs portions de la plage :

- Au centre de la plage au niveau du ponton et du restaurant L'Imprévu, le jet de rive est remonté dans la rue Judes Thuriaf. Des dépôts de sables et des traces de submersion marine sont observés jusqu'à 30 m perpendiculairement au front de mer (WP 241, annexe 2).
- Au nord de la plage, la submersion a atteint la RN2 où du sable a été déposé et des galets de taille (très) importantes via les projections liées aux chocs des vagues sur l'enrochement. Cette route a donc été considérée comme impraticable, elle a été fermée à la circulation (WP 235, annexe 2).

La plage du Carbet a subi une forte érosion au niveau du bas de plage avec un abaissement généralisé du profil de plage. On trouve la formation d'un talus d'érosion, déjà bien marqué le 1^{er} juillet à 18h30 témoignant d'une érosion forte sur ces différents secteurs (Figure 29). Ce talus d'érosion atteint environ 1m10 au maximum de hauteur à la suite de l'événement. Les réseaux racinaires sont affleurants, on distingue des différences de recul au niveau des cocotiers qui ont pu maintenir du sable en place pendant l'événement (WP 238, annexe 2).

Le trait de côte semble avoir reculé sur la totalité de cette portion de la plage, de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, avec des pertes sédimentaires conséquentes. Pour mieux comprendre l'impact sur le littoral de cette commune, une analyse détaillée de l'évolution morphologique de cette plage est réalisée dans la suite du rapport (section 5.1.2).



Figure 29 : Formation d'un talus d'érosion au sud du ponton sur la plage du Carbet (Photographie 01/07/24 18h30)

Au nord de la passerelle, un autre talus d'érosion s'est formé et borde les infrastructures situées en front de mer (Figure 30).



Figure 30 : Talus d'érosion au nord du ponton (Wahoo Café) (Photographie 03/07/24 © BRGM)

4.3.7. Commune du Prêcheur

Des dommages importants ont été observés au niveau des commerces et habitations situées en front de mer ; cinq familles ont dû être déplacées.

Dans le quartier de la charmeuse, l'érosion du stock sédimentaire constitué de galets a entraîné la suppression des terrains d'assises de deux habitations dont l'une qui a totalement été détruite et l'autre qui est sous-cavée sur plusieurs mètres (cf. Figure 31). L'apparition d'un talus d'érosion mettant à nu le sol en place à une dizaine de mètres en arrière témoigne de l'abaissement du profil de plage sur 1 m environ. La chaussée de la RD 10 est largement sous-cavée à cet endroit. La partie largement érodée s'étend sur 40 m à peu près. Il n'y a pas d'enrochement à cet endroit.

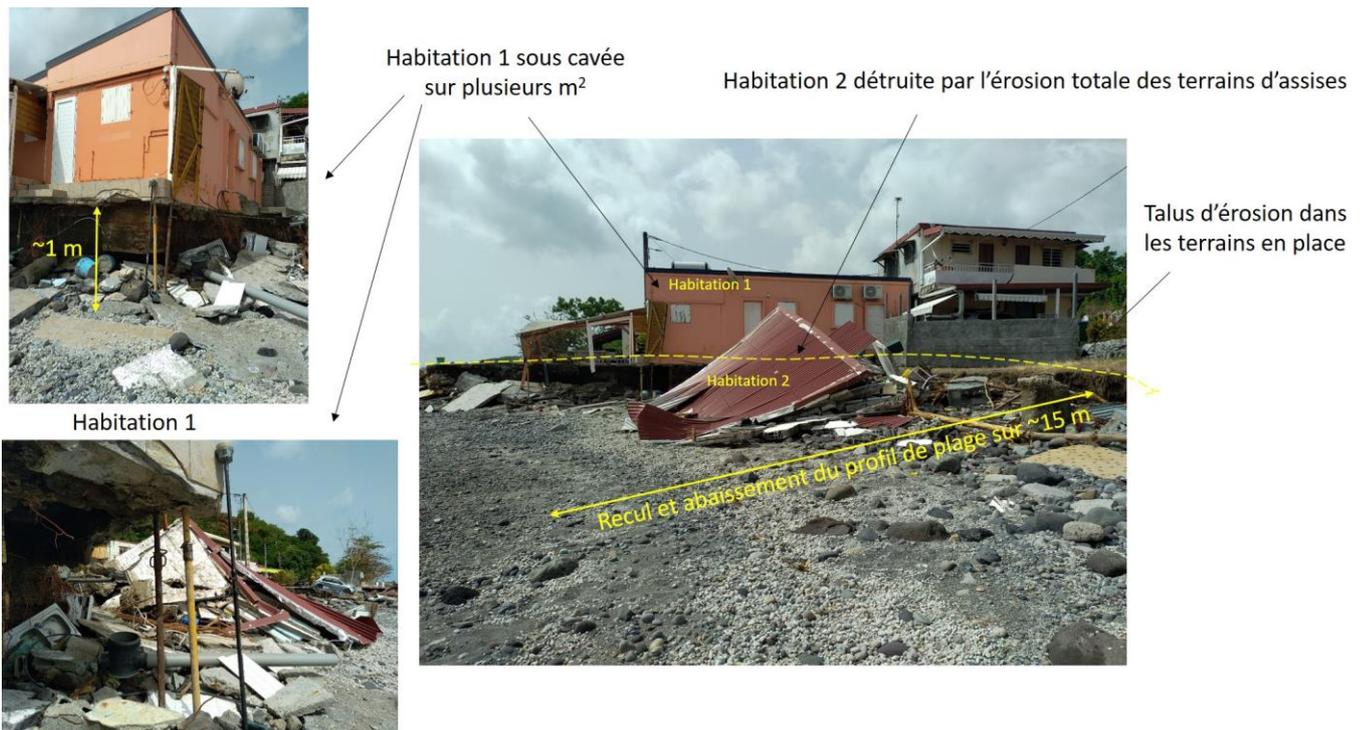


Figure 31 : Deux habitations fortement endommagées dans le quartier de la charmeuse par l'érosion de la plage (WP 246 et 245 de l'annexe 2 © BRGM)

A pointe Lamarre, on relève plusieurs dégâts : une maison a été partiellement détruite et une habitation a été inondée. Ces infrastructures se trouvent en front de mer. Les dégâts sont apparus à la suite des chocs provoqués par les vagues entraînant des projections et des inondations sur ce secteur (WP 248, annexe 2).

Entre la pointe Lamarre et le quartier cimetière, on trouve des projections de tailles impressionnantes qui témoignent de la forte énergie en œuvre durant l'évènement (galets et blocs, Figure 32)



Figure 32 : Projection de galets et de blocs observées au niveau d'une terrasse sur le littoral au sud du pont du prêcheur (09/07/24 © BRGM) (WP 258 de l'annexe 2)

Dans le quartier du cimetière, plusieurs habitations du front de mer ont été fortement inondées et endommagées. Une terrasse a été détruite (WP 244, annexe 2).

Au nord, l'enrochement au niveau du restaurant « Mélodie » est déstabilisé et l'accès de descente à la plage est brisé durant l'événement. Les dégâts à l'intérieur du restaurant restent modérés malgré l'état de l'enrochement en front de mer (WP 257, annexe 2). A l'extrémité sud du cône alluvial, le talus d'érosion affecte la côte meuble en haut de plage (WP 243, annexe 2).

5. Analyse géomorphologique sur trois plages caractéristiques

Ce chapitre décrit les évolutions morphologiques observées sur deux sites suivis avant et après BERYL : la plage du *Coin* (commune du Carbet) ainsi que l'anse *Cafard* et la plage de *Dizac* (commune du Diamant). Après une présentation de chaque cellule sédimentaire investiguée, une analyse du recul du trait de côte et une description détaillée des déplacements sédimentaires est proposée pour l'ensemble des profils de référence le long desquels ont été réalisées les mesures. Une synthèse des observations est enfin proposée sur chaque partie afin de dresser le bilan de l'impact érosif de BERYL sur les sites étudiés.

5.1. OBSERVATIONS ISSUES DES LEVES TOPOGRAPHIQUES

5.1.1. Façade Sud-Caraïbe : plages du Diamant (anse Cafard et plage du Diamant)

a) Présentation des plages

La plage de Dizac et la plage de l'anse Cafard sont situées sur la commune du Diamant au sud-ouest de la Martinique (Figure 10). La cellule sédimentaire de Dizac s'étend sur plus de 3 km de long et s'impose comme l'une des plages les plus étendues de l'île (Figure 33). Orientée vers le sud-est et exposée à un climat de vague relativement énergétique, la plage de Dizac est composée majoritairement de sables fins. Le haut de plage est délimité par de la végétation arborée à l'ouest et par un muret et des enrochements à l'est qui séparent la plage du bâti situé quelques mètres en arrière. Les profils SC3.P1 et SC3.P2 n'ont pas été mesurés compte-tenu de l'absence de sédiments affleurants sur cette portion de la plage. Les autres profils seront analysés dans la suite du rapport. La cellule sédimentaire de l'anse Cafard est délimitée par des enrochements à l'est qui la sépare de la plage de Dizac et par un cap rocheux à l'ouest, aussi appelé le Cap 110 situé au pied du Morne Larcher. La plage est essentiellement composée de sables fins et reste exposée à un climat de vague assez énergétique.

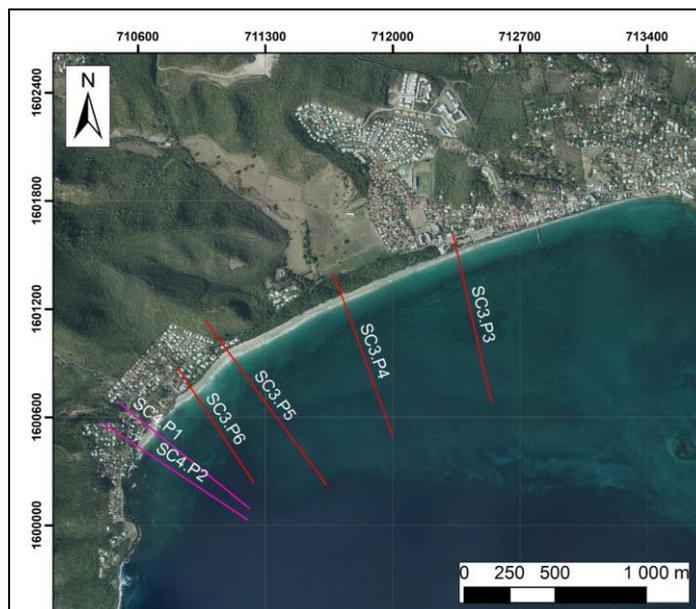


Figure 33 : Localisation des profils de référence mesurés avant et après le passage de BERYL sur la plage de Dizac (profils rouge) et de l'anse Cafard (profils violets). Fond de carte : orthophoto 2022 (IGN).

b) *Évolution de la position du trait de côte*

Entre le 27 juin et le 8 juillet 2024, les plages de Dizac et de l'anse cafard montrent un **recul généralisé** du trait de côte sur tous les secteurs, allant d'un recul faible (0 à 4 m) à sévère (jusqu'à 19 m) sur son linéaire côtier. Le recul n'est donc pas uniforme sur ces plages.

Sur la même période, la plage de l'anse Cafard présente un recul important du trait de côte notamment face au restaurant « le Ernest » avec des reculs allant jusqu'à 13 m. C'est principalement le centre de l'anse qui a subi le recul le plus important (Figure 34, a).

Le secteur le plus touché sur la plage de Dizac se situe entre les profils P3 et P5 avec des reculs compris entre 8 et 19 m sur cette portion peu anthropisée de la plage. Le secteur de plage face au parking (entre le cimetière et la poissonnerie, Figure 34, b) est également dans une dynamique érosive avec un retrait du trait de côte variant de 6 à 13 m. Les infrastructures situées en front de mer sur ce linéaire côtier ont subi des dégâts importants.

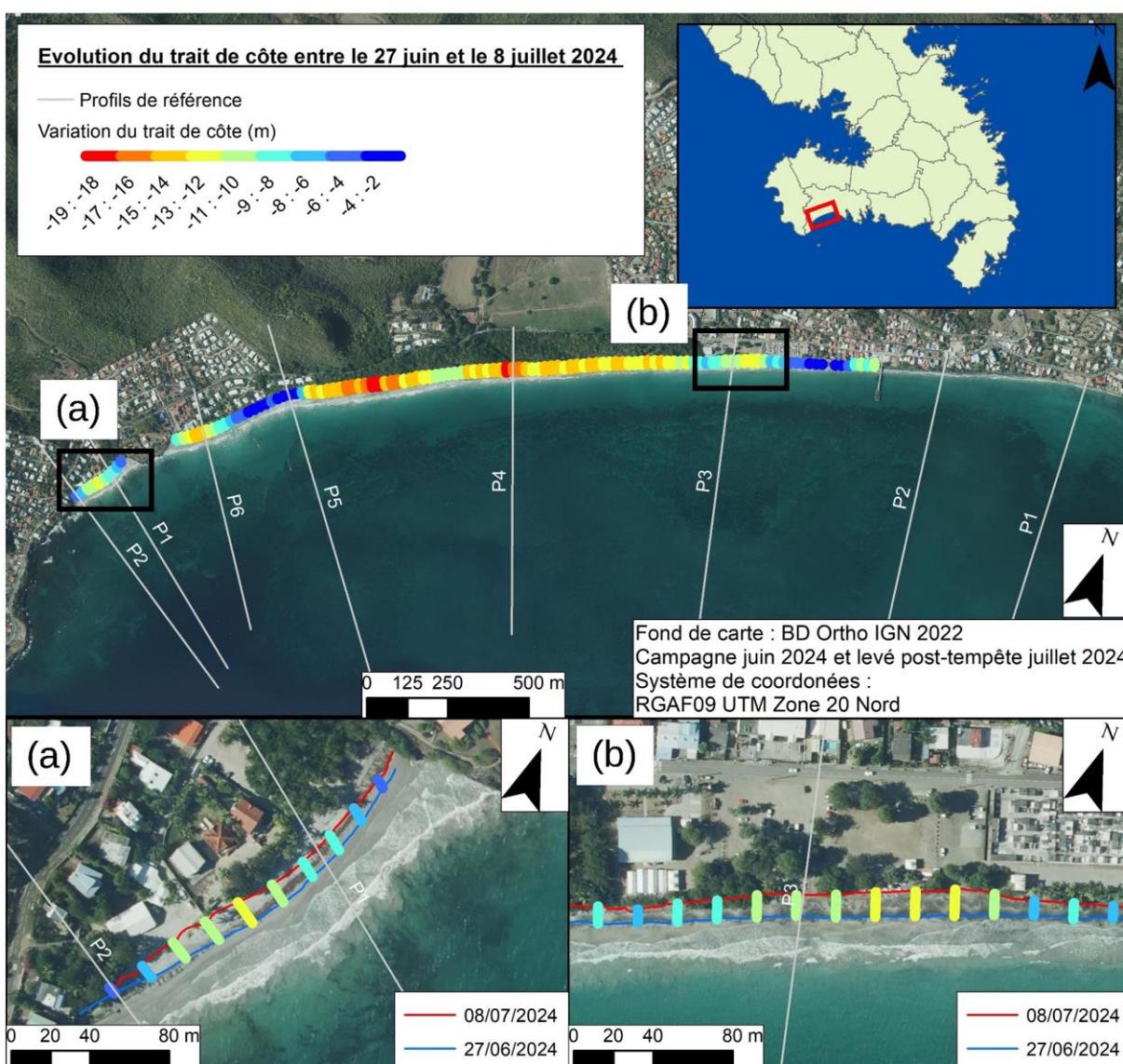


Figure 34 : Variation relative (en m) de la position du trait de côte entre le 27 juin et le 8 juillet 2024 avec (a) : zoom sur la plage de l'anse Cafard et (b) : zoom sur le parking au niveau du profil P3.

c) Évolution des profils topographiques

Les profils de plages SC4-P1 et SC4-P2 de l'anse cafard montrent chacun un affaissement et une érosion conséquente du stock sédimentaire avec un recul de la berme cohérent par rapport aux reculs observés du trait de côte.

Le profil SC4-P1 situé à l'est de l'anse témoigne d'une perte sédimentaire importante avec un affaissement et un recul de la berme marqué notamment entre 10 et 20 m de distance depuis le haut de plage. Cette partie de la plage a subi des submersions sur le haut de plage avec de nombreux débordements (caractérisé par un risque $SI = 2$: Régime de submersion, d'après la section 3.2.2, voir WP229-230, annexe 1).

Le profil SC4-P2 situé à l'ouest de la plage présente une allure réfléchive témoignant de la forte énergie durant l'événement. Une partie du stock sédimentaire s'est déposée en haut de plage à la suite des fortes conditions hydrodynamiques. Cette portion a subi des submersions avec des dépôts de sargasses sur la partie haute de la plage touchant les infrastructures (habitations, commerces) en front de mer (Figure 35 et comparatif photo consultable en annexe 3).

L'énergie des vagues, croissante durant la soirée du lundi 1^{er} juillet et la direction nord-ouest de la houle sur ce secteur sont les facteurs qui ont remodelés ces profils de plage durant l'événement.

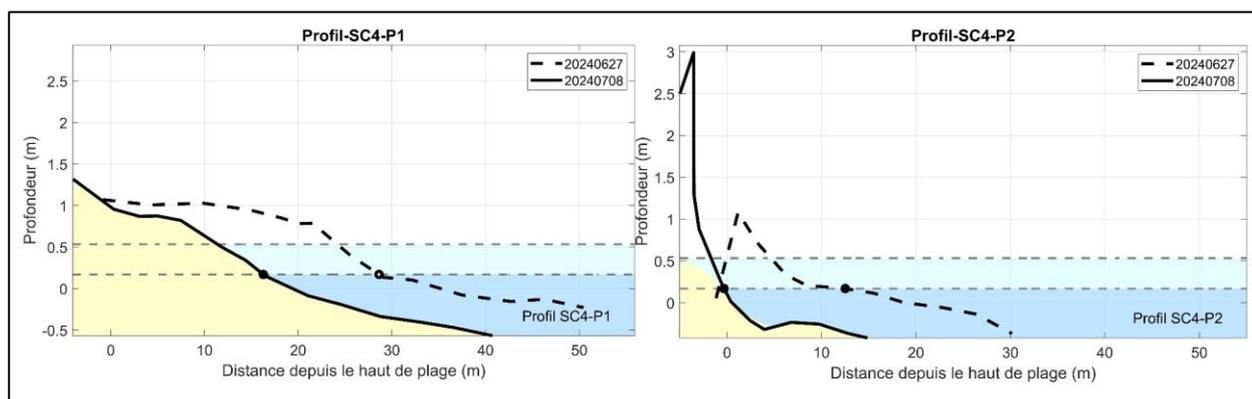


Figure 35 : Evolution des profils topographiques de référence de la plage de l'anse cafard avant (tirets) / après (trait continu) BERYL en fonction de la distance depuis le haut de plage. Les lignes pointillées situent le niveau d'eau atteint à mi-marée et à marée haute (plus haute mer astronomique).

Au niveau de la plage de Dizac, les profils SC3-P1 et P2 n'ont pas pu être mesurés suite à l'absence de plage émergée sur la portion est de cette cellule sédimentaire. La morphologie du profil topographique SC3-P3 présente une linéarité du profil à la suite de l'événement BERYL. En effet, le profil prend une allure réfléchive induite par la forte énergie déployée par les houles de tempête. Ces conditions énergétiques entraînent une forte érosion sur ce secteur avec une perte sédimentaire considérable ainsi que des submersions par intermittence sur l'arrière-plage. Ce secteur a particulièrement été touché compte-tenu du peu de végétation au niveau de la berme et en arrière-plage ainsi que des enjeux présents comme les infrastructures situées en front de mer (bar, restaurant, snack, parking) (Figure 36). Les observations réalisées montrent que le stock sédimentaire perdu au niveau de la berme et de l'ensemble du profil ne se retrouve pas directement sur le bas de plage et suggèrent alors un transport vers le large sur des secteurs de plus grandes profondeurs qui n'ont pas pu être mesurés lors de ces campagnes de suivis.

Un recul important et généralisé du profil de plage est observé sur SC3-P4 plusieurs jours après le passage de BERYL, cohérent avec l'analyse de la variation du trait de côte vue précédemment.

Initialement, avant le passage de BERYL, la morphologie de ce profil est caractérisée par une berme positionnée à environ 10 m de distance depuis le haut de plage. Suite au passage de la tempête, les observations réalisées décrivent une érosion significative du profil sur toute sa longueur avec un recul de la berme situé sur le haut de plage, allant jusqu'au recul de la limite de végétation.

Sur le profil SC3-P5, l'érosion semble être concentrée sur la partie submergée du profil (entre 10 et 35 m de distance depuis le haut de plage) avec un affaissement variant de 10 à 80 cm environ. La pente de la plage devient plus importante d'après le levé post-tempête. Le trait de côte a subi un recul d'environ 3 m sur cette partie ouest de la plage.

La morphologie du profil SC3-P6 est marquée par un affaissement général du profil de plage. La berme n'est pas visible sur les observations post-tempête de juillet puisqu'elle se trouve sous la couverture végétale qui empêche l'opérateur d'effectuer des mesures. Notons un recul du trait de côte d'environ 15 m sur ce profil, avec des chutes de cocotiers de part et d'autre (Figure 36 et comparatif photo annexe 3).

Un comparatif photographique des profils avant-après l'événement est consultable en annexe 4.

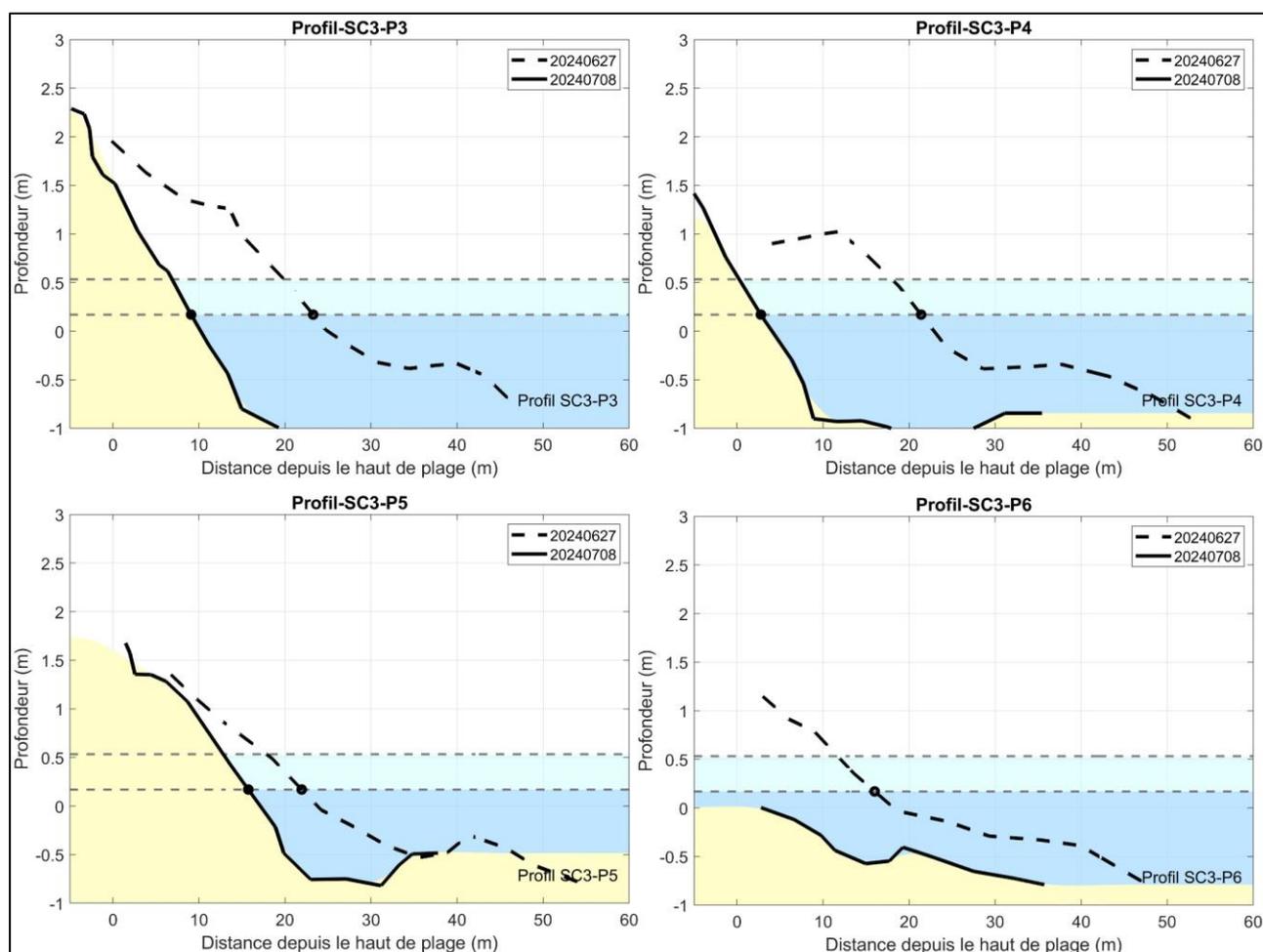


Figure 36 : Évolution des profils topographiques de référence de la plage de Dizac avant (tirets) / après (trait continu) BERYL en fonction de la distance depuis le haut de plage. Les lignes pointillés situent le niveau d'eau atteint à mi-marée et à marée haute (plus haute mer astronomique).

d) *Bilan morphologique sur la commune du Diamant*

Les impacts érosifs associés à cette tempête sont hétérogènes le long de ces cellules sédimentaires, certains secteurs sont plus touchés que d'autres, en fonction du stock sédimentaire disponible et de leur exposition à la houle. Les parties centrales des plages de Dizac et de l'anse Cafard ont subi le plus de dégâts avec une diminution importante du stock sédimentaire et un recul de la position du trait de côte, entraînant des submersions par franchissement. Les mesures réalisées au cours des prochaines campagnes de l'observatoire permettront de mieux évaluer la capacité résiliente de ces cellules sédimentaire sur ce secteur. D'après la classification décrite section 3.2.1, l'impact morphologique de BERYL sur ces deux plages est modéré à fort et atteint sévère sur certaines portions de la plage de Dizac (entre l'ouest du profil P3 et l'est du profil P5 et au niveau du profil P6).

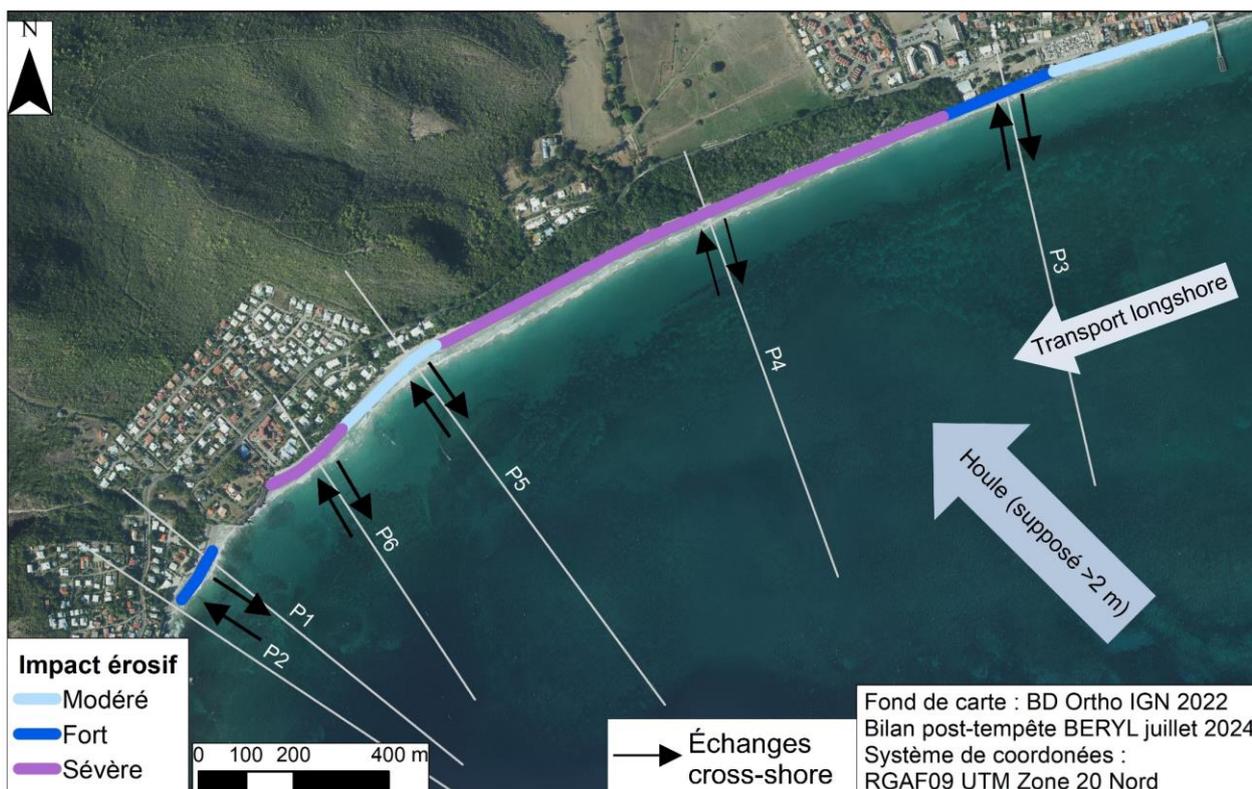


Figure 37 : Bilan de l'évolution morphologique des cellules sédimentaires de la commune du Diamant : Plage de Dizac et plage de l'anse Cafard, les forçages hydrodynamiques sont représentés avec des flèches en fonction de leur direction.

5.1.2. Façade Caraïbe : plage du Coin au Carbet

a) Présentation du site

La plage du Coin est située sur la commune du Carbet (Figure 11) et fait partie d'une cellule sédimentaire qui s'étend sur environ 2.4 km de long. Orientée du nord vers le sud, la plage fait face à la mer des Caraïbes et est caractérisée par un grand linéaire sableux de part et d'autre de l'embouchure de la rivière du Carbet.

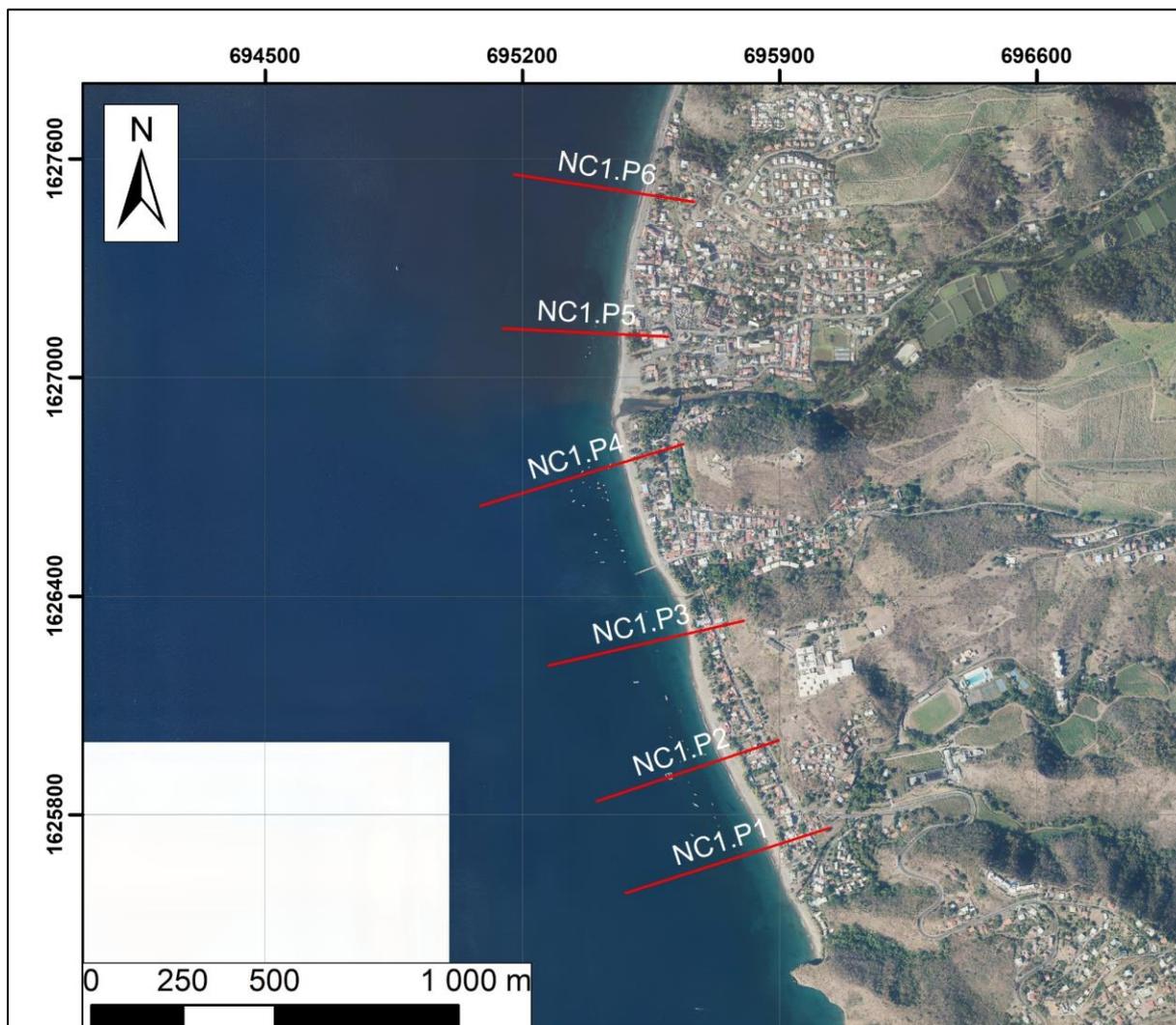


Figure 38 : Localisation des profils de référence mesurés avant et après le passage de BERYL sur la plage du Coin au Carbet. Fond de carte : orthophoto 2022 (IGN).

b) Evolution de la position du trait de côte

La plage du Coin montre de manière générale un recul de la position du trait de côte sur l'ensemble de son linéaire côtier, ce qui témoigne de son exposition aux vagues durant le passage de BERYL. Toutefois, ce recul n'est pas uniforme sur l'ensemble de la plage. En effet, on trouve des zones relativement stables voir en avancée (notamment au niveau de l'embouchure de la rivière du Carbet) et des zones avec des reculs marqués. C'est le cas au niveau du profil P5 avec un recul allant jusqu'à 15 m et entre les profils P2 et P3 avec un recul compris entre 5 et 10 m environ (Figure 39). On remarque la formation d'un talus d'érosion au niveau du haut de plage du profil P3 qui témoigne d'une érosion intense et d'un fort recul de la berme sur cette portion de la plage.

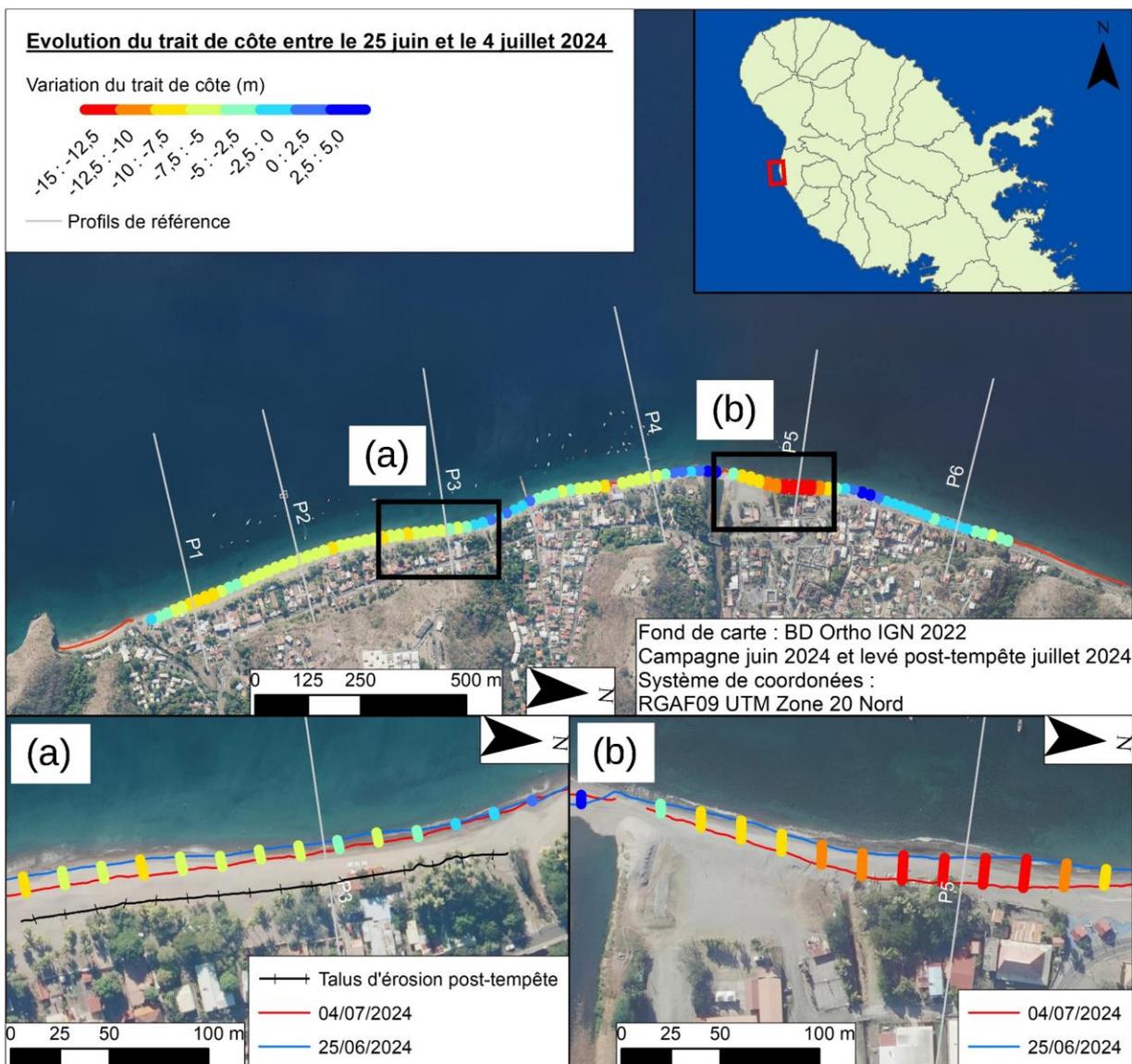


Figure 39 : Variation relative (en m) de la position du trait de côte entre le 25 juin et le 4 juillet 2024 avec (a) : zoom sur le profil P3 avec la formation d'un talus d'érosion (post-tempête) et (b) : zoom sur la partie Est de l'embouchure du Carbet et de l'espace culturel et associatif de la ville au niveau du profil P3.

c) *Evolution des profils topographiques*

L'évolution morphologique des profils NC1-P1 et NC1-P2 montrent un recul de la berme avec un affaissement général du profil. Après le passage de BERYL, une perte considérable de sédiments est à déplorer sur cette partie sud de la plage, on trouve maintenant des galets affleurants au centre de ces profils (de 10 à 20 m pour le profil NC1-P1 et de 25 à 35 m pour le profil NC1-P2, Figure 40).

Un recul important sur la partie haut de plage est remarquable sur le profil NC1-P3, qui est marqué par la formation d'un talus d'érosion situé à 2 m seulement de distance depuis le haut de plage. Ce profil a subi un affaissement de plus d'un mètre sur sa partie centrale témoignant d'une forte érosion. Les observations réalisées montrent que le stock sédimentaire perdu au niveau de la berme et de l'ensemble du profil ne se retrouve pas directement sur le bas de plage et suggèrent alors un transport vers le large sur des secteurs de plus grandes profondeurs qui n'ont pas pu être mesurées lors de cette campagne de suivi post-tempête.

La morphologie du profil NC1-P4 est marqué par un léger recul avec une forme plus réfléchive sur la partie haut de plage (Figure 40). On trouve un petit talus d'érosion de part et d'autre de ce profil qui est tassé par le passage d'engins mécanique dans cette zone, on suppose la présence d'un talus d'érosion à la suite de l'événement qui a été tassé avant le levé post-tempête réalisé le 4 juillet.

La partie de la plage qui semble être la plus touchée par l'événement d'après les variations de de la position du trait de côte est situé au niveau du profil NC1-P5. La morphologie de ce profil post-tempête est marquée par un affaissement important variant du haut de plage jusqu'à 15 m de distance. De la même manière que le profil NC1-P3, le stock sédimentaire ne se retrouve pas directement sur le bas de plage, un transport vers le large vers des secteurs de plus grandes profondeurs est très probable. L'érosion est qualifiée de forte sur cette portion puisque l'arrière-plage est vulnérable suite à cet épisode morphogène, des réseaux racinaires sont affleurants sur la partie haut de plage, (annexe 3, avant après).

Le profil NC1-P6, situé en bordure de la route nationale 2 est moins marquée morphologiquement par l'érosion que les autres profils de plage. Pourtant on remarque une perte sédimentaire (annexe 5) qui n'est remarquable sur les mesures compte-tenu de l'enrochement présent entre la RN2 et le jet de rive. Cette portion nord de la cellule sédimentaire a subi des projections sur la partie haute de la plage touchant notamment la route.

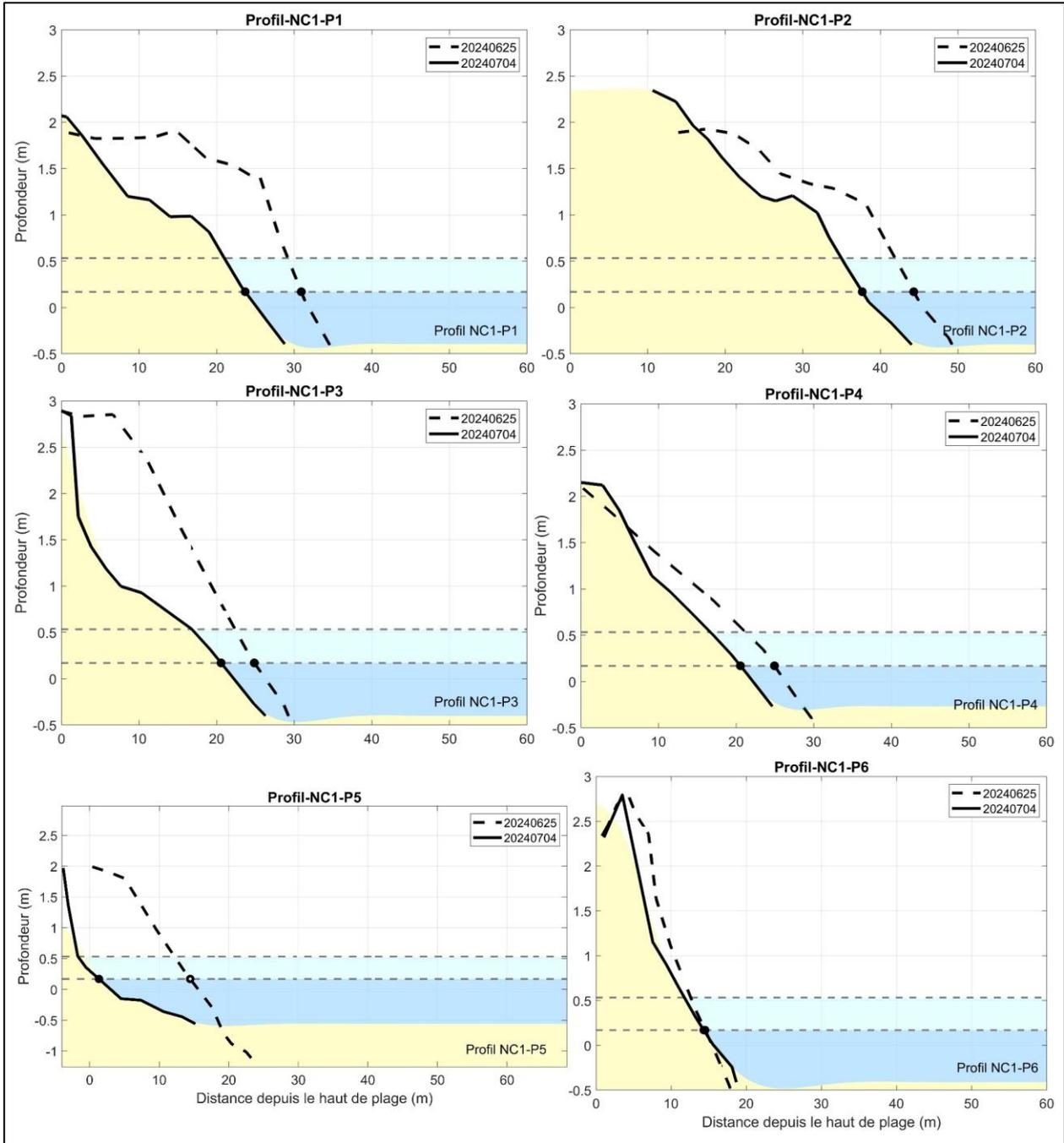


Figure 40 : Evolution des profils topographiques de référence de la plage du Coin avant (tirets) / après (trait continu) BERYL en fonction de la distance depuis le haut de plage. Les lignes pointillés situent le niveau d'eau atteint à mi-marée et à marée haute (plus haute mer astronomique).

d) *Bilan morphologique sur la commune du Carbet*

A la suite de BERYL, on constate une érosion sur l'ensemble de la plage avec des secteurs plus touchés que d'autres. En l'absence de données de houles sur ce secteur, on suppose une houle de provenance sud – sud-ouest avec des hauteurs significatives supérieures à 2 m d'après les photos et vidéos recueillies datant du 1^{er} juillet. Cependant, la provenance du train de houle a probablement varié vers l'ouest durant la nuit du lundi au mardi d'après la trajectoire et l'intensité de BERYL. Les profils les plus touchés sont situés sur la partie sud de la plage (entre le profil P1 et le profil P3) et au niveau du profil P5 avec un recul intense du trait de côte dans ces zones.

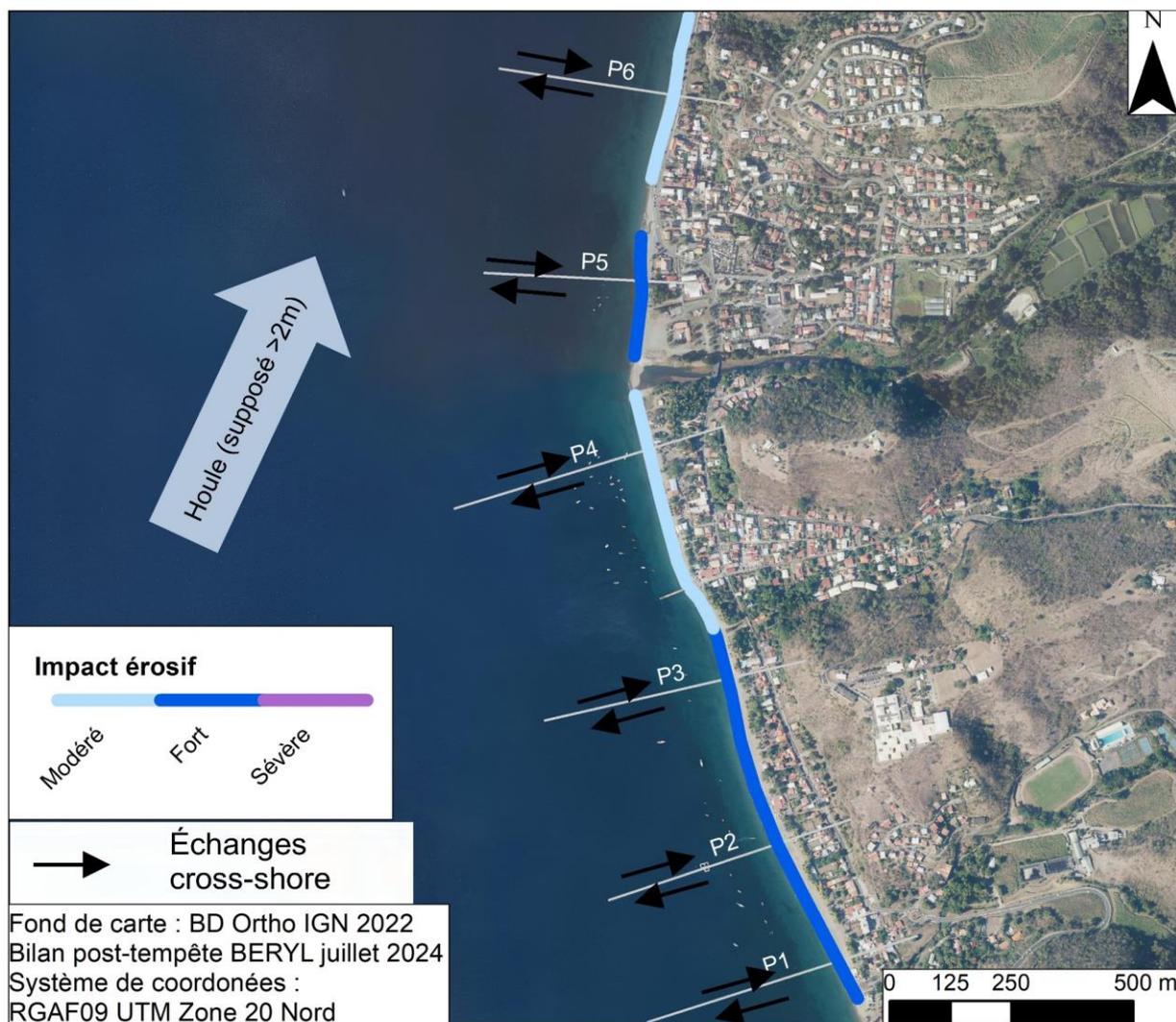


Figure 41 : Bilan de l'évolution morphologique de la plage du coin situé dans la commune du Carbet, la direction et l'intensité des houles sont évalués à dire d'expert via les vidéos et photos du lundi 1^{er} juillet.

Le recul du trait de côte sur certaines parties de la plage (notamment au sud) et la perte sédimentaire associée ont un impact environnemental sur les sites de pontes des tortues marines. En effet, l'érosion des sédiments à la suite de cet événement réduit considérablement l'espace de ponte des tortues marines (luth, verte et imbriquée) avec un recul partiel de la végétation sur certaines zones. La végétalisation de bord de mer, en plus de favoriser les conditions de pontes des tortues marines, permet de limiter l'érosion du littoral en fixant les sédiments (Figure 42). Cette solution souple est intégrée dans le cadre du projet de restauration d'habitats naturels mené par l'Asso-Mer sur la commune du Carbet.

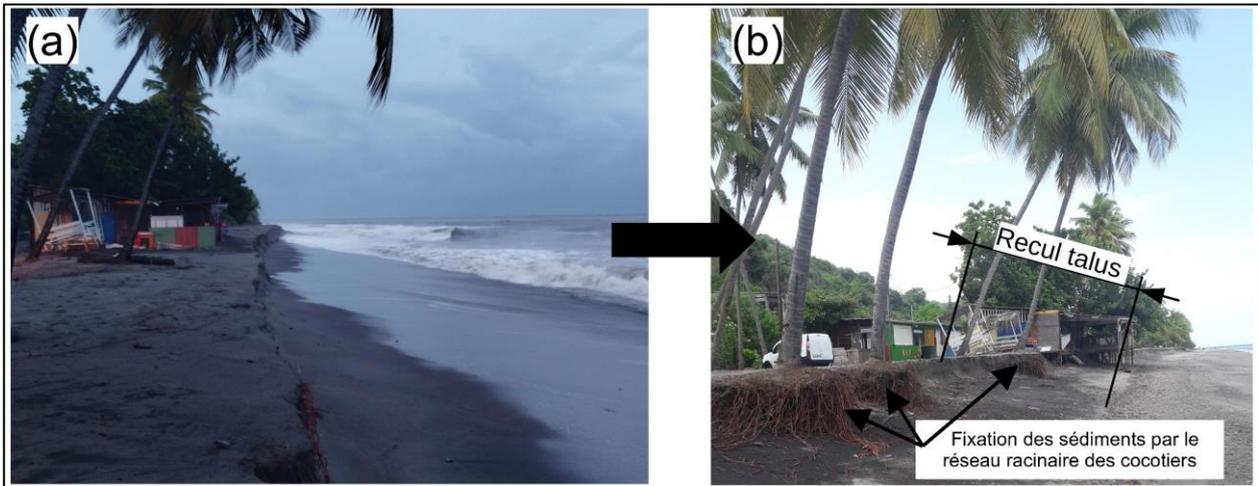


Figure 42 : Photographies avant / après le passage de la tempête BERYL avec (a) photographie du 1^{er} juillet à 18h30 et (b) photographie du levé post-tempête du 4 juillet.

5.2. OBSERVATIONS ISSUES DU SUIVI PAR IMAGERIE PHOTO

5.2.1. Façade Caraïbe

a) La plage du Coin au Carbet

La solarcam de la plage du coin ne permet pas de visualiser des images pendant la tempête à la suite d'un problème survenu le 1^{er} juillet. Cependant on constate une évolution morphologique entre l'image du 1^{er} juillet à 7h (avant) et celle du 3 juillet à 7h (post-tempête).



Figure 43 : Images issues de la solarcam sur la plage du carbet avec évolution de la position du trait de côte avant (01/07/24) et après (03/07/24) BERYL. En bleu le trait de côte observé le 1^{er} juillet avant l'événement et en rouge le trait de côte post-événement du 3 juillet, les pointillés rouges représentent une zone marquée par un affaissement de la plage.

Ces évolutions morphologiques se traduisent également par un recul de la position du trait de côte et une diminution de la largeur de plage sur plusieurs mètres avec un abaissement du profil de plage (Figure 43). Ce constat est complémentaire et cohérent vis-à-vis des analyses morphologiques vues précédemment sur la partie sud de cette plage.

b) Les plages du Diamant

Les images provenant de la solarcam de la plage du Diamant nous montrent une évolution significative des conditions hydrodynamiques entre le 30 juin et le 1^{er} juillet. Notons l'orientation Sud – Sud-est des vagues sur la capture du 1^{er} juillet à 13h30 qui correspond au passage de BERYL au sud des petites Antilles.



Figure 44 : Images issues de la solarcam de la commune du Diamant avec : (a) Image du 30 juin à 10h30 (avant tempête), (b) image du 1^{er} juillet à 13h30 (pendant la tempête) et (c) image du mardi 2 juillet à 10h30 (post-tempête).

6. Synthèse des impacts provoqués par la houle cyclonique

6.1. IMPACTS EROSIFS

Les observations réalisées avant et après le passage de BERYL montrent des impacts érosifs modérés à forts qui se concentrent sur la côte Caraïbe, entre la commune du Prêcheur au nord et celle de Saint Anne au sud comme le montre la Figure 45. On trouve une exception pour la plage de Dizac au Diamant avec un niveau d'érosion sévère lié à l'exposition de la plage aux houles cycloniques. D'après les témoignages des communes de la côte Atlantique, il n'y aurait pas eu d'impact (ou d'ampleur limitée) sur cette façade.

Parmi les cellules sédimentaires les plus touchées, on trouve celle du nord Caraïbe. Sur la commune du Prêcheur, l'érosion a entraîné un recul de la position du trait de côte de plusieurs mètres voire une dizaine de mètres dans le quartier de la Charmeuse associé à un abaissement du profil de plage. Cette érosion affecte des stocks sédimentaires constitués de galets. Les impacts sont nombreux puisque de nombreuses infrastructures et habitations sont directement installées sur ce stock sédimentaire.

Sur la plage du Carbet, les mesures topographiques démontrent un recul marqué de la position de la berme et un affaissement des profils avec l'apparition d'un talus d'érosion métrique sur plusieurs portions de la plage. Ces évolutions entraînent un recul de la position du trait de côte sur plusieurs mètres ayant impacté un certain nombre de restaurant de plage. Toutefois, les impacts observés se concentrent essentiellement sur le haut de plage et aucune répercussion sur le couvert végétal en arrière-plage ou sur les biens ou autres infrastructures situées à cet endroit n'a été observée.

Située au sud-ouest de la Martinique, la commune du Diamant a été particulièrement touchée compte tenu de son exposition aux trains de houles générés par la trajectoire de BERYL. L'évolution morphologique des plages du Diamant (anse Cafard et Dizac) est caractérisée par une diminution importante du stock sédimentaire notamment sur les parties centrales de ces cellules. En conséquence, un recul du trait de côte généralisé est constaté variant de quelques mètres à presque 20 m au centre de la plage Dizac. Plusieurs infrastructures situées en front de mer ont été touchées par cet événement mais l'arrière-plage urbanisé reste préservé dans l'ensemble malgré des accumulations de sable et des dépôts de sargasse.

La poursuite des suivis topographiques menés dans le cadre de l'Observatoire permettra d'évaluer les capacités de résilience des plages du Diamant et du Carbet, à savoir dans quelle mesure et dans quelle temporalité le déficit du stock sédimentaire actuel va être comblé.

Sur la partie sud, l'impact érosif sur les plages est moins marqué. L'érosion du stock sédimentaire se manifeste plutôt par un déplacement massif de sable déposé par les laisses de mer sur l'arrière-plage que constitue souvent les routes qui bordent ces bords de mer. Une épaisseur de 1 m a été évoquée sur la route du front de mer de Sainte Luce. Les observations réalisées suggèrent donc principalement des échanges sédimentaires transversaux (dans la direction perpendiculaire au trait de côte).

Ainsi, d'après la classification décrite section 3.2, l'impact morphologique de BERYL oscille entre modéré à fort sauf sur la plage de Dizac du Diamant où il atteint un niveau sévère. Rappelons que ce niveau se produit lorsque le système situé en arrière plage est touché par l'érosion. Il

s'agit du niveau de risque d'érosion le plus élevé avec des répercussions sur le couvert végétal en arrière-plage ou sur tous les biens ou autres infrastructures situés dans cette zone.

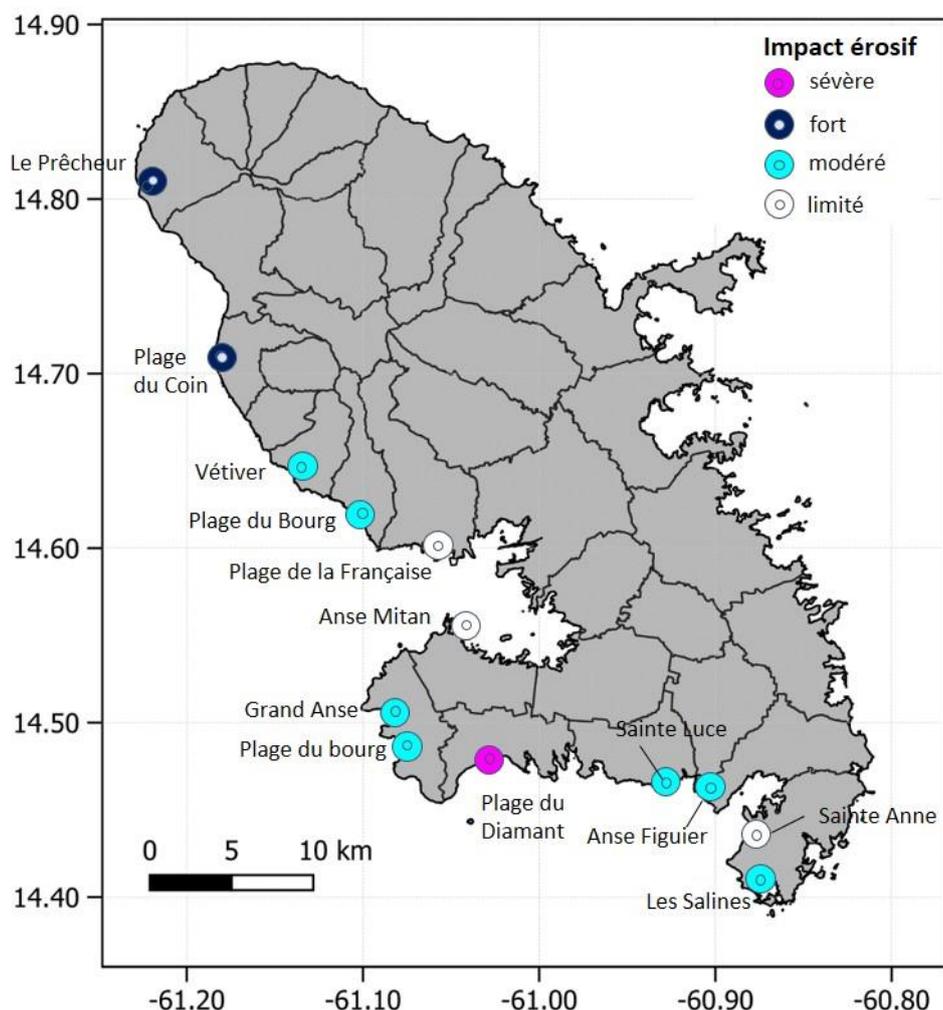


Figure 45 : Cartographie synthétique des *impacts érosifs* provoqués par les houles cycloniques associées au passage du cyclone BERYL du 1^{er} juillet 2024. L'échelle d'impact est décrite dans le § 3.2.2

6.2. IMPACTS SUBMERSIFS

Les observations ont mis en évidence également une concentration des impacts submersifs sur les bourgs de la côte Caraïbe. La Figure 46 montre la diversité de ces impacts estimés entre modéré et sévère suivant les bourgs.

La submersion a été accompagnée par des phénomènes de chocs et de projection liés à l'action mécanique des vagues. Les vagues sont venues déferler sur le front de mer de la quasi-totalité des bourgs visités comme en témoignent certains dommages caractéristiques.

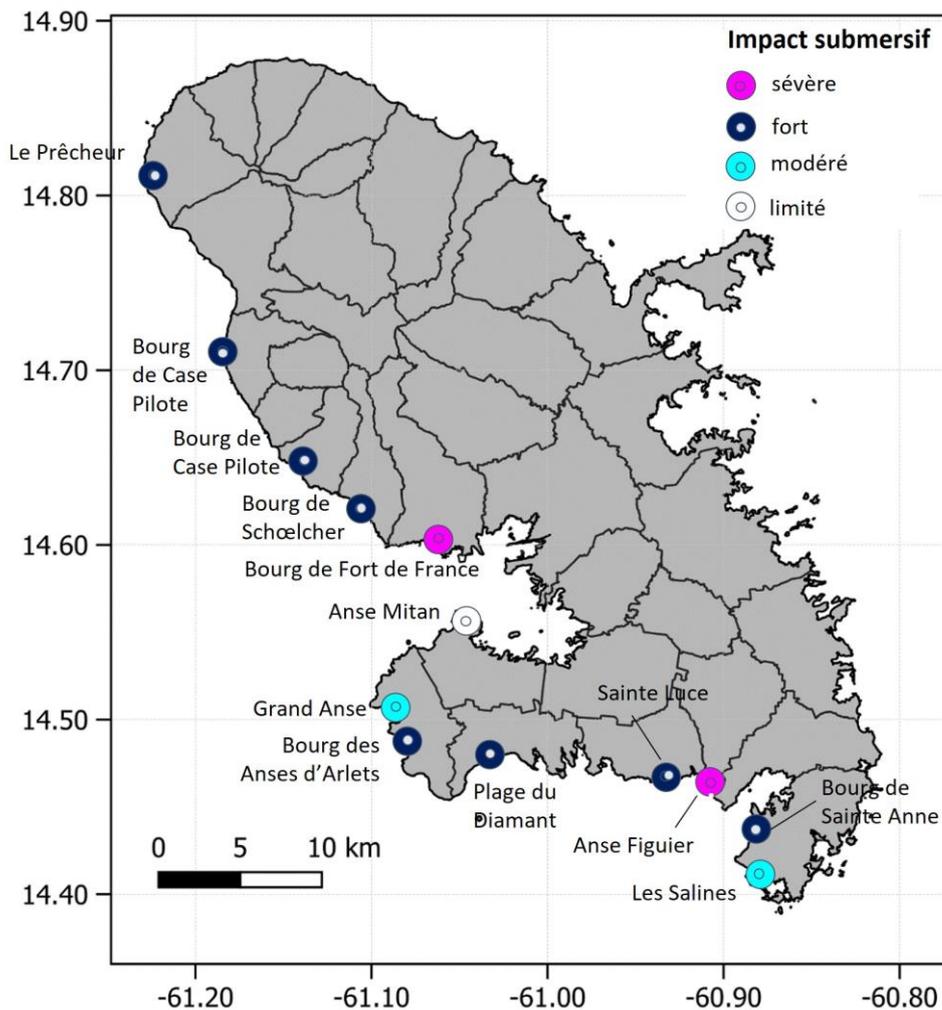


Figure 46 : Cartographie synthétique des impacts submersifs provoqués par les houles cycloniques associés au passage du cyclone BERYL du 1^{er} juillet 2024. L'échelle d'impact associée est décrite dans le § 3.2.1.3.2.2

Le niveau d'impact a été qualifié de sévère sur deux sites où la submersion s'est maintenue après le pic de l'événement (Anse Figuier) de manière permanente et/ou a été très pénétrante (comme à Fort de France). L'arrière plage de l'Anse Figuier, constituée d'un point bas topographique, était encore submergée le lendemain matin à 9h (cf. Figure 47).



Figure 47 : Submersion prolongée de l'arrière plage de l'Anse Figuier, encore sous eaux le lendemain matin (©Facebook mairie de Rivière Pilote)

6.3. COMPARAISON AVEC D'AUTRES HOULES CYCLONIQUES

Au vu de ce bilan, la houle cyclonique provoquée par BERYL a provoqué des effets importants sur la côte Sud et la côte Caraïbe. Est-elle pour autant un évènement de référence par rapport aux cyclones historiques ? Le présent rapport est donc également l'occasion de comparer les dommages engendrés par BERYL avec ceux provoqués par d'autres cyclones en comparant notamment les photographies prises après les différents évènements.

Cet évènement n'apparaît pas comme le plus dommageable à l'échelle de l'île mais pourrait correspondre à un évènement de référence pour certains secteurs.

Les seuls cyclones ayant traversé le sud de l'arc antillais sont DEAN (2007) et BEULAH (1967). Pour ce dernier nous ne disposons pas d'information mais pour le cyclone DEAN, la houle cyclonique impactante avait une direction nord-est très différente de celle de BERYL ; les impacts de DEAN se sont essentiellement concentrés sur la côte Atlantique et ne sont donc pas comparables.

Les derniers cyclones ayant provoqué des houles cycloniques impactantes pour la Martinique ont traversé l'arc des petites Antilles plus au nord. Il s'agit du cyclone Maria (2017), du cyclone Omar (2008) et plus anciennement, du cyclone Lenny (1999). Ce dernier est peu documenté mais aurait causé des dégâts importants sur la côte Caraïbe. La houle cyclonique levée par ces ouragans suit une direction nord-ouest au niveau de la Martinique qui a pu, comme cela a été constaté pour l'évènement Maria, s'orienter progressivement ouest à sud-ouest à l'arrivée de la côte Caraïbe se rapprochant ainsi de la direction de la houle cyclonique (sud – sud-ouest) de BERYL.

Le Tableau 1 compare les effets des trois dernières houles cycloniques sur la côte Caraïbe. Elle met en évidence que les houles cycloniques provoquées par le OMAR sont vraisemblablement celles qui ont eu les effets les plus importants. Lors de cet évènement, le niveau d'impact

submersif (qu'on jugerait de sévère) sur la ville de Saint-Pierre et du Carbet paraissent largement plus importants que pour BERYL. Le niveau d'impact paraît relativement similaire sur les communes de Case Pilote et de Schœlcher entre les cyclones OMAR et BERYL (cf. Figure 48 et Figure 49).

Sur la côte Sud cependant, et plus particulièrement entre les communes de Sainte-Luce et de Sainte-Anne, nous ne disposons que de peu d'observations. Les ouragans documentés Omar, Dean et Maria n'évoquent aucun dommage ni érosion marquée sur ces trois communes (excepté sur les Salines) ; nous n'avons en particulier, pas connaissance de dommages dans les bourgs de ces trois communes alors qu'ils ont été fortement impactés par le passage de BERYL.

En conclusion, il se pourrait que les houles cycloniques engendrées par le passage de BERYL sur les îles Grenadines n'apparaissent pas comme les plus dommageables à l'échelle de l'île ni pour la côte Caraïbe mais pourraient s'avérer être un événement de référence pour la côte Sud.

Tableau 1 : Comparatifs des impacts des houles cyclones provoquées par les trois derniers cyclones Omar, Maria et BERYL sur la côte Caraïbe

	DEAN (2007)	OMAR (2008)	MARIA (2017)	BERYL (2024)
Saint-Pierre	+++	+++		+
Carbet	+++	+++	++	++
Case-Pilote	++	++	+	++
Schœlcher	?	?	+	**
Anse Mitan	+	+	?	-



a). Après le passage de la houle cyclonique OMAR - 16 octobre 2008 (Barras 2008)



b). Après le passage de la houle cyclonique MARIA – 18 septembre 2017 (Lombard et Nachbaur 2017)



d) Après le passage de la houle cyclonique BERYL (1^{er} juillet 2024)

Figure 48 : Comparaison de l'ampleur de la submersion du haut de plage sur le front de mer du bourg de Case Pilote



a). Après le passage de la houle cyclonique MARIA – 18 septembre 2017 (Lombard et Nachbaur, 2017)



b). Après le passage de la houle cyclonique BERYL (1^{er} juillet 2024)

Figure 49 : Comparaison de l'ampleur de la submersion du haut de plage sur la partie nord de la plage d'Anse Madame entre les houles cycloniques provoqués par le passage de a). Maria et b). BERYL

7. Conclusion

BERYL est passé dans la matinée du 1er juillet 2024 sur les Grenadines avec une intensité de catégorie 4/5 générant une forte houle cyclonique de secteur sud ouest à sud/sud-ouest vers le littoral de la Martinique et touchant en particulier les secteurs Sud Caraïbe et Caraïbe de l'île. La hauteur significative des vagues dans le canal de Sainte-Lucie a atteint jusqu'à 5 m au pic de l'évènement.

A 200 km de distance, sur la Martinique, les impacts se sont concentrés sur les côtes sud et la côte Caraïbe depuis la commune du Prêcheur au nord jusqu'à la commune de Sainte-Anne. Les zones les plus touchées sont celles exposées directement à cette houle de direction sud – sud-ouest comme le montre l'analyse morphologique au niveau de la commune du Diamant.

Le diagnostic post-évènement réalisé a visé à collecter des informations sur les différentes manifestations d'un phénomène de houle cyclonique pour enrichir notre connaissance de ces événements extrêmes ; il ne s'agit donc pas d'une liste exhaustive de l'intégralité des dommages sur le littoral. Le degré d'impact sur les sites visités a été mesuré au moyen de deux indicateurs qualitatifs complémentaires mesurant d'une part les impacts érosifs sur le stock sédimentaire des plages et d'autre part, les impacts submersifs sur l'arrière plage.

Ce bilan nous permet de mettre en évidence que cette houle cyclonique n'est pas la plus dévastatrice depuis ces trente dernières années : les houles cycloniques provoquées par les ouragans Lenny (1999) et Omar (2008) semblent avoir eu des impacts plus dévastateurs encore. Cependant, au vu des impacts érosifs et submersifs observés sur la façade Caraïbe et des analyses morphologiques réalisées, cet événement peut être considéré comme une référence en termes de classification des tempêtes pour la côte Sud de la Martinique.

A cette information sur l'importance de ce cyclone, évoquons plusieurs autres enseignements tirés de ce retour d'expérience :

- Cette étude rappelle combien les impacts des houles cycloniques dépendent à la fois de la position du cyclone (traversée nord ou sud de l'arc des petites Antilles) et en même temps de la distance à l'œil du cyclone. En effet, DEAN a traversé l'arc à très faible distance des côtes limitant sans doute l'amplification de la houle vis-à-vis de la côte Caraïbe relativement épargnées. A l'inverse, BERYL a engendré des houles cycloniques de forte intensité sur la côte Caraïbe.
- Cet évènement a engendré de nombreux dommages par l'attaque mécanique directe des vagues. En effet, la houle a attaqué frontalement un grand nombre de bourgs et de plages à enjeux. Évoquons notamment les dommages sévères sur plusieurs habitations de la commune du Prêcheur dont une a été totalement détruite.
- A ces dommages se sont ajoutés des déplacements massifs de sable sur le haut de plage sur un grand nombre de route de front de mer. Ce phénomène rappelle le rôle essentiel de cette zone de battement naturel à l'arrière plage à prendre en compte pour un aménagement durable du littoral. C'est notamment sur la partie centrale au niveau de la plage de Dizac que l'on constate l'importance de cette zone tampon durant ce type d'évènement.
- Ce retour d'expérience confirme que certaines plages comme celles du Carbet, de l'Anse Madame ou de Grand Anse subissent des érosions à chaque évènement. Mieux comprendre le potentiel de résilience de ces plages particulièrement exposées est important notamment pour des événements comme BERYL en début de saison cyclonique.

L'anticipation du recul de la position du trait de côte doit reposer d'une part sur la connaissance des évolutions historiques et d'autre part sur une bonne compréhension locale du fonctionnement de la dynamique du littoral. Les observations collectées participent à améliorer la compréhension et la quantification des phénomènes de reculs événementiels majeurs du trait de côte associés aux événements météorologiques de fortes intensités. Elles viennent alimenter le dispositif de surveillance « érosion » en cours de déploiement (annexe 6) et ainsi co-construire une base de données collaborative permettant d'archiver et quantifier les impacts des événements extrêmes à venir

8. Références

- Barras, A.V. 2008. « Inventaire des impacts de la houle cyclonique OMAR (16 octobre 2008) sur la côte caraïbe de la Martinique. Compte-rendu du 18 octobre 2008 ». Rapport final RP-56803-FR. BRGM.
- Bouvier, C, A Njakam, A Robinet, et G Azorakos. 2023. « SMARTPHONE BASED SHORELINE MONITORING: AN INTERSITE COMPARISON IN LESSER ANTILLES ». In *Coastal Sediments*, 255-66. https://doi.org/10.1142/9789811275135_0023.
- Bouvier, Clement, Jelmer Korteling, Timothy D. Price, Yann Balouin, et Bruno Castelle. 2020. « OBSERVATION AND MODELLING OF SHOREWARD PROPAGATING ACCRETIONARY WAVES (SPAWS) ON MICROTIDAL BEACHES ». *Coastal Engineering Proceedings*, n° 36v (décembre), sediment.27. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.sediment.27>.
- 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. ». Rapport final RP-69651-FR. BRGM.
- Bouvier, C. 2021. Observatoire de la dynamique du littoral martiniquais (OLiMar) – « Rapport technique d'année 2 et 3 (2019-2020) ». Rapport final RP-70659-FR
- Ferreira, Óscar, Theocharis A Plomaritis, et Susana Costas. 2017. « Process-based indicators to assess storm induced coastal hazards ». *Earth-Science Reviews* 173:159-67. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.010>.
- Harley, Mitchell D., Michael A. Kinsela, Elena Sánchez-García, et Kilian Vos. 2019. « Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images ». *Coastal Engineering* 150 (août):175-89. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2019.04.003>.
- Leaman, Christopher K, Mitchell D Harley, Kristen D Splinter, Mandi C Thran, Michael A Kinsela, et Ian L Turner. 2021. « A storm hazard matrix combining coastal flooding and beach erosion ». *Coastal Engineering* 170:104001. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104001>.
- Lombard, M., et A. Nachbaur. 2017. « Inventaire des impacts occasionnés par la houle cyclonique associée à l'ouragan MARIA (18 septembre 2017) sur la côte Nord-Caraïbe de la Martinique ». Rapport final RP-67298-FR. BRGM.
- A.V Barras, C. Oliveros, B. Joseph, C. Marimoutou. 2008. « Inventaire et caractérisation des impacts de la houle cyclonique de Dean (17 août 2007) sur le littoral de la Martinique ». Rapport final RP-55954-FR
- Sallenger Jr, A. H. 2020. « Storm Impact Scale for Barrier Islands ». *Journal of coastal research*, 890-95.

Annexe 1 Catalogue photo (façade Sud)

Localisation des impacts : commune de Sainte-Anne



Localisation des impacts : grande plage des Salines



Photographies des impacts : commune de Sainte-Anne



WP 115 : inondation et dépôts massifs de sargasses (photographie M.C-B, France-Antilles.fr)

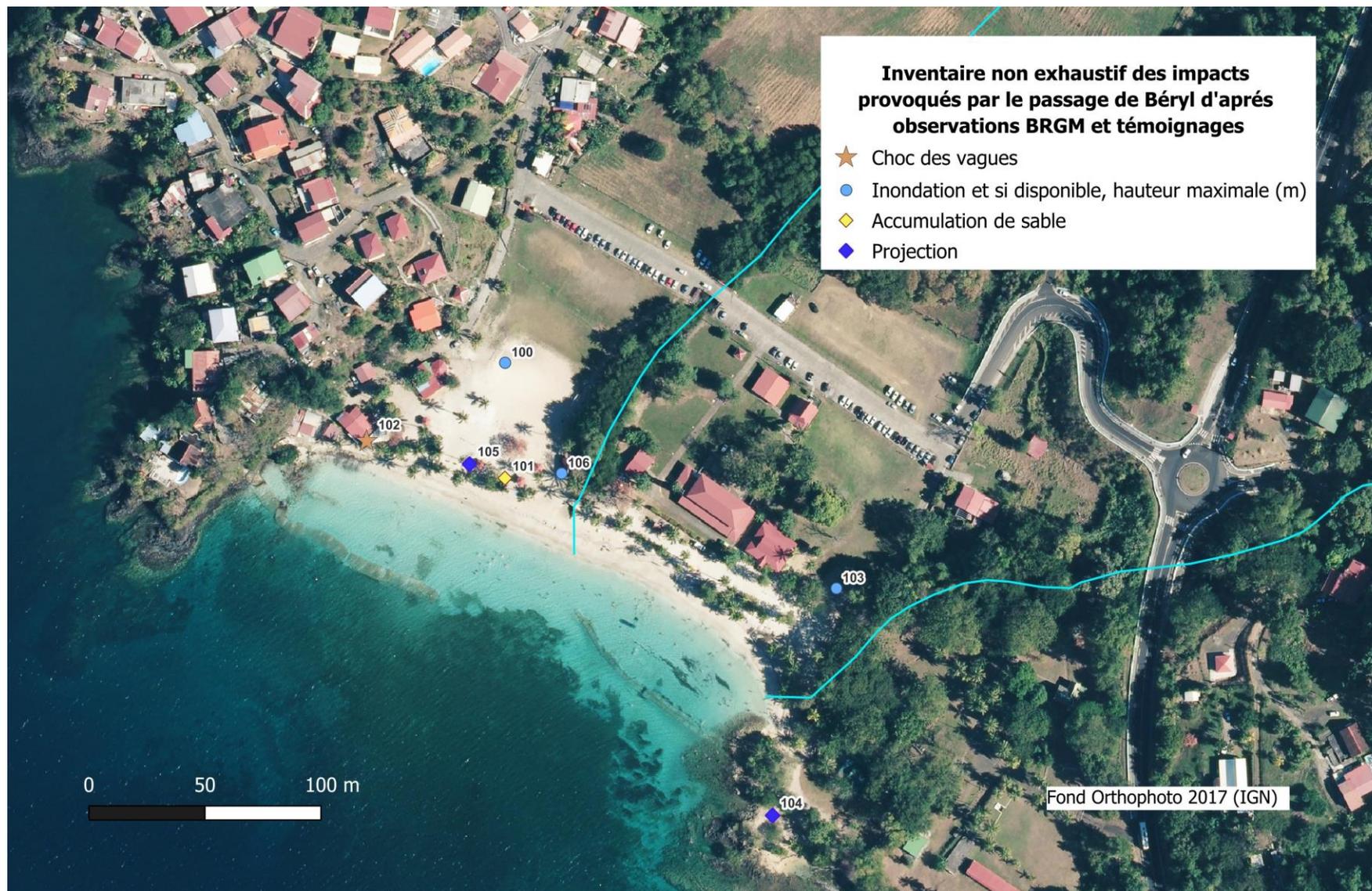


WP 114 : Projections et dépôts massifs de sargasses sur les terrasses en front de mer



WP 122 : Érosion modéré au niveau du centre de la grande plage des Salines

Localisation des impacts : Anse Figuiier (Rivière Pilote)



Photographies des impacts : Anse Figuier (Rivière Pilote)



WP 101 : Ensablement au niveau des kiosques de plages (photographie mairie, facebook)



WP 105 : Projection de débris sur le haut de plage (photographie mairie, facebook)



WP 103 : inondation arrière-plage sur le secteur sud de l'anse Figuier (photographie BRGM 02/07/2024)



WP 100 : inondation arrière-plage sur le secteur sud de l'anse Figuier (photographie mairie, facebook)

Photographies des impacts : Anse Figuier (Rivière Pilote)



WP 106 : inondation derrière les latrines
(photographie mairie, facebook)



WP 102 : destruction du soubassement du restaurant
'Cascade' (photographie mairie, facebook)

Localisation des impacts : Sainte-Luce (bourg et plage de Gros Raisin)



Photographies des impacts : Sainte-Luce (bourg)



WP 190 : « 1m de dépôts sableux » à cet endroit (photographie © RCI 09/07/24)



WP 194 : Projection de débris et accumulation de sable (photographie © RCI 09/07/24)



WP 196 : Débris et enfoncement des rideaux métalliques par le jet de rive (photographie © RCI 09/07/24)



Accumulation décimétriques de sables face aux habitations en haut de plage (photographie © RCI 09/07/24)

Photographies des impacts : Sainte-Luce (plage et sentier littoral)



Érosion le long du littoral (Photographie C.Lancette 07/07/24)



WP 253: Érosion le long du littoral (Photographie ©BRGM 02/07/24)



WP 251: Débris de coraux en bas de plage (Photographie ©BRGM 02/07/24)

Photographies des impacts : Le Diamant (Anse Cafard)



WP 229: Projection de sargasses sur terrasse
(Photographie ©BRGM 02/07/24)



WP 229: Chutes de cocotiers et socle rocheux
apparent (Photographie ©BRGM 02/07/24)



WP 230: Inondation haut de plage (Photographie
©BRGM 02/07/24)

Photographies des impacts : Le Diamant (Plage Dizac)



WP 231: Érosion et formation d'un petit talus
(Photographie ©BRGM 02/07/24)



WP 232: Submersion et dégâts matériels
(Photographie ©BRGM 02/07/24)



WP 226: Projections et débris sur un logement en
front de mer (Photographie ©BRGM 02/07/24)



WP 226: Érosion dû aux chocs des vagues
(Photographie ©BRGM 02/07/24)

Annexe 2 Catalogue photo (façade Caraïbe)

Localisation des impacts : Anse d'Arlet



Photographies des impacts : Anse d'Arlet



WP 141 : Abaissement de la plage provoqué par l'érosion entraînant la chute d'un cocotier (photographie du 02/07/2024 © BRGM)



WP 147 : submersion sur la partie haut de plage, la première rangée de bâtiments est touchés (photographie 02/07/2024 © BRGM)

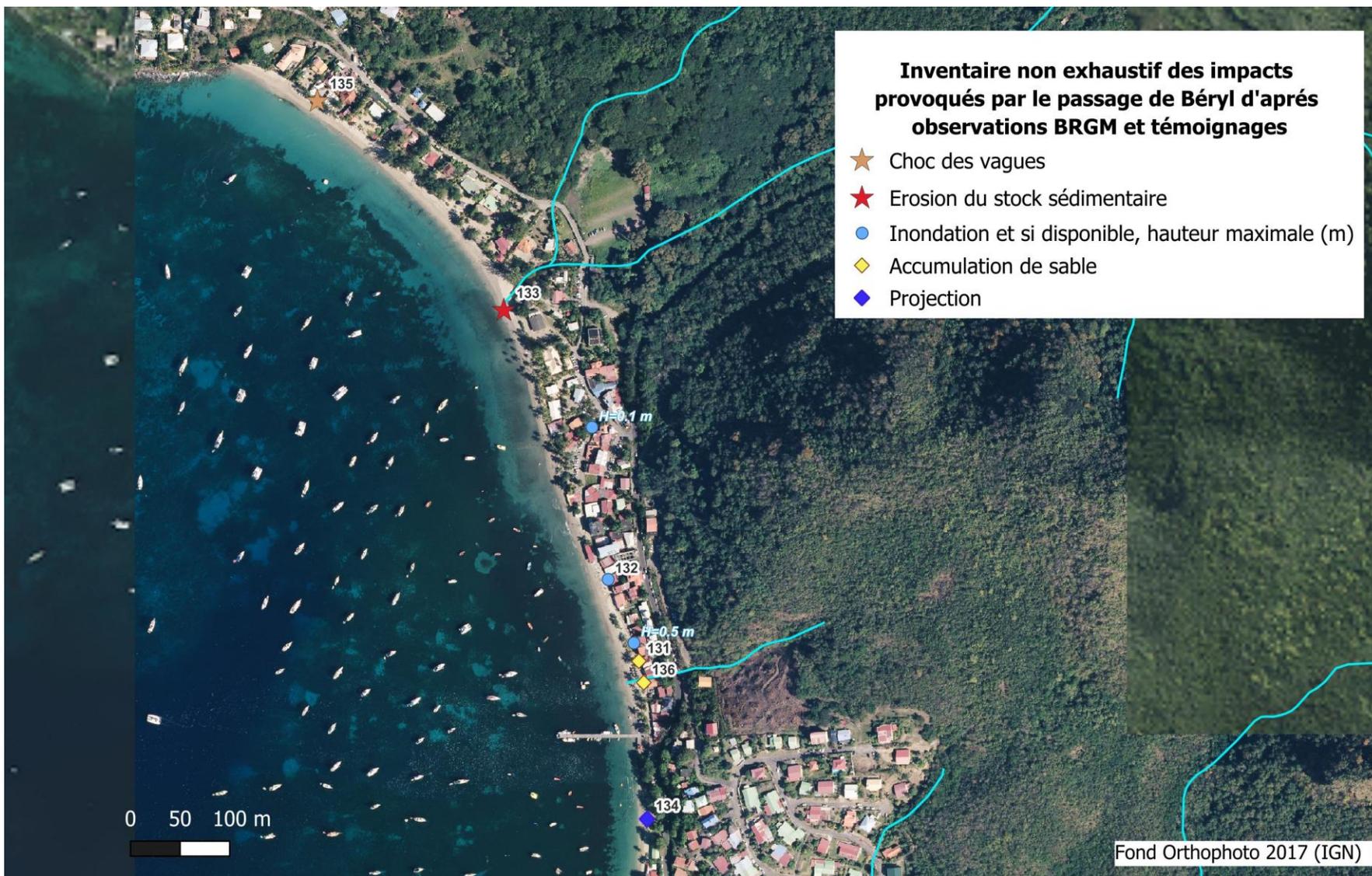


WP 144 : Abaissement de la plage provoqué par l'érosion entraînant des dégâts matériels (photographie du 02/07/2024 © BRGM)



WP 146 : Dépôts de vase, laisse de mer et débris sédimentaires sur la route départementale (photographie du 02/07/2024 © BRGM)

Localisation des impacts : Grande Anse d'Arlet



Photographies des impacts : Grande Anse d'Arlet



WP 136 : submersion sur la partie haut de plage, la première rangée des bâtiments est touchés



Érosion de la plage et projection sur les bâtiments en front de mer

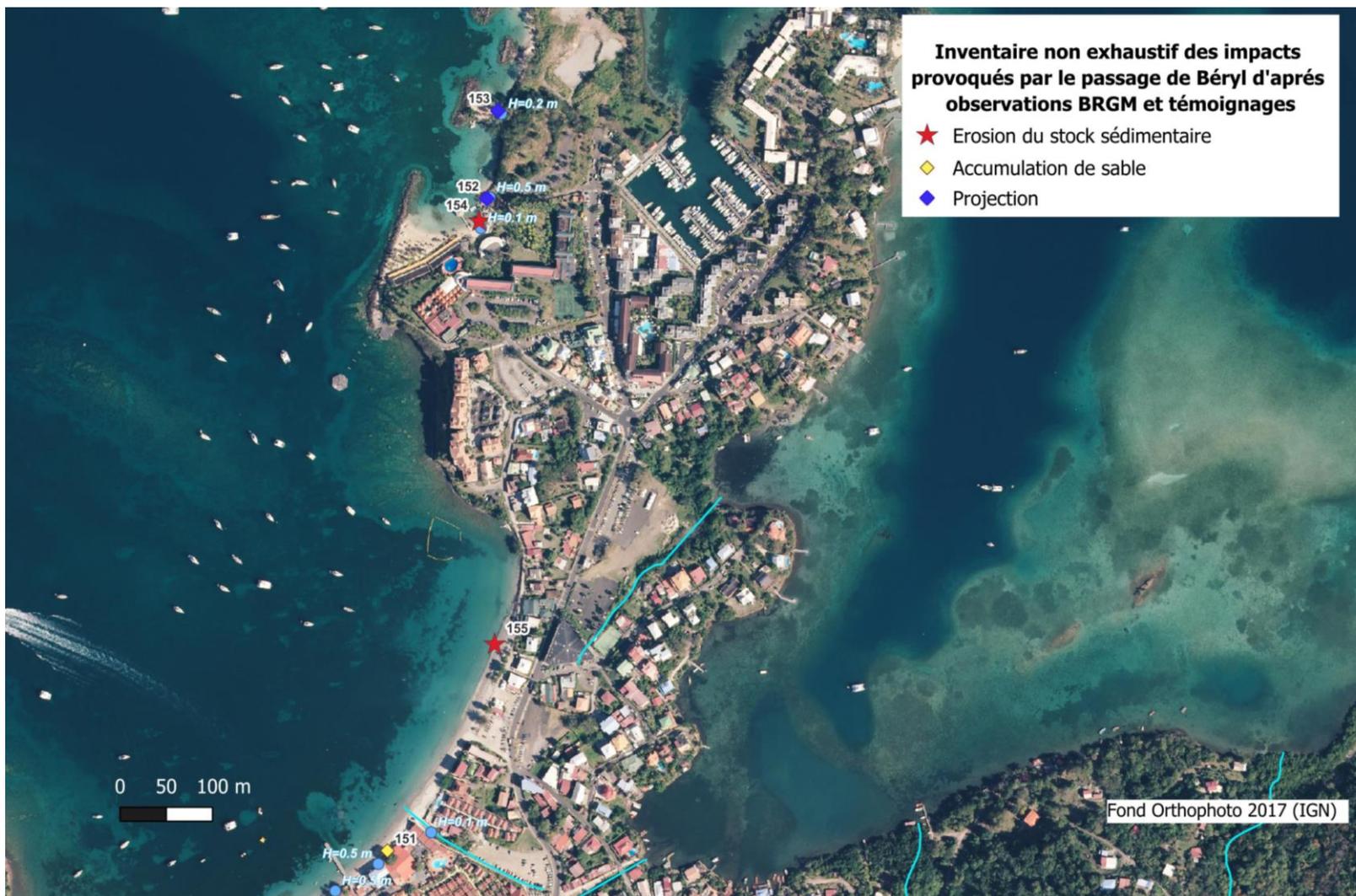


WP 131 : submersion sur la partie haut de plage, la première rangée des bâtiments est touchés



WP 133 : érosion de la plage et projection sur les bâtiments en front de mer

Localisation des impacts : Trois-Ilets



Photographies des impacts : Trois-Îlets



WP 152 : Dépôts de débris et de galets sur la plage de l'hôtel bakoua (photographie ©BRGM 02/07/24)



Accumulation de sable sur le haut de plage de l'anse Mitan (depuis ponton vers le sud, photographie ©BRGM 02/07/24)



WP 151 : Accumulation de sable au niveau de l'anse-Mitan (photographie ©BRGM 02/07/24)



Accumulation de sable sur le haut de plage de l'anse Mitan (depuis ponton vers le nord, photographie ©BRGM 02/07/24)

Localisation des impacts : Fort-de-France



Photographies des impacts : Fort-de-France



WP 225 : Bateau échoué au niveau de la plage de la Française (photographie ©France-Antilles)



WP 221 : Inondation provoqué par la submersion au niveau de l'Impératrice sur la Savane (photographie ©France-Antilles)



WP 224 : Dégâts apparents sur le marché des artisans au niveau du Malecon (photographie ©JME France-Antilles)



Dépôts de vases le long de la Savane (photographie ©France-Antilles)

Localisation des impacts : Schœlcher



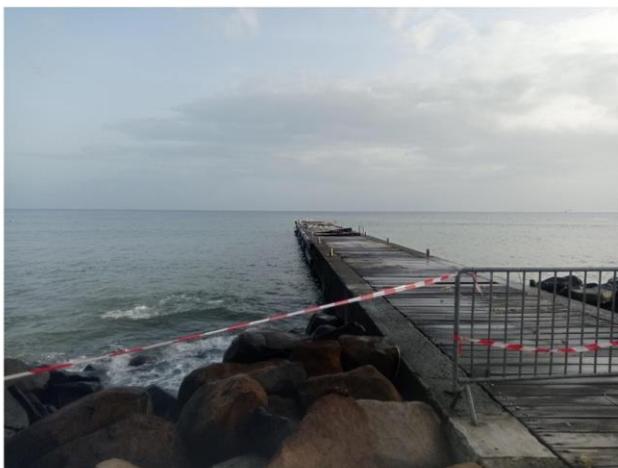
Photographies des impacts : Schoelcher



WP 177 : Submersion de la place des Arawaks
(01/07/24 17h30 ©BRGM)



WP 175 : Accumulation de sable en haut de plage
(02/07/24 ©BRGM)



WP 164 : Ponton principal endommagé (02/07/24)



WP 176 : Dépôts de sable recouvrant l'intégralité de
la route du bord de mer (02/07/24)



WP 255 : Dépôts de sable et de sargasses sur l'intégralité de la rue du front de mer de Fond Lahaye

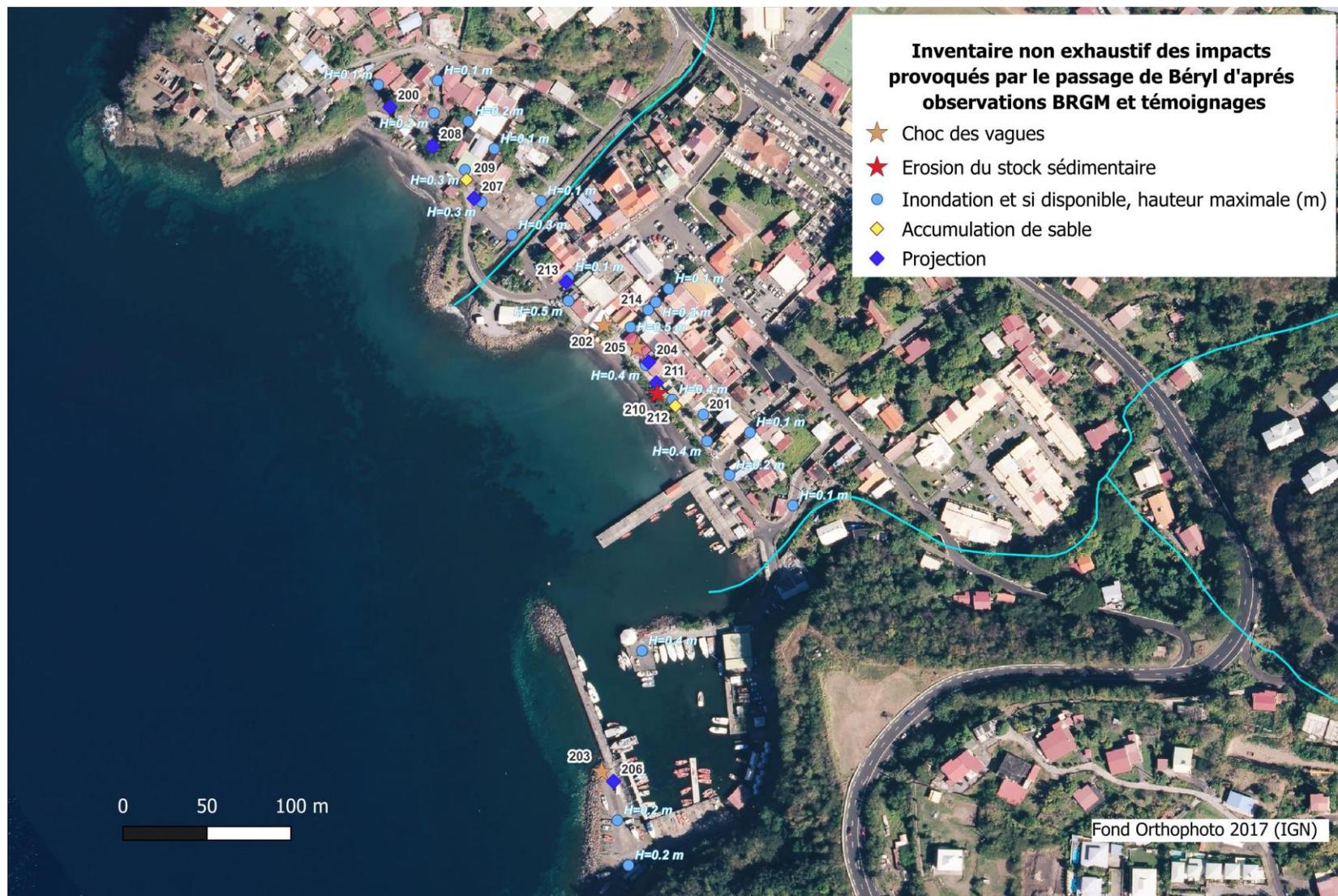


WP 167 : Erosion du bas de plage, au nord du Senah beach (02/07/24 ©BRGM)



WP 169 : Accumulation de sable en haut de plage Senah beach (02/07/24 ©BRGM)

Localisation des impacts : Case-Pilote



Photographies des impacts : Case-Pilote



WP 214 : Limite de submersion atteinte dans la rue de la clinique Vétérinaire (02/07/24 ©BRGM)



WP 202 : Dommages sur les infrastructures du bord de mer (photographie 02/07/24 ©BRGM)



WP 212 : Dépôts de sables et de galets (environ 20 cm) (photographie 02/07/24 ©BRGM)



WP 213 : Dépôts massifs de galets décimétriques (photographie 02/07/24 ©BRGM)



WP 200 : Dépôts massifs de galets, quartier Autrebord (02/07/24 ©BRGM)



Destruction de la salle des fêtes de Vetiver avec de multiples projections de galets (02/07/24 ©BRGM)

Localisation des impacts : Le Carbet



Photographies des impacts : Le Carbet



WP 242 : Projection de sable et de galets sur le haut de plage (04/07/24 ©BRGM)



WP 235 : Érosion et projection de sable sur au niveau de la RN2 (04/07/24 ©BRGM)



WP 234 : Talus d'érosion au sud de l'embouchure du Carbet (04/07/24 ©BRGM)



WP 238 : Talus d'érosion formé sur le haut de plage au sud de la passerelle (04/07/24 ©BRGM)



WP 256 : Projection de sable en haut de plage au nord de l'embouchure du Carbet (04/07/24 ©BRGM)

Localisation des impacts : Le Prêcheur



Photographies des impacts : Le Prêcheur



WP 248 : Dégâts observés à Pointe Lamarre
(09/07/24 ©BRGM)



WP 257 : accès de descente à la plage brisé au
niveau du restaurant Mélodie (09/07/24 ©BRGM)



WP 243 : (09/07/24 ©BRGM)



WP 244 : Destruction d'une terrasse suite aux
projections et chocs des vagues (09/07/24 ©BRGM)

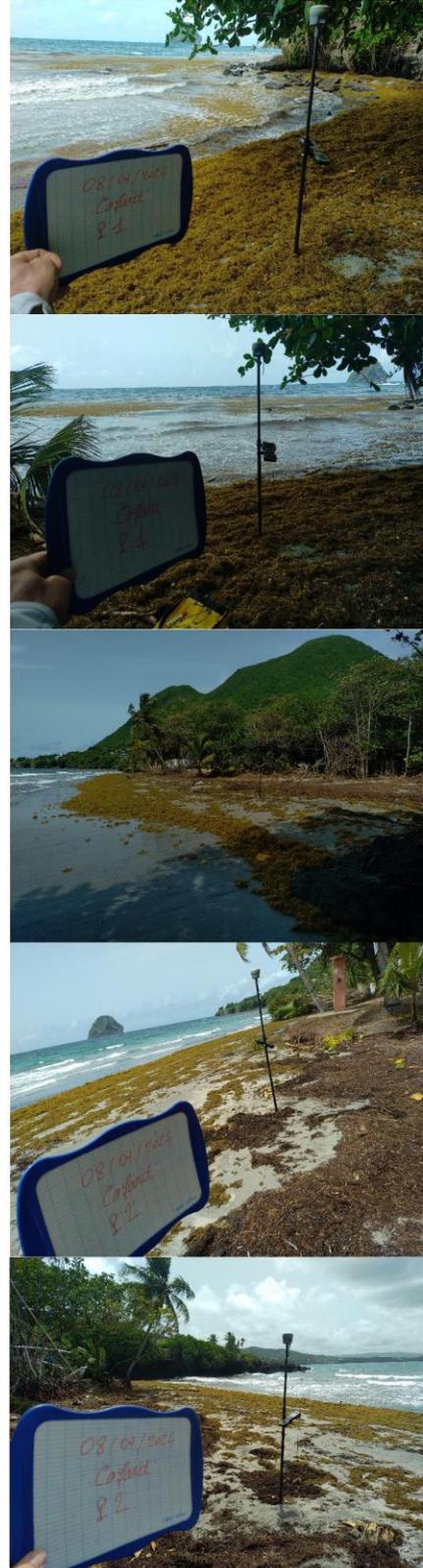
Annexe 3 Anse Cafard : Evolution morphologique visuel

Photographies campagne
BRGM du 27/06/24



Béryl
01/07/24

Photographies campagne
BRGM du 08/07/24



Annexe 4 Plage Dizac : Evolution morphologique visuel

Photographies campagne
BRGM du 27/06/24



Béryl
01/07/24

Photographies campagne
BRGM du 08/07/24



Annexe 5 Plage du Coin : Evolution morphologique visuel

Photographies campagne
BRGM du 25/06/24



Béryl
01/07/24

Photographies campagne
BRGM du 04/07/24



Annexe 6 Bulletin tempête du 28/06/24

Réseau d'observation - Littoral de la Martinique
Bulletin d'information - Surveillance érosion événementielle
du 28/06/2024 20:00 au 03/07/2024 20:00

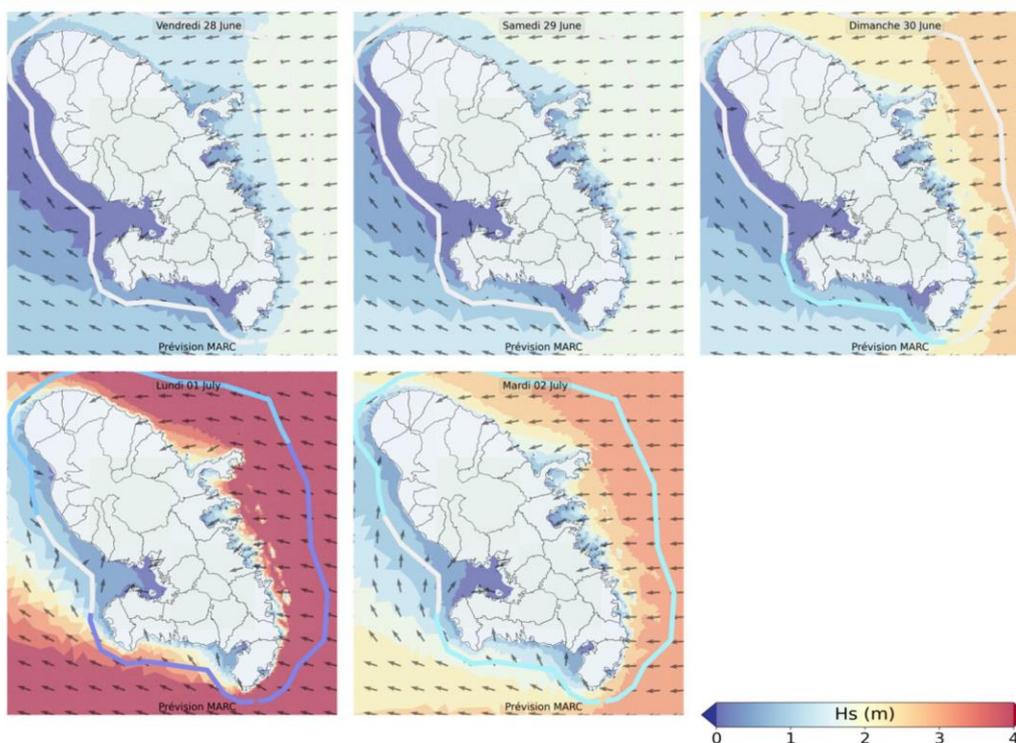
Bulletin émis le : 29/06/2024 à 06:23
 Le bulletin est susceptible d'être actualisé dans les prochaines 24 heures.



Informations générales

Le dispositif de surveillance 'érosion événementielle' de l'Observatoire OLiMar <https://www.observatoire-olimar.fr> assure une veille des événements météo-marins pouvant générer une érosion rapide des littoraux sableux. Ce bulletin, à vocation informative uniquement, fournit une information synthétique prévisionnelle à 5 jours de l'érosion potentielle à venir sur certaines plages du littoral de la Martinique. Les membres du Réseau sont invités à partager les informations relatives à l'évènement et les observations terrain remarquables par mail à l'adresse c.bouvier@brgm.fr en attendant la mise en place d'une interface dédiée. Ce dispositif ne se substitue pas à la Vigilance météorologique de Météo-France (www.meteofrance.mq), seule référence en matière d'alerte. Les informations contenues dans le bulletin ne doivent donc pas être utilisées à des fins de mise en sécurité des personnes.

Cartographie des prévisions de l'impact érosif par échéance de 24h (maximum journalier)



Impact érosif sur les plages sableuses

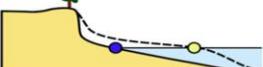
Moderé

Erosion visible mais les impacts attendus se concentrent sur le bas de plage.



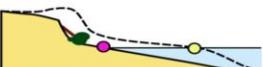
Fort

Les impacts attendus se concentrent sur la plage. Risque d'abaissement du niveau de la plage.



Sévère

Le haut de plage subit les assauts des vagues et des reculs importants du trait de côte sont possibles.





**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale

4 lot. Miramar – Route Pointe des Nègres

Tél. : 05 96 71 17 70

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm