

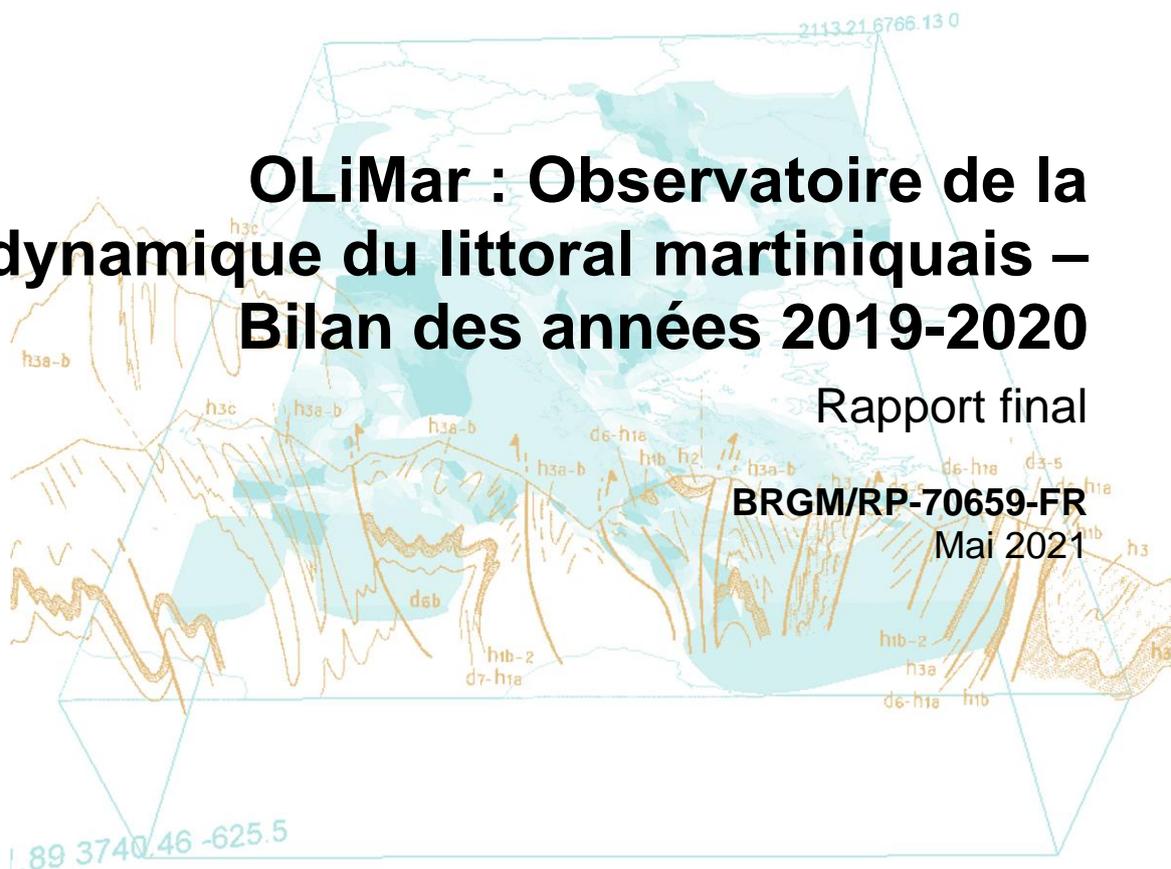


OLiMar : Observatoire de la dynamique du littoral martiniquais – Bilan des années 2019-2020

Rapport final

BRGM/RP-70659-FR

Mai 2021



OLIMAR

OBSERVATOIRE DE LA DYNAMIQUE
DU LITTORAL MARTINICAIS



OLiMar : Observatoire de la dynamique du littoral martiniquais – Bilan des années 2019-2020

Rapport final

BRGM/RP-70659-FR
Mars 2021

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

C. Bouvier

Vérificateur :

Nom : C. Mallet

Fonction : Ingénieur risques côtiers

Date : 26/03/2021

Signature :



Approbateur :

Nom : B. Vittecoq

Fonction : Directeur régional

Date : 16/05/2021

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr

Mots-clés : littoral, Martinique, érosion, plage, trait de côte, dynamique sédimentaire, réseau de suivi, suivi photographique

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

Bouvier C. (2021) – OLiMar : Observatoire de la dynamique du littoral martiniquais – Bilan des années 2019-2020. Rapport final. BRGM/RP-70659-FR, 120 p., 106 ill, 5 tabl.

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

Synthèse

Depuis les plages de sable fin de la façade Caraïbe jusqu'aux falaises escarpées de la côte Atlantique en passant par les mangroves, le littoral de la Martinique représente un territoire d'exception, attractif et encore préservé. Les plages sableuses se dessinent sous la forme d'une succession de baies, de caps et d'anses, orientées dans toutes les directions et donc exposées à des climats de vague très variés. Cette diversité se retrouve sur la morphologie de ces plages, dont les caractéristiques (typologie, stock sédimentaire, granulométrie, évolution, résilience, enjeux) restent très spécifiques.

L'évolution morphologique d'une plage fait intervenir un grand nombre de processus qui s'étale sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles, depuis l'évolution instantanée des rides sableuses (quelques secondes) jusqu'aux évolutions du prisme littoral (plusieurs millénaires). Les observations ou mesures effectuées sur le terrain sont essentielles et restent un point clef nécessaire à l'amélioration de la compréhension des mécanismes hydro-sédimentaires.

En 2017, le BRGM et la DEAL ont initié un réseau de suivi afin de mieux appréhender les processus côtiers et de fournir des éléments d'aide à la décision pour l'aménagement du littoral. L'Observatoire de la dynamique du littoral martiniquais (OLiMar) se veut fédérateur, mutualisé et devient un outil pérenne d'acquisition, de compréhension et de capitalisation des connaissances sur l'évolution du littoral martiniquais. En 2019, l'OLiMar est entré dans sa 3^{ème} année au cours de laquelle l'évolution de 15 cellules sédimentaires ont été analysées.

- **Synthèse des observations**

De manière générale, les observations réalisées mettent en évidence une forte dynamique interannuelle, tant sur les profils de plage, que sur la position du trait de côte. Parmi les 15 sites suivis par l'Observatoire, 40 % présentent des vitesses de recul significatives, supérieures à 0.5 m/an (tendance entre juillet 2017 et juillet 2020). Les secteurs les plus touchés par l'érosion et le recul du trait de côte sont les plages situées sur la commune de Sainte-Anne (anse aux Bois, anse Michel) et sur la commune du Marin (anse Four à Chaux) qui montrent des vitesses de recul très élevées, supérieures à 1 m/an (tendance entre juillet 2017 et juillet 2020).

Certaines plages suivies par l'Observatoire révèlent au contraire une dynamique inverse avec en moyenne un élargissement de la plage et un gain en termes de stock sédimentaire. Environ 30 % des sites suivis montrent une accrétion significative, comme sur la plage des Salines (commune de Sainte-Anne) qui a gagné en moyenne plus de 6 m de large entre 2017 et 2020. Toutefois, cette dynamique n'est pas homogène au sein de la cellule. Si le secteur situé à l'extrémité nord-ouest de la plage a vu son stock sédimentaire augmenter, le secteur situé au niveau de l'extrémité sud-est montre au contraire un recul important à hauteur d'environ 1.4 m/an.

D'autres plages peuvent apparaître relativement stables sur le moyen terme depuis 2017 (~ 30 %). Toutefois, des évolutions morphologiques saisonnières ont pu être identifiées sur certaines d'entre elles. Sur la plage du Carbet par exemple, les variations saisonnières observées sur la position du trait de côte peuvent atteindre plus de 10 m sur certains secteurs. Les techniques récentes associées à l'imagerie vidéo permettent de suivre cette dynamique, sur des durées suffisamment longues et apparaissent alors comme un outil essentiel au suivi et à la meilleure gestion de la dynamique littorale.

Concernant la dynamique évènementielle, reliée aux épisodes de tempêtes et aux ouragans, aucun épisode d'intensité remarquable n'est venu frapper les côtes martiniquaises depuis les Ouragans Irma et Maria en 2017.

Nous retiendrons sur ces trois dernières années les sites sensibles suivants qui montrent une certaine vulnérabilité face à l'aléa érosion :

- anse la Richer (La Trinité) ;
- anse Cosmy (La Trinité) ;
- anse Four à chaux (Le Marin) ;
- anse au Bois (Sainte-Anne) ;
- anse Michel (Sainte-Anne) ;
- plage de Dizac, portion nord-est (Le Diamant) ;

De façon plus spécifique, avec des vitesses de recul qui excèdent 2 m/an sur certains secteurs et une résilience a priori très faible (plage très étroite, faible élévation de la limite de végétation par rapport au niveau de la mer), les plages de l'anse aux Bois et de l'anse Michel (Sainte-Anne) présentent une forte vulnérabilité à l'aléa érosion.

Si au contraire certains sites montrent globalement une vulnérabilité moins prononcée face à l'aléa érosion, comme sur l'anse Charpentier (Le Marigot), la plage des Salines (Sainte Anne) ou sur la plage du bourg (Le Carbet), il est important de souligner à quel point les résultats peuvent être contrastés au sein d'une même cellule sédimentaire :

- sur l'anse Charpentier, le secteur situé au sud de la cellule présente une vitesse de recul significative (> 1 m) et une plage beaucoup plus étroite que sur les autres secteurs ;
- sur la plage des Salines, le secteur situé au sud-est présente des vitesses de recul estimées à plus de 1 m/an ;
- sur la plage du bourg au Carbet, les observations réalisées depuis 2017 montrent une tendance à l'érosion avec une vitesse de recul moyenne de 0.4 m/an. Certains secteurs comme la partie sud de la plage montrent des vitesses de recul plus élevées (> 1.5 m/an).

La poursuite du réseau de suivi sera indispensable pour mieux qualifier ces évolutions et en préciser les tendances sur le plus long terme.

- **De nouveaux outils de communication**

Une des actions phares du plan de communication de l'Observatoire est la création du site Internet de l'OLiMar (www.observatoire-olimar.fr). Parmi les différentes fonctionnalités proposées, une cartographie interactive permet de visualiser en ligne l'évolution du littoral martiniquais. L'outil de cartographie est public, mis à la disposition des partenaires et des producteurs de données pour son exploitation (archivage, traitement, partage) et disponible à tous pour la consultation. L'OLiMar se veut ainsi un outil pérenne d'acquisition, de compréhension et de capitalisation des connaissances sur l'évolution du littoral martiniquais. Les données collectées au cours des prochaines années seront capitalisées, archivées et mises en forme pour pouvoir alimenter la plateforme mutualisée de cartographie de l'OLiMar.

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. CONTEXTE	15
1.2. OBJECTIFS	17
2. Méthodes d'observation mise en oeuvre.....	19
2.1. DISPOSITIF DE SUIVI.....	19
2.2. LE SUIVI TOPO-BATHYMETRIQUE	19
2.2.1. Acquisition de données.....	19
2.2.2. Traitements des données et analyses.....	22
2.3. LE SUIVI PAR IMAGERIE VIDEO.....	24
2.3.1. Acquisition de données et sites suivis	24
2.3.2. Traitements des données et analyses.....	27
2.4. DONNEES COMPLEMENTAIRES.....	30
2.4.1. Données météorologiques	30
2.4.2. Données marégraphiques.....	31
2.4.3. Données et caractéristiques des vagues.....	31
3. Synthèse des évolutions par plage.....	33
3.1. ANSE CHARPENTIER (LE MARIGOT ET SAINTE-MARIE)	33
3.2. ANSE LA RICHER (TRINITE)	37
3.3. ANSE COSMY (TRINITE).....	41
3.4. ANSE L'ETANG (TRINITE)	44
3.5. POINTE FAULA (VAUCLIN)	48
3.6. CHEZ FREFRE (VAUCLIN)	52
3.7. ANSE FOUR A CHAUX (LE MARIN)	55
3.8. ANSE BALEINE (LE MARIN)	58
3.9. ANSE AUX BOIS (SAINTE-ANNE)	61
3.10. ANSE MICHEL (SAINTE-ANNE)	64
3.11. LES SALINES (SAINTE-ANNE).....	67
3.12. PLAGES DE DIZAC (LE DIAMANT).....	74

3.13.	ANSE CAFARD (LE DIAMANT)	79
3.14.	PLAGE DU COIN ET PLAGE DU BOURG (LE CARBET)	84
3.15.	ANSE CERON (LE PRECHEUR)	98
4.	Vue d'ensemble sur le réseau de suivi.....	103
4.1.	VERS LA CONSTRUCTION D'UN INDICATEUR DE VULNERABILITE.....	103
4.2.	SYNTHESE DES OBSERVATIONS.....	104
5.	La création d'une carte interactive	107
5.1.	INTRODUCTION	107
5.2.	ERGONOMIE, NAVIGATION ET FONCTIONNALITE UTILISATEUR	108
6.	Conclusion	111
7.	Bibliographie.....	115

Liste des figures

- Illustration 1 : La plage de Grande anse des Salines à Sainte-Anne (sud Martinique) accueille chaque année plus d'un million de visiteurs. Elle est alors exposée a des pressions environnementales et économiques sans précédent. 15
- Illustration 2 : Les communes de la Martinique (www.geo.data.gouv.fr) avec en rouge la localisation des 15 cellules sédimentaires suivies par l'Observatoire OLiMar. Fond de carte : topo-bathymétrie (Shom, 2018). 18
- Illustration 3 : Acquisition de données topographiques (mars 2020). (à gauche) - Levé DGPS, avec sac à dos sur la plage des Salines. (à droite) - Installation d'une base fixe en raison d'une connexion GSM limitée. 20
- Illustration 4 : Profils de référence p1 et p2 sur la la plage de Anse Baleine (le Marin). 21
- Illustration 5 : Exemple du levé topo-bathymétrique réalisé sur la plage du Carbet le 23 juillet 2020. La position du trait de côte est représentée par les points blancs tandis que la limite du haut de plage est illustrée par les points verts. Le profil de référence est renseigné par la ligne rouge. La croix noir (D_0) indique l'intersection entre la limite de haut de plage et le profil de référence et sert de repère pour la comparaison des profils année après année. 22
- Illustration 6 : Exemple du traitement réalisé pour des mesures effectuées sur la plage du Carbet le 23 juillet 2020. Les points de mesure topo-bathymétriques sont marqués par les points noirs. La position du trait de côte est représentée par la ligne rouge tandis que la limite du haut de plage est illustrée par la ligne verte. Un MNT est produit par interpolation (z) dont le maillage est illustré par la grille figurant en blanc. 23
- Illustration 7 : Le dispositif ©SolarCam. Montage sur support à Pointe Savane en Martinique... 24
- Illustration 8 : a) Localisation des plages sableuses équipées d'un dispositif de suivi vidéo. b) Exemple de localisation du dispositif sur le site de Grande Anse Macabou au Vauclin. c) Image capturée par le dispositif sur le site de Grande Anse Macabou révélant un échouage massif de Sargasse le 15 avril 2019. 25
- Illustration 9 : Synthèse des acquisitions vidéo (nombre de photos) par jour sur les différentes caméras. L'accessibilité (%) au minima à une image par jour et par site est notée pour la durée du suivi. 26
- Illustration 10 : Localisation du dispositif et prise de vue à Anse Céron sur la commune du Prêcheur. 26
- Illustration 11 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage du Coin au Carbet. 27
- Illustration 12 : Photographie aérienne de la plage de Duck (Caroline du Nord, États-Unis) montrant la transformation d'une image oblique (coordonnées u, v) en image plane (coordonnées X, Y, Z). (b,c) Rectification d'une image à partir de points gcps connus. Images obtenues depuis la station ARGUS de Duck pendant le Coastal Imaging Research Network (CIRN) en Juin 2017. 28
- Illustration 13 : (de la gauche vers la droite) - Images brutes (vue oblique), rectifiées (vue en plan) et résolution des pixels de l'image pour le dispositif en place en place sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. Les couleurs expriment la résolution des pixels de l'image dans la direction de l'axe parallèle à celui de la plage (Y) tandis que les iso-contours correspondent à la résolution dans l'axe transversal (X). 29
- Illustration 14 : Caractéristiques du vent mesurée à la station météorologique de la Trinité (Météo-France) depuis novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence des vitesses de vent moyen (W_v en m/s). 30
- Illustration 15 : (à gauche) - Niveau d'eau (nz) mesuré (en noir) à la station marégraphique de Fort-de-France (SHOM) et simulé (en rouge) depuis le 01 janvier 2019 (1 mois de mesures). (à droite) - Composantes principales diurnes et semi-diurnes déterminées

pour la simulation des niveaux d'eau. Les niveaux sont données par rapport au zéro hydrographique.	31
Illustration 16 : Caractéristiques des vagues à Basse pointe mesurées par la bouée houlographe (http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/) depuis Novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence de la hauteur significative des vagues (H_s).....	32
Illustration 17 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Charpentier située à cheval sur la commune du Marigot et de Sainte-Marie. (à droite) - La plage est essentiellement composée de sables fins et peut être parfois exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	33
Illustration 18 : (à gauche) - vagues de plus de 2 m déferlant à Anse Charpentier le 27 juillet 2020 faisant suite au passage de l'ouragan Isaias. (à droite) - L'extrémité sud de la plage peut se montrer très étroite comme pendant la campagne de mesure réalisée en juillet 2020.	34
Illustration 19 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Charpentier. Le trait noir indique le haut de plage (limite de végétation) mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P3) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).....	35
Illustration 20 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2 et P3 sur anse Charpentier. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.	35
Illustration 21 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 et P3 sur anse Charpentier en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).	36
Illustration 22 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse La Richer (Trinité). (à droite) - La plage est composée de sables fins et reste largement exposée aux échouages de sargasses. Photographies prises pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	37
Illustration 23 : (à gauche) - Dans le secteur le plus au nord de la baie, la plage est très étroite et la route longeant la côte apparaît en mauvais état. (à droite) - Quelques dizaines de mètres plus au sud, l'arrière plage porte les marques d'une érosion chronique. Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020.....	37
Illustration 24 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse La Richer. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P4) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).	38
Illustration 25 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 et P4 sur anse La Richer. La largeur de plage est déterminée par rapport la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.	39
Illustration 26 : Évolution le long des profils de référence P1, P2, P3 et P4 sur anse La Richer en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).	40
Illustration 27 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Cosmy (Trinité). (à droite) - La plage est composée de sables fins et reste exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	41
Illustration 28 : Dans le secteur le plus au sud de la baie (à gauche), la plage est large tandis qu'elle devient plus étroite en allant vers le nord (à droite). Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	41

- Illustration 29 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Cosmy. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P5 et P6) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN). 42
- Illustration 30 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 et P4 sur anse Cosmy. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive. 43
- Illustration 31 : Évolution le long des profils de référence P5 (à gauche) et P6 (à droite) sur anse Cosmy en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020). 43
- Illustration 32 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse l'Etang (Trinité). (à droite) - La plage est composée de sables fins et s'étend sur un linéaire de plus de 700 m. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020. 44
- Illustration 33 : Dans le secteur le plus à l'ouest de la baie, la plage est assez large (à gauche) tandis qu'elle devient de plus en plus étroite en allant vers l'est (à droite), en particulier devant le centre de vacance VVF. Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020. 44
- Illustration 34 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse l'Etang. Le trait noir indique le haut de plage (limite de végétation) mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P3) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN). 45
- Illustration 35 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 sur Anse l'Etang. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive. 45
- Illustration 36 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 et P3 sur anse l'Etang en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020). 47
- Illustration 37 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de la plage de Pointe Faula (Vauclin). (à droite) - La plage est composée de sables fins et parfois de sédiments terrigènes, souvent exposée à des échouages massifs de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020. 48
- Illustration 38 : Dans le secteur le plus au nord (à gauche), la plage est très étroite tandis qu'elle devient plus large sur sa partie la plus centrale (à droite). Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020. 49
- Illustration 39 : (à gauche) - Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur la Pointe Faula. Le trait noir indique le haut de plage mesuré en mars 2020. Les trait rouges (P1,P2 et P3) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN). (à droite) - Images aériennes montrant l'évolution de la flèche sableuse. Images obtenues via Google Image. 50
- Illustration 40 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 sur la Pointe Faula. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive. 50
- Illustration 41 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 et P3 sur la Pointe Faula en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020). 51
- Illustration 42 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de la plage de « Chez Fréfré » (Vauclin). (à droite) - La plage est composée de sables fins, souvent exposée à des

	échouages massifs de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	52
Illustration 43 :	Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur le site de Chez Fréfré. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1,P2 et P3) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).	53
Illustration 44 :	Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 sur le site de Chez Fréfré. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.	53
Illustration 45 :	Évolution le long des profils de référence P1 et P2 sur le site de chez Fréfré en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).	54
Illustration 46 :	(à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Four à Chaux (Marin). (à droite) - La plage est composée de sables fins, parfois exposée à des échouages massifs de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	55
Illustration 47 :	Evolution de la position de la limite de végétation (traits colorés) depuis 1951 jusqu'à 2017. Les photographies aériennes (IGN) de 1951 (à gauche) et 2010 (à droite) sont illustrées en arrière plan.....	55
Illustration 48 :	Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Four à CHaux. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 et P2) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).	56
Illustration 49 :	Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2 sur anse Four à Chaux. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.	57
Illustration 50 :	Évolution le long des profils de référence P1 et P2 sur anse Four à Chaux en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).	57
Illustration 51 :	(à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Baleine (Marin). (à droite) - La plage est composée de sables fins, même si quelques blocs rocheux peuvent être présents sur le bas de plage et l'avant-côte. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	58
Illustration 52 :	Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Baleine. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P3 et P4) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).	59
Illustration 53 :	Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P3, P4 sur anse Baleine. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.	59
Illustration 54 :	Évolution le long des profils de référence P3 et P4 sur anse Baleine en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).	60
Illustration 55 :	(à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse aux Bois (Sainte-Anne). (à droite) - la plage est composée de sables fins, mais est largement exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	61

- Illustration 56 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse aux Bois (à gauche) avec chacun de secteurs de la plage en zoom (à droite). Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1, P2 et P3) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN). 62
- Illustration 57 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 sur anse aux Bois. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020 et le jet de rive). 62
- Illustration 58 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 et P3 sur anse aux Bois en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020). 63
- Illustration 59 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Michel (Sainte-Anne). (à droite) - La plage est composée de sables fins, mais est largement exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020. 64
- Illustration 60 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Michel (à gauche) avec chacun des secteurs de la plage en zoom (à droite). Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P4, P5 et P6) indique la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN). 65
- Illustration 61 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P4, P5, P6 sur anse Michel. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive. 65
- Illustration 62 : Évolution le long des profils de référence P4, P5 et P6 sur anse Michel en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020). 66
- Illustration 63 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation des plages des Salines (Sainte-Anne). (à droite) - La plage de Grande Anse est composée de sables fins, et constitue l'une des plages les plus fréquentées de la Martinique. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020. 67
- Illustration 64 : Dans le secteur le plus à l'est de la baie (à gauche), la plage de Grande Anse est étroite tandis qu'elle devient plus large en allant vers le nord-ouest (à droite). Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020. 67
- Illustration 65 : Vue en plan montrant la carte bathymétrique de la plage des Salines. Chaque point de mesure est illustré en pointillés le 22 juillet 2020. Les profondeurs mesurées sont interpolées sur une grille régulière (2x2 m) orientée dans l'axe de la plage. 68
- Illustration 66 : Évolution bathymétrique des profils de référence P1 à P4 sur les Grandes Salines en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) sur le site de Grande anse des Salines. 69
- Illustration 67 : Évolution bathymétrique des profils de référence P5 et P6 sur les Petites Salines en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) sur le site de Petite anse des Salines. 69
- Illustration 68 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur Les Salines (en haut) avec chacun des secteurs en zoom (en bas). Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P6) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN). 70
- Illustration 69 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 à P4 (plage des Grandes Salines). La largeur de plage est déterminée par la

distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.	71
Illustration 70 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P5 et P6 (plage des Petites Salines). La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.	71
Illustration 71 : Évolution le long des profils de référence P1 à P4 sur la plage des Grandes Salines en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).	72
Illustration 72 : Évolution des profils de référence P5 et P6 sur la plage des Petites Salines en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).	73
Illustration 73 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de la plage de Dizac (Le Diamant). (à droite) – Avec plus de 3 km de long, elle s'impose comme l'une des plages les plus étendues de la Martinique. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	74
Illustration 74 : (à gauche) - Vagues de plus de 1 m déferlant sur la plage de Dizac (image capturée le 17 septembre 2019 avec le dispositif de suivi video). (à droite) - A l'extrémité est de la cellule sédimentaire, le haut de plage est délimité par des enrochements. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	74
Illustration 75 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur la plage de Dizac (en haut) avec chacun des secteurs en zoom (en bas). Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P6) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).	75
Illustration 76 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 à P6 sur la plage de Dizac. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.	76
Illustration 77 : (à gauche) - Représentation visuelle (timestack) de l'évolution de la position du trait de côte, et de la limite de végétation le long du profil P5' (à droite) sur la plage de Dizac. Un échouage de sargasse est visible à partir du 25 mars 2020. Les pixels sont extraits à partir des images d'archives à un pas de temps horaire.	77
Illustration 78 : Évolution des profils de référence P1 à P6 sur la plage de Dizac en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).	78
Illustration 79 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Cafard (Diamant). (à droite) - La plage est composée de sables fins mais reste largement exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	79
Illustration 80 : (à gauche) - Image illustrant un arrivage massif de sargasses sur Anse Cafard capturé par le dispositif de suivi. La surface de sargasses estimée atteint alors plus de 20 000 m ² . (à droite) – Faisant suite à l'échouage des algues en grande quantité, une séquence de ramassage est souvent mise en place.	79
Illustration 81 : images illustrants le rechargement artificiel de la plage le 17 février 2020. La séquence a été capturée par le dispositif de suivi vidéo positionné sur Anse Cafard (à gauche) et sur le Morne Larcher (à droite).	80
Illustration 82 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Cafard. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P7 et P8) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).	81

- Illustration 83 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 à P6 sur anse Cafard. La largeur de plage est déterminée par la largeur entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive. 81
- Illustration 84 : Évolution le long des profils de référence P1 à P6 sur anse Cafard en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020). 82
- Illustration 85 : Vue en plan montrant les évolutions morphologiques sur anse Cafard suite aux travaux de rechargement. A gauche, le levé a été réalisé en mars 2020 (un mois après le début des travaux) et au centre en juillet 2020 (cinq mois après le début des travaux). Chacun des levés topographiques a été interpolé sur une grille régulière (1 x 1 m). Le différentiel ($Z_{\text{mars}_2020} - Z_{\text{juillet}_2020}$) altimétrique est illustré sur la figure de droite. 83
- Illustration 86 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de la plage du Carbet. (à droite) - La plage est composée de sables fins d'origine volcanique. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020. 84
- Illustration 87 : (à gauche) - Carte de prévision de la hauteur des vagues sur les petites Antilles le 10 mars 2020 à 10h (<http://marc.ifremer.fr/>). (à droite) - Vagues de plus de 1.5 m déferlant sur la plage du Carbet le même jour à la suite du passage d'une dépression au nord des petites antilles. 85
- Illustration 88 : Vue en plan montrant la carte bathymétrique de la plage du Carbet. Chaque points de mesure (campagne du 23 juillet 2020) est illustré en pointillés. Les profondeurs mesurées sont interpolées sur grille régulière (2x2 m) orientée dans l'axe de la plage. (à droite) - Photographies prises depuis l'embarcation le 23 juillet 2020. 86
- Illustration 89 : Évolution de la bathymétrie le long des profils de référence P1 à P6 sur la plage du Carbet en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020). 87
- Illustration 90 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur la plage du Carbet. Le trait noir indique le haut de plage mesuré en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P6) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN). 88
- Illustration 91 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 à P6 sur la plage du Carbet. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive. 89
- Illustration 92 : Évolution le long des profils de référence P1 à P6 sur la plage du Carbet en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020). 91
- Illustration 93 : Caractéristiques des vagues au entre le 01-10-17 et le 01-06-20 (2.7 ans). Prévision des vagues pour une situation « classique » en période d'hivernage (a) et de carême (b). c) Diagramme directionnel en fréquence des hauteurs significatives des vagues (Hs). Simulations extraites à partir de <http://marc.ifremer.fr/>, configuration Antilles. 92
- Illustration 94 : Diagramme en boîte mensuelle des hauteurs significatives des vagues simulées au large du Carbet (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) entre le 01-10-17 et le 01-06-20 (2.7 ans). Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la hauteur significative des vagues simulées au cours des événements les plus extrêmes. Les barres grises représentent la direction moyenne de propagation des vagues. 93
- Illustration 95 : Séquence érosive observée sur la plage du Coin pendant la période de Carême entre avril (c) et septembre 2018 (d). a) Hauteur significative (trait noir) et composante saisonnière de la direction des vagues (couleurs) au point d'extraction

du modèle WWIII. b) Evolution de la largeur de plage sur différents secteurs (cercles en couleur par transects) avec en traits épais la composante interrannuelle du signal. (c-d) séries d'images brutes permettant de visualiser l'évolution de la position du trait de côte entre les deux dates (selon les transects T1 à T4 et les plages #1 et #2)	95
Illustration 96 : Dynamique saisonnière du trait de côte sur le Le Carbet. (a) Hauteur significative des vagues (Hs) et composante saisonnière de la direction des vagues (θ_{90d}) simulées au large. (b) Direction moyenne de la plage #1 (gris) et de la plage #2 (noir) avec en traits épais les composantes saisonnières du signal. (c) Evolution interrannuelle de la position du trait de côte en fonction de la latitude. H et L désignent respectivement les secteurs où la largeur de plage apparaît en excès et en défaut. Les échanges sédimentaires sont schématisés par H → H.....	97
Illustration 97 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Céron (Prêcheur). (à droite) - La plage est composée de sables fins d'origine volcanique issue de l'activité récente de la montane Pelée. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.	98
Illustration 98 : vagues de plus de 2 m déferlant à anse Céron le 28 octobre 2019 faisant suite au passage d'une dépression sur le bassin Nord-Atlantique.	99
Illustration 99 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Céron. Le trait noir indique le haut de plage (limite de végétation) mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 et P2) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).	100
Illustration 100 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 et P2 sur anse Céron. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.	100
Illustration 101 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 sur anse Céron en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).	101
Illustration 102 : a) Evolution de la hauteur significative des vagues simulées au large de la plage de Anse Céron (simulations extraites du modèle WWIII, plateforme MARC, configuration Antilles). Les étoiles signalent les évènements énergétiques de type « houle de nord ». b-d) Images capturées par le dispositif à environ 6 mois d'intervalle entre le 16 janvier 2020 et le 21 janvier 2021. e) Représentation visuelle (timestack) de l'évolution de la position du trait de côte le long du profil Xuv (b). Les bandes noires correspondent aux périodes d'inactivité du dispositif de suivi photo.	102
Illustration 103 : Indicateur de vulnérabilité (IVL) calculé par profil et par plage. Une plage où la vulnérabilité face au phénomène d'érosion est maximale a un IVL élevé (5.2 au maximum), tandis qu'une plage où la vulnérabilité est minimale présente un IVL faible (1.5 au minimum).	105
Illustration 104 : Rubrique « Cartes et données » du site internet de l'Observatoire (https://www.observatoire-olimar.fr/page/carte-donnees).....	107
Illustration 105 : Les fonctionnalités de l'interface cartographique interactive.	108
Illustration 106 : Différents niveaux de zoom proposés sur le secteur du Vauclin à la Pointe Faula (http://carmen.carmencarto.fr/288/observatoire-olimar.map).	109

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Depuis les plages de sable fin de la façade Caraïbe jusqu'aux falaises escarpées de la côte Atlantique, en passant par les mangroves, le littoral de la Martinique constitue un territoire d'exception, attractif et encore préservé. Cette bande fragile à l'interface entre la terre et la mer représente un linéaire côtier d'environ 450 km, confrontée aux phénomènes d'érosion et de submersion marine. Ce littoral est un système dynamique dont l'équilibre dépend des échanges et des transferts de sédiments qui se produisent latéralement et transversalement sous l'action des houles et des courants.

Si les deux-tiers des côtes martiniquaises sont constitués de côtes dites meubles (i.e. plages, mangroves), le reste du linéaire se répartit entre des côtes rocheuses et des côtes artificialisées (rapport BRGM/RP-63238-FR, 2015). Parmi les côtes meubles, on distingue les « plages de poche » qui sont généralement convexes et situées en fond baies, encadrées par des côtes rocheuses et souvent alimentées par une rivière (Illustration 1). Les plages de poche composent 75 % des plages sableuses du littoral martiniquais. Les 25 % restants correspondent à des « plages ouvertes » qui se répartissent généralement sur un plus grand linéaire côtier sableux, longeant par exemple, les pieds de falaises rocheuses (rapport BRGM/RP-64499-FR, 2015).

Le littoral de la Martinique se dessine avec environ 117 plages sableuses, dont plus de 30 % ont vu leurs largeurs diminuer de façon remarquable au cours de ces 60 dernières années (entre 1951 et 2010) et où le recul évalué est supérieur à 25 m (Tableau 1). Plus récemment, sur le moyen terme (entre 2004 et 2010), un tiers des plages sableuses de la Martinique est caractérisé par un recul modéré (> 0.8 m/an).



Illustration 1: La plage de Grande anse des Salines à Sainte-Anne (sud Martinique) accueille chaque année plus d'un million de visiteurs. Elle est alors exposée à des pressions environnementales et économiques sans précédent.

Tableau 1: Nombre de plages présentant des reculs ou avancées de la limite de végétation permanente (LVP) et de l'interface terre-mer (ITM ou trait de côte) à long et moyen-terme. Illustration extraite du rapport BRGM/RP-64499-FR, 2015.

	Recul fort	Recul modéré	Stabilité	Avancée modérée	Avancée forte
Mobilité de la végétation permanente de haut de plage (LVP)					
LVP Long-terme (1951-2010)	41 (35%)	22 (19%)	33 (28%)	10 (8%)	12 (10%)
LVP Moyen -terme (2004-2010)	4 (3%)	33 (28%)	75 (64%)	6 (5%)	11 0 (0%)
Mobilité de l'interface terre-mer (ITM)					
ITM Long-terme (1951-2010)	42 (36%)	21 (18%)	32 (27%)	12 (10%)	(9%)
ITM Moyen-terme (2004-2010)	2 (2%)	33 (28%)	74 (63%)	9 (8%)	0 (0%)

Le littoral de la Martinique reste donc un environnement côtier très vulnérable à l'érosion côtière. Un phénomène naturel qui peut parfois revêtir un caractère exceptionnel, notamment au cours de la saison cyclonique. Les impacts des houles cycloniques sur les systèmes côtiers sont nombreux et leurs caractéristiques soulèvent encore aujourd'hui des interrogations. Face à ces questionnements, l'amélioration de nos connaissances et la capitalisation de l'information, nous permettent aujourd'hui de renforcer notre capacité d'adaptation et nous éloignent de tout déterminisme et catastrophisme. Le réseau de suivi de la dynamique littorale de Martinique est donc capital pour les acteurs de l'aménagement du littoral qui émettent fréquemment le besoin de disposer d'informations sur l'évolution du trait de côte, afin de quantifier l'érosion côtière. Ce réseau doit permettre de suivre la dynamique des plages depuis l'échelle événementielle jusqu'aux échelles pluriannuelles avec un intérêt commun qui est de capitaliser l'information pour mieux anticiper l'évolution du littoral martiniquais.

En 2017, le BRGM et la DEAL ont initié un réseau de suivi de la dynamique littorale afin de mieux comprendre les processus côtiers et de fournir des éléments d'aide à la décision pour l'aménagement du littoral. Cette première phase a permis de définir un protocole de suivi adapté au contexte de la Martinique et de réaliser des mesures régulières, à une fréquence saisonnière, sur 15 sites présentant de forts enjeux humains, environnementaux ou socio-économiques (rapport BRGM/RP-69071-FR, 2019; rapport BRGM/RP-68470-FR, 2019). La pérennisation du suivi des plages, à pas de temps régulier, avec un protocole scientifique adapté et validé, est désormais indispensable pour renforcer l'expertise et la pertinence des diagnostics portés à connaissance des décideurs et permettre d'améliorer les préconisations pour la gestion ou l'aménagement du littoral. La connaissance de la dynamique de ces plages permettra d'élaborer, à terme, pour chacune d'elle, des prévisions de résilience après tempête ou cyclone et, à long terme, des scénarios d'évolution intégrant l'effet du changement climatique.

Cette démarche de pérennisation du réseau de suivi de la dynamique littorale en Martinique s'inscrit pleinement dans le cadre de la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte (MEEM, 2017) visant à développer des outils d'observation du littoral en s'appuyant sur les acteurs régionaux tel que le BRGM. L'Observatoire de la dynamique du Littoral Martiniquais (OLiMar) se veut un outil pérenne d'acquisition, de compréhension et de capitalisation des connaissances sur l'évolution du littoral, ainsi que d'appui aux politiques publiques de gestion. Cette démarche a donc vocation à être inscrite dans la durée au travers de conventions pluriannuelles.

1.2. OBJECTIFS

Le littoral martiniquais est caractérisé par une grande variété de typologies côtières et il est exposé à des pressions environnementales et économiques sans précédent. L'observation et la capitalisation de l'information aux regards de la dynamique du littoral sont alors indispensables pour avoir une meilleure compréhension de la complexité des phénomènes et renforcer notre capacité d'adaptation face au changement climatique.

Dans ce but, l'OLiMar est un réseau qui réalise et diffuse des observations sur la dynamique du littoral martiniquais. Cet Observatoire a les principaux objectifs suivants :

- **Observer** en mobilisant notamment un réseau de mesures et d'observations pour suivre l'évolution de l'érosion du littoral afin d'améliorer notre compréhension et de renforcer l'expertise scientifique.
- **Accompagner** en offrant aux pouvoirs publics un savoir-faire scientifique, technique et objectif d'aide à la décision et à la gestion de l'environnement du littoral martiniquais.
- **Communiquer** en mettant à disposition du grand public et des gestionnaires des données et des informations de référence actualisées sur le littoral, afin de partager la connaissance et la culture des risques.

La première convention 2017-2018 s'est achevée fin 2018 avec la parution du rapport BRGM/RP-68470-FR incluant les résultats des campagnes de mesures de terrain réalisées en 2017 et en 2018. Le projet a été renouvelé en 2019 par la signature d'une nouvelle convention 2019-2021. Ce projet, cofinancé par la DEAL et la subvention pour charge de service public du BRGM, comporte 3 missions principales :

- Volet 1 : l'observation et l'acquisition de données sur 15 plages ;
- Volet 2 : l'établissement de diagnostic post-événement cyclonique ;
- Volet 3 : la communication et la valorisation des données.

S'insérant dans les volets 1 et 3 du projet, ce rapport technique d'année 2 et 3 intègre les nouvelles données issues des campagnes de mesures de 2019 et de 2020 aux données mesurées et analysées des années précédentes (rapport BRGM/RP-68470-FR, 2019). Le rapport présente dans un premier temps la méthode mise en œuvre pour les suivis ainsi que les traitements associés. Dans un second temps, l'évolution récente de chaque cellule sédimentaire sera proposée sous une forme synthétique. Enfin le nouvel outil interactif de visualisation et de téléchargement des données sera présenté.

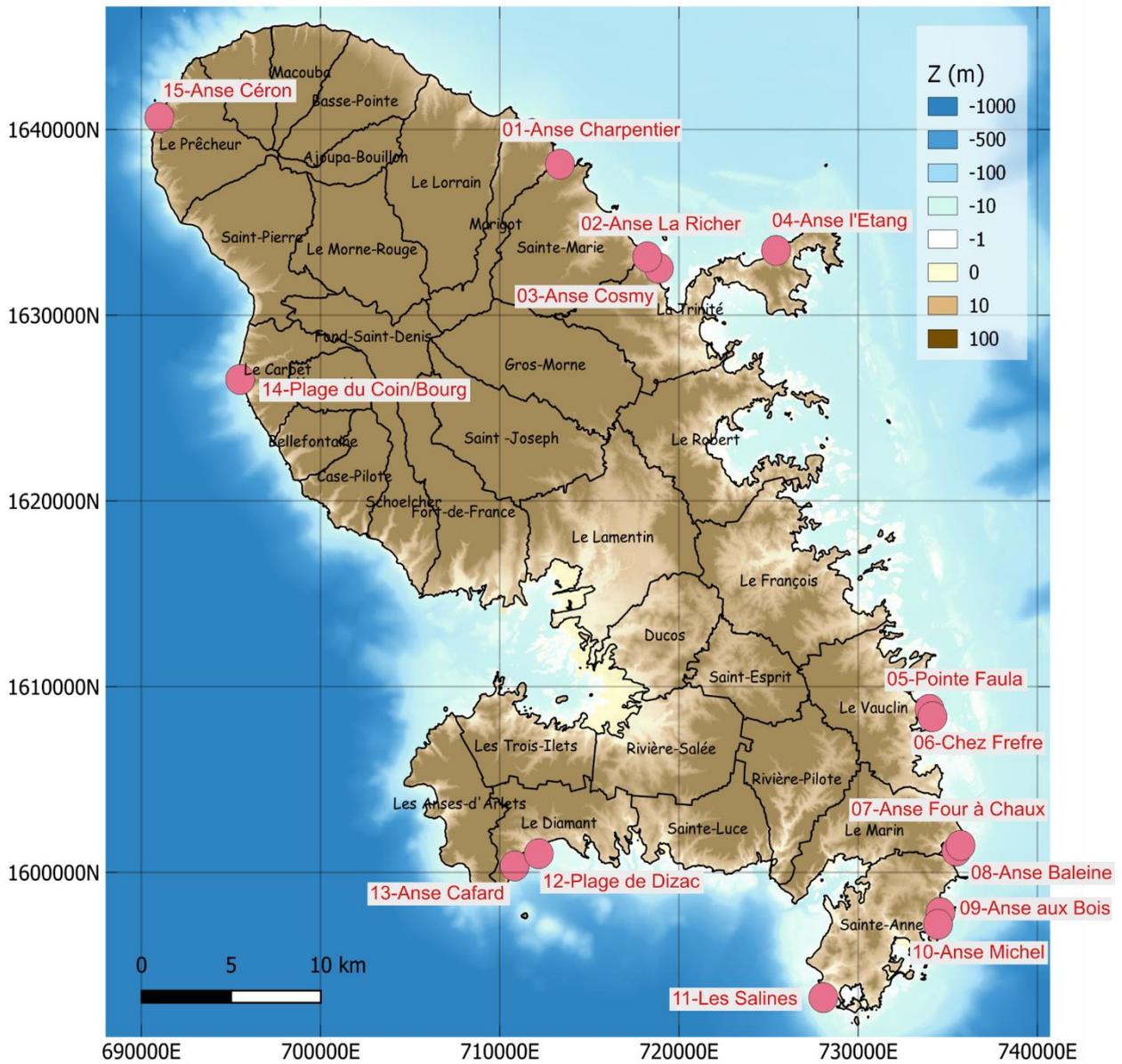


Illustration 2 : Les communes de la Martinique (www.geo.data.gov.fr) avec en rouge la localisation des 15 cellules sédimentaires suivies par l'Observatoire OLiMar. Fond de carte : topo-bathmétrie (Shom, 2018).

2. Méthodes d'observation mises en oeuvre

2.1. DISPOSITIF DE SUIVI

L'évolutions morphologique d'une plage fait intervenir un grand nombre de processus physiques agissant sur les court et moyen termes. La méthode adoptée doit alors permettre de couvrir l'ensemble de ces échelles temporelles et spatiales, que ce soit au niveau des observations réalisées ou au niveau des analyses qui sont proposées. Cette méthode est décrite dans ce chapitre, en s'appuyant sur des exemples concrets, afin de mieux comprendre l'intérêt du travail effectué ainsi que les limites des outils utilisés par la suite dans le cadre de ce projet.

2.2. LE SUIVI TOPO-BATHYMETRIQUE

2.2.1. Acquisition de données

Des campagnes de levés topo-bathymétriques sont réalisées deux fois par an. La première campagne a lieu à la fin de la période d'hivernage (février/mars), et la seconde au début de la saison cyclonique à la fin de la période de carême (juillet/août). Des levés ponctuels peuvent également avoir lieu après un évènement météo-marin de forte intensité afin de réaliser un suivi post-tempête.

La zone d'étude est découpée en 4 secteurs ayant des caractéristiques physiques variées et des enjeux spécifiques, regroupant au total 15 cellules sédimentaires plus ou moins indépendantes (Illustration 2 et Tableau 2). Les positions du trait de côte et de la limite de végétation sont levés sur chacune des plages suivies par l'OLiMar (Tableau 2) ainsi que deux à six profils transversaux (e.g. Illustration 4). Des levés bathymétriques ou un suivi par imagerie vidéo viennent compléter ces mesures selon le Tableau 2. En 2018, à l'issue de la première année de l'Observatoire, les plages de l'anse l'Étang (Trinité) et de l'anse Céron (Prêcheur) ont été ajoutées au réseau de suivi.

*Tableau 2: Plages suivies par l'Observatoire de la dynamique littorale de Martinique. * Plages sur lesquelles un dispositif de suivi par imagerie vidéo a été installé dans le cadre d'un autre projet.*

Côte	Site suivi en 2017-2018	Plage	Linéaire	Moyen de suivi déployé
Atlantique Nord	X	anse Charpentier	600 m	topo
	X	anse Cosmy	400 m	topo
	X	anse La Richer	800 m	topo
		anse l'Étang	400 m	topo
Atlantique Sud	X	Pointe Faula	500 m	topo + suivi photographique*
	X	Chez Fréfré	100 m	topo
	X	anse Four à Chaux	350 m	topo
	X	anse Baleine	400 m	topo + suivi photographique*
	X	anse aux Bois	600 m	topo
	X	anse Michel	500 m	topo + suivi photographique*
Caraïbes Sud	X	Les Salines	1700 m	topo + bathy + suivi photographique
	X	plage de Dizac	3000 m	topo
	X	anse Cafard	200 m	topo + suivi photographique*
Caraïbes	X	plage du Coin/Bourg	2500 m	topo + bathy + suivi photographique*
		anse Céron	400 m	topo+ suivi photographique

Les campagnes de mesures de l'année 2 et 3 de l'OLiMar ont été réalisées du 10 au 19 juillet 2019 (campagne de fin de carême), du 4 au 11 mars 2020 (campagne post-hivernage) et du 15 au 26 juillet 2020 (campagne de fin de carême).

Ces mesures sont réalisées à partir d'un GPS¹ I (GNSS²) @Trimble R10 en mode différentiel RTK³ connecté en GSM⁴ via le réseau ORPHEON⁵. Certains secteurs peuvent nécessiter l'utilisation d'une base fixe en cas de mauvaise connexion au réseau GSM dans la zone (Illustration 3).

Levés Topographiques

L'acquisition des données topographiques comporte 3 types de levés GPS (GNSS) où l'opérateur renseigne pour chacun des points mesurés un attribut géomorphologique (jet de rive, limite de végétation, falaise rocheuse, etc...) :

- la position du trait de côte et de la limite de haut de plage ;
- la topographie de la plage ;
- les profils de référence.

La position du trait de côte (jet de rive) et de la limite de haut de plage (souvent la limite de végétation) sont principalement levées de manière continue (environ un point tous les mètres) à pied. L'antenne DGPS est fixée sur la partie supérieure du sac à dos @Trimble et les points de levé sont enregistrés au fur et à mesure que l'opérateur parcourt la plage lors de l'acquisition (Illustration 3). Le marqueur du trait de côte ainsi levé est la limite du jet de rive. Les marges d'erreur sur les données topographiques acquises sont estimées entre 5 et 10 cm en planimétrie et entre 10 et 20 cm en altimétrie en fonction des mouvements parasites de l'opérateur pendant la marche.



Illustration 3 : Acquisition de données topographiques (mars 2020). (à gauche) - Levé DGPS, avec sac à dos sur la plage des Salines. (à droite) - Installation d'une base fixe en raison d'une connexion GSM limitée.

¹ GPS : Global Positioning System

² GNSS : Global Navigation Satellite System

³ RTK : Real Time Kinematic

⁴ GSM : Global System for Mobile communications

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



Illustration 4 : Profils de référence p1 et p2 sur la la plage de l'anse Baleine (le Marin).

Selon l'extension du jet de rive et l'interprétation de l'opérateur sur sa position, des écarts de quelques dizaines de centimètre jusqu'à 2 m peuvent être observés sur la position du trait de côte. Afin de limiter cette source d'erreur, les levés seront réalisés par mer calme. Aussi, afin de limiter les écarts liés aux variations du niveau d'eau induit par la marée, les mesures sont réalisées pour des niveaux proches de ceux de la mi-marée (~ 0.169 m ngm⁶). Le niveau d'eau correspondant à l'heure à laquelle est effectuée la mesure est renseigné en métadonnée.

Les profils de référence (perpendiculaires au « trait de côte ») sont levés à la canne en mesurant un point à chaque inflexion de la pente, suivant des axes prédéfinis et invariables sur toutes les campagnes de mesure (e.g. Illustration 4). Deux fois par an, les mesures sont ainsi réalisées le long de 49 profils transversaux. Les marges d'erreur sur les données topographiques acquises à la canne sont estimées à quelques centimètres en planimétrie et 5 cm sur l'altitude (enfouissement moyen de la canne dans le sable pris en compte).

Des levés topographiques continus à pied peuvent être réalisés si nécessaire, notamment en cas de morphologie de plage atypique (croissants de plage, rechargement artificiel et certaines embouchures). L'antenne DGPS est fixée sur la partie supérieure du sac à dos Trimble® et les points de mesures sont enregistrés au fur et à mesure que l'opérateur parcourt la plage lors du levé. Les marges d'erreur sur les données topographiques acquises au sac à dos varient entre 5 et 10 cm en planimétrie et entre 10 et 20 cm en altimétrie (mouvements parasites de l'opérateur pendant la marche).

Levés bathymétriques

Les levés bathymétriques combinent l'utilisation du GPS ®Trimble R10 et celle du sondeur monofaisceau ®Tritech PA500. Les levés bathymétriques en mer sont réalisés sur une embarcation rigide dans la continuité de certains profils topographiques prédéfinis sur les plages. Deux fois par an, les mesures sont ainsi réalisées sur un total de 12 profils transversaux qui se répartissent équitablement sur la plage des Salines (Sainte-Anne) et sur la plage du Carbet. Les marges d'erreur sur les données bathymétriques acquises sont estimées à 20 cm en planimétrie, liés aux mouvements parasites de l'antenne selon l'état de la mer. Les levés ne sont pas réalisés

⁶ ngm : nivellement général de la Martinique (niveau moyen de la mer à Fort-de-France)

dès lors que l'état de la mer est jugé comme pouvant fortement dégrader la précision et la sécurité du levé (vagues de hauteur supérieure à 0.5 m). Les erreurs en altitude sont estimées entre 10 à 20 cm, liés aux mouvements parasites de la sonde selon l'état de la mer.

2.2.2. Traitements des données et analyses

Une succession d'étapes est nécessaire pour traiter l'ensemble des données et restituer les différents indicateurs et leurs évolutions. Lors de la première année, l'ensemble de ces étapes consistait en une chaîne de traitement assez complexe basée sur l'utilisation de plusieurs logiciels (©Excel, ©Surfer, ©ArcGis). Pour les années 2 et 3, un travail d'optimisation de la chaîne de traitement a été réalisé. Le traitement ne nécessite plus que l'utilisation d'un logiciel (©Matlab) et permet au travers de différents programmes de réaliser la chaîne de traitement de façon semi-automatique.

Le traitement des données topo-bathymétriques a pour objectif d'aboutir à plusieurs types d'indicateurs afin d'évaluer l'évolution des dynamiques morpho-sédimentaires de la plage et de l'avant côte, d'une campagne à l'autre. Trois indicateurs sont principalement restitués :

- la position du trait de côte ;
- la variation morphologique des profils de plages à partir des profils de référence ;
- les variations morphologiques de la plage émergée et de la plage immergée à partir des cartes et modèles numériques de terrain (MNT) topo-bathymétriques disponibles.

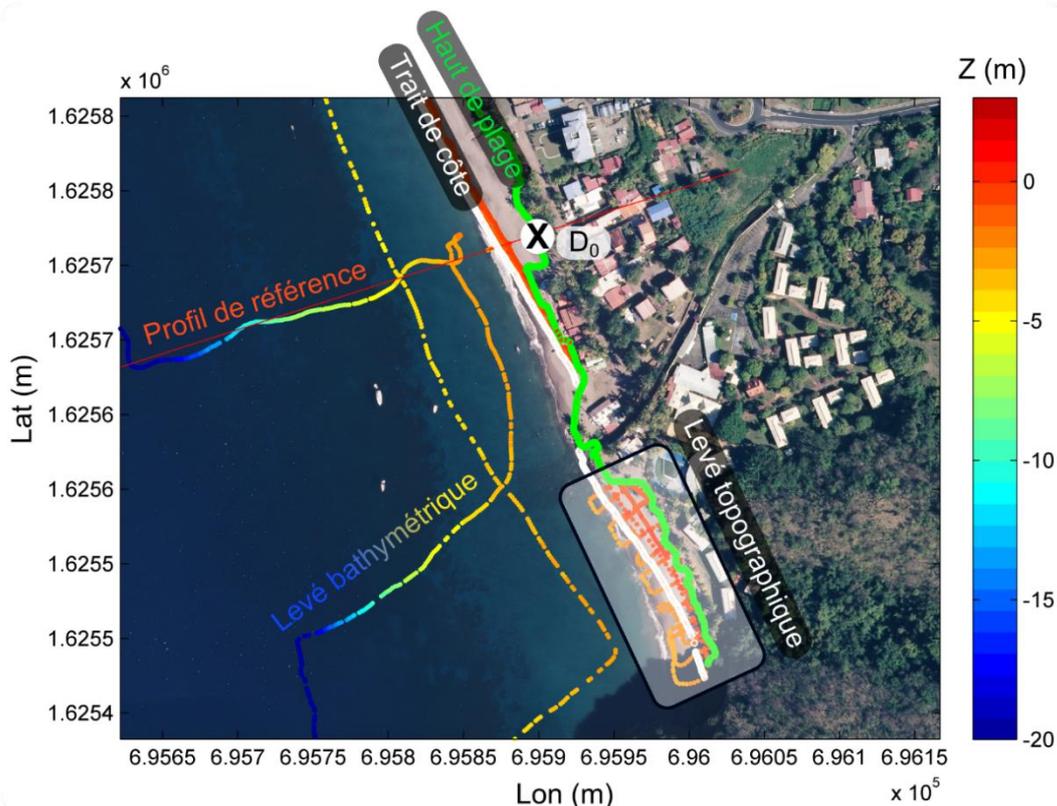


Illustration 5 : Exemple du levé topo-bathymétrique réalisé sur la plage du Carbet le 23 juillet 2020. La position du trait de côte est représentée par les points blancs tandis que la limite du haut de plage est illustrée par les points verts. Le profil de référence est renseigné par la ligne rouge. La croix noire (D_0) indique l'intersection entre la limite de haut de plage et le profil de référence et sert de repère pour la comparaison des profils année après année.

La première étape du traitement consiste à extraire les données correspondant à la position du trait de côte et à la limite de haut de plage. Cette étape consiste à repérer de façon automatique dans le jeu de données les mesures dont les attributs géomorphologiques sont identiques ('trait de côte', 'végétation', 'falaise' etc...). Ces attributs sont renseignés par l'opérateur lors de l'acquisition. Cette étape est représentée par l'illustration 5 où les points blancs correspondent à la position du trait de côte et les points verts à la limite du haut de plage (ici la végétation). Les données sont ensuite exportées au format Shapefile (.shp) lisible avec @ArcGis (ou @Qgis).

La deuxième étape du traitement est la correction des données bathymétriques avec les niveaux de marées mesurées au moment de l'acquisition. Les données utilisées sont issues du marégraphe de Fort-de-France mises à disposition via le Réseau REFMAR-SHOM (section 2.4.2). La localisation du marégraphe est illustré par le carré bleu (Illustration 8).

Une fois les données bathymétriques corrigées par rapport au niveau de référence (ngm), l'interpolation des données topo-bathymétriques est réalisée sur une grille avec une résolution horizontale de 2 m (Illustration 6). Afin d'améliorer les résultats de l'interpolation entre les profils bathymétriques, une rotation de la grille est appliquée selon un ratio dans l'axe parallèle à la côte variant entre 3 et 4. Ce ratio peut être réajusté en fonction de la géométrie du semi de points des campagnes de mesures. Lorsque l'interpolation est effectuée, le résultat est exporté au format ascii lisible avec @ArcGis (ou @Qgis).

Les profils topo-bathymétriques sont transposés dans un repère de référence dont l'axe horizontal correspond à la distance entre l'intersection du profil de référence et d'une limite de végétation idéalisée qui reste fixe pour les différents levés. Ainsi chaque profil mesuré pour un site donné peut être comparé avec les profils mesurés des années précédentes. Les données de chacun des profils sont exportés sous un format cige (.csv) lisible par exemple avec le logiciel @Excel.

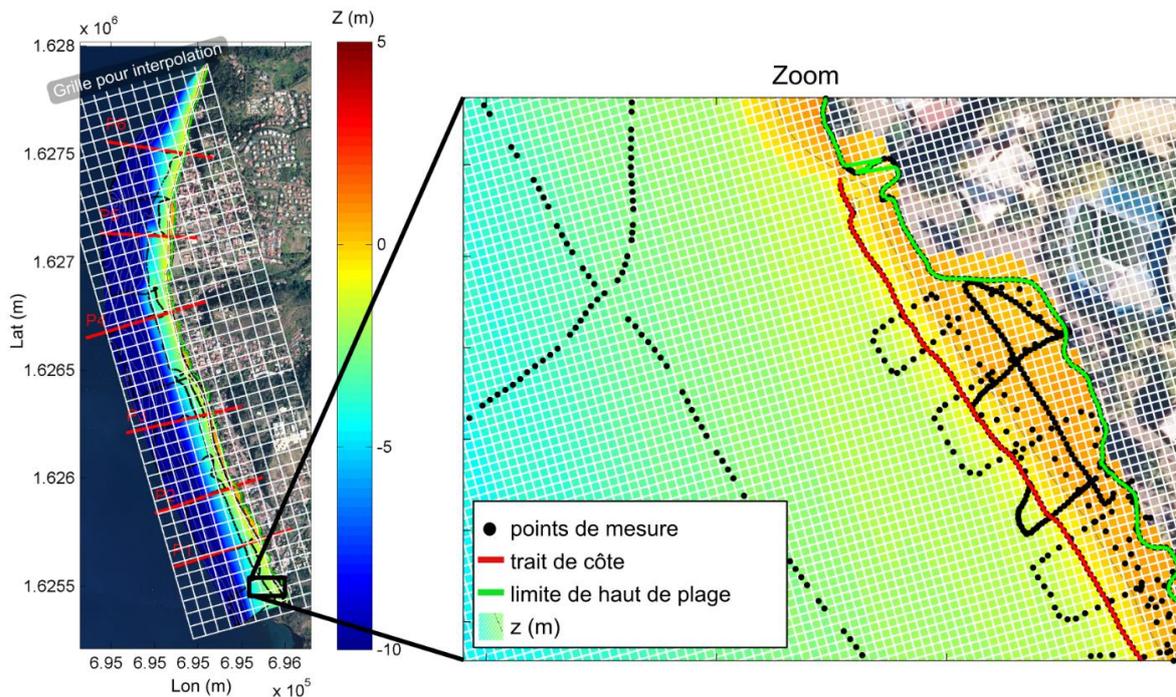


Illustration 6 : Exemple du traitement réalisé pour des mesures effectuées sur la plage du Carbet le 23 juillet 2020. Les points de mesure topo-bathymétriques sont marqués par les points noirs. La position du trait de côte est représentée par la ligne rouge tandis que la limite du haut de plage est illustrée par la ligne verte. Un MNT est produit par interpolation (z) dont le maillage est illustré par la grille figurant en blanc.

Ces traitements @Matlab sont effectués pour chacun des sites de l'OLiMar. Une fois les fichiers créés, ils sont transférés sur le serveur du BRGM pour pouvoir être utilisé sur l'application de cartographie Carmen (<http://carmen.naturefrance.fr/>) où ils sont alors consultables sur internet de façon interactive (<http://carmen.carmencarto.fr/288/observatoire-olimar.map>). La mise en place et l'utilisation de cette interface sont détaillées au chapitre 4. Les cartes de déplacements sont réalisées de façon semi-automatique sous @Matlab mais peuvent également être réalisées sous @ArcGis. Ces informations sont nécessaires pour caractériser les tendances d'évolution des différents secteurs ainsi que les volumes sédimentaires mis en jeux.

2.3. LE SUIVI PAR IMAGERIE VIDEO

Les acquisitions topo-bathymétriques traditionnelles précédemment décrites ne peuvent pas satisfaire au suivi de l'évolution de certaines plages particulièrement dynamiques, selon l'ensemble des échelles spatio-temporelles concernées, en raison du coût des mesures et des difficultés techniques pouvant être rencontrées lors des épisodes très énergétiques (e.g. vagues importantes ; Lippmann and Smith, 2009). D'autres outils se sont développés avec les méthodes de télédétection qui permettent de suivre à une fréquence élevée certaines caractéristiques morphologiques des plages. L'identification des paramètres morphologiques, ici la position du trait de côte, 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.

Si les nouveaux systèmes d'observation par satellites disposent d'une résolution de l'ordre du mètre, ces techniques sont typiquement associées à des fréquences d'acquisition très basses (Vos et al., 2019) et restent largement dépendantes de la couverture nuageuse. Un suivi à haute fréquence, est alors encore difficile à appréhender. Au contraire, un système de suivi par appareils photos fixes apparaît totalement en accord avec la problématique d'érosion du trait de côte. Les systèmes fixés de manière permanente sur des plateformes permettent d'obtenir des informations à haute fréquence (jusqu'à plusieurs Hz) sur de longues durées (années) pour des échelles spatiales allant du mètre au kilomètre (e.g. Aarninkhof et al., 2003; Lippmann and Holman, 1989; Van Enckevort and Ruessink, 2001). Pour ces raisons, un réseau de suivi par webcam est déployé sur le littoral martiniquais depuis fin 2017.

2.3.1. Acquisition de données et sites suivis

La sélection du dispositif a été réalisée à partir de l'analyse de l'efficacité de plusieurs caméras autonomes déployées en Corse dans le cadre d'un projet de suivi de la dynamique des banquettes de posidonie et de leur impact sur l'évolution du trait de côte (rapport BRGM/RP-66351-FR). Plus récemment, depuis 2018, dans le cadre d'un projet de suivi des échouages de sargasses, le BRGM, l'ADEME et la DEAL ont mis en place un tel dispositif sur une quinzaine de site en Martinique avec de très bons résultats (rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020). D'après ce retour d'expérience, le choix de la caméra s'est porté sur SolarCam© (Illustration 7) en raison de son faible coût (entre 390€ et 540€ selon le modèle, hors forfait téléphonique), sa fiabilité et sa simplicité d'utilisation.



Illustration 7: Le dispositif ©SolarCam. Montage sur support à Pointe Savane en Martinique.

L'acquisition des images est réalisée à intervalles réguliers jusqu'à 1 photo/min. Les images capturées ont une résolution entre 8 et 12 mégapixels selon le modèle de caméra pour une taille d'environ 1 100 ko. Une fois la caméra activée, les images sont transférées via la 3G vers un serveur ftp (File Transfer Protocol) et sont ensuite archivées sur un serveur du BRGM en Martinique. Les dernières images capturées peuvent être visualisées sur une page internet dédiée. Le dispositif est généralement configuré pour acquérir une image toutes les heures entre 7h00 et 17h00, ce qui représente 11 images par jour et par site. L'alimentation électrique des caméras est assurée par des capteurs solaires, rendant ainsi les installations autonomes.

Le réseau de suivi est opérationnel depuis décembre 2018 où certains des dispositifs ont été mis en place dans le cadre d'un autre projet de suivi des échouages de sargasses (rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020). Parmi les littoraux suivis, le réseau permet aujourd'hui un examen approfondi de la dynamique sédimentaire sur 7 plages sableuses : la plage du nord du bourg de Sainte-Marie (02) ; Pointe Faula (11) et Grande Anse Macabou (12) au Vauclin ; anse Cafard (14) et Morne Larcher (15) au Diamant ; la plage du Coin au Carbet (16) et enfin anse Céron sur la commune du Prêcheur (17). Le dispositif en place sur anse Michel à Sainte-Anne a été subtilisé.

La plupart des sites du réseau de suivi ont été décrits dans le rapport de la phase 1 du projet de suivi des échouages de sargasses (rapport BRGM/RP-69071-FR, 2019) et ne seront donc pas décrits plus en détail dans ce rapport. Les sites situés sur les communes du Prêcheur (anse Céron), du Carbet (plage du Coin ou plage du Bourg) ou du bourg de Tartane (anse l'Etang) ont été mis en place dans le cadre de l'Observatoire OLiMar et n'ont donc encore jamais été décrits. Leurs caractéristiques sont détaillées par les paragraphes ci-dessous.

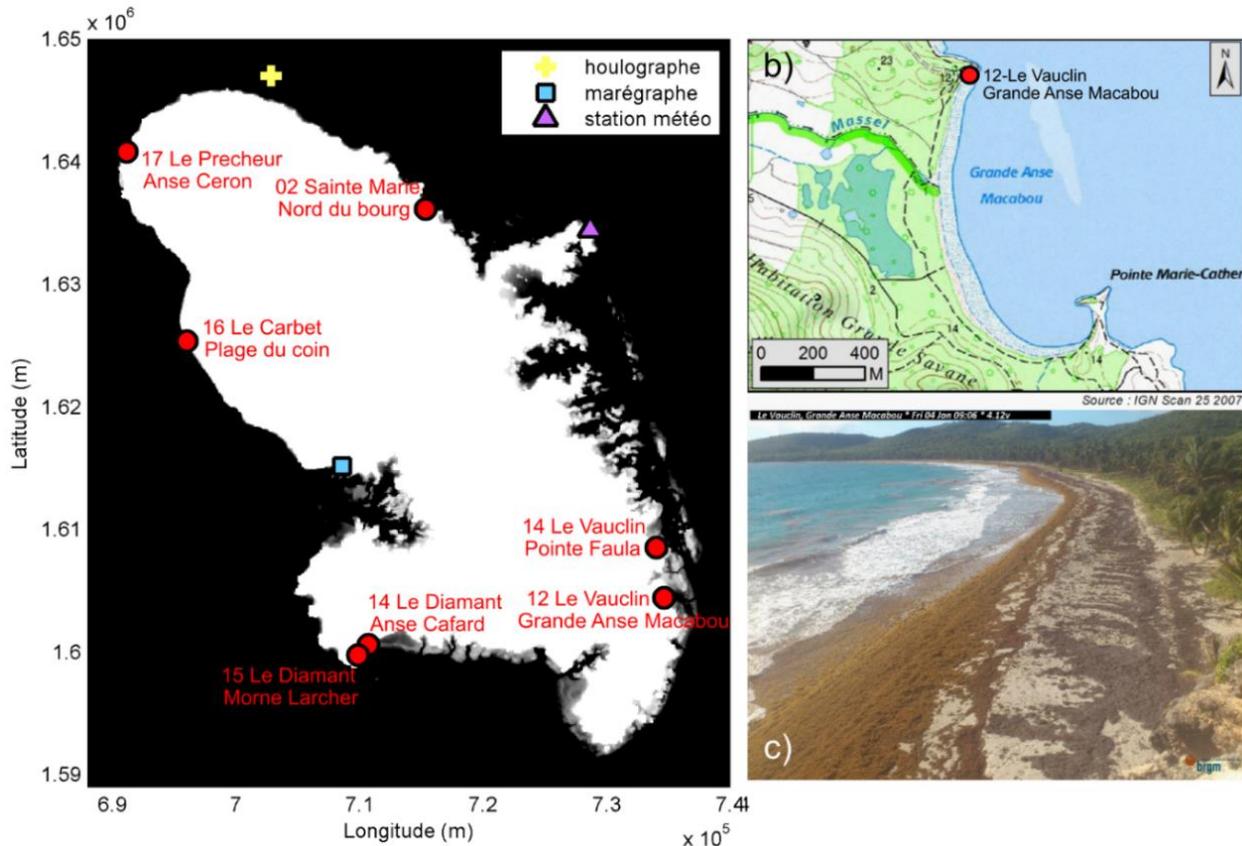


Illustration 8 : a) Localisation des plages sableuses équipées d'un dispositif de suivi vidéo. b) Exemple de localisation du dispositif sur le site de Grande Anse Macabou au Vauclin. c) Image capturée par le dispositif sur le site de Grande Anse Macabou révélant un échouage massif de Sargasse le 15 avril 2019.

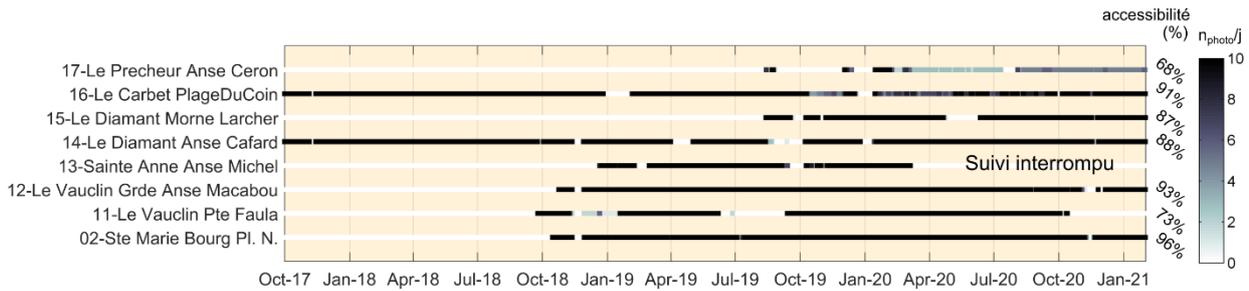


Illustration 9 : Synthèse des acquisitions vidéo (nombre de photos) par jour sur les différentes caméras. L'accessibilité (%) au minima à une image par jour et par site est notée pour la durée du suivi.

Sur les 23 premiers mois de fonctionnement, le nombre d'interventions techniques est resté modéré (environ 2 par mois), permettant d'assurer une accessibilité journalière aux images entre 68 et 96 % du temps (Illustration 9). Les principaux facteurs jouant sur la performance des caméras sont souvent reliés à la fluctuation du réseau 3G et à l'alimentation solaire. Aussi, lorsque que les conditions météorologiques sont défavorables, à cause de la pluie ou de l'exposition aux embruns, les images peuvent être ponctuellement inexploitable.

Anse Céron (Le Prêcheur)

Le dispositif a été déployé sur la plage de l'anse Céron sur la commune du Prêcheur le 24 septembre 2018. La caméra a été installée au nord de la baie et se situe à proximité immédiate de la mer (Illustration 10). Quelques pannes ont pu avoir lieu en raison d'une faible alimentation solaire sur le site. Le système d'alimentation a dû être changé le 15 janvier 2020 pour des panneaux solaires plus performants.



Illustration 10 : Localisation du dispositif et prise de vue à l'anse Céron sur la commune du Prêcheur.

La plage du Coin (Le Carbet)

La plage du Coin, située sur la commune du Carbet, fait l'objet d'un suivi vidéo depuis le 10 octobre 2017. Le dispositif a été installé sur un arbre, au sommet de la falaise, surplombant la plage. À une hauteur d'environ 50 m, le dispositif permet d'obtenir une vue générale et plongeante sur le site, avec une orientation perpendiculaire adéquate pour le suivi de la dynamique littorale (Illustration 11). Avec un suivi initié en 2017, la plage du Coin est probablement l'un des sites qui dispose du plus grand nombre de données issues de l'imagerie vidéo de tout l'arc Antillais.



Illustration 11 : Localisation du dispositif et prise de vue sur la plage du Coin au Carbet.

Anse l'Etang (Trinité)

Une demande est encore en cours au moment de la rédaction du présent rapport pour l'installation d'un dispositif sur le site de l'anse l'Etang. À une hauteur d'environ 50 m, le dispositif permettrait d'obtenir une vue générale et plongeante sur le site.

2.3.2. Traitements des données et analyses

Afin de réaliser des observations quantitatives à partir des images du réseau de suivi, différents algorithmes de traitement ont été développés dans le cadre d'autres projets (rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020). Ces traitements visent notamment au géoréférencement des images et à la détection du trait de côte.

Géoréférencement des images

La quantification de données physiques requiert un géoréférencement des images vidéo. Cela revient à déterminer la relation entre les coordonnées pixels de l'image (u, v) et la position X, Y, Z de chacun d'entre eux dans un repère réel (Illustration 12). La relation entre l'image et les coordonnées réelles peut être obtenue en connaissant la position (X_0, Y_0, Z_0) , la distance focale D_f et l'orientation (tilt, azimuth et roll) de la caméra. Ces angles sont déterminés en utilisant plusieurs points de références dont les coordonnées images et réelles sont connues (gcp1⁷ à gcp5, Illustration 12). La rectification de l'image bidimensionnelle (u, v) en coordonnées tridimensionnelles X, Y, Z implique une sous-détermination du système. Ce problème est généralement résolu en attribuant une altitude verticale Z connue, typiquement la hauteur du plan d'eau (Holland et al., 1997).

⁷ gcp : ground control point (point de contrôle au sol, géoréférencé)

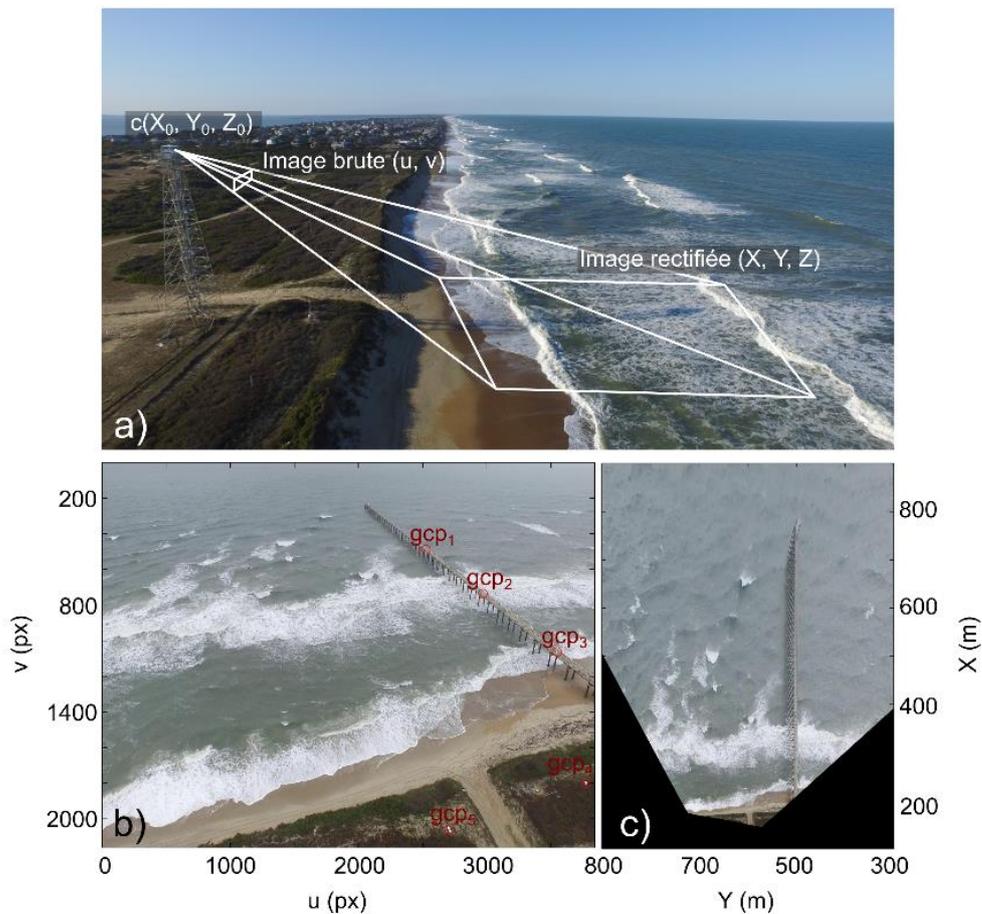


Illustration 12 : Photographie aérienne de la plage de Duck (Caroline du Nord, États-Unis) montrant la transformation d'une image oblique (coordonnées u, v) en image plane (coordonnées X, Y, Z). (b,c) Rectification d'une image à partir de points gcps connus. Images obtenues depuis la station ARGUS de Duck pendant le Coastal Imaging Research Network (CIRN) en Juin 2017.

Sur de nombreux sites d'étude, il est (parfois) admis que les angles de vue des caméras peuvent varier plus ou moins dans le temps pour différentes raisons. Un décalage même faible de l'orientation de la caméra peut entraîner des erreurs de géoréférencement post-acquisition de l'ordre de la centaine de mètres (Bouvier et al., 2019). De ce fait, chaque image nécessite une rectification spécifique calculée après la prise de vue qui requiert l'identification d'objets dans le champ de la caméra (bâtiment, route, digue) dont la localisation est connue. Lorsque l'image ne contient pas ce genre de repère, ce qui est courant sur le littoral, un géoréférencement précis est alors impossible.

Une fois géoréférencées, les images issues des différentes caméras permettent d'obtenir une zone de suivi continue sur une grille d'environ 600 m dans la direction parallèle à la plage et de 250 m dans la direction transversale (Illustration 13). La résolution d'un pixel peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres dans les zones les plus éloignées des caméras (Illustration 13). Selon l'angle de vue de la caméra ou de la distance à laquelle elle se situe de la zone de suivi, la résolution de l'image peut se dégrader et devenir insuffisante pour détecter la position du trait de côte. Pour exemple, sur la plage de grande Anse Macabou au Vauclin, la résolution transversale des pixels varie entre 0.25 m et 1.5 m dans un secteur proche du trait de côte selon la distance à laquelle se situe le pixel de la lentille de l'appareil (Illustration 13). La résolution de l'image dans l'axe parallèle à celui de la plage varie entre 0.25 et 10 m.

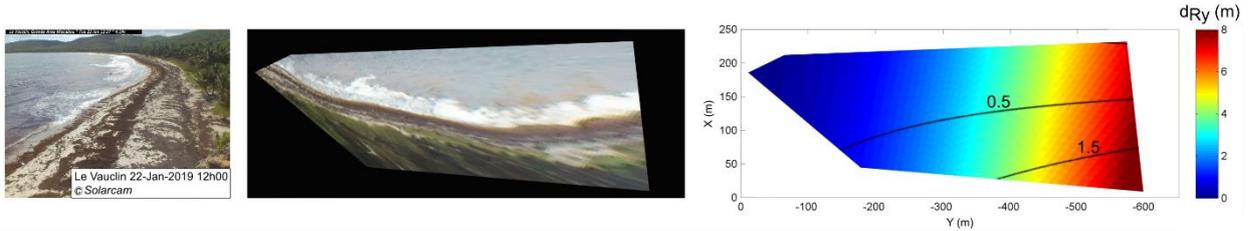


Illustration 13 : (de la gauche vers la droite) - Images brutes (vue oblique), rectifiées (vue en plan) et résolution des pixels de l'image pour le dispositif en place en place sur la plage de Grande Anse Macabou au Vauclin. Les couleurs expriment la résolution des pixels de l'image dans la direction de l'axe parallèle à celui de la plage (Y) tandis que les iso-contours correspondent à la résolution dans l'axe transversal (X).

Détection du trait de côte

La détection du trait de côte est réalisée en utilisant les images obliques issues directement des caméras. La détection du trait de côte est semi-automatique et peut s'effectuer de façon plus ou moins robuste ou complexe. La méthode utilisée ici consiste à détecter par une analyse spectrale l'interface entre les zones humides et sèches (Holman and Stanley, 2007). Pour cela, l'image RGB (Red, Green, Blue) est convertie en image HSV (Hue Saturation Value) sur laquelle un filtre est appliqué sur l'intensité pour améliorer le contraste entre la partie humide et sèche. La technique de détection est ensuite réalisée séparément sur l'image RGB et HSV par une méthode spectrale afin de déterminer quel type d'image est le plus pertinent pour identifier le trait de côte.

Le trait de côte identifié correspond à la zone du jet de rive dont l'extension et la position transversale dépendent des conditions de vagues et de surcote. Il est donc obligatoire de se référer à des conditions hydrodynamiques semblables pour décrire son évolution. Typiquement il est préférable de restreindre l'analyse à des conditions de vagues et de vent peu énergétiques, pour limiter les erreurs associées à la surcote et au jet de rive (Stockdon et al., 2006). De la même façon il est impératif de réaliser le suivi de la dynamique du trait de côte pour des hauteurs de marée similaires. Ainsi, l'erreur sur la position du trait de côte varie selon les écarts verticaux du niveau d'eau au cours d'une période de suivi qui se traduisent en une erreur horizontale selon la pente de la plage. La résolution transversale de l'image redressée est enfin ajoutée comme source d'erreur affectant l'identification du trait de côte.

Les images traitées dans cette étude ont été choisies en fonction des conditions hydrodynamiques ($H_s^{\circ} < 1.3$ m) et météorologiques (vent faible), ce qui suppose une erreur verticale due au set-up/set-down⁹ (Δ_{Setup}) inférieure à 0.30 m (Stockdon et al., 2006). En ajoutant la variation du niveau d'eau due à la marée ($\Delta_{marée} = 0.30$ m pour les images sélectionnées), et considérant une pente de plage α à 6 %, on peut estimer une erreur sur la position du trait de côte par :

$$\phi_{tdc} = \frac{\Delta_{Setup} + \Delta_{marée}}{\tan(\alpha)} \quad (1)$$

Au cours du suivi, l'erreur horizontale sur la position du trait de côte varie habituellement entre ± 2 m et ± 5 m selon les précautions prises par l'opérateur. Si l'on ajoute la résolution transversale de l'image redressée (< 1 m au niveau du trait de côte), l'erreur maximale estimée se situe entre ± 3 m et ± 6 m et reste inférieure aux mouvements associés à l'évolution du trait de côte à l'échelle événementielle, saisonnière ou pluriannuelle sur les plages les plus dynamiques.

⁸ H_s : hauteur significative des vagues

⁹ set-up/set-down : augmentation ou abaissement du niveau d'eau moyen (respectivement)

2.4. DONNEES COMPLEMENTAIRES

Afin d’enrichir les analyses du suivi des échouages et arrivages de sargasses ou de la dynamique du trait de côte sur les sites pilotes déterminés, il convient de rappeler le contexte météorologique et hydrodynamique particulier de la Martinique et de présenter les différents instruments de mesure utilisés en parallèle des outils ou algorithmes déjà présentés plus haut.

2.4.1. Données météorologiques

La Martinique connaît un climat tropical, chaud et humide, présentant une saison sèche, le carême (de décembre à mai, centrée sur les mois de février/mars) et une saison humide, l’hivernage (de juin à novembre). Ces conditions climatiques sont directement liées aux positions respectives de l’anticyclone des Açores et de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT). La Martinique est soumise aux alizés toute l’année. En provenance constante de l’est à l’est-sud-est (Illustration 14), ces vents soufflent en moyenne à une vitesse de 7 m/s (soit 25 km/h).

Les alizés sont soutenus et réguliers, susceptibles notamment de se renforcer de décembre à février (11 à 19 m/s) et de générer ainsi de plus fortes houles. Pendant l’hivernage, l’anticyclone des Açores remonte vers l’Atlantique Nord, les alizés diminuent. La ZCIT remonte vers 10° de latitude nord et la Martinique est soumise à des pluies fréquentes. Pendant le carême, l’anticyclone des Açores et la ZCIT migrent vers le sud. A cela s’ajoutent les cyclones qui peuvent parcourir l’arc caribéen pendant la saison cyclonique, de juillet à mi-novembre. Les vents peuvent alors dépasser les 150 km/h avec des précipitations qui peuvent atteindre des valeurs extrêmes de 1000 mm d’eau par jour. A la Trinité (Illustration 8), une station de Météo-France permet de mesurer les différents paramètres météorologiques dont les vitesses et directions du vent (Illustration 14).

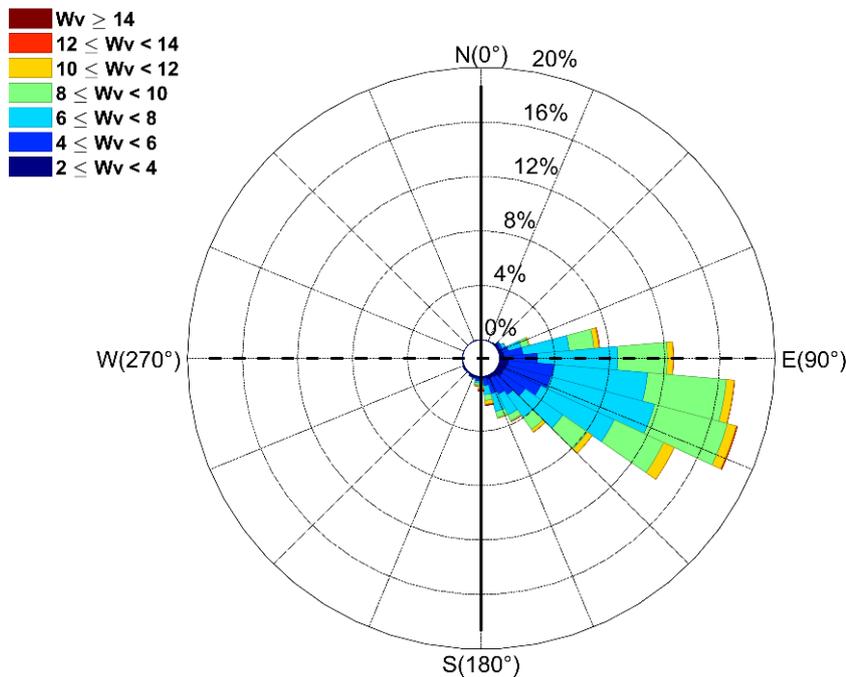


Illustration 14 : Caractéristiques du vent mesurée à la station météorologique de la Trinité (Météo-France) depuis novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence des vitesses de vent moyen (W_v en m/s).

2.4.2. Données marégraphiques

Les marées en Martinique sont d'amplitude microtidale avec un marnage moyen de 45 cm (SHOM, 2016) et une amplitude de marée aux équinoxes qui peut atteindre 90 cm. Le niveau moyen marin est de 0.169 m (ngm). Les marées sont de type semi-diurne à inégalités diurnes avec deux pleines mers et deux basses mers par jour où les hauteurs d'eau sont différentes (Illustration 15). Plusieurs points de mesures sont disponibles autour de la Martinique et notamment sur la commune de Fort-de-France (Illustration 8).

En cas de dysfonctionnement de la bouée, les données de niveau d'eau sont complétées par une marée simulée, définie par la reconstitution des différentes composantes de l'onde de marée, déterminée à partir des données d'origines (Grinsted, 2020). Pour exemple, la méthode a été appliquée sur les données issues du marégraphe de Fort-de-France sur une période située entre le 1^{er} janvier 2018 et le 1^{er} janvier 2020. L'erreur quadratique moyenne entre les niveaux d'eau mesurés et simulés est de 0.06 m où les composantes principales diurne et semi-diurne du signal de marée sont décrites par l'illustration 15. En Martinique les principales harmoniques de la marée océanique sont O1 et M2 (principales lunaire), P1 et S2 (principales solaire), K1 (déclinaison luni-solaire), N2 (majeure lunaire elliptique).

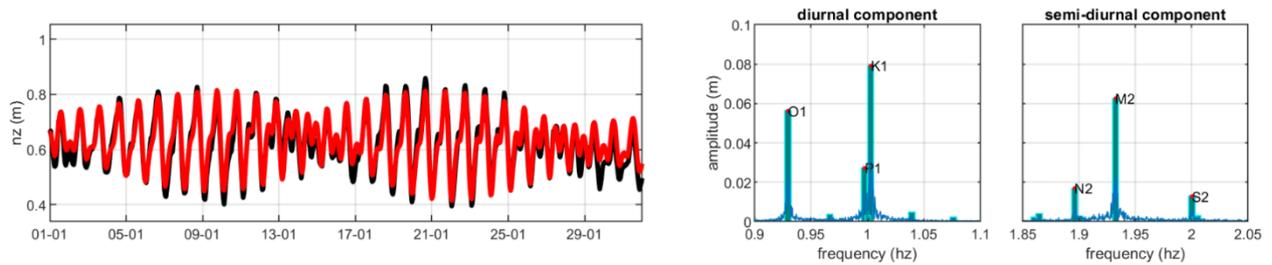


Illustration 15 : (à gauche) - Niveau d'eau (nz) mesuré (en noir) à la station marégraphique de Fort-de-France (SHOM) et simulé (en rouge) depuis le 01 janvier 2019 (1 mois de mesures). (à droite) - Composantes principales diurnes et semi-diurnes déterminées pour la simulation des niveaux d'eau. Les niveaux sont données par rapport au zéro hydrographique.

2.4.3. Données et caractéristiques des vagues

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

Il existe autour de la Martinique trois houlographes du réseau Candhis (Centre d'Archivage National de Données de Houle In-Situ : <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>). Une bouée houlographe est mouillée au nord de la Martinique dans le secteur de Basse Pointe (Illustration 8 et Illustration 16). La seconde est positionnée près de l'île de Sainte Lucie au sud de la Martinique et la troisième au large de la Baie de Fort de France. Pour chacune de ces bouées, les caractéristiques des vagues sont mesurées en temps réel à une fréquence horaire. Si nécessaire, les données issues du modèle de prévision océanographiques côtières (plateformes MARC-LOPS, <https://marc.ifremer.fr/>) peuvent compléter les caractéristiques de vagues mesurées au niveau des bouées.

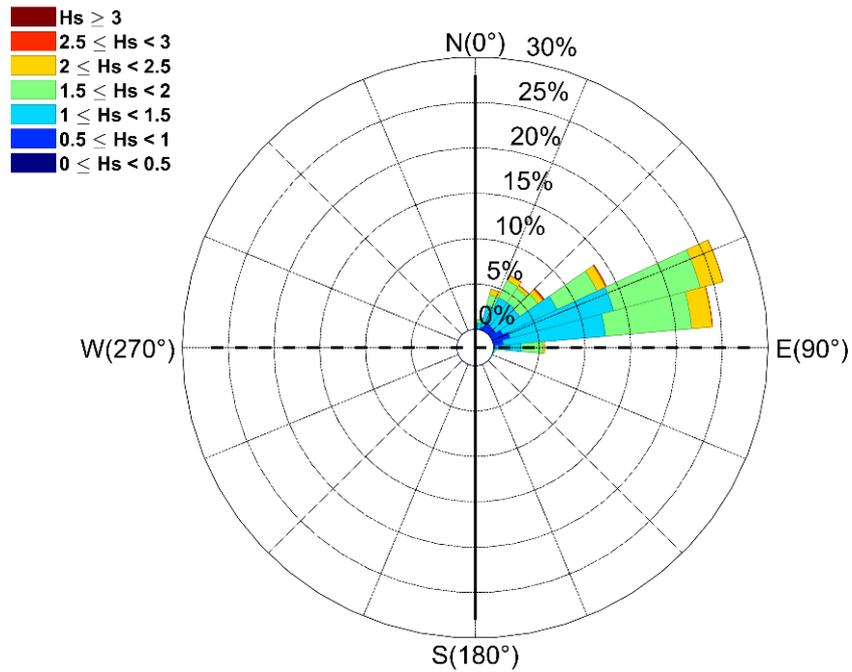


Illustration 16 : Caractéristiques des vagues à Basse pointe mesurées par la bouée houlographe (<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>) depuis Novembre 2018 (1 an de mesures). Diagramme directionnel en fréquence de la hauteur significative des vagues (H_s).

3. Synthèse des évolutions par plage

Le présent chapitre s'attache à décrire les évolutions morphologiques observées de chacune des plages suivies par l'Observatoire depuis les premières campagnes de mesures en 2017 jusqu'aux derniers levés réalisés en juillet 2020. Après une présentation globale des caractéristiques principales de chaque cellule sédimentaire, ce chapitre offre une description synthétique de la dynamique des plages suivies par l'OLiMar, depuis l'échelle interannuelle jusqu'à l'échelle saisonnière. Pour certains sites qui disposent d'un dispositif de suivi par imagerie vidéo, la dynamique événementielle pourra également être abordée.

3.1. ANSE CHARPENTIER (LE MARIGOT ET SAINTE-MARIE)

Introduction

L'anse Charpentier représente une cellule sédimentaire située à cheval sur les communes du Marigot et de Sainte-Marie au nord-est de la Martinique (Illustration 17, à gauche). Cette cellule sédimentaire indépendante s'étend sur plus d'un kilomètre de long, alimentée par une rivière en son centre et délimitée par des côtes rocheuses telles que la pointe Baignoire au nord et la pointe Pain de Sucre au sud. L'anse Charpentier est une plage sableuse composée majoritairement de sables fins (Illustration 17, à droite), même si des sédiments plus grossiers (galets) peuvent également être présents sur certaines portions de la cellule sédimentaire. La baie est orientée vers le nord, ouverte vers l'océan Atlantique et donc exposée à un climat de vague énergétique.

Les observations et les photographies prises sur le terrain permettent de souligner à quel point la plage de l'anse Charpentier est dynamique, exposée aux coups de mer, avec des vagues qui peuvent parfois atteindre plus de 2 m dans la baie lors des événements les plus énergétiques (Illustration 18, à gauche). Des marqueurs d'érosion sont d'ailleurs souvent visibles sur l'arrière plage avec un talus qui peut être plus ou moins prononcé (Illustration 18, à droite). Le haut de plage est délimité par de la végétation au nord et par une falaise rocheuse fracturée au Sud (basalte) dont la morphologie témoigne de l'énergie des vagues qui pénètrent dans la baie.



Illustration 17 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Charpentier située à cheval sur la commune du Marigot et de Sainte-Marie. (à droite) - La plage est essentiellement composée de sables fins et peut être parfois exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.



Illustration 18 : (à gauche) - vagues de plus de 2 m déferlant à l'anse Charpentier le 27 juillet 2020 faisant suite au passage de l'ouragan Isaias. (à droite) - L'extrémité sud de la plage peut se montrer très étroite comme pendant la campagne de mesure réalisée en juillet 2020.

Evolution du trait de côte

La position du trait de côte est extraite à différentes dates à partir des campagnes de mesures réalisées (Illustration 19). Initialement en 2017 (trait bleu), la plage est relativement large (> 15 m) sur l'ensemble du linéaire côtier. Depuis, certaines portions de la plage ont connu des variations morphologiques significatives, avec une largeur de plage qui oscille entre 5 et 20 m selon le secteur en fonction des années ou des saisons, démontrant à quel point la cellule sédimentaire est dynamique (Illustration 18). Sur le secteur nord-ouest de la baie, à proximité du profil P1, alors que la position du trait de côte se situe à plus de 20 m de la limite de végétation (trait noir) en juillet 2017, la plage subit un recul et n'atteint plus qu'une dizaine de mètres en janvier 2018. Plus récemment en juillet 2020, la plage s'est élargie et atteint plus d'une trentaine de mètres sur ce même secteur. Au contraire, on observe que sur le secteur sud-est, à proximité du profil P3, la plage est caractérisée par des variations importantes la conduisant à un recul progressif depuis 2017 et une faible largeur en juillet 2020, inférieure à 10 m (Illustration 18 à droite).

L'évolution temporelle de la largeur de plage permet de caractériser sa dynamique à l'échelle interannuelle et saisonnière (Illustration 20). Alors que la largeur de plage est restée relativement stable dans le secteur situé au centre de la baie, à proximité du profil P2, la cellule sédimentaire montre une dynamique saisonnière importante au niveaux de ses extrémités nord et sud.

Au niveau du profil P1, la largeur de plage varie entre 5 et 30 m sur toute la durée du suivi. En fin de carême, avant le début de la saison cyclonique (juillet-août), le stock sédimentaire est important et la largeur de plage atteint plus de 20 m. Après l'hivernage (mars-avril), ce secteur de la plage est plus réduit et sa largeur atteint une dizaine de mètres.

Au niveau du profil P2, la plage reste stable sur toute la durée du suivi avec une tendance significative à l'élargissement. La largeur de la plage a augmenté de 5 m en 3 ans dans ce secteur.

Au niveau du profil P3, la plage présente une dynamique plus importante que sur P2. Avec des oscillations de la largeur de plage mesurée entre 10 et 20 m sur toute la durée du suivi, ce secteur présente néanmoins une dynamique plus restreinte que sur P1. De façon similaire, en fin de Carême, le stock sédimentaire est plus important qu'à la fin de la période d'hivernage.

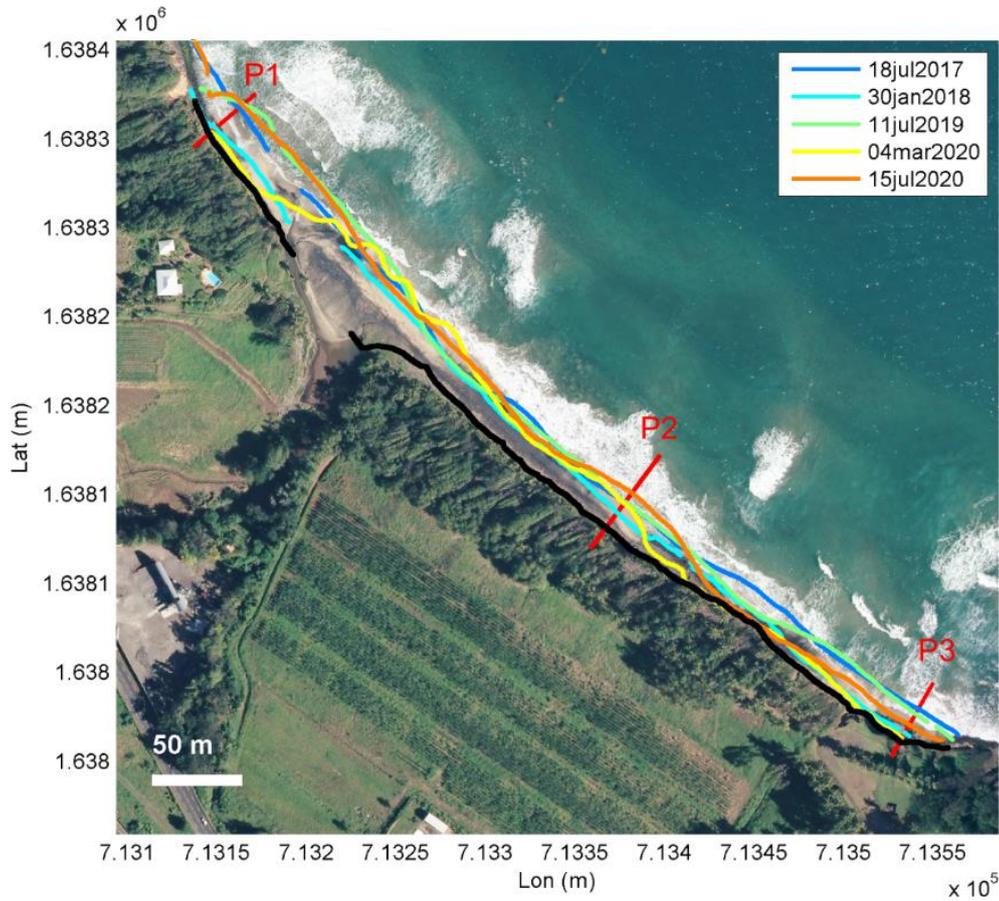


Illustration 19 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Charpentier. Le trait noir indique le haut de plage (limite de végétation) mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P3) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

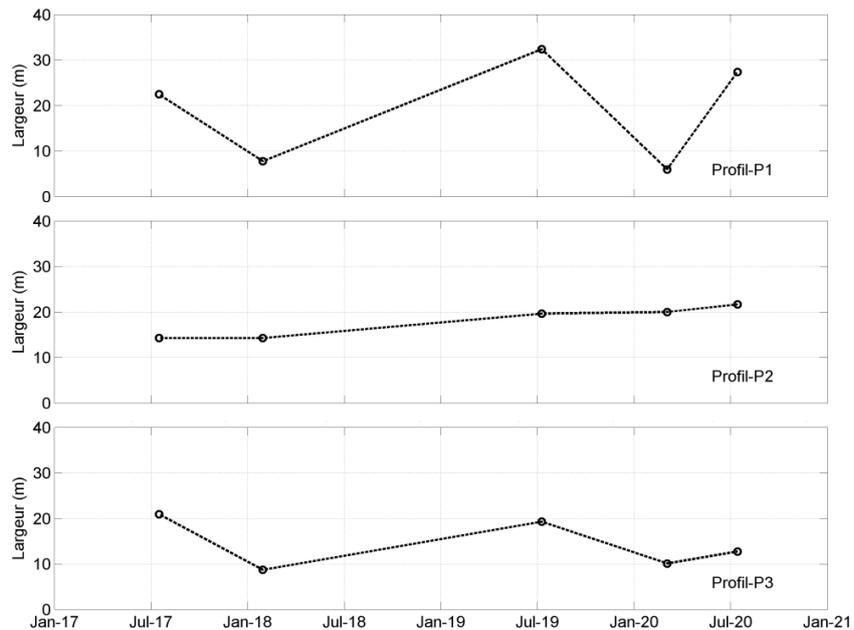


Illustration 20 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2 et P3 sur anse Charpentier. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Les changements de morphologies observés impliquent forcément d'importants mouvements sédimentaires. Des informations plus détaillées sur les évolutions morphologiques des profils de plage sont fournies par l'illustration 21. De façon assez visible, les profils de plage présentent une dynamique saisonnière très importante avec des variations qui peuvent atteindre plus de 50 m² au cours de la même année (e.g. supérieures à 70 m² entre mars 2020 et juillet 2020 au niveau du profil P1). Les profils P1 et P3 confirment que ces sections sont les plus dynamiques de la cellule sédimentaire.

En fin de période d'hivernage (janvier 2018, mars 2020), le profil P1 est caractérisé par une forte pente (> 15 %) et une plage fortement réduite en largeur (< 10 m). Au contraire en fin de période de carême (juillet 2017, juillet 2019 et juillet 2020), le profil de plage s'engraisse en sédiments, la plage devient plus large (> 25 m) et moins pentue (< 5 %).

Le profil P3 montre des évolutions similaires avec une plage étroite et très pentue en fin d'hivernage (et inversement en fin de carême), même si plus récemment en juillet 2020 la plage ne semble pas avoir récupéré son volume habituel dans ce secteur.

Dans le secteur de P2, à proximité du centre de la cellule sédimentaire, le profil de plage ne présente pas d'évolutions saisonnières significatives en opposition aux extrémités de la baie. On observe au contraire une évolution qui semble pluriannuelle avec une tendance à l'accrétion. La plage a gagné plus de 5 m de large entre juillet 2017 et juillet 2020 et plus de 15 m le long du même profil.

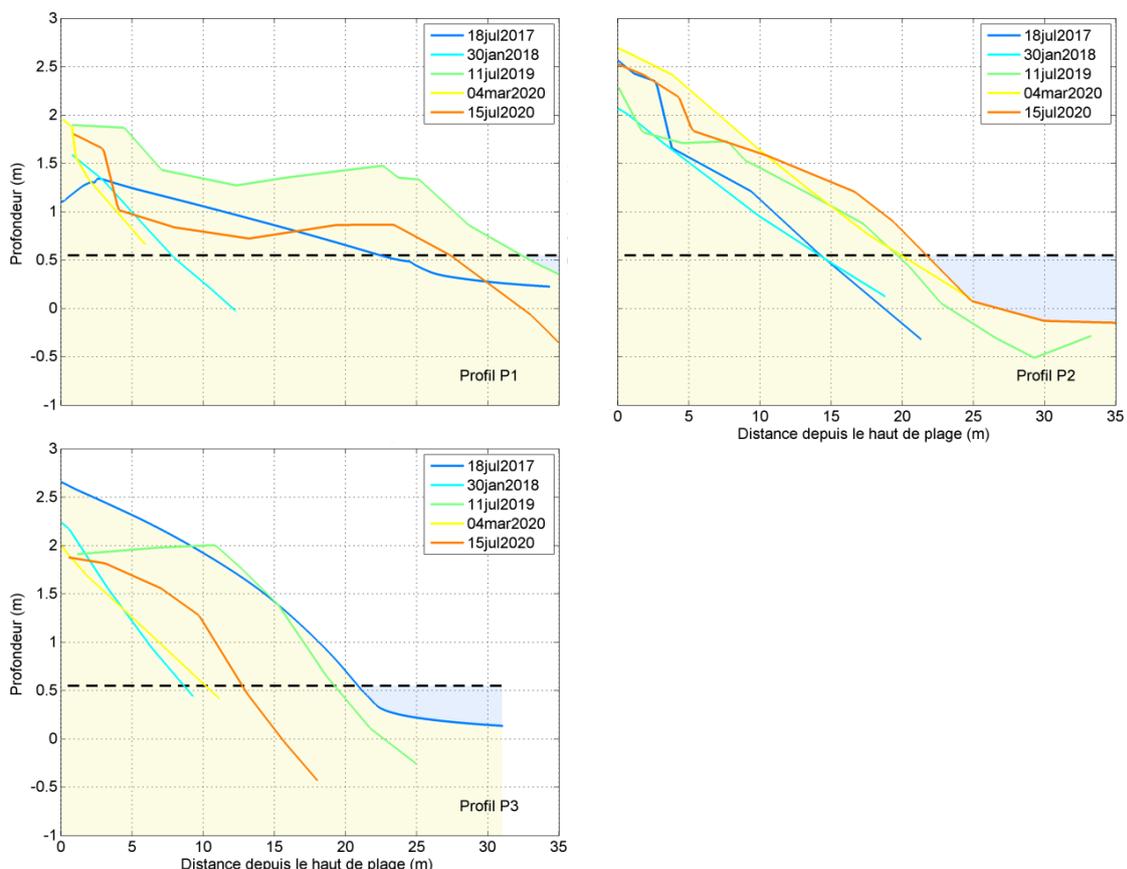


Illustration 21 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 et P3 sur anse Charpentier en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.2. ANSE LA RICHER (TRINITE)

Introduction

L'anse La Richer peut se définir par une cellule sédimentaire indépendante située sur la commune de la Trinité au nord-est de la Martinique (Illustration 22, à gauche). Cette cellule s'étend sur environ 900 m de long, délimitée par une falaise peu escarpée (morne Bataillon) au nord et un cap artificialisé (enrochement) au sud qui offre une protection à une route littorale longeant la côte vers l'anse Cosmy. L'anse La Richer est essentiellement composée de sables fins et reste largement exposée aux échouages de sargasses (Illustration 22, à droite). La baie est orientée vers le nord-est, ouverte vers l'océan Atlantique mais reste protégée des vagues par la présence de récifs coralliens.



Illustration 22 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse La Richer (Trinité). (à droite) - La plage est composée de sables fins et reste largement exposée aux échouages de sargasses. Photographies prises pendant la campagne de mesure en juillet 2020.



Illustration 23 : (à gauche) - Dans le secteur le plus au nord de la baie, la plage est très étroite et la route longeant la côte apparaît en mauvais état. (à droite) - Quelques dizaines de mètres plus au sud, l'arrière plage porte les marques d'une érosion chronique. Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Les observations et les photographies prises sur le terrain permettent de souligner la vulnérabilité de l'anse La Richer aux phénomènes d'érosion et de submersion marine (Illustration 23). Des marqueurs d'érosion sont visibles sur l'arrière plage, particulièrement au nord de la baie, où la route située à quelques mètres du trait de côte devient difficilement praticable.

Evolution du trait de côte

Les positions du trait de côte mesurées au cours de chacune des campagnes de terrain sont présentées par l'illustration 24. La largeur de la plage reste faible sur tout le linéaire avec au maximum 3-4 m dans le secteur sud à proximité de P4 en 2020 (mars et juillet). La position du trait de côte se situe parfois même en arrière de la limite de végétation, notamment dans le secteur de P1, à l'extrémité nord de la baie. Dans ce secteur, le stock sédimentaire disponible est très réduit et rend la route longeant le bord de mer très vulnérable à l'érosion côtière. La dynamique sédimentaire est parfois significative dans certains secteurs avec une largeur de plage qui varie au maximum sur environ 5 m dans le secteur de P4.

Alors que la largeur de plage est restée relativement stable dans le secteur situé au centre de la baie (P2 et P3, Illustration 25), la cellule montre une dynamique importante au niveaux de ses extrémités nord et sud (P1 et P4, Illustration 25).

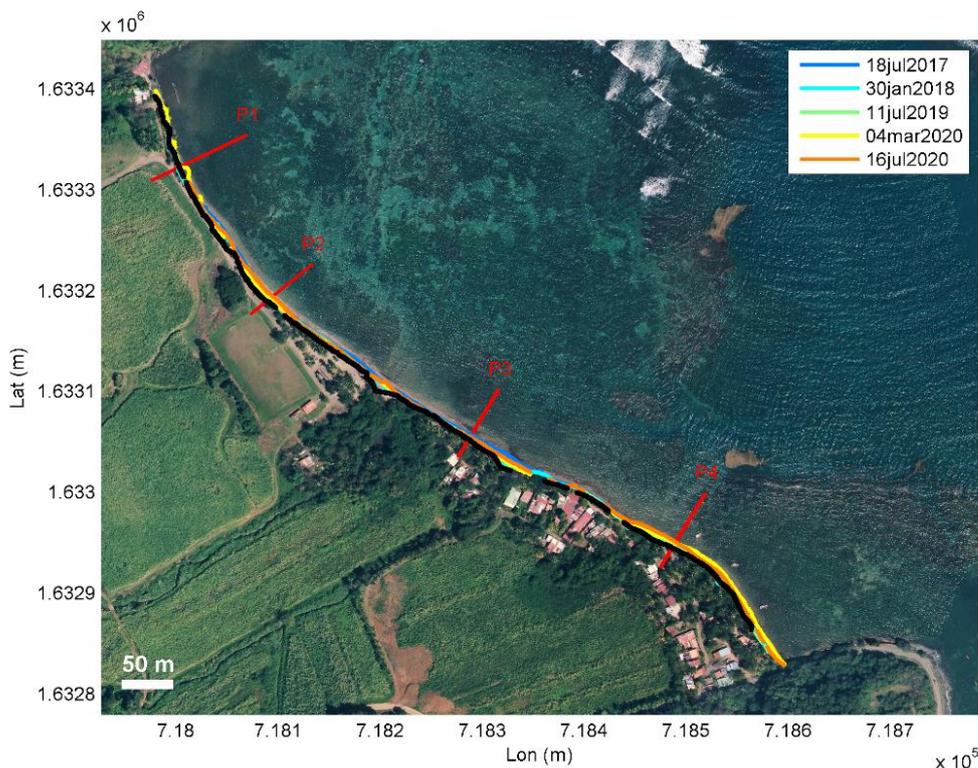


Illustration 24 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse La Richer. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P4) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

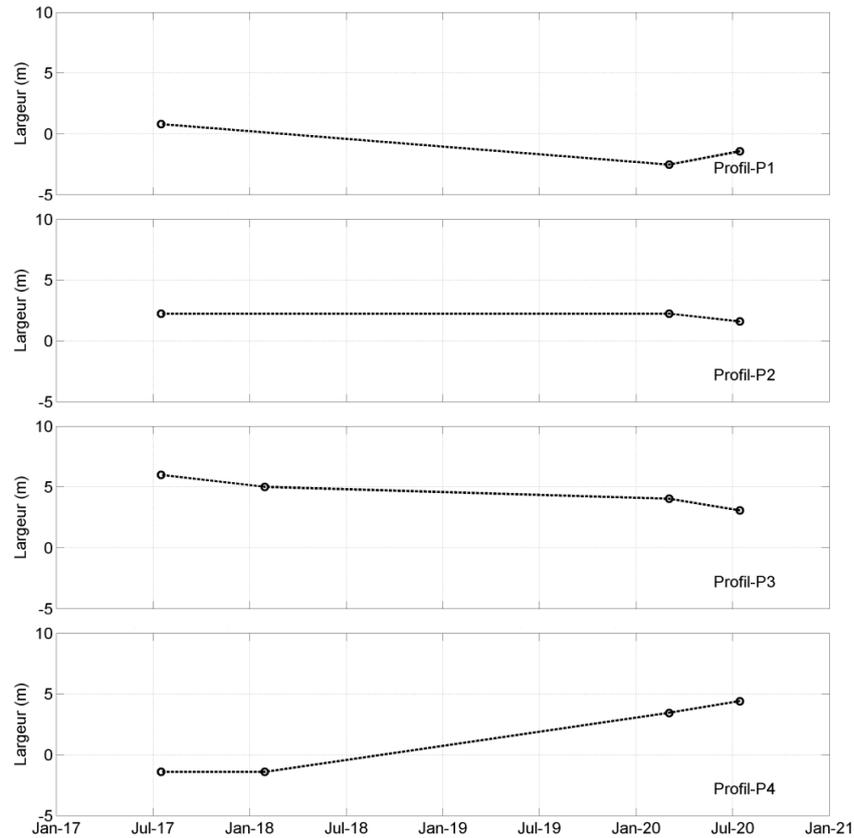


Illustration 25 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 et P4 sur anse La Richer. La largeur de plage est déterminée par rapport la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

A l'extrémité nord de la cellule, la position du trait de côte connaît un recul significatif (~ 3 m) entre juillet 2017 et mars 2020 (P1, Illustration 25). Quelques mois plus tard (juillet 2020), alors que les sargasses échouées sur la plage occasionnent une avancée du trait de côte de quelques mètres, le stock sédimentaire reste constant.

Au centre de la baie (P2 et P3, Illustration 25), la plage reste stable sur toute la durée du suivi avec néanmoins une légère tendance au recul au niveau du profil P3.

Dans le secteur du profil P4, à l'extrémité sud de la cellule, la plage présente une dynamique bien plus importante. L'évolution de la position du trait de côte se caractérise par une avancée d'environ 5 m entre juillet 2017 et juillet 2019 (P4, Illustration 25).

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

De façon bien visible, la morphologie du profil de plage est très différente selon le secteur de la cellule sédimentaire. Alors que dans le secteur nord (P1 et P2), la plage est quasiment inexistante avec un stock sédimentaire très réduit, le sud de la baie est caractérisé par une largeur de plage plus importante (Illustration 26). Dans le secteur de P4, à l'extrémité sud, la largeur de plage atteint 5 m en juillet 2020. Si ce secteur connaît un élargissement de la plage depuis juillet 2019, l'érosion observée sur les secteurs des profils P1 ou P3 est considérable avec un recul de la position du trait de côte sur plus de 2 m.

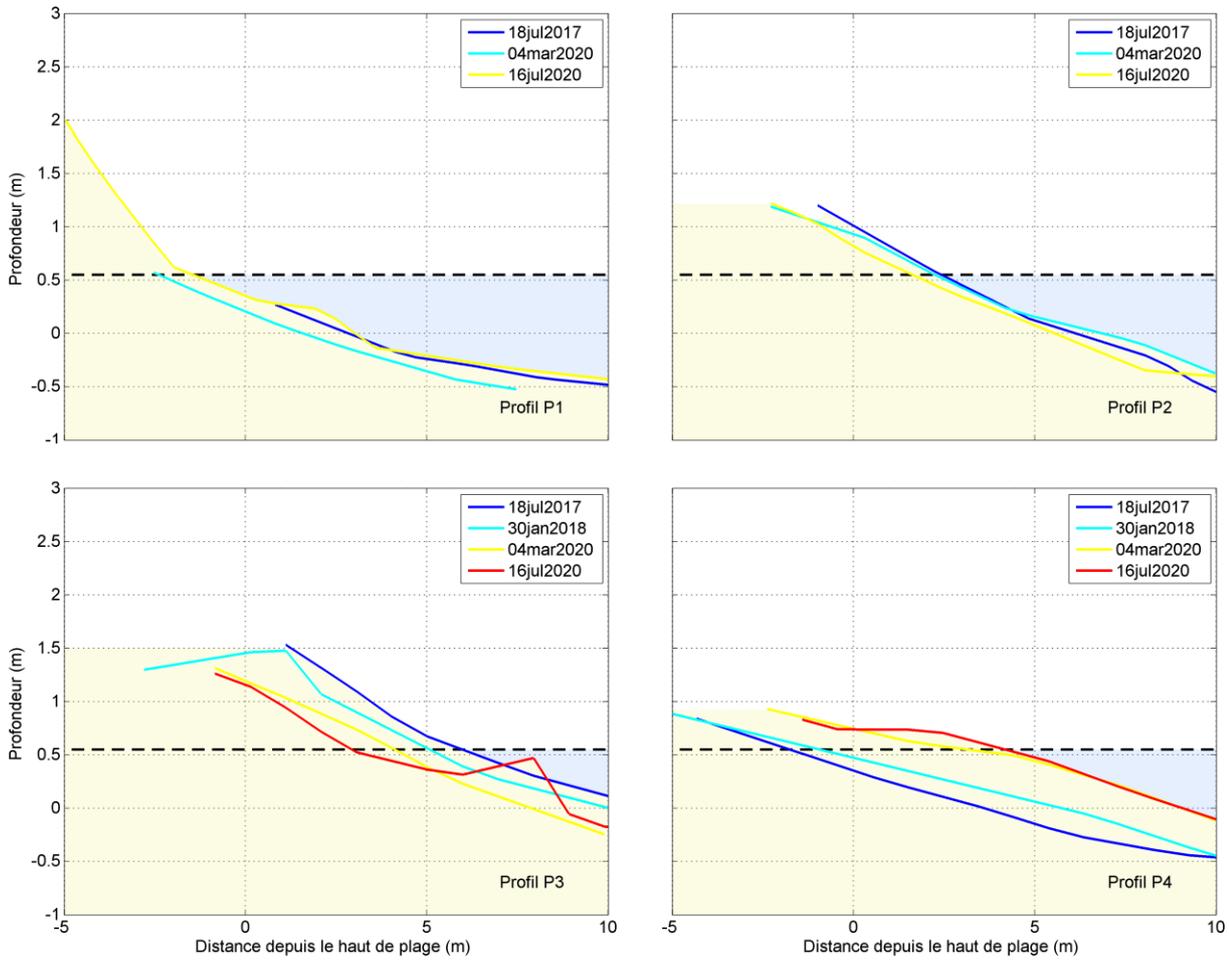


Illustration 26 : Évolution le long des profils de référence P1, P2, P3 et P4 sur anse La Richer en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.3. ANSE COSMY (TRINITE)

Introduction

L'anse Cosmy est caractérisée par une cellule sédimentaire située sur la commune de la Trinité au nord-est de la Martinique (Illustration 27, à gauche). Cette cellule s'étend sur environ 500 m de long, délimitée par un cap artificialisé (enrochement) au nord et un remblai artificiel au sud, où repose le bâtiment de l'ancienne sucrerie. L'anse Cosmy, située à quelques centaines de mètres de l'anse La Richer, présente des caractéristiques sédimentaires similaires de sa voisine (Illustration 27, à droite), même si la portion centrale de la baie peut se distinguer par des sédiments plus grossiers (Illustration 28). La baie est orientée vers le nord-est, ouverte vers l'océan Atlantique mais reste protégée des vagues par les récifs.



Illustration 27 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Cosmy (Trinité). (à droite) - La plage est composée de sables fins et reste exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.



Illustration 28 : Dans le secteur le plus au sud de la baie (à gauche), la plage est large tandis qu'elle devient plus étroite en allant vers le nord (à droite). Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Evolution du trait de côte

Les positions du trait de côte ont été extraites à partir des différents levés réalisés (Illustration 29). La largeur de la plage reste faible sur tout le linéaire avec au maximum 7 m dans le secteur sud à proximité de P6 en 2019 (juillet). La position du trait de côte se situe parfois même en bordure de la limite de végétation, notamment dans le secteur de P5, à l'extrémité nord de la baie. Dans ce secteur, comme sur la portion centrale de la plage (Illustration 28 à droite), le stock sédimentaire disponible est très réduit rendant l'arrière plage et la limite de végétation vulnérables à l'érosion côtière. Certains secteurs peuvent se montrer très dynamiques, notamment au niveau de la pointe sableuse située au sud de P6.

Alors que la largeur de plage est restée relativement stable dans le secteur situé au nord de la baie (P5, Illustration 30), la cellule montre une dynamique importante au niveau de son extrémité sud (P6, Illustration 30).

Au niveau du profil P5, la plage est étroite (~ 1 m) et la position du trait de côte reste stable sur toute la durée du suivi avec quelques oscillations saisonnières qui peuvent atteindre jusqu'à 1 m.

Dans le secteur sud (P6, Illustration 30), la plage présente une dynamique plus importante. L'évolution de la position du trait de côte est caractérisée par une avancée (~ 5 m) entre juillet 2017 et juillet 2019, similairement à ce qui a pu être décrit à l'anse la Richer dans le secteur sud.

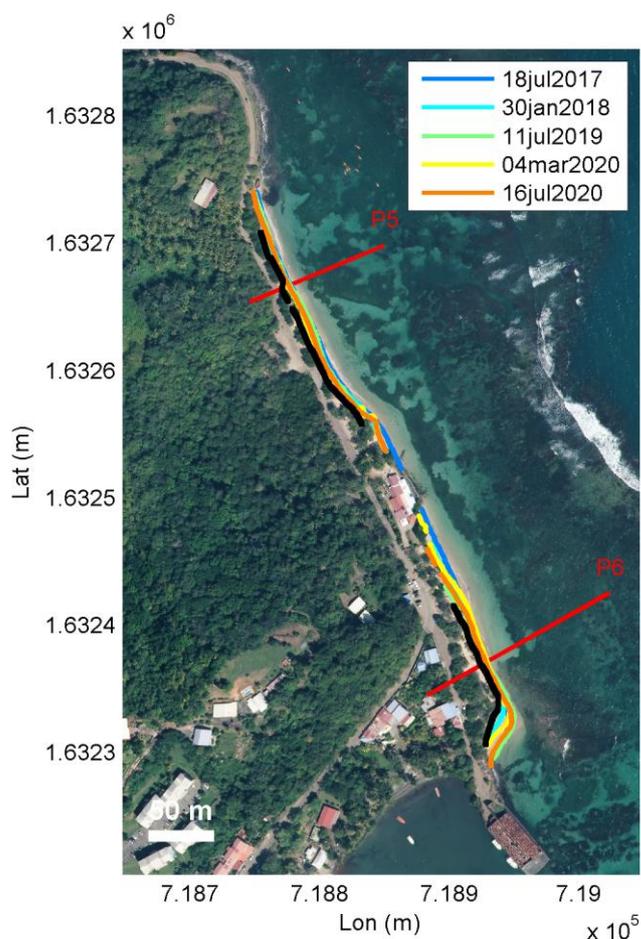


Illustration 29 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Cosmy. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P5 et P6) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

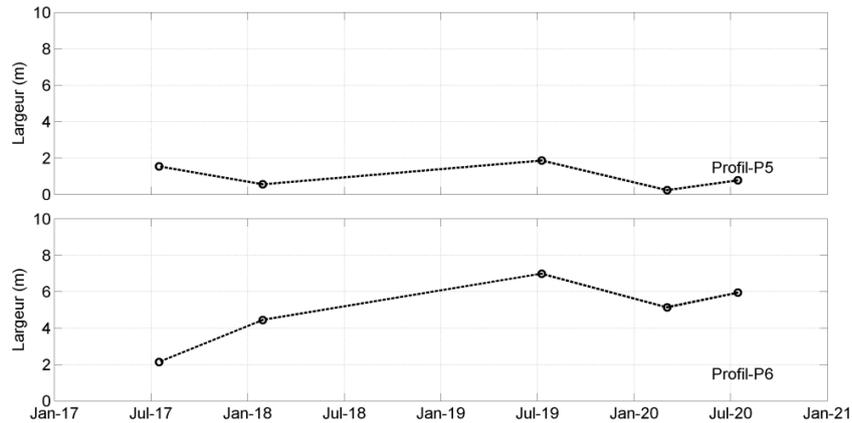


Illustration 30 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 et P4 sur anse Cosmy. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

De manière marquée, le stock sédimentaire disponible est bien distinct selon le secteur de la plage (Illustration 31). Alors que dans le secteur nord (P5), la plage est très étroite et parfois même inexistante, le sud de la baie est caractérisé par une largeur de plage plus importante (entre 2 et 7 m selon les années).

Initialement, en juillet 2017, ce même secteur de la cellule sédimentaire présente une morphologie relativement uniforme sur l'ensemble du profil avec une largeur de plage extrêmement faible (~ 2 m, Illustration 30). Deux ans plus tard, en juillet 2019, on observe un apport sédimentaire important (~ 2.50 m² sur la section) avec une élévation d'environ 0.50 m sur l'ensemble du profil qui se traduit par un élargissement de la plage sur environ 2 m (P6, Illustration 31). Un an plus tard, l'évolution du profil de plage est restée stable et la plage atteint environ 6 m de large.

Sur l'ensemble du suivi, le secteur plus au nord montre plus de stabilité que sur le secteur sud et présente une légère tendance érosive, se traduisant par un recul de la plage sur environ 1 m depuis le début du suivi (P5, Illustration 31).

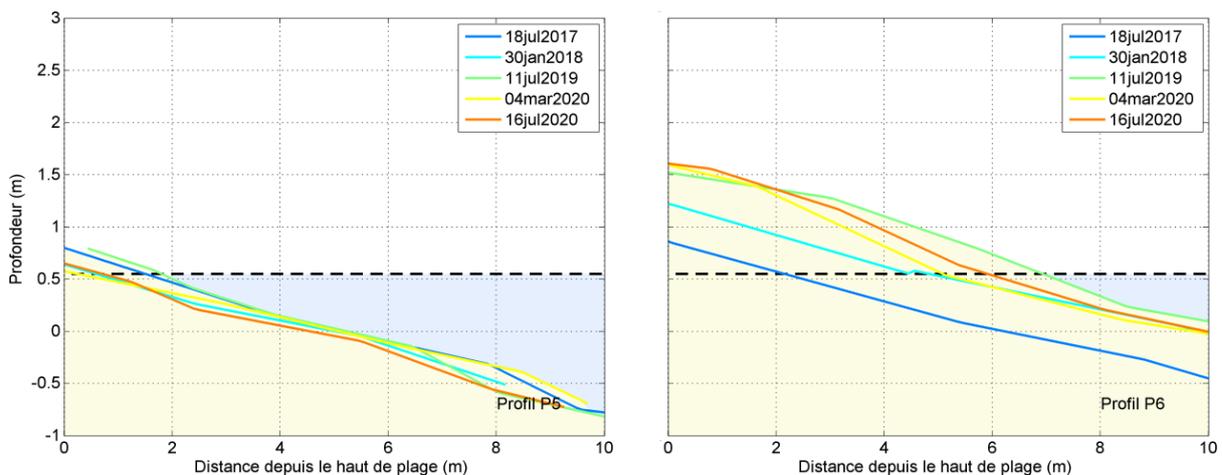


Illustration 31 : Évolution le long des profils de référence P5 (à gauche) et P6 (à droite) sur anse Cosmy en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.4. ANSE L'ETANG (TRINITE)

Introduction

La plage de l'anse l'Etang est une cellule sédimentaire située sur la presqu'île de la Caravelle à la Trinité (Illustration 32, à gauche). La plage s'étend sur plus de 700 m de long et est délimitée par un cap rocheux escarpé à l'ouest (Pointe de l'anse l'Etang) et une pointe rocheuse à l'est la séparant de l'anse Dufour. Essentiellement constituée de sables fins, la plage de l'anse l'Etang est exposée à un climat de vague relativement énergétique.

Les photographies prises sur le terrain démontrent à quel point la cellule sédimentaire est caractérisée par des morphologies contrastées. Contrairement au secteur ouest où la plage est relativement large (Illustration 33, à gauche), son extrémité Est, située en face du village vacance VVF, est très exposée au phénomène d'érosion (Illustration 33, à droite). Sur ce secteur, des marqueurs d'érosion sont visibles sur l'arrière plage avec un talus qui atteint plus de 2 m de haut.

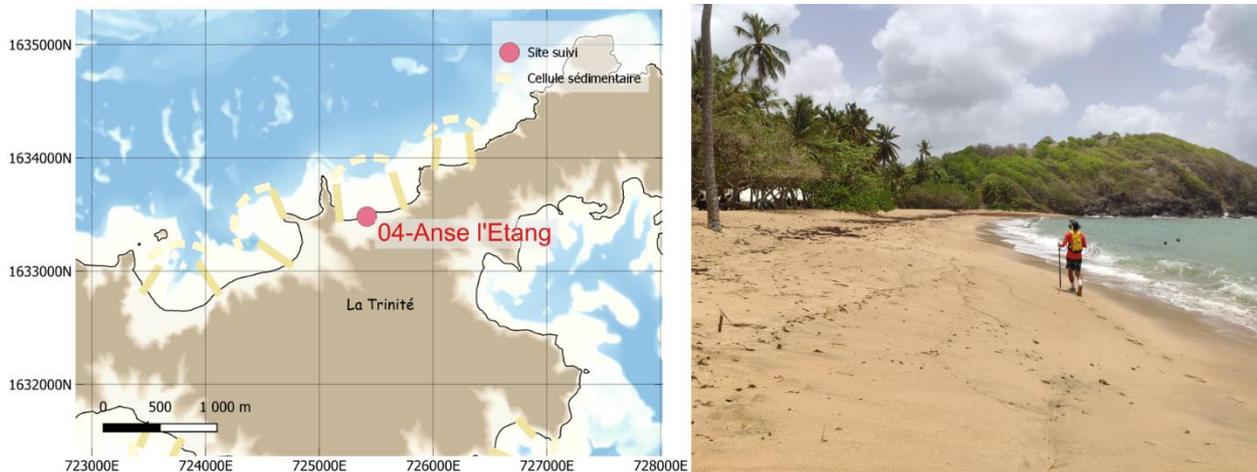


Illustration 32 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse l'Etang (Trinité). (à droite) - La plage est composée de sables fins et s'étend sur un linéaire de plus de 700 m. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.



Illustration 33 : Dans le secteur le plus à l'ouest de la baie, la plage est assez large (à gauche) tandis qu'elle devient de plus en plus étroite en allant vers l'est (à droite), en particulier devant le centre de vacance VVF. Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Evolution du trait de côte

La plage de l'anse l'Etang fait partie des sites suivis par l'Observatoire depuis 2019 avec une première campagne de mesures topographiques réalisée en juillet 2019. La largeur de la plage est très variable sur tout le linéaire côtier avec environ 20 m dans le secteur ouest de la cellule et à peine quelques mètres dans le secteur est, à proximité du village vacances (Illustration 34). Sur cette portion du littoral, la position du trait de côte se situe souvent en bordure de la limite de végétation et le stock sédimentaire disponible est très réduit. L'arrière plage qui peut être caractérisé par de la végétation ou parfois du bâti (ici la parcelle du village vacances) devient vulnérable et il est très exposé au risque d'érosion (Illustration 33 à droite).

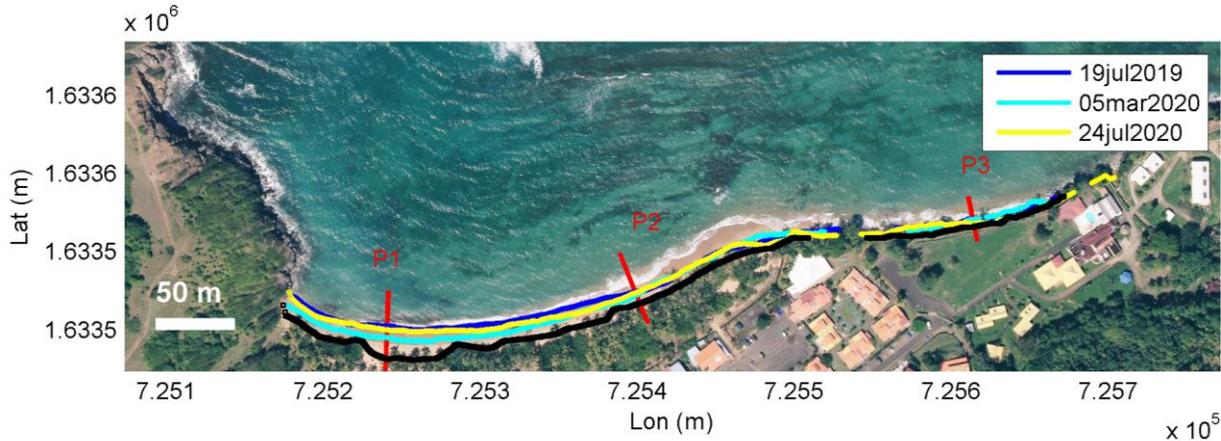


Illustration 34 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse l'Etang. Le trait noir indique le haut de plage (limite de végétation) mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P3) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

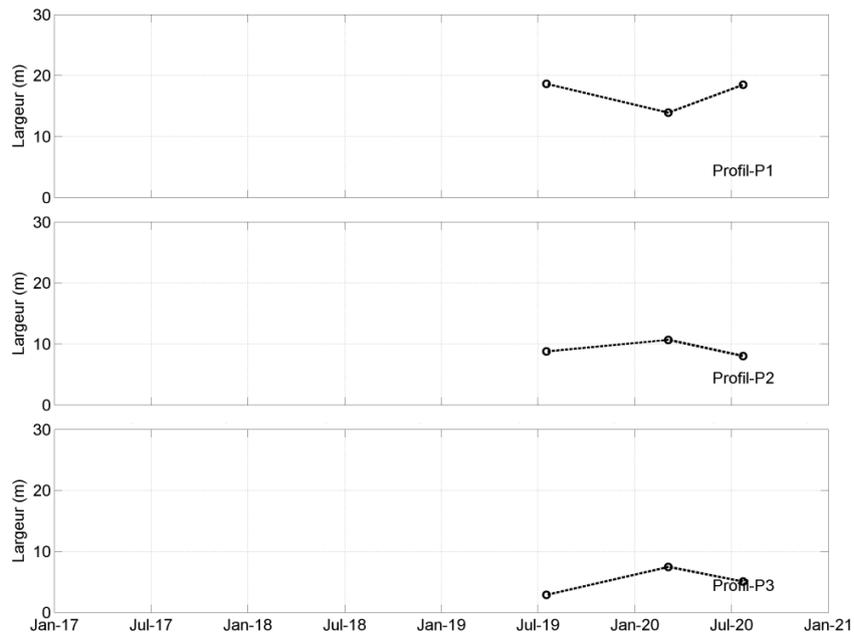


Illustration 35 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 sur anse l'Etang. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

La morphologie du trait de côte présente une certaine avancée au centre de la baie qui résulte d'un couplage avec les hauts fonds situés à quelques mètres du rivage (visible sur l'orthophoto de 2017, Illustration 34). Cette morphologie particulière semble dynamique et a eu tendance à s'aplanir entre 2017 et 2019. Depuis la mise en place du suivi, le trait de côte présente une morphologie plus linéaire.

L'évolution temporelle de la position du trait de côte par rapport à la limite de haut de plage est représentée par l'illustration 35. Alors que la largeur de plage est restée relativement stable dans le secteur situé à proximité du centre de la baie (P2, Illustration 35), la dynamique sédimentaire présente une composante saisonnière relativement prononcée avec des variations de la largeur de plage qui atteignent 5 m au niveau de ces extrémités. A la fin de la période de carême (juillet 2019 ou juillet 2020), la plage est relativement large dans le secteur le plus à l'ouest (P1, Illustration 35), tandis que sa largeur est bien moins importante après la fin de la période d'hivernage en mars 2020. La dynamique inverse est observée à l'est, à proximité du profil P3, suggérant alors des transferts sédimentaires latéraux importants (dans la direction parallèle à celle du trait de côte).

La poursuite du réseau de suivi est indispensable pour mieux qualifier la dynamique du trait de côte sur ce site. Les prochaines campagnes de mesure permettront alors de valider ou de réfuter cette hypothèse. De plus, le dispositif de suivi par imagerie vidéo qui devrait prochainement être installé sur le site permettra de mieux caractériser les différentes échelles spatio-temporelles sur lesquelles évolue la morphologie de la plage.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Le stock sédimentaire disponible est bien distinct selon le secteur de la plage. Alors que dans le secteur est (P3), la plage est très étroite (~ 5 m), l'ouest de la baie est caractérisé par une largeur de plage plus importante (entre 14 et 18 m selon les années).

Au regard des données disponibles, la dynamique saisonnière des différents profils de plage semble remarquable, en particulier au niveau des extrémités ouest et est de la cellule (Illustration 36). Dans le secteur le plus à l'ouest, au niveau du profil P1, le stock sédimentaire disponible en fin de période de Carême, au début de la saison cyclonique (juillet 2019 et juillet 2020) est nettement supérieur au stock disponible à la fin de la période d'hivernage (mars 2020). Cette variation saisonnière du stock sédimentaire (~ 3 m²) se répercute inévitablement sur la largeur de la plage qui varie alors sur ~ 5 m.

A l'inverse, dans le secteur le plus à l'est, au niveau du profil P3, à proximité du centre de vacance, le stock sédimentaire disponible en fin de période de Carême (juillet 2019 et juillet 2020) est nettement inférieur au stock disponible à la fin de la période d'hivernage (mars 2020). La largeur de la plage dans le secteur varie là encore sur ~ 5 m.

Toutefois, avec trois campagnes de mesure réalisées sur ce site, le jeu de données disponibles à ce jour reste limité et ne nous permet pas encore d'établir de diagnostic précis. La poursuite du réseau de suivi est indispensable pour mieux qualifier cette dynamique et en préciser les tendances sur le plus long terme.

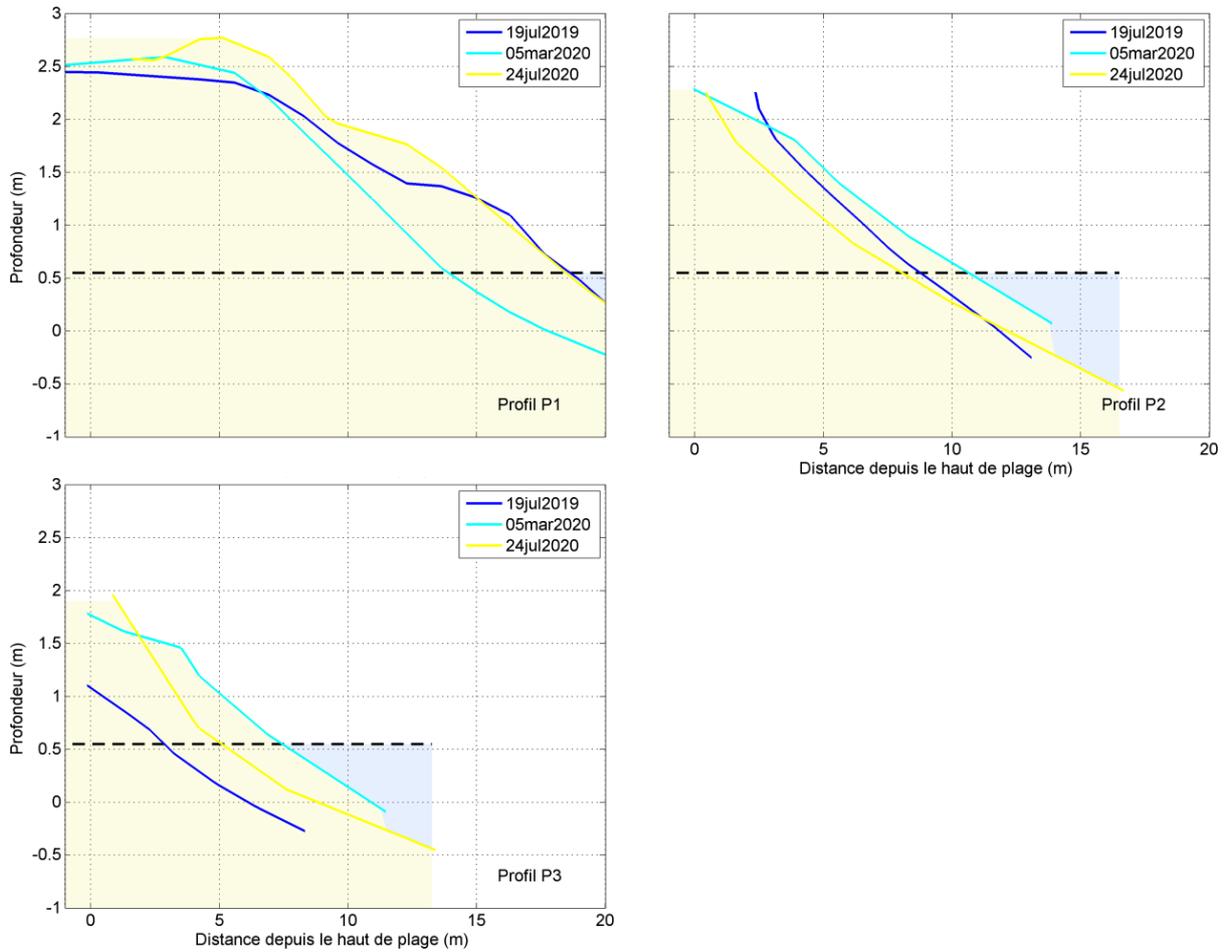


Illustration 36 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 et P3 sur anse l'Etang en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.5. POINTE FAULA (VAUCLIN)

Introduction

La plage de la Pointe Faula est située sur la commune du Vauclin (Illustration 37, à gauche) et s'étend sur plus de 400 m de long. La cellule sédimentaire est délimitée par des enrochements mis en place dans les années 2000 à l'extrémité nord et une pointe rocheuse plus au sud. Le système d'enrochement a été implémenté le long de l'avant côte, sur un linéaire d'une centaine de mètres, avec l'objectif de protéger le chemin d'accès situé à quelques mètres en arrière. Le site est caractérisé par une bande récifale en forme de pointe vers le large qui s'étend sur plusieurs centaines de mètres (Illustration 39). Sur la partie centrale du site, la bathymétrie reste très faible (entre 0.2 et 0.3 m de hauteur d'eau) alors qu'au nord de la Pointe la pente de la plage est plus importante et la hauteur d'eau atteint rapidement 0.7 m à quelques mètres du trait de côte.

Bien que très fréquentée notamment pour les sports nautiques, la plage de la Pointe Faula reste relativement peu aménagée où le seul bâtiment en dur à proximité immédiate de la plage est le centre nautique situé à 20 m en retrait du trait de côte. La plage de la Pointe Faula est essentiellement constituée de sables fins et est souvent exposée à des échouages de sargasses. Orientée vers l'est, ouverte sur l'océan Atlantique, elle reste protégée des vagues par la présence de récifs plus au large.

Comme vu précédemment sur les sites de l'anse Charpentier, l'anse Cosmy ou l'anse l'Etang, la plage est caractérisée par des morphologies contrastées selon les secteurs. Contrairement aux extrémités nord et sud où la plage est relativement étroite (Illustration 38, à gauche), la partie centrale de la plage, située sur le secteur du profil P2 présente un stock sédimentaire bien plus important (Illustration 38, à droite). Sur cette portion de la cellule sédimentaire, la morphologie du trait de côte est caractérisée par une avancée en forme de pointe (flèche sableuse), orientée aujourd'hui vers le Sud sous l'action des courants. La plage peut atteindre jusqu'à 20 m de large sur ce secteur.



Illustration 37 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de la plage de Pointe Faula (Vauclin). (à droite) - La plage est composée de sables fins et parfois de sédiments terrigènes, souvent exposée à des échouages massifs de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.



Illustration 38 : Dans le secteur le plus au nord (à gauche), la plage est très étroite tandis qu'elle devient plus large sur sa partie la plus centrale (à droite). Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Evolution du trait de côte

La position du trait de côte est extraite à différentes dates à partir des campagnes de mesures réalisées (Illustration 39). Sur la période récente, les évolutions mettent en évidence une très forte variabilité de la largeur de plage. Au nord de la Pointe, on constate un recul progressif de la position du trait de côte (supérieur à 7 m) entre 2017 et 2020 associé à une avancée de la portion centrale de la plage sur quelques dizaines de mètres plus au sud. Cette dynamique se traduit par le déplacement de la flèche sableuse vers le sud ainsi qu'à sa linéarisation (aplatissement). Si la flèche sableuse apparaît nettement en juillet 2017 et janvier 2018 sur le secteur situé entre les profils P1 et P2, cette portion du littoral semble progressivement s'aplatir tout en migrant vers le sud (Illustration 39, à droite).

Alors que la largeur de plage est restée relativement stable sur le secteur sud à proximité du profil P3, la cellule sédimentaire montre une dynamique plus importante sur le reste de la cellule (Illustration 39).

Au nord (profil P1, Illustration 40), la largeur de plage varie entre 18 et 12 m sur toute la durée du suivi. Le recul de la plage est progressif (~ 3 m/an) et semble relié à la migration de la flèche sableuse vers le sud (Illustration 39).

Au centre (profil P2, Illustration 40), la plage semble rester stable sur toute la durée du suivi avec toutefois une augmentation brutale de la largeur de plage en juillet 2020. L'élargissement soudain de la plage résulte en fait d'une accrétion progressive et visible à partir de mars 2020 (trait jaune, Illustration 39). Cette dynamique provient essentiellement de la migration de la flèche sableuse vers le sud (décrit plus haut).

Au sud (profil P3, Illustration 40), la plage présente une dynamique moins importante et reste plus stable sur toute la durée du suivi.

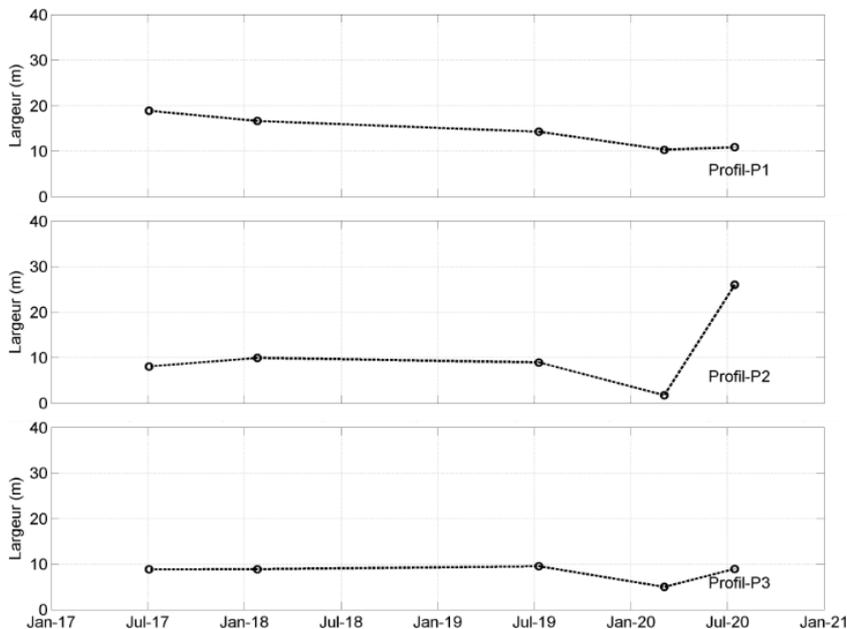
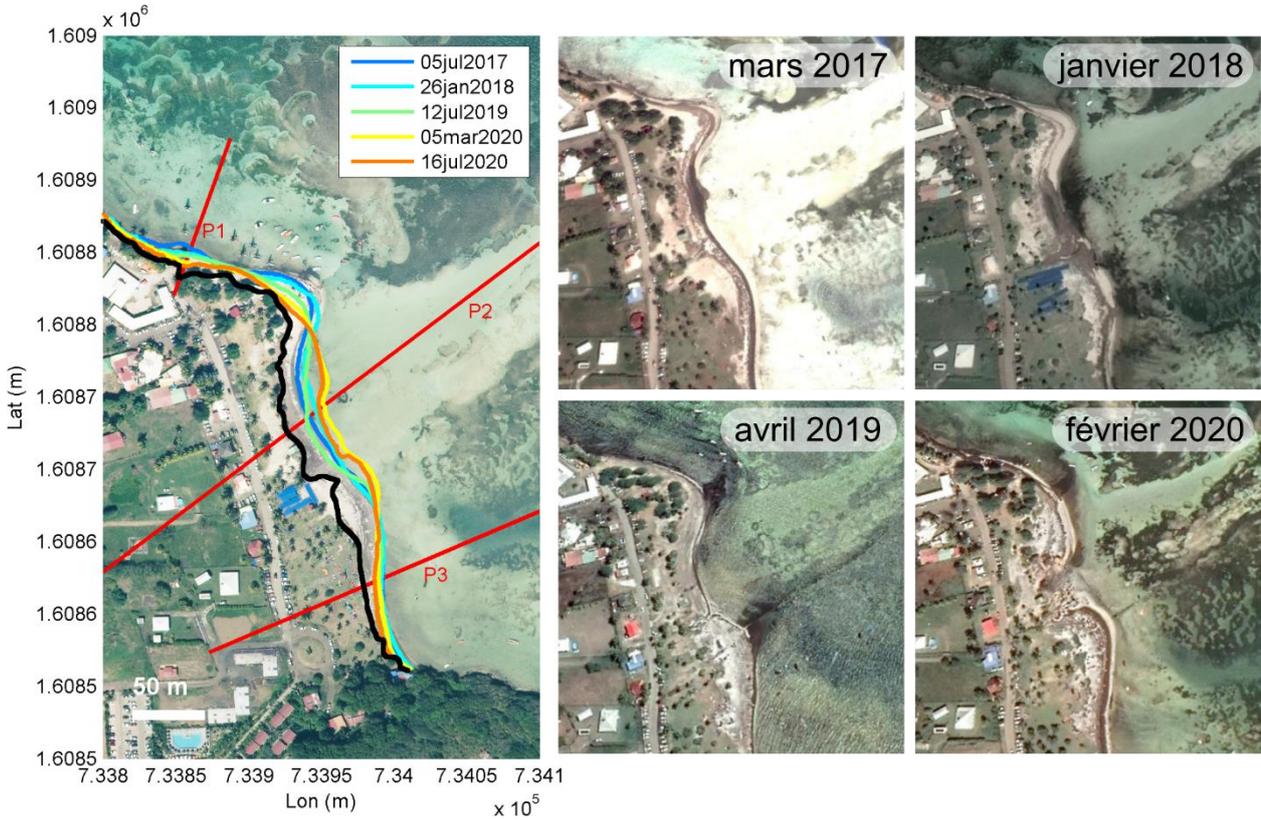


Illustration 40 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 sur la Pointe Faula. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

De façon assez visible, les profils de plage présentent une dynamique très contrastée avec des variations du profil de plage qui peuvent atteindre plus de 5 m² au cours de la même année. Les profils P1 et P2 représentent les sections les plus dynamiques de la cellule sédimentaire.

L'évolution morphologique le long du profil P1 se caractérise par une érosion chronique du stock sédimentaire, depuis le haut de plage, jusqu'à la partie peu profonde de l'avant-côte. L'érosion maximale du profil de plage se situe entre juillet 2017 et janvier 2018 ou entre juillet 2019 et mars 2020. Au cours de chacune de ces deux périodes, la plage recule sur environ 5 m.

Au contraire, le profil P2 qui se caractérise par une faible pente montre des évolutions opposées où la pente de plage diminue brutalement et entraîne un élargissement de la plage entre mars et juillet 2020. Si le volume de sédiment semble alors augmenter considérablement, il faut aussi souligner la présence de sargasses en grande quantité sur la plage. Cette grande quantité de matière déposée dans le secteur du trait de côte a pour effet de modifier ponctuellement le profil de plage. Aussi, les aménagements réalisés, avec notamment la mise en place d'un barrage pour la gestion des échouages de sargasses (entre avril et septembre 2020) ont pu jouer un rôle non négligeable sur la morphologie du profil de plage sur ce secteur.

Sur le secteur de P3, situé au sud de la cellule sédimentaire, le profil de plage ne présente pas d'évolutions significatives.

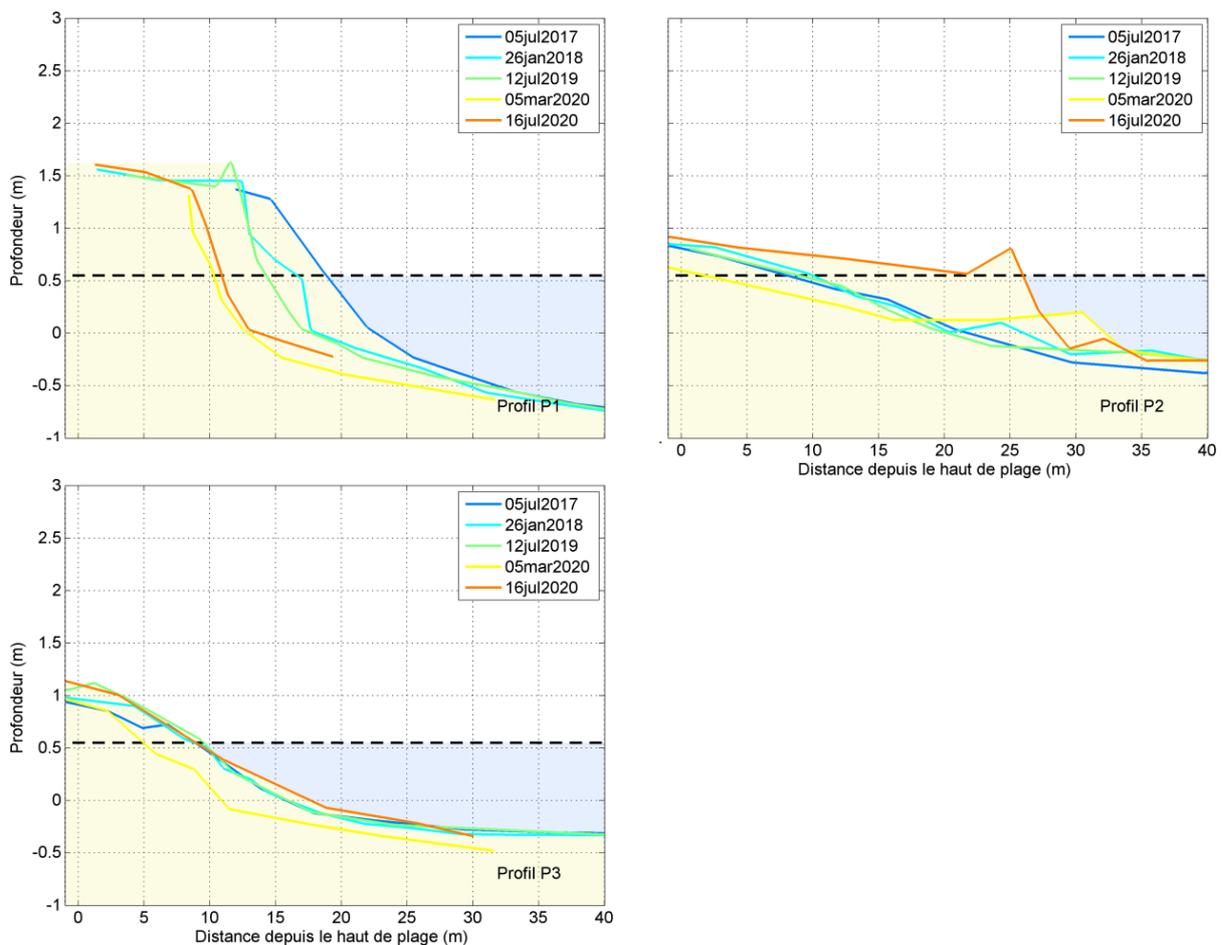


Illustration 41 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 et P3 sur la Pointe Faula en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.6. CHEZ FREFRE (VAUCLIN)

Introduction

La plage de « Chez Fréfré » est située sur la commune du Vauclin (Illustration 42, à gauche) et s'étend sur environ 150 m de long. La cellule sédimentaire est délimitée par une pointe rocheuse au nord et par la Pointe Théogène au sud. Tout comme le site de la Pointe Faula, l'anse de « chez Fréfré » est issue d'un complexe calcaire recouvert localement par des formations basaltiques qui arment notamment les mornes¹⁰ de part et d'autre de la baie. D'après l'allure topobathymétrique du secteur, la plateforme récifale sur laquelle se situe cette plage se prolonge en mer jusqu'à plusieurs centaines de mètres. Le plateau reste alors très peu profond (moins de 50 cm d'eau) et s'étend jusqu'à 300 m de distance au large.

La plage de « Chez Fréfré » reste relativement peu aménagée et nettement moins fréquentée que le site de la Pointe Faula décrit précédemment. La plage est essentiellement constituée de sables très fins coquilliers ainsi que de débris d'algues, provenant des échouages successifs de sargasses. La plage est orientée vers l'est, ouverte vers l'océan Atlantique mais reste protégée des vagues par la présence de récifs plus au large. Sa morphologie est assez homogène sur toute sa longueur, avec une faible pente (3 %) et une largeur pouvant atteindre jusqu'à 15 m. Sur le site de Fréfré, la végétation est arbustive (cocotiers, arbres de taille moyenne et herbacée).



Illustration 42 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de la plage de « Chez Fréfré » (Vauclin). (à droite) - La plage est composée de sables fins, souvent exposée à des échouages massifs de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Evolution du trait de côte

Les positions du trait de côte mesurées au cours de chacune des campagnes de terrain sont présentées par l'illustration 43. Par rapport à la limite de végétation herbacée (trait noir Illustration 43), la plage reste aujourd'hui relativement étroite. Toutefois, depuis 2017, la cellule sédimentaire s'est montrée très dynamique avec une forte tendance à l'accrétion et a gagné en moyenne plus de 15 m de large. Si le secteur le plus au sud présente une dynamique moins importante avec

¹⁰ morne : aux Antilles, toute hauteur de forme arrondie (source : Larousse)

une avancée du trait de côte vers l’océan sur une dizaine de mètres, le secteur situé au nord de la plage est plus dynamique et présente un gain de plus 25 m (Illustration 44).

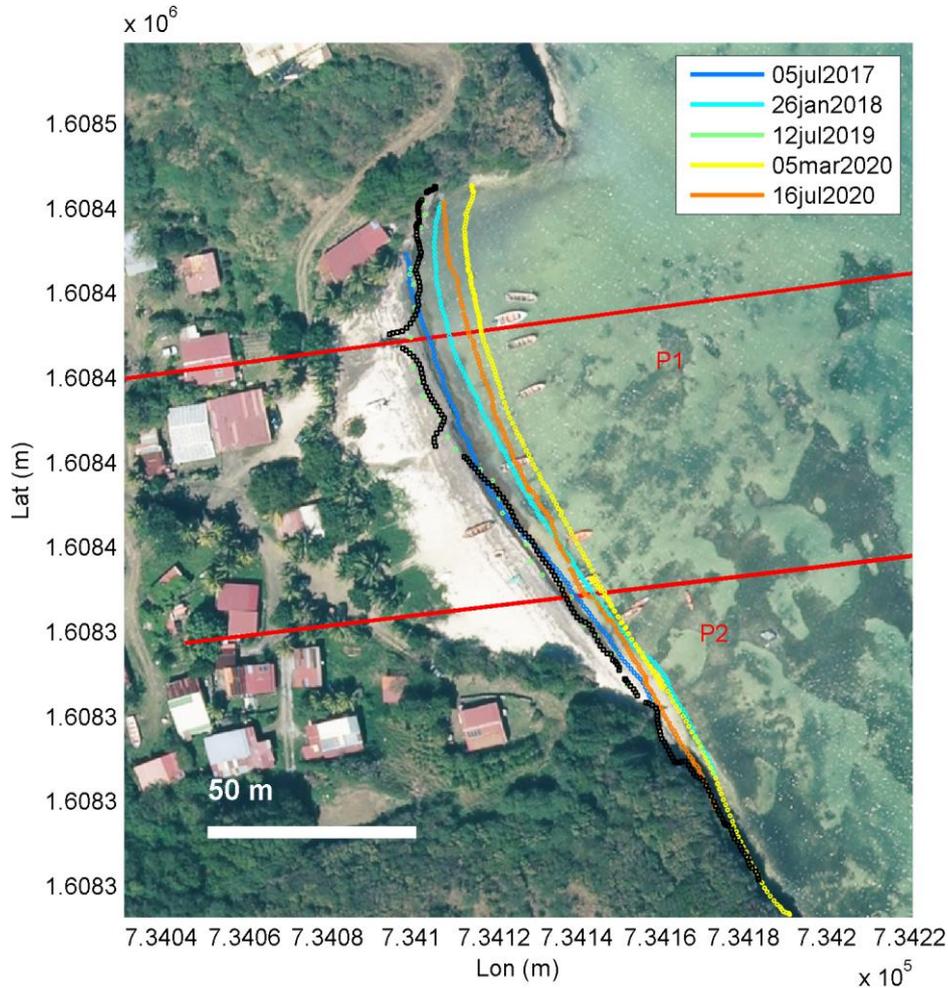


Illustration 43 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur le site de Chez Fréfré. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1,P2 et P3) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

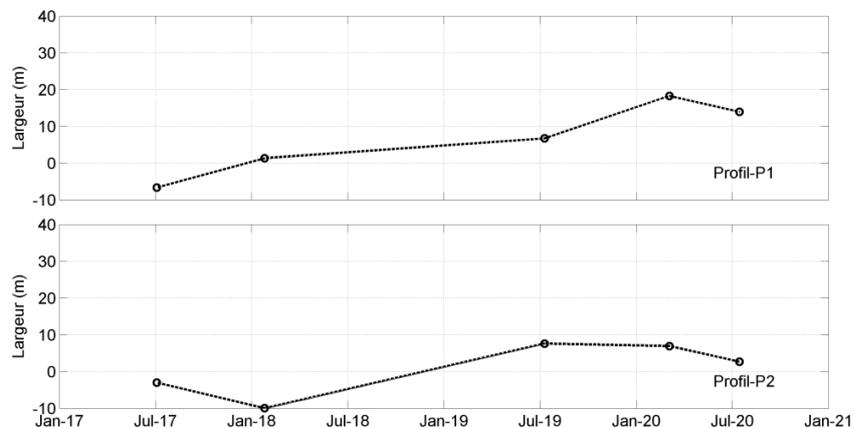


Illustration 44 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 sur le site de Chez Fréfré. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Les profils de plage présentent une dynamique assez contrastée avec des variations plus importantes pour le profil P1 que pour le profil P2.

L'évolution morphologique le long du profil P1 se caractérise par une accrétion et un apport progressif en sédiments, surtout localisé sur la partie émergée ou peu profonde de la plage. L'évolution la plus importante observée se situe entre juillet 2018 et mars 2020 où la plage gagne 13 m de large. Si la plage gagne en largeur depuis la mise en place du suivi, on note également une forte augmentation de la pente le long du profil de plage, reliée à une surélévation de l'ensemble de la portion émergée de la plage (+ 0.5 m entre juillet 2017 et juillet 2020).

Au contraire, le profil P2 montre des évolutions plus atténuées où la pente de plage augmente progressivement à partir de janvier 2018 jusqu'en mars 2020. On note ensuite une érosion significative du profil où la plage perd ~ 5 m en largeur à partir de mars 2020.

Comme vu précédemment sur le site de la Pointe Faula, il faut aussi souligner la présence de sargasses en grande quantité sur la plage. Cette grande quantité de matière déposée dans le secteur du trait de côte a pour effet de modifier ponctuellement le profil de plage et a pu avoir un rôle majeur sur l'accrétion récente observée, notamment sur le secteur le plus au nord.

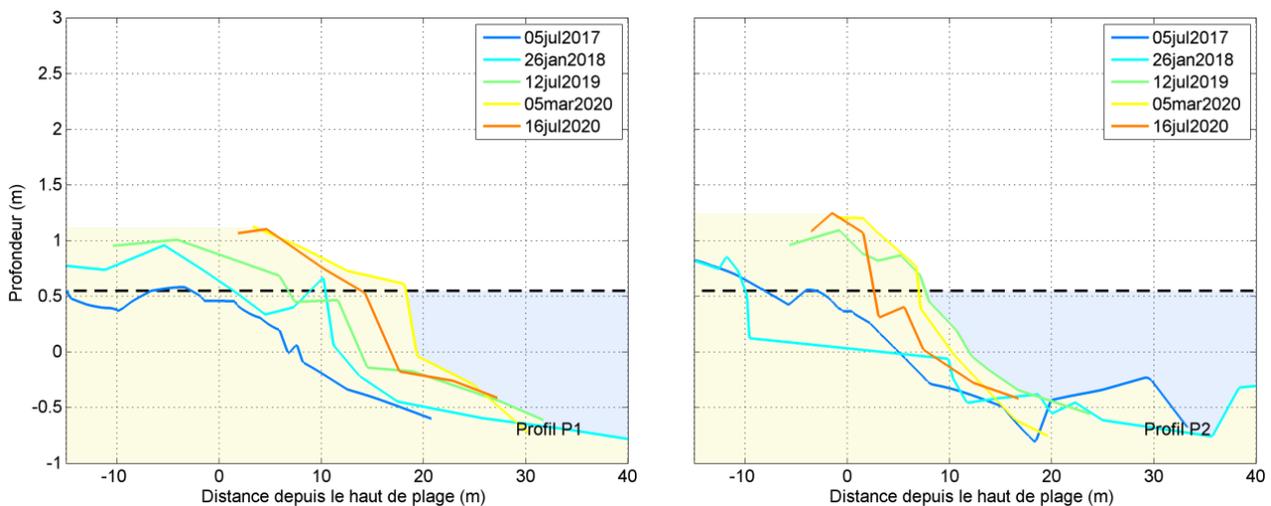


Illustration 45 : Évolution le long des profils de référence P1 et P2 sur le site de chez Fréfré en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.7. ANSE FOUR A CHAUX (LE MARIN)

Introduction

L'anse Four à Chaux est une plage sableuse située sur la commune du Marin (Illustration 46, à gauche). La plage prend une forme de baie et s'étend sur environ 350 m de long, délimitée par un morne peu escarpé au nord et par la pointe Marée au sud qui la sépare de l'anse Baleine. La cellule sédimentaire est essentiellement constituée de sables fins. Elle est orientée vers l'est mais reste bien protégée des vagues par la présence de récifs situés à 500 m plus au large (Illustration 47). La plage est caractérisée par une forêt littorale assez dense en arrière plage. Bien que relativement fréquentée (baignade, bivouac), la cellule sédimentaire reste encore bien préservée des activités humaines. Les prochains suivis permettront de mettre en évidence l'impact de ces activités, en particulier sur les écosystèmes situés en arrière plage.

Anse Four à Chaux figure parmi les plages du littoral martiniquais les plus exposées au phénomène d'érosion au regard de sa dynamique passée (rapport BRGM/RP-63238-FR, 2015). Avec un recul observé de la limite de végétation qui atteint jusqu'à 40 m entre 1951 et 2004 selon les secteurs, la plage a pourtant réussi à conserver un stock sédimentaire non négligeable où sa largeur peut atteindre encore aujourd'hui plus de 15 m. Plus récemment entre 2010 et 2017, la position de la limite de végétation est restée relativement stable (Illustration 47).

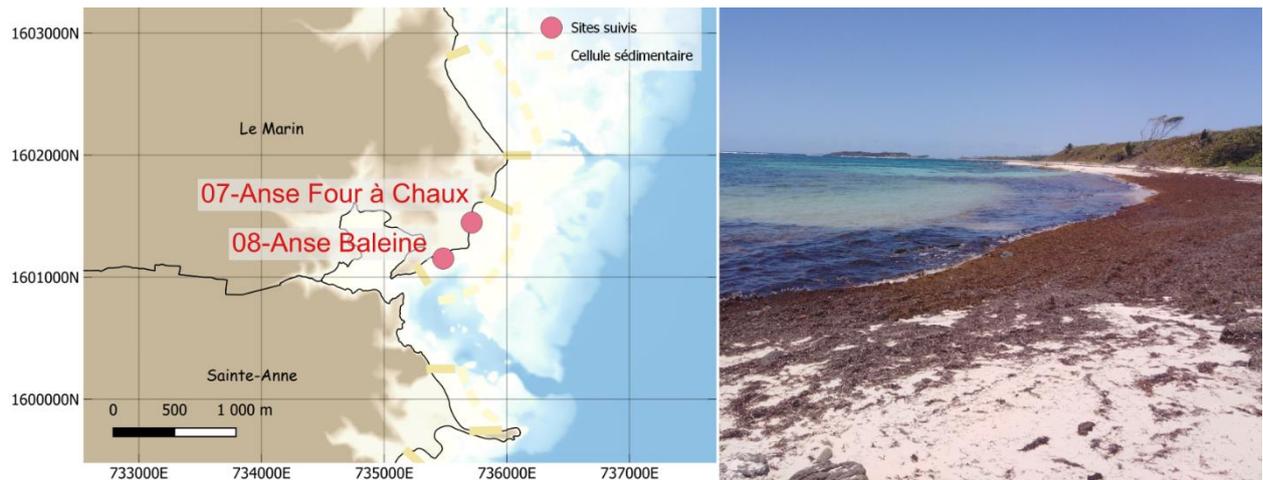


Illustration 46 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Four à Chaux (Marin). (à droite) - La plage est composée de sables fins, parfois exposée à des échouages massifs de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

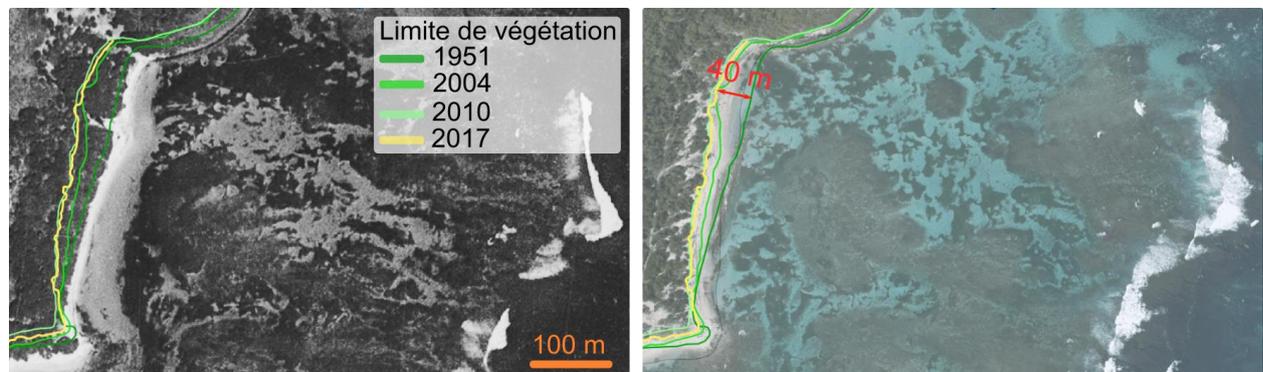


Illustration 47 : Evolution de la position de la limite de végétation (traits colorés) depuis 1951 jusqu'à 2017. Les photographies aériennes (IGN) de 1951 (à gauche) et 2010 (à droite) sont illustrées en arrière plan.

Evolution du trait de côte

La plage est relativement homogène sur sa longueur bien que la portion nord soit légèrement plus large et moins pentue que la portion la plus au sud. La position du trait de côte est extraite à différentes dates à partir des campagnes de mesures réalisées (Illustration 48). Malgré l'érosion importante constatée sur le long terme à partir des données issues des campagnes orthophotos de 1951, 2004, 2010 et 2017, l'évolution plus récente (de 2017 à 2020) de la position du trait de côte montre au contraire une certaine stabilité.

Si certaines variations ont pu avoir lieu entre juillet 2019 et mars 2020 où l'on observe un certain recul de la plage (1 à 2 m, Illustration 49), la morphologie de la cellule sédimentaire n'a pas évolué de façon significative depuis les premières campagnes de mesure de 2017 (Illustration 48). Au niveau du profil P1 ou du profil P2, les évolutions observées de la position du trait de côte sont similaires et restent peu significatives. La plage montre alors une certaine homogénéité entre le nord et le sud de la baie, autant dans sa morphologie que dans les évolutions observées. La largeur de plage varie entre 7 et 11 m sur toute la durée du suivi.

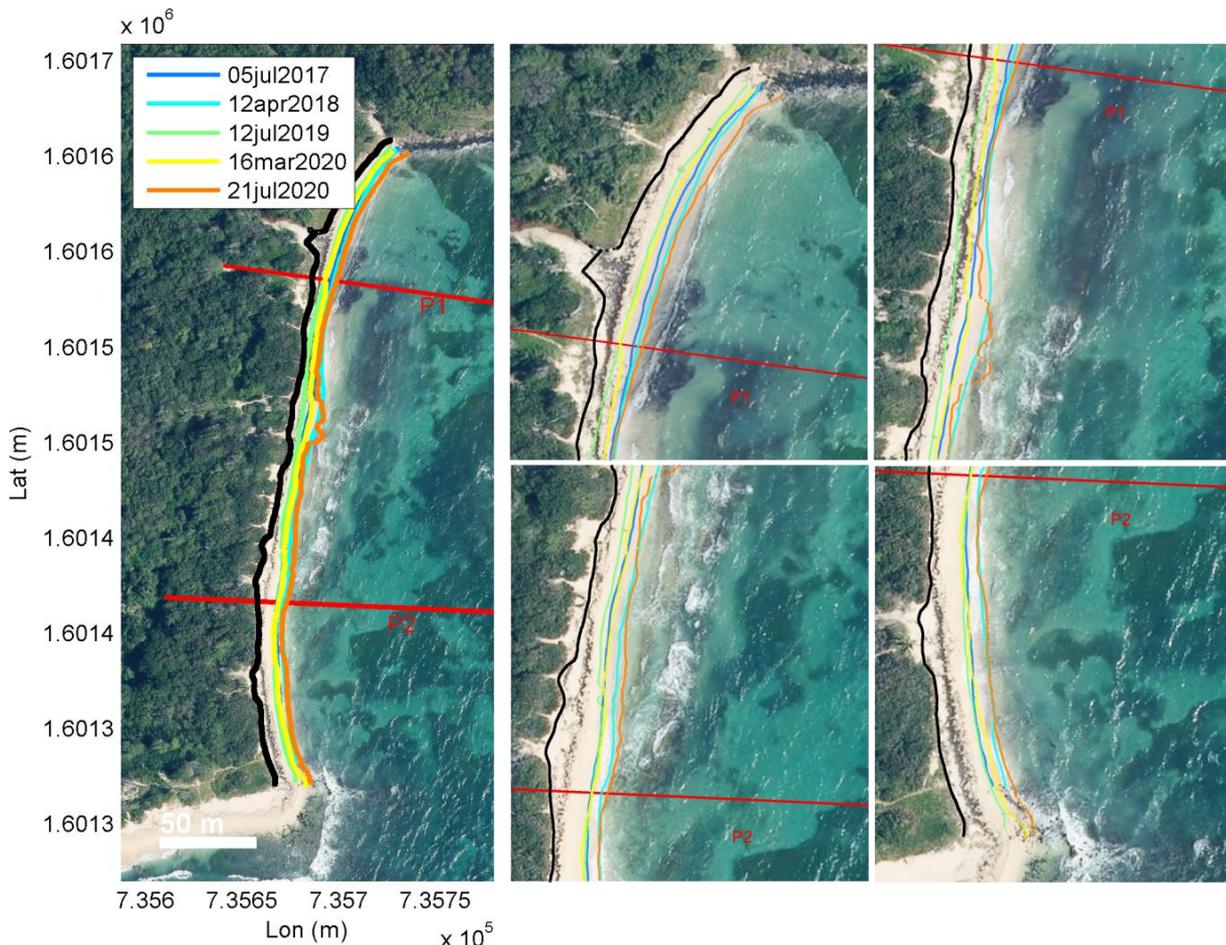


Illustration 48 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Four à CHaux. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 et P2) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

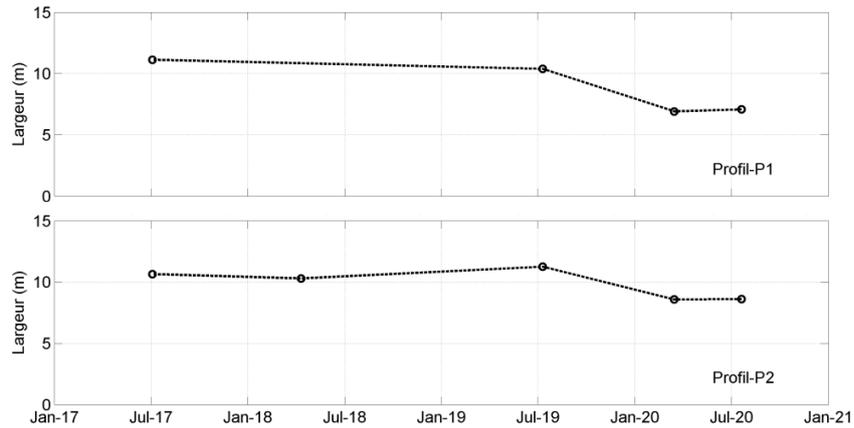


Illustration 49 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2 sur anse Four à Chaux. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Au nord comme au sud de la baie, la morphologie de la plage reste assez homogène avec une pente qui varie entre 10 % et 15 % ; la pente du secteur sud à proximité de P2 est légèrement plus importante qu’au nord à proximité de P1 (Illustration 50). Dans les deux cas, on note une légère érosion du profil de plage entre juillet 2019 et mars 2020. Entre ces deux dates, la largeur de la plage diminue sur environ 2 m et la surface de la section varie sur environ 10 m².

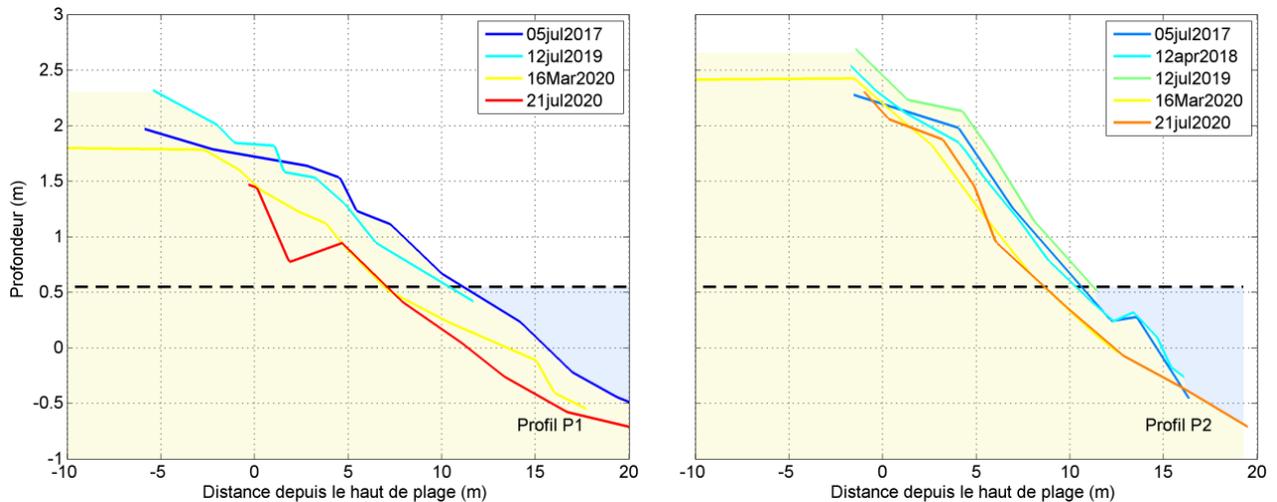


Illustration 50 : Évolution le long des profils de référence P1 et P2 sur anse Four à Chaux en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.8. ANSE BALEINE (LE MARIN)

Introduction

L'anse Baleine est une plage sableuse située sur la commune du Marin (Illustration 51, à gauche) qui s'étend sur un peu plus de 400 m de long. La cellule sédimentaire est délimitée par la pointe Marée au nord qui la sépare de l'anse Four à chaux et par un morne peu escarpé qui la relie avec la pointe Bourgenne. La baie est orientée vers le sud-est et reste bien protégée des vagues par la présence de récifs plus au large. La plage est essentiellement constituée de sables fins, même si certains blocs rocheux peuvent parfois être présents dans la zone du jet de rive (Illustration 51, à droite).

Contrairement à l'anse Four à Chaux qui figure parmi les plages les plus exposées à l'érosion depuis 1951, l'anse Baleine montre une dynamique plus restreinte sur le long terme avec des évolutions peu significatives. La morphologie de la plage reste aussi assez homogène sur sa longueur, que ce soit sur le secteur nord ou sur le secteur sud de la cellule sédimentaire.

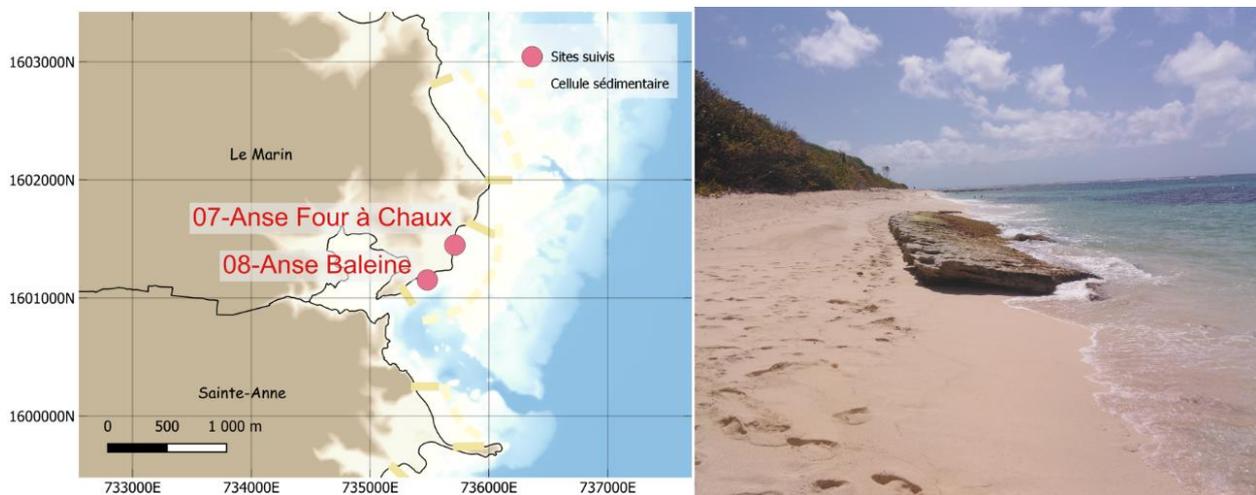


Illustration 51 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Baleine (Marin). (à droite) - La plage est composée de sables fins, même si quelques blocs rocheux peuvent être présents sur le bas de plage et l'avant-côte. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Evolution du trait de côte

La position du trait de côte est extraite à différentes dates à partir des campagnes de mesures réalisées (Illustration 52). A partir des données collectées, l'évolution récente (entre 2017 et 2020) de la position du trait de côte montre une certaine stabilité.

Si certaines variations ont pu avoir lieu entre juillet 2019 et juillet 2020 où l'on observe une dynamique saisonnière assez prononcée avec le recul de la plage sur le secteur nord après le Carême et une avancée après la période d'Hivernage (et inversement sur secteur sud), la morphologie de la cellule sédimentaire n'a pas évolué de façon significative sur le plus long terme entre 2017 et 2020 (Illustration 52). La largeur de plage varie entre 7 et 11 m sur toute la durée du suivi (Illustration 53).

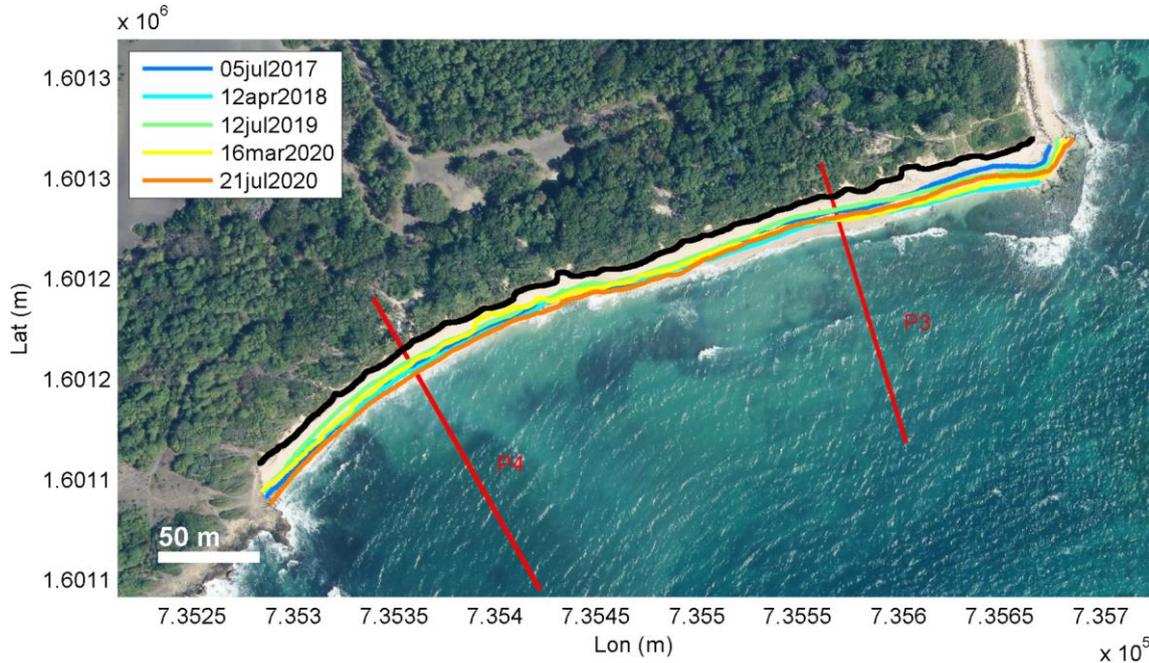


Illustration 52 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Baleine. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P3 et P4) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

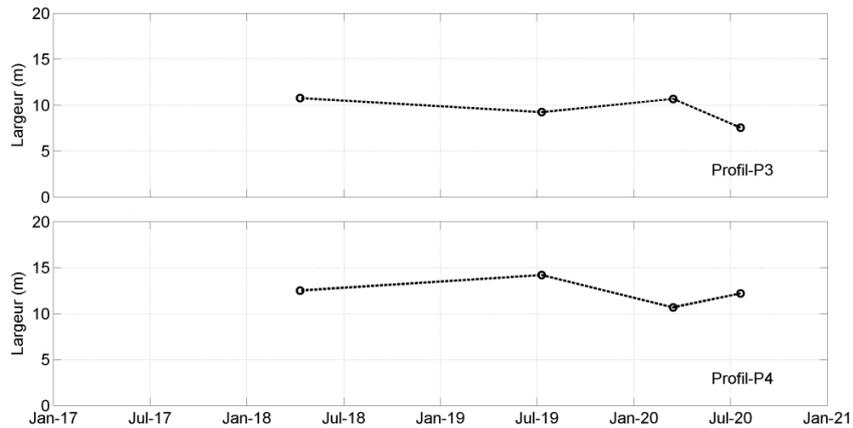


Illustration 53 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P3, P4 sur anse Baleine. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Si la dynamique du trait de côte reste relativement stable sur toute la durée du suivi (2017-2020), le stock sédimentaire disponible est toutefois bien distinct selon le secteur de la plage (Illustration 54). Alors que dans le secteur nord (profil P3), le haut de plage est situé à 2.5 m par rapport au niveau moyen de la mer (zéro ngm), le sud de la baie (profil P4) est caractérisé par un haut de plage situé à une hauteur d'environ 3 m (zéro ngm). On remarque également sur cette période une érosion du profil de plage dans le secteur de P3 depuis le haut de plage jusqu'à la partie sous-marine située à quelques mètres de la position du trait de côte.

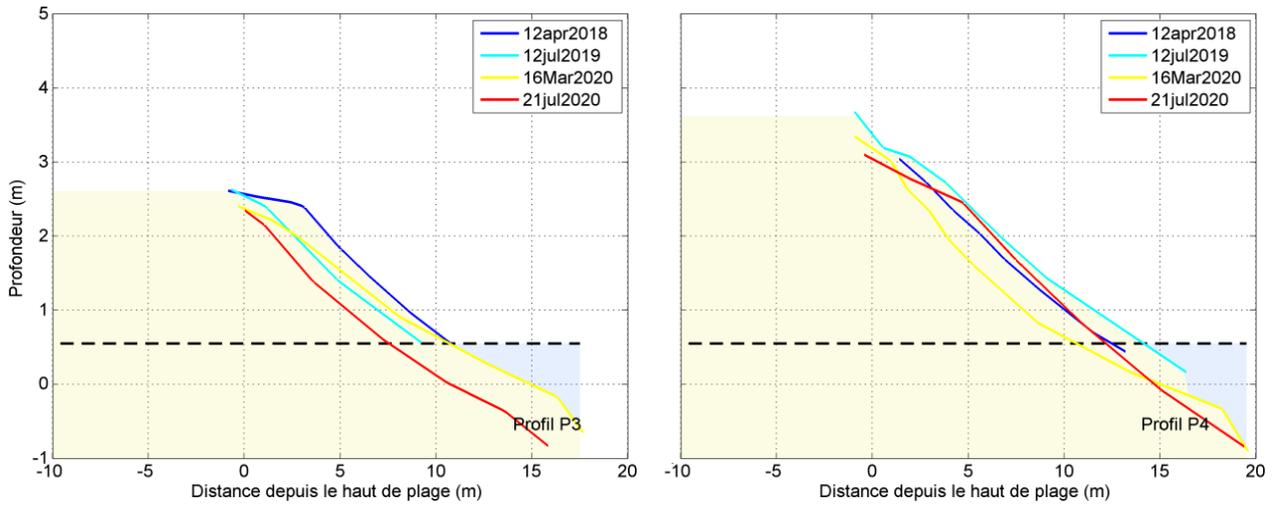


Illustration 54 : Évolution le long des profils de référence P3 et P4 sur anse Baleine en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.9. ANSE AUX BOIS (SAINTE-ANNE)

Introduction

Anse aux Bois est caractérisée par une cellule sédimentaire située sur la commune de Sainte-Anne au sud-est de la Martinique (Illustration 55, à gauche). Cette cellule s'étend sur environ 600 m de long, délimitée par une falaise boisée peu escarpée au nord et par la pointe Michel au sud. Anse aux Bois correspond à la partie sud de la cellule sédimentaire alors que la partie nord est rigoureusement appelée Anse Esprit. Les deux anses présentent des caractéristiques sédimentaires similaires, même si la partie la plus au sud est souvent plus largement exposée aux échouages de sargasses (Illustration 55, à droite). La baie est orientée vers le sud-est, ouverte sur l'océan Atlantique mais reste protégée des vagues par la présence de récifs.

Alors que la partie sud de la cellule sédimentaire est relativement stable sur le long terme, la partie la plus au nord (Anse Esprit) présente une tendance à l'érosion avec un recul sur 10 m de la limite de végétation entre 1951 et 2004 (rapport BRGM/RP-63238-FR, 2015). Le linéaire est caractérisé par des morphologies contrastées selon les secteurs. La portion la plus au nord présente un stock sédimentaire un peu plus important qu'à l'extrême sud de l'anse où la plage est quasiment inexistante (Illustration 55, à droite). La partie nord de la plage peut atteindre jusqu'à 5 m de large.

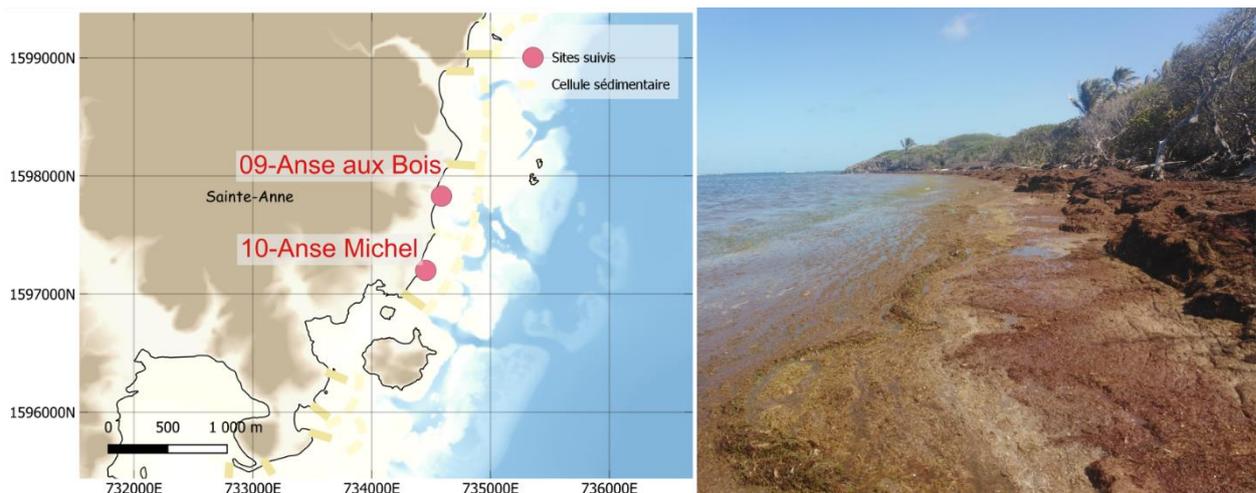


Illustration 55 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse aux Bois (Sainte-Anne). (à droite) - la plage est composée de sables fins, mais est largement exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Evolution du trait de côte

Les positions du trait de côte mesurées au cours de chacune des campagnes de terrain sont présentées par l'illustration 56. Sur toute la durée du suivi, l'évolution du trait de côte montre une variabilité significative. Entre 2017 et 2020, alors que la plage reste stable dans le secteur de P1 au nord de la cellule sédimentaire (Illustration 57), la partie centrale et la partie sud présentent un recul d'environ 5 m. Dans le secteur de P3, la plage est aujourd'hui inexistante et la limite du jet de rive apparaît en arrière de la limite de végétation.

De grandes quantités de sargasses ont été observées sur cette portion du littoral. Si les algues échouées peuvent parfois jouer le rôle de protection naturelle, elle pourrait ici avoir un effet inverse. Les algues déposées en grande quantité sur la plage prennent parfois les allures d'un

ouvrage longitudinal de type « perré » et pourraient avoir tendance à renforcer la réflexion des vagues. Le sédiment pourrait donc être plus facilement remis en suspension et transporté vers la mer, favorisant alors un abaissement altimétrique au pied de la banquette d'algues. Ce phénomène pourrait générer un affouillement et constituer un facteur d'érosion.

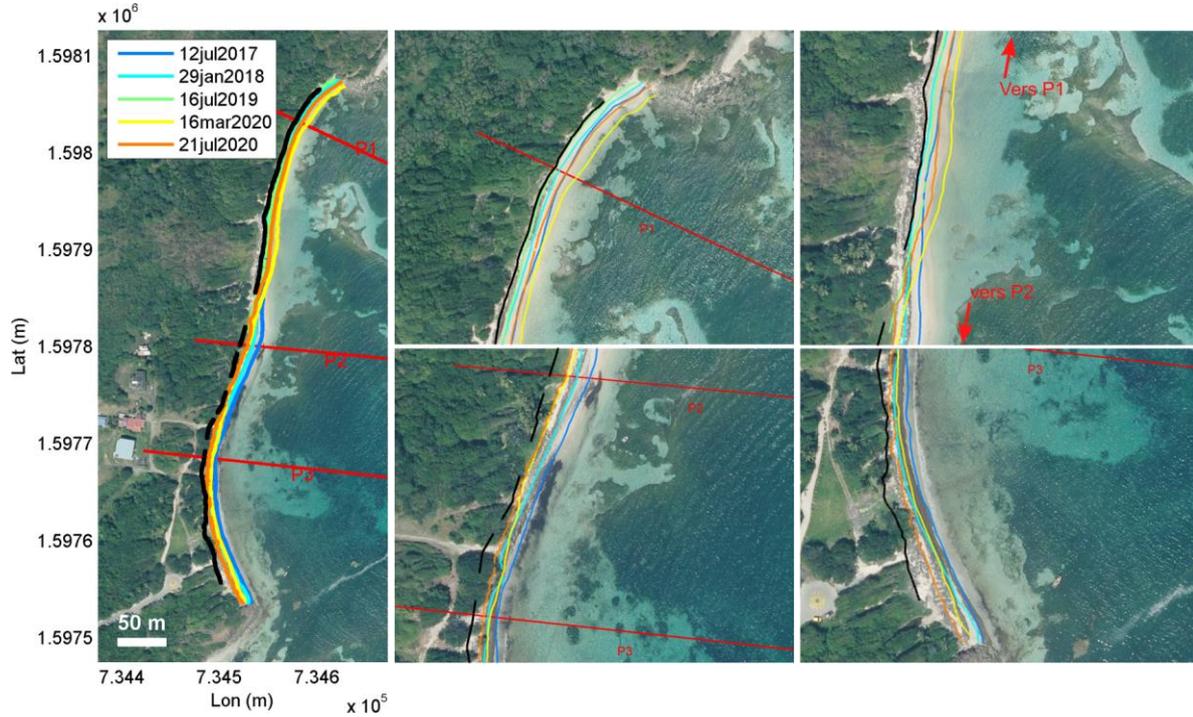


Illustration 56 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse aux Bois (à gauche) avec chacun de secteurs de la plage en zoom (à droite). Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1, P2 et P3) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

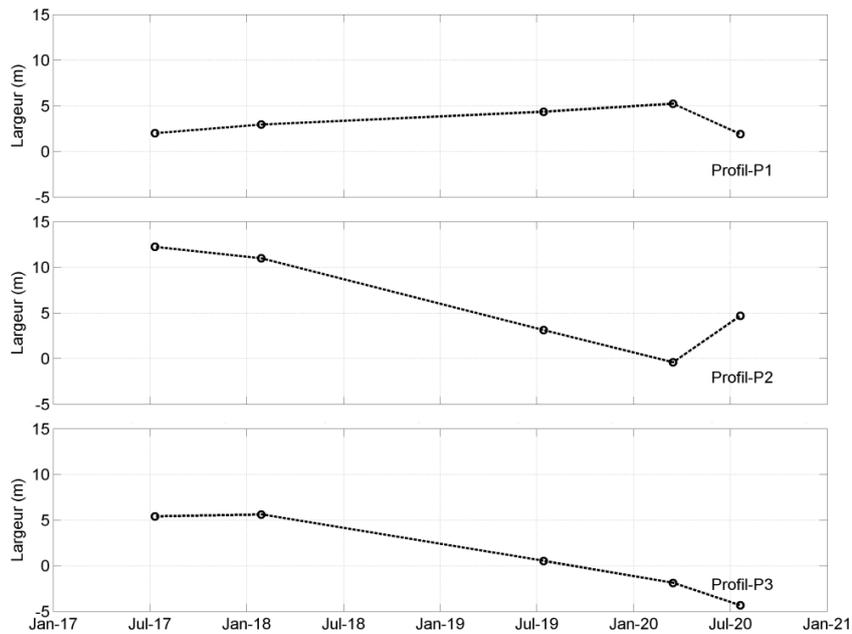


Illustration 57 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1, P2, P3 sur anse aux Bois. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020 et le jet de rive).

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Les profils de plage présentent une dynamique très contrastée avec des variations plus importantes pour les profils P2 et P3 que pour le profil P1 dont les évolutions restent peu significatives (Illustration 58).

L'évolution morphologique le long des profils P2 et P3 se caractérise par une érosion très importante entre janvier 2018 et juillet 2019 où la plage perd jusqu'à 5 m de large sur les deux secteurs. De la même façon, on note 8 mois plus tard une érosion presque aussi importante des profils où la plage perd de nouveau 3 à 5 m de large entre juillet 2019 et mars 2020. Sur ces secteurs, la plage est désormais quasiment inexistante et la limite du jet de rive atteint la limite de végétation qui apparaît alors plus vulnérable et exposée à l'érosion.

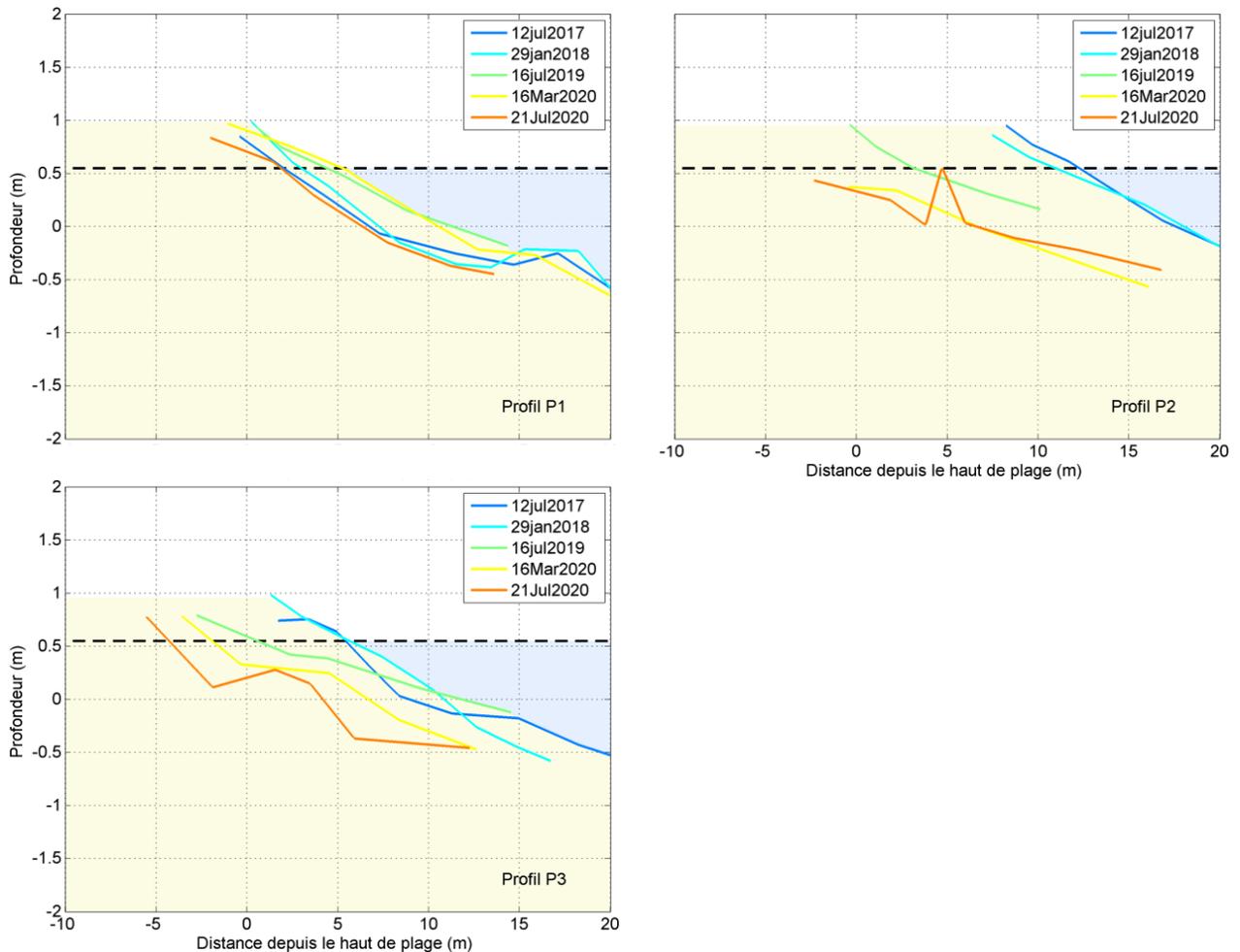


Illustration 58 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 et P3 sur anse aux Bois en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.10. ANSE MICHEL (SAINTE-ANNE)

Introduction

Anse Michel, voisine de l'anse aux Bois, s'étend sur environ 600 m de long, délimitée par la pointe Michel au nord et par la Pointe à Pommes au sud. La baie est orientée vers le sud-est et reste bien protégée des vagues par les récifs situés au large de la cellule sédimentaire. La plage est essentiellement constituée de sables fins, mais reste exposée aux échouages de sargasses (Illustration 59, à droite).

Contrairement à l'anse aux Bois qui présente une érosion significative depuis 1951, l'anse Michel montre une dynamique plus restreinte sur le long terme. La morphologie de la plage reste aussi assez homogène sur sa longueur bien que le stock sédimentaire sur le secteur sud de la baie soit légèrement plus important.

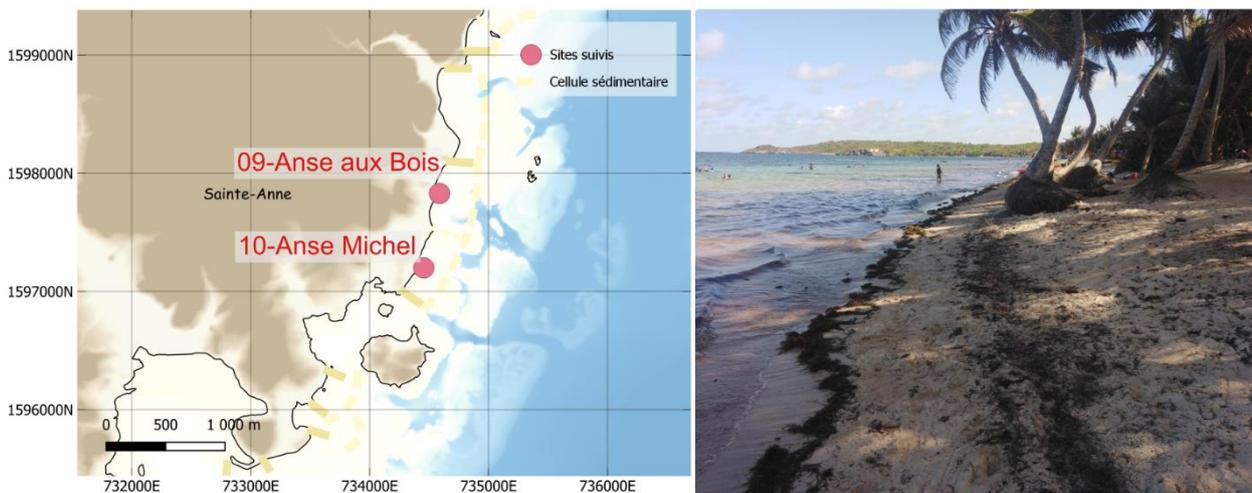


Illustration 59 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Michel (Sainte-Anne). (à droite) - La plage est composée de sables fins, mais est largement exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Evolution du trait de côte

Les positions des différents traits de côtes sont extraites des levés réalisés à chacune des campagnes de mesure (Illustration 60). La largeur de la plage est plus importante que sur la plage de l'anse aux Bois, voisine de l'anse Michel, avec parfois plus de 7 m sur le secteur sud à proximité de P6 en 2018 (janvier) et 2019 (juillet). Sur le secteur nord, comme sur la portion centrale de la plage (Illustration 59 à droite), le stock sédimentaire disponible est plus réduit rendant l'arrière plage et la limite de végétation vulnérables à l'érosion côtière.

Alors que la largeur de plage est restée relativement stable sur l'ensemble du linéaire pendant la période de suivi, la cellule sédimentaire montre une érosion significative sur le secteur nord à proximité du profil P4 entre juillet 2019 et mars 2020 où la plage perd jusqu'à 5 m de large (Illustration 61).

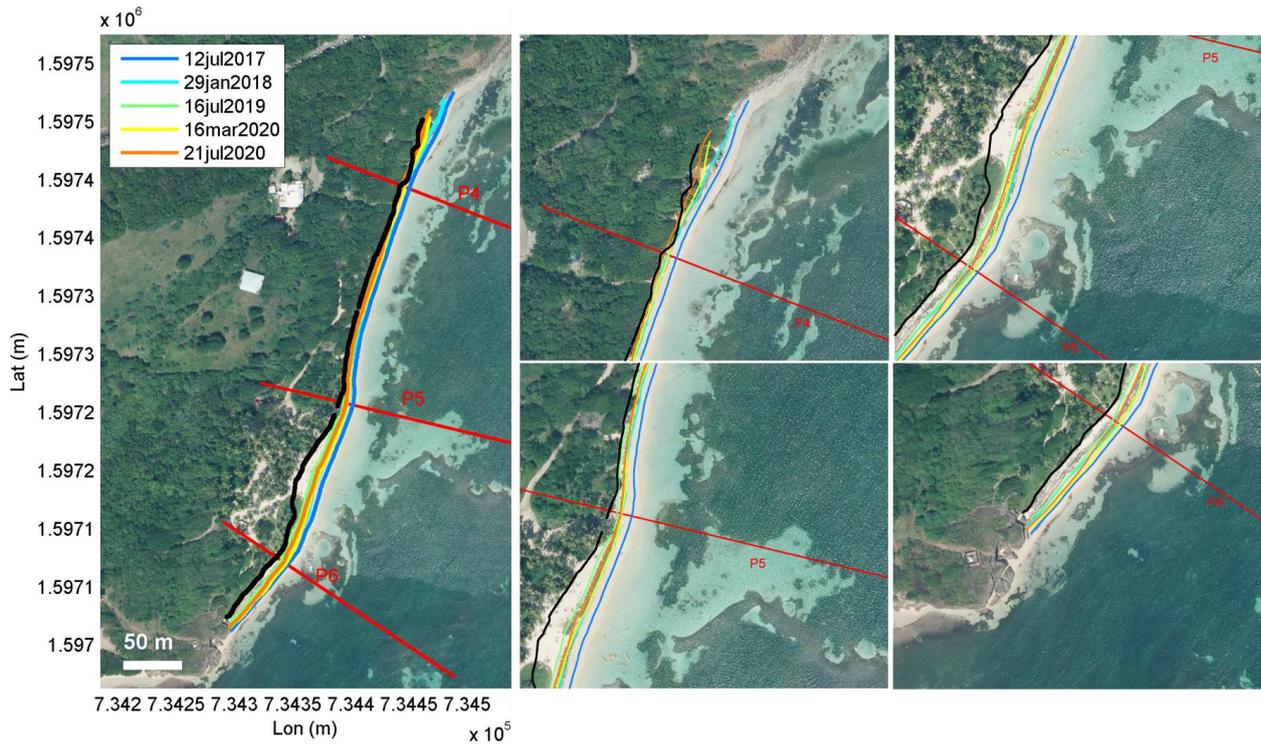


Illustration 60 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Michel (à gauche) avec chacun des secteurs de la plage en zoom (à droite). Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P4, P5 et P6) indique la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

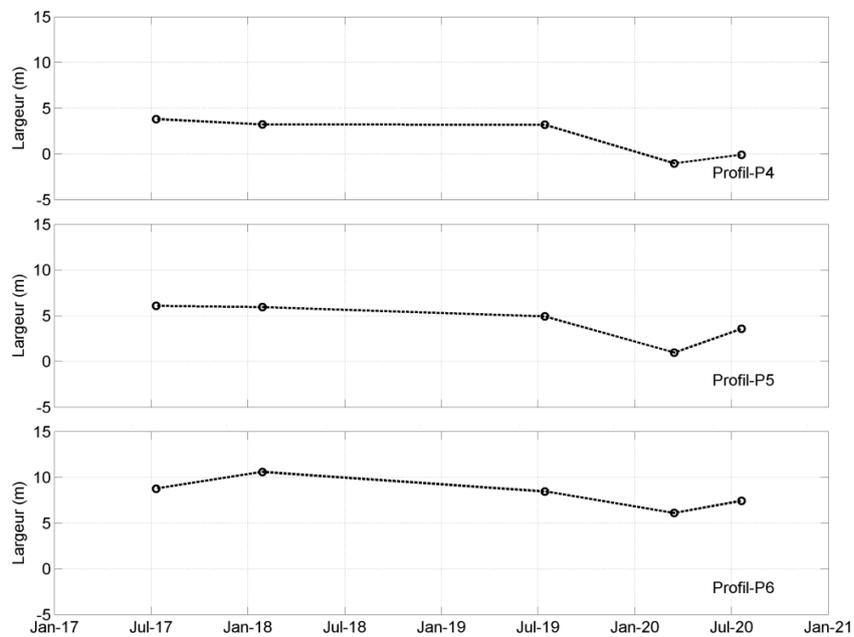


Illustration 61 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P4, P5, P6 sur anse Michel. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Les profils de plage ne présentent pas de dynamique saisonnière marquée mais au contraire une évolution plus progressive avec une tendance vers l'érosion (Illustration 62). Si la pente ou la morphologie générale du profil de plage reste assez stable, on note toutefois un recul significatif sur chacun des secteurs avec une érosion plus marquée sur le secteur nord, à proximité de P4, où la plage a perdu plus de 5 m de large depuis la mise en place du suivi topographique en juillet 2019. Cette érosion est bien visible sur la partie désormais immergée du profil de plage qui a perdu plusieurs dizaines de centimètres entre juillet 2017 et juillet 2020 (P4, Illustration 62).

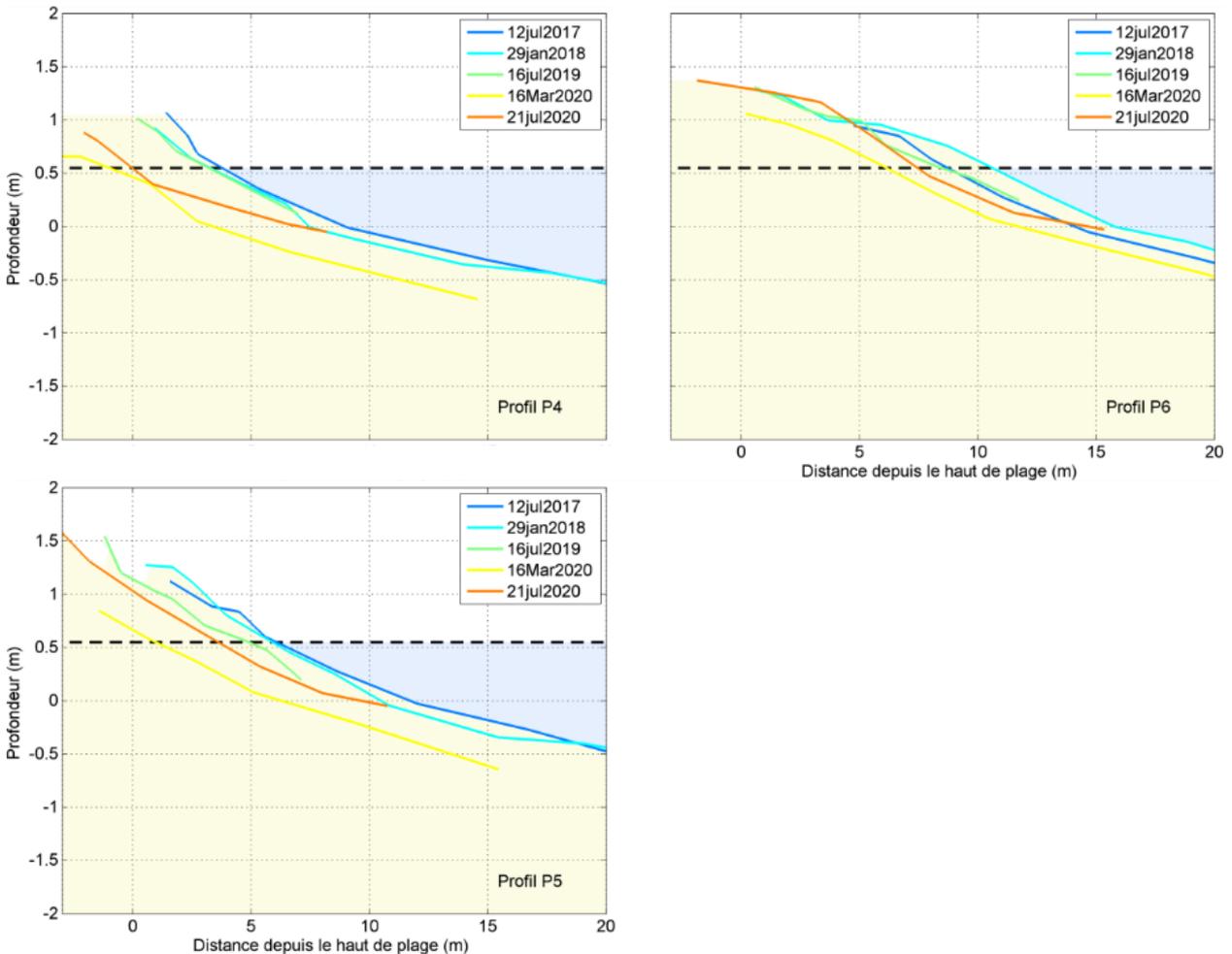


Illustration 62 : Évolution le long des profils de référence P4, P5 et P6 sur anse Michel en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.11. LES SALINES (SAINTE-ANNE)

Introduction

Le site des Salines est situé sur la commune de Sainte-Anne non loin de la pointe la plus au sud de la Martinique et forme un ensemble naturel regroupant à la fois une lagune, des vasières, un cordon sableux avec des plages, une forêt littorale et une mangrove. Avec plus d'un million de visiteurs par an, le site des Salines constitue aujourd'hui un environnement fragile où les pressions environnementales et économiques ne cessent d'augmenter.

Exposées vers le sud-ouest, les plages de Petite Anse et de Grande Anse s'étendent respectivement sur 350 m et 1400 m de longueur (Illustration 63). Ces plages appartiennent à la même cellule sédimentaire et sont encadrées par des promontoires rocheux d'origine volcanique. La Petite Anse des Salines est encadrée par la Pointe Pie au sud-est et par la Pointe Catherine au nord-ouest qui la sépare de la plage de l'anse Meunier située à une centaine de mètres plus au nord. La Grande Anse des Salines est délimitée par la pointe Pie au nord-ouest et la Pointe des Salines au sud-est.

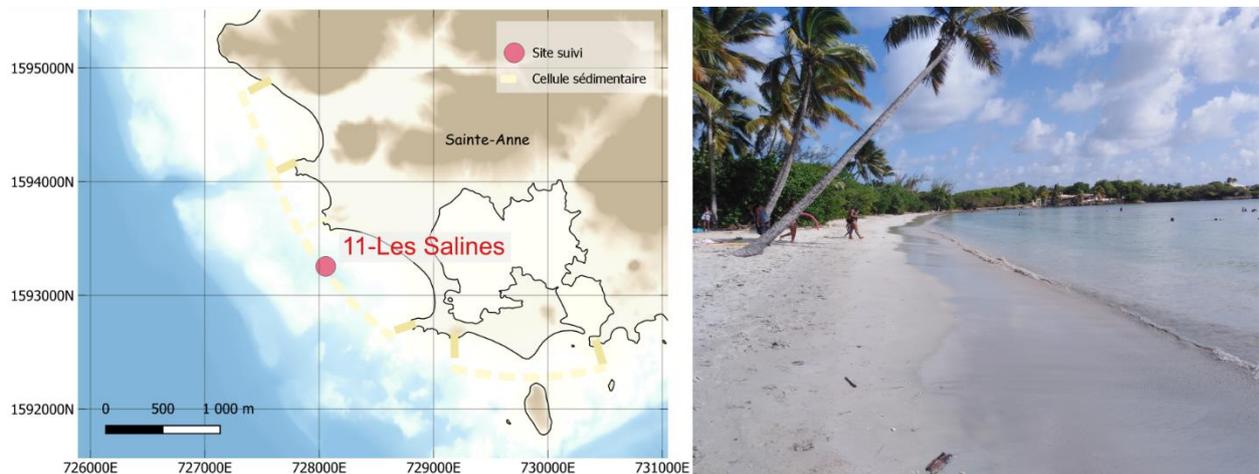


Illustration 63 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation des plages des Salines (Sainte-Anne). (à droite) - La plage de Grande Anse est composée de sables fins, et constitue l'une des plages les plus fréquentées de la Martinique. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.



Illustration 64 : Dans le secteur le plus à l'est de la baie (à gauche), la plage de Grande Anse est étroite tandis qu'elle devient plus large en allant vers le nord-ouest (à droite). Photographies capturées pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Suivi bathymétrique des plages de Grande et Petite Anse

La cellule sédimentaire des Salines est caractérisée par une morphologie très contrastée selon le secteur. Sur le secteur sud-est de la plage de Grande Anse, à proximité du profil P1, la morphologie de l'avant-côte est caractérisée par une faible pente ($\sim 1\%$) et une profondeur qui atteint seulement 4 m à une distance de 400 m de la limite de végétation (Illustration 65 et Illustration 66). Alors que la morphologie du profil P2 reste assez similaire celle du profil P1, le centre de la baie présente un plateau peu profond où les hauteurs d'eau se situent entre 3 et 4 m de profondeur sur une longueur de 250 m (P3, Illustration 66). Une fois dépassé le plateau, la pente de l'avant-côte augmente et les profondeurs atteignent 8 m de fond à une distance de 500 m de la plage. Au nord-ouest de Grande anse (Illustration 66, profil P4), le plateau peu profond décrit précédemment n'existe plus et la morphologie de l'avant-côte est définie par une plus forte pente que sur les profils plus à l'est ($\sim 2\%$). La hauteur d'eau atteint là aussi jusqu'à 8 m de profondeur à une distance de 500 m de la côte. L'ensemble de la partie sous-marine de la baie est composée d'un mélange de sables et de récifs qui se traduisent par certaines discontinuités bathymétriques visibles le long des profils. La morphologie des profils bathymétriques P1, P2 et P3 est particulièrement marquée par ces variations de la couverture des fonds meubles et rocheux ou récifaux.

Sur Petite Anse, les morphologies de l'avant-côte sont relativement homogènes selon le secteur de la plage avec une pente moyenne de 1.4 % et des hauteurs d'eau qui atteignent 6 m à une distance de 500 m de la plage (Illustration 67). De la même manière que sur Grande Anse, des discontinuités bathymétriques sont observées témoignant de la présence de récifs.

Compte tenu de ces morphologies particulières, il est difficile d'estimer de façon précise les mouvements sédimentaires associés à la dynamique naturelle de l'avant-côte. Ce travail de comparaison des profils de plage peut en revanche être effectué de façon précise sur les parties strictement sableuses, jusqu'à quelques mètres de profondeur (Illustration 71 et Illustration 72).

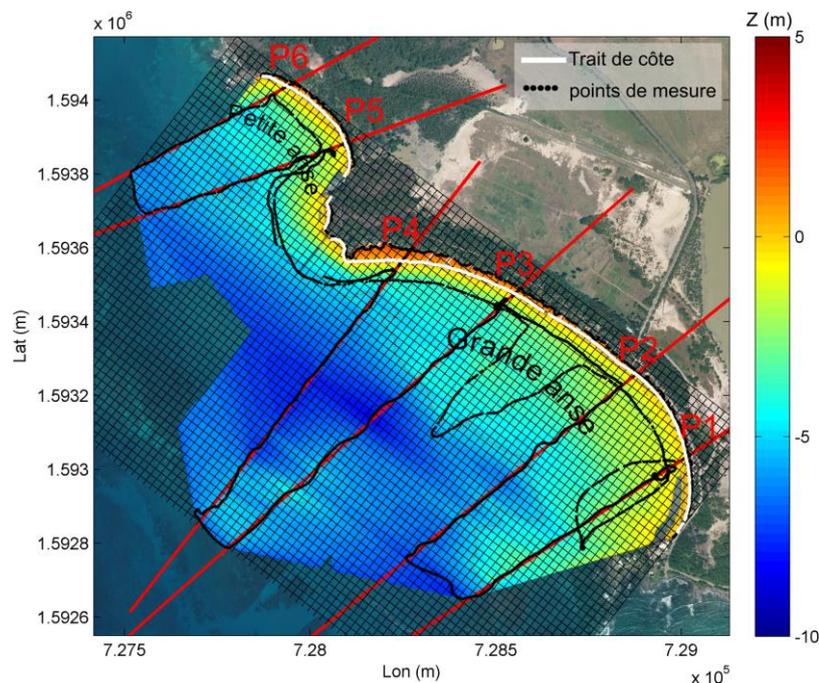


Illustration 65 : Vue en plan montrant la carte bathymétrique de la plage des Salines. Chaque point de mesure est illustré en pointillés le 22 juillet 2020. Les profondeurs mesurées sont interpolées sur une grille régulière (2x2 m) orientée dans l'axe de la plage.

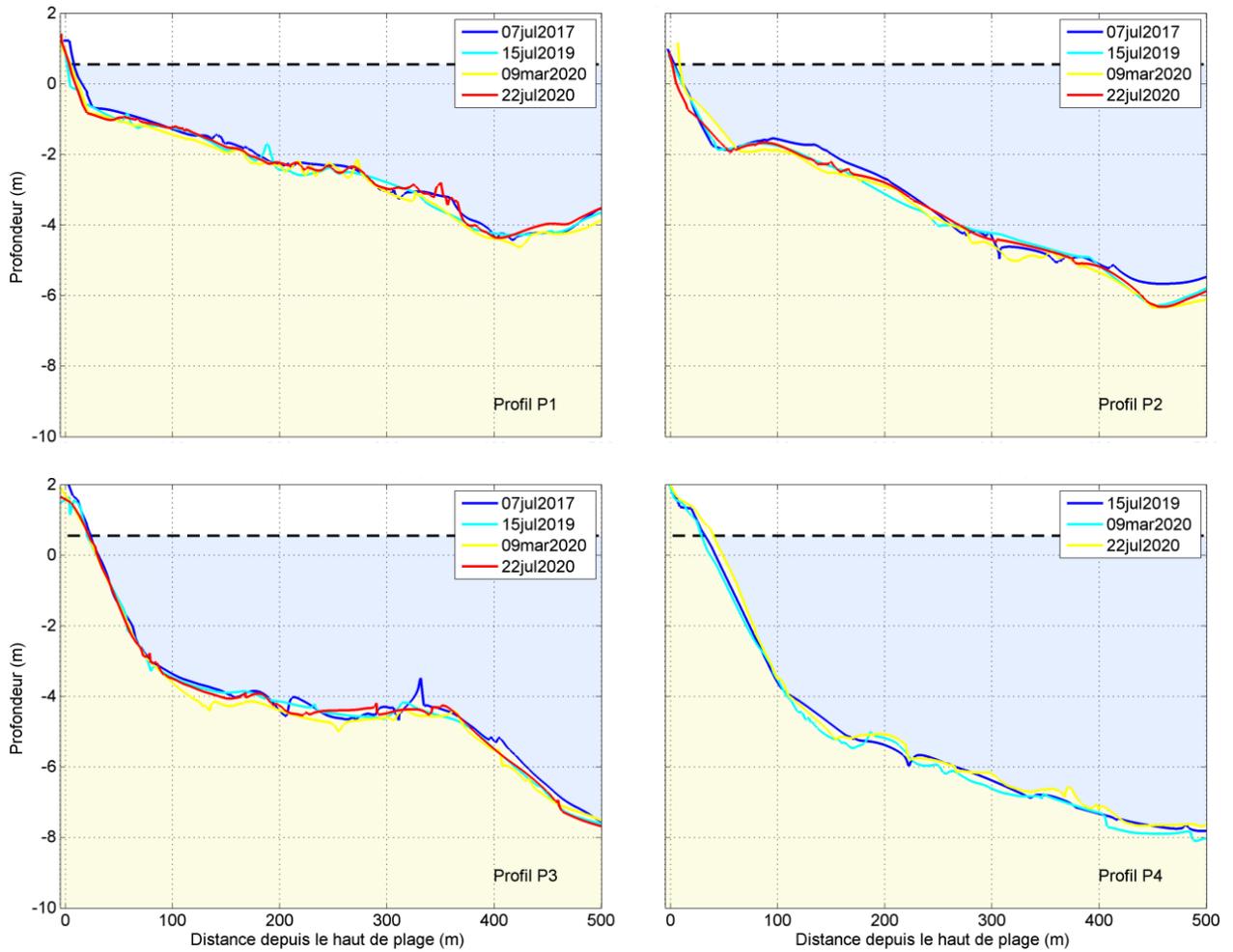


Illustration 66 : Évolution bathymétrique des profils de référence P1 à P4 sur les Grandes Salines en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) sur le site de Grande anse des Salines.

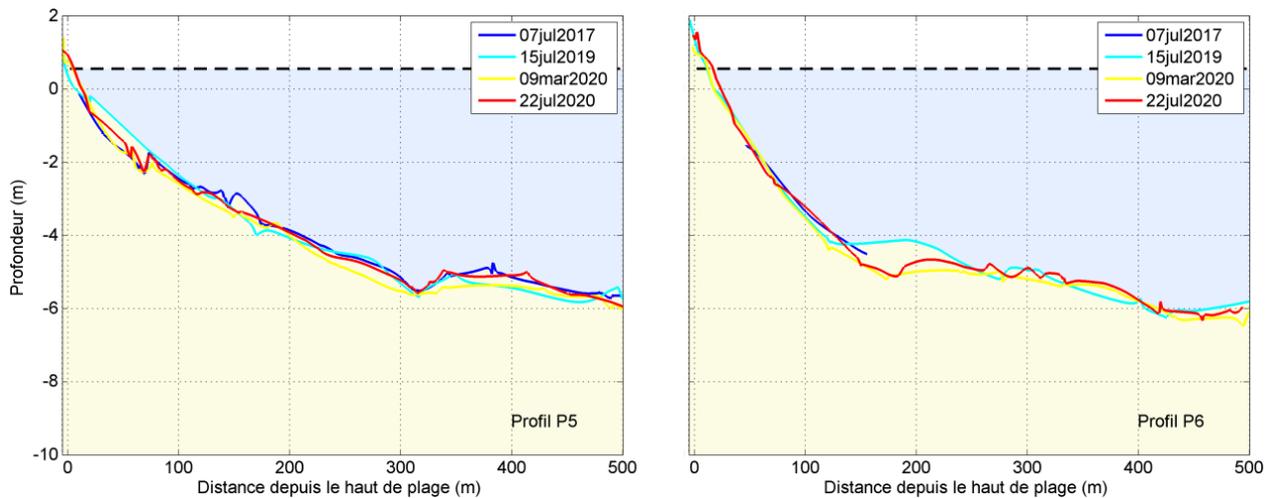


Illustration 67 : Évolution bathymétrique des profils de référence P5 et P6 sur les Petites Salines en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) sur le site de Petite anse des Salines.

Evolution du trait de côte

Les études précédentes (rapport BRGM/RP-63238-FR) ont pu montrer que la limite de végétation sur la plage de Grande Anse apparaît en recul entre 1951 et 2010 (15 à 20 m) et stable entre 2004 et 2010. Entre 2004 et 2010, on constate en revanche une diminution de la densité de la végétation du haut de plage.

Aujourd'hui, la plage de Grande Anse présente une largeur particulièrement réduite au sud-est (entre 6 et 9 m) et qui augmente progressivement jusqu'à atteindre 40 m à l'extrémité nord-ouest (Illustration 64 à droite et Illustration 69).

La plage de Grande Anse a connu un recul important (> 5 m) entre juillet 2017 et juillet 2019 à l'extrémité sud et une certaine stabilité sur la partie centrale (Illustration 69). Plus récemment entre juillet 2019 et juillet 2020, la position du trait de côte connaît une légère avancée (~ 2 m) au niveau de son extrémité sud (P1, Illustration 69). Alors que la portion la plus centrale de la plage reste relativement stable (P2 et P3, Illustration 69), sur le secteur le plus au nord (P4, Illustration 69), la plage gagne plus de 10 m en quelques mois et atteint aujourd'hui 40 m de large.

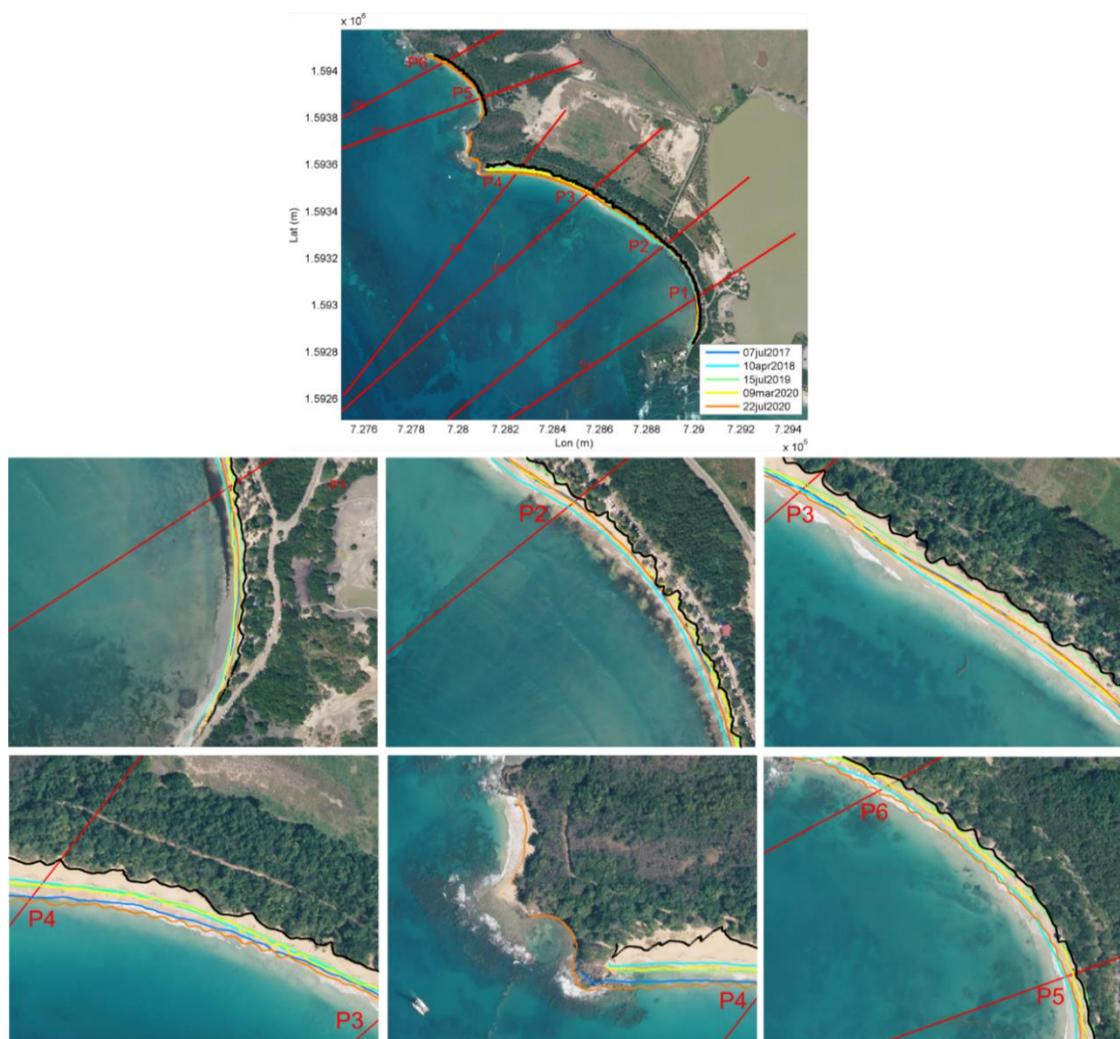


Illustration 68 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur Les Salines (en haut) avec chacun des secteurs en zoom (en bas). Le trait noir indique le haut de plage mesuré en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P6) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

Sur la plage de Petite Anse, la limite de végétation est restée plus stable que sur Grande Anse entre 1951 et 2010 (rapport BRGM/RP-63238-FR). La plage de Petite Anse présente aujourd'hui une largeur de plage plus réduite au sud-est (entre 0 et 10 m) qu'au nord-ouest (entre 10 et 20 m). Sur la période de suivi on note en moyenne un élargissement de la plage avec une avancée de plus de 5 m de la position du trait de côte entre juillet 2019 et juillet 2020. Une nouvelle fois, la poursuite du réseau de suivi est indispensable pour mieux qualifier la dynamique saisonnière du trait de côte sur ce site ainsi que pour en dégager la tendance sur le plus long terme.

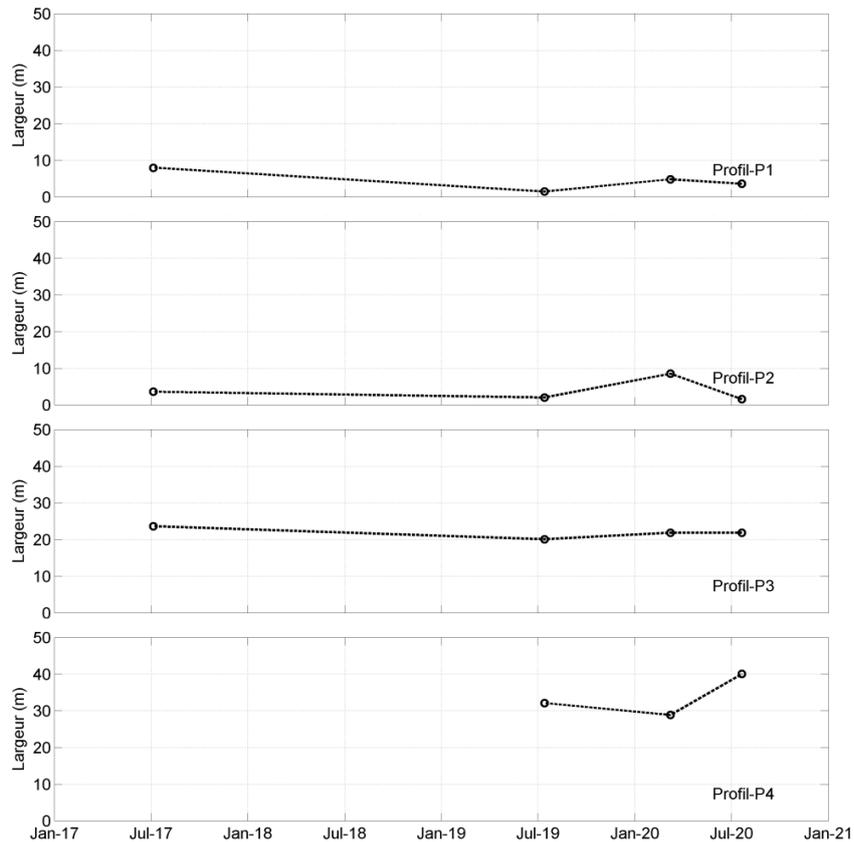


Illustration 69 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 à P4 (plage des Grandes Salines). La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

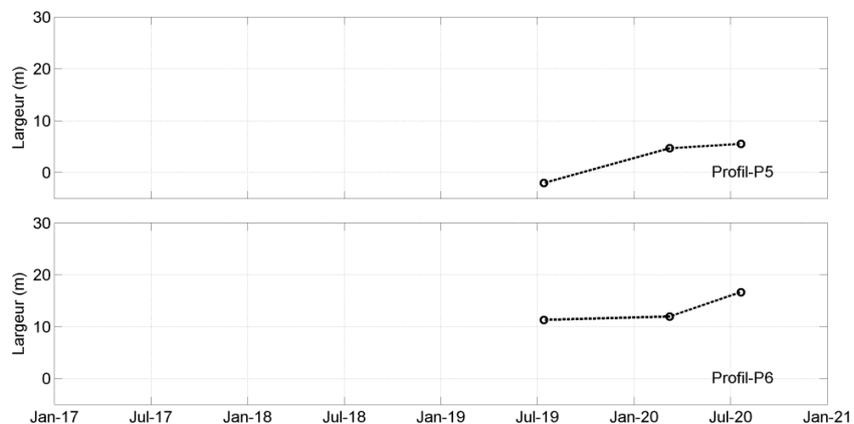


Illustration 70 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P5 et P6 (plage des Petites Salines). La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

La morphologie des profils de plage est très différente selon le secteur nord ou sud de la plage de Grande Anse. Alors que la partie émergée de la plage est caractérisée par une forte pente (> 15 %) et une faible largeur (< 10 m) dans les secteurs le plus au sud (P1 et P2 Illustration 71), le stock sédimentaire est nettement supérieur sur le secteur nord (P3 et P4 Illustration 71), où la pente reste inférieure à 8 %. Sur cette portion du linéaire côtier, la plage atteint jusqu'à 40 m de large et la hauteur mesurée au niveau de la limite de végétation avoisine les 2 m.

De façon assez visible, les profils de plage P1 et P2 situés à l'est de la plage de Grande Anse présentent une érosion importante avec un affaissement global du profil sur plusieurs dizaines de centimètres verticalement qui se traduit par un recul de la position du trait de côte de ~ 5 m entre juillet 2019 et juillet 2020. Les profils P1 et P2 restent à priori les sections les plus dynamiques de la cellule sédimentaire, même si l'on observe une accrétion en bas de plage sur le profil P4.

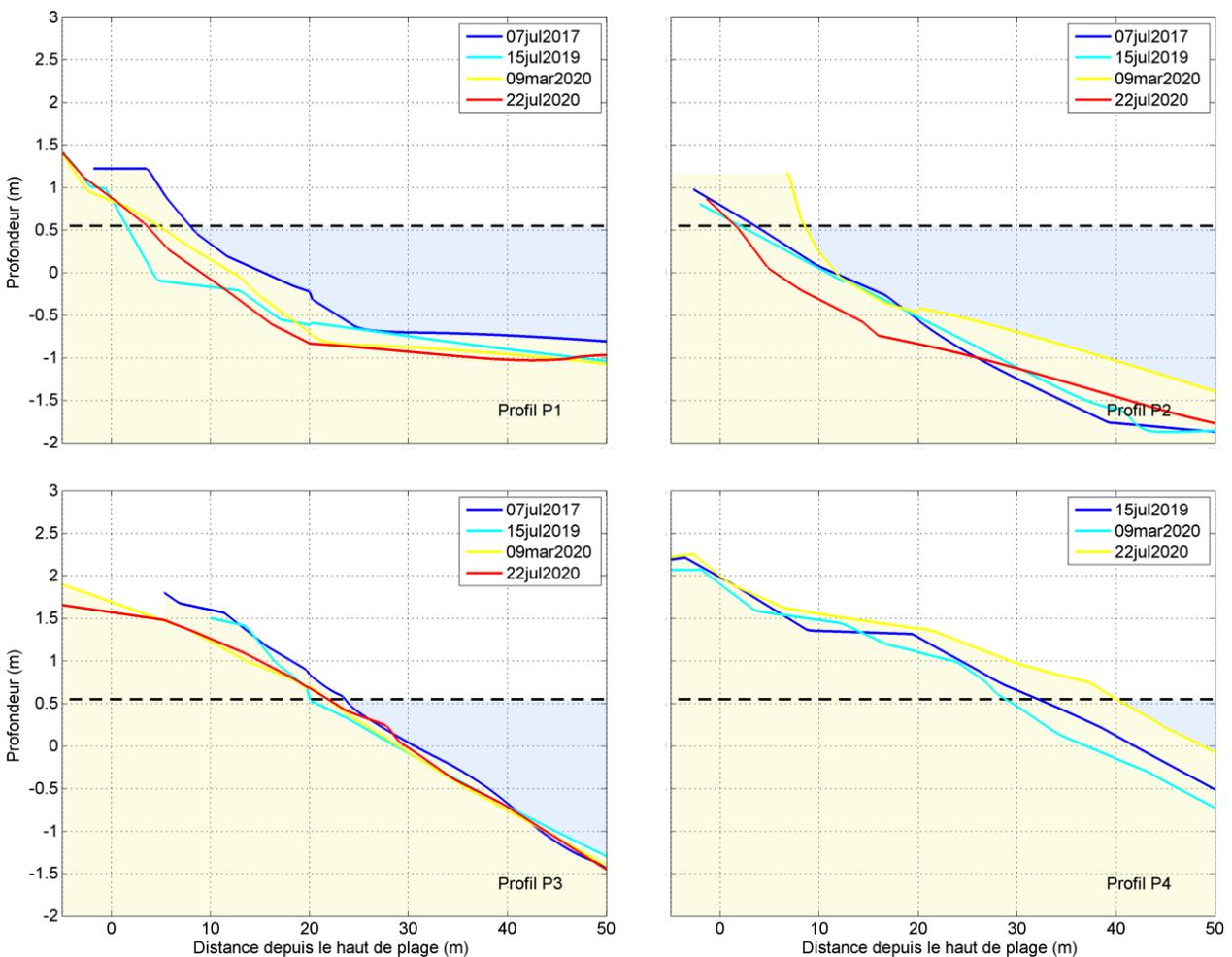


Illustration 71 : Évolution le long des profils de référence P1 à P4 sur la plage des Grandes Salines en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

L'évolution du trait de côte mesurée au cours de ces trois dernières années (2017-2020) est très contrastée selon le secteur de la plage. Le secteur le plus au nord de la plage de Grande Anse présente une très forte tendance à l'accrétion avec une largeur de plage qui augmente à une vitesse estimée à plus de 5 m/an. Au contraire, la portion la plus au sud de la plage connaît une érosion significative avec une vitesse de recul estimée à plus de 1 m/an. Les portions centrales de l'anse montrent plus de stabilité avec des évolutions qui restent négligeables.

Ces résultats suggèrent des échanges sédimentaires importants entre les deux extrémités de la plage. Le secteur sud semble alimenter le secteur plus au nord en étroite relation avec le sens de la dérive littorale. Les houles dominantes proviennent majoritairement du sud-est sur ce secteur générant une dérive du sud-est vers le nord-ouest de l'anse. L'érosion constatée sur la portion la plus au sud de la plage a donc une composante naturelle, probablement accentuée par la forte fréquentation du site dans ce secteur. Le stationnement des véhicules et le piétinement limitent en effet le développement de la végétation de haut de plage qui joue habituellement un rôle de stabilisation du sable (en particulier la végétation rampante).

Comme sur la plage de Grande Anse, la plage de Petite Anse présente une morphologie contrastée où le stock sédimentaire est nettement supérieur sur le secteur nord de la cellule. Au niveau du profil P1, la plage atteint jusqu'à 15 m de large en juillet 2020 et la hauteur mesurée au niveau de la limite de végétation atteint 2 m (Illustration 72).

Sur la période de suivi, la plage de Petite Anse connaît une tendance à l'accrétion caractérisée par le stock sédimentaire qui devient plus important à la fois en haut de plage entre juillet 2019 et mars 2020 sur le secteur du profil P5, mais aussi en bas de plage entre mars 2020 et juillet 2020 sur le secteur du profil P6.

La poursuite du réseau de suivi devrait permettre de mieux qualifier la dynamique saisonnière du trait de côte sur ce site. En particulier, un phénomène caractéristique d'un basculement du stock sédimentaire de la plage causée par un changement d'orientation des houles incidentes morphogènes pourrait s'ajouter à la dynamique pluriannuelle des plages de Grande et Petite Anse.

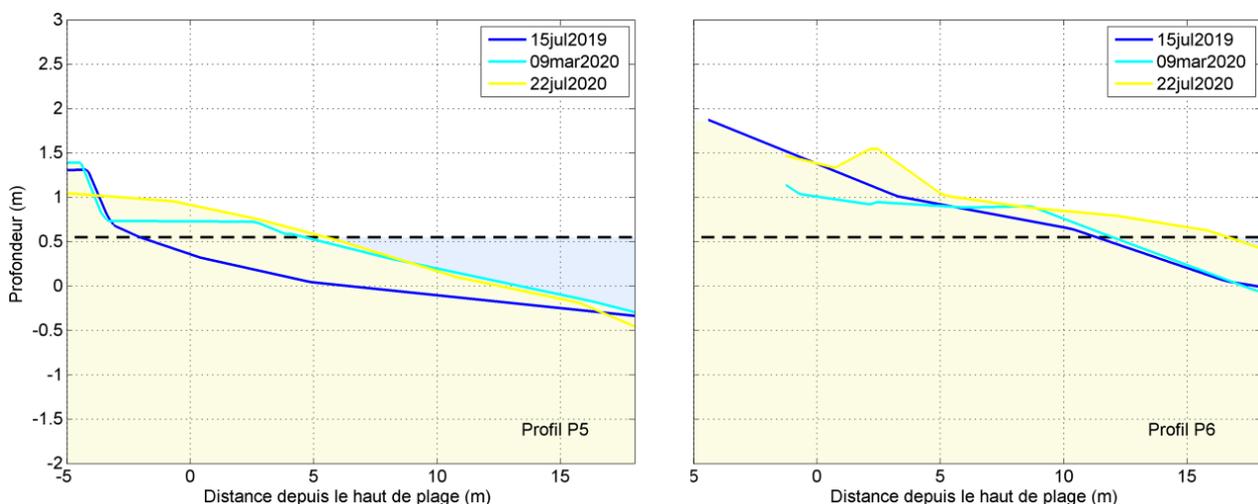


Illustration 72 : Évolution des profils de référence P5 et P6 sur la plage des Petites Salines en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.12. PLAGE DE DIZAC (LE DIAMANT)

Introduction

La plage de Dizac est située sur la commune du Diamant au sud-ouest de la Martinique (Illustration 73, à gauche). Cette cellule sédimentaire s'étend sur plus de 3 km de long et s'impose comme l'une des plages les plus étendues de l'île. La cellule sédimentaire est délimitée par une côte rocheuse à l'est (Pointe du Marigot) et des enrochements à l'ouest qui la sépare de l'anse Cafard. Orientée vers le sud-est et exposée à un climat de vague relativement énergétique, la plage de Dizac est composée majoritairement de sables fins (Illustration 73, à droite). Elle est souvent sujette aux échouages de sargasses, en particulier sur son extrémité ouest. Le haut de plage est délimité par de la végétation arborée à l'ouest et par un muret ou des enrochements à l'est qui sépare la plage du bâti situé quelques mètres en arrière (Illustration 74, à droite).

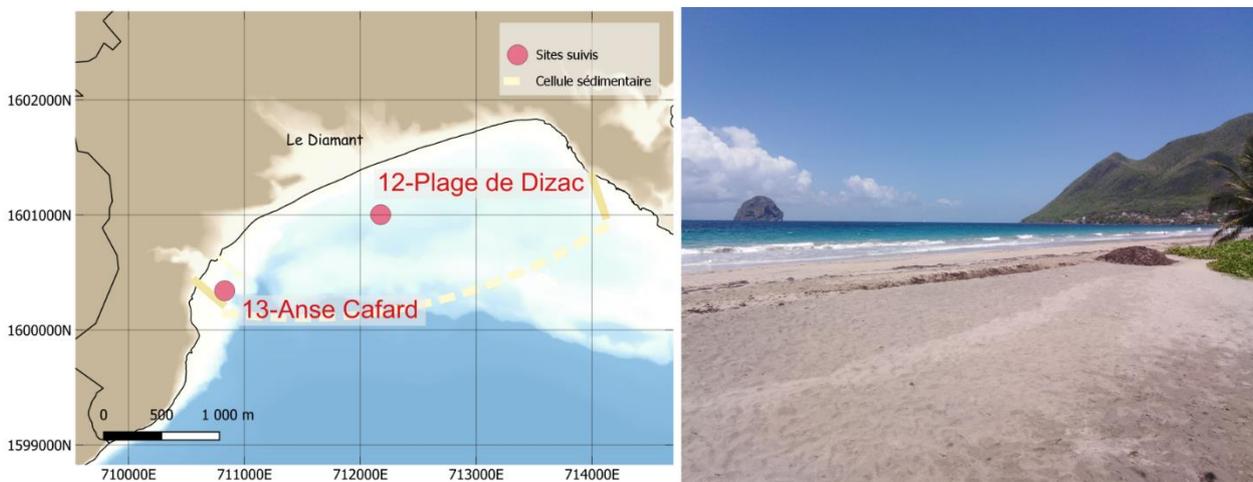


Illustration 73 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de la plage de Dizac (Le Diamant). (à droite) – Avec plus de 3 km de long, elle s'impose comme l'une des plages les plus étendues de la Martinique. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

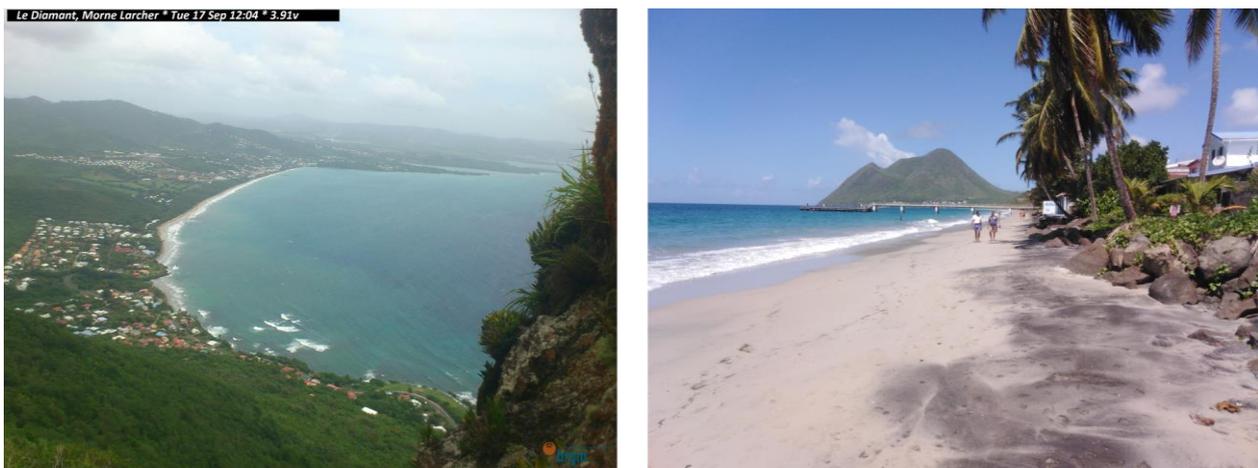


Illustration 74 : (à gauche) - Vagues de plus de 1 m déferlant sur la plage de Dizac (image capturée le 17 septembre 2019 avec le dispositif de suivi vidéo). (à droite) - A l'extrémité est de la cellule sédimentaire, le haut de plage est délimité par des enrochements. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

Evolution du trait de côte

La position du trait de côte est extraite à différentes dates à partir des campagnes de mesures réalisées (Illustration 75). La plage de Dizac présente une largeur particulièrement réduite à l'est au niveau des enrochements (plage quasiment inexistante au niveau de P1, Illustration 75) qui augmente progressivement jusqu'à atteindre 20 m au centre de la baie (P3 et P4, Illustration 75). A l'extrémité ouest de la plage, la bande sableuse diminue en largeur et varie entre 5 et 15 m de large (P5 et P6, Illustration 75). En fonction des saisons, certaines portions de la plage peuvent évoluer sur plus de 5 m, démontrant à quel point la cellule sédimentaire est dynamique.

Alors que la largeur de plage montre une certaine stabilité sur le secteur situé à l'ouest de la baie (P6, Illustration 76), la cellule sédimentaire montre une érosion importante au niveau de son extrémité Est depuis janvier 2018 (P1, Illustration 76). Sur ce secteur, la largeur de plage varie entre 0 et 7 m sur toute la durée du suivi.

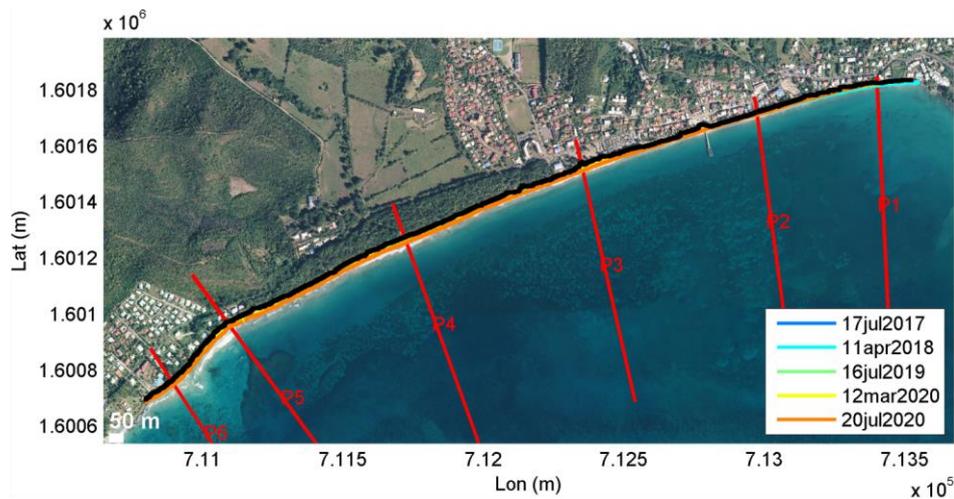


Illustration 75 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur la plage de Dizac (en haut) avec chacun des secteurs en zoom (en bas). Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P6) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

Sur les autres secteurs de la plage (P2 à P6, Illustration 76), la largeur de plage présente des évolutions assez contrastées où certains secteurs voient la largeur de plage diminuer (e.g. entre juillet 2019 et mars 2020 à proximité de P2) ou au contraire augmenter de quelques mètres (e.g. entre juillet 2019 et mars 2020 à proximité de P5). Sur le plus long terme, entre juillet 2017 et juillet 2020, la dynamique de la plage présente une certaine stabilité avec des évolutions de la largeur de plage peu significatives.

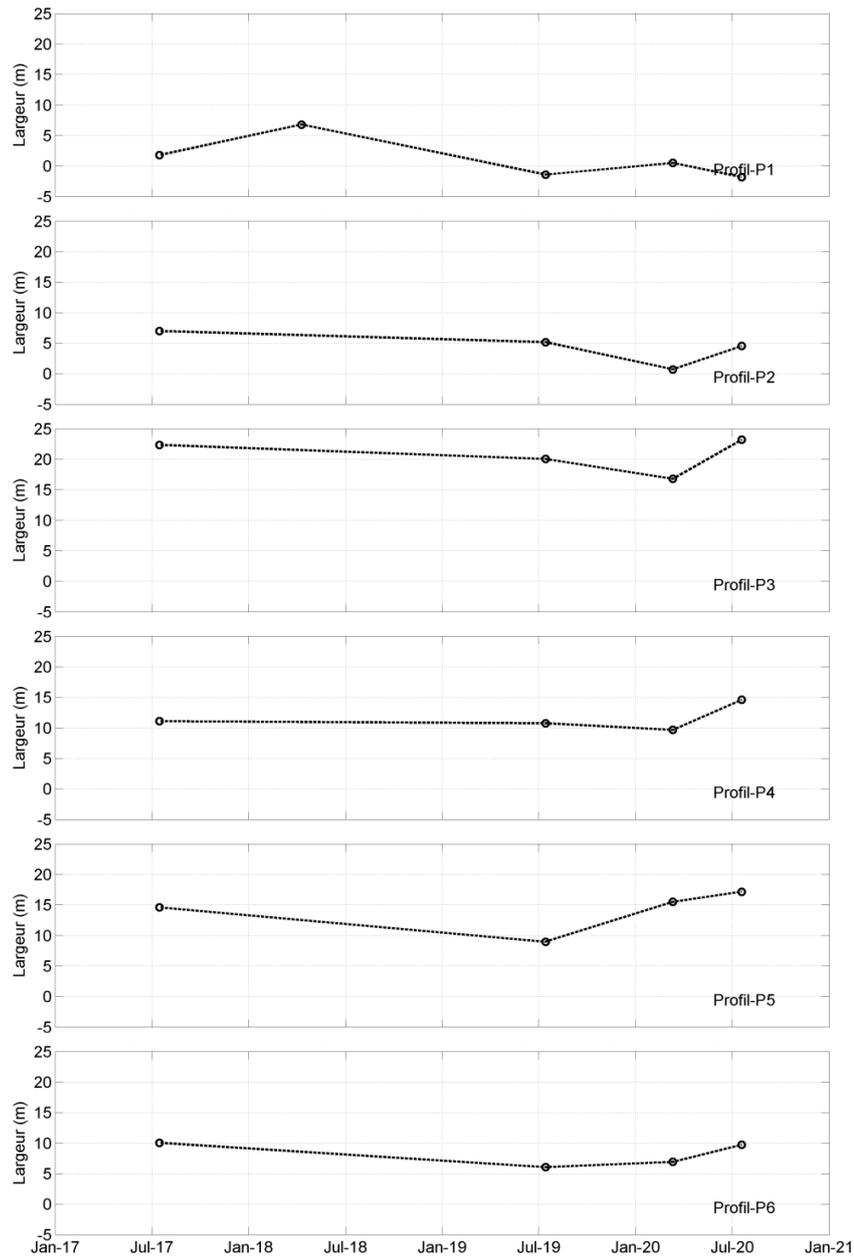


Illustration 76 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 à P6 sur la plage de Dizac. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Le stock sédimentaire disponible et la morphologie des profils de plage varient de façon significative selon le secteur de la cellule. Alors que la partie émergée de la plage est caractérisée par une forte pente (~ 10 %) et une faible largeur (< 5 m) sur les secteurs le plus à l'est (P1, Illustration 78), le stock sédimentaire apparaît nettement supérieur au centre de la baie (P3 et P4 Illustration 71), où la pente reste inférieure à 6 %. Sur cette portion du linéaire côtier, la plage atteint jusqu'à 20 m de large. Au niveau de l'extrémité ouest de la cellule sédimentaire, la plage redevient plus étroite avec une largeur d'environ 10 m.

De façon assez visible, le profil P1 situé à l'est de la plage présente une érosion importante avec un affaissement global du profil sur plusieurs dizaines de centimètres verticalement qui se traduit par un recul de la position du trait de côte de ~ 5 m entre janvier 2017 et juillet 2020. Au contraire, sur les autres secteurs, la morphologie du profil de plage reste relativement stable sur la période de suivi même si on note parfois quelques évolutions importantes avec des variations altimétriques sur plusieurs dizaines de centimètres, comme au niveau du profil P5 qui subit une érosion significative localisée sur le bas de plage et visible en juillet 2019. Depuis, ce même secteur a retrouvé son volume initial et la plage a gagné plus de 5 m de large en une seule année.

Alors qu'il est parfois difficile de diagnostiquer la cause de certaines évolutions morphologiques rapides, par exemple celles qui sont liées à un évènement particulier, le dispositif de suivi par imagerie vidéo vient désormais compléter les mesures topographiques et assurer une collecte de données en quasi-continu depuis août 2019. Les images permettent de couvrir les épisodes de fortes vagues (houle cyclonique), les séquences d'échouages ou de ramassage des sargasses (Illustration 77) et d'obtenir ainsi des informations qualitatives et quantitatives sur les variations de la position du trait de côte associées. On note sur ce site que l'angle de vue de la caméra peut varier plus ou moins dans le temps pour différentes raisons (vent, évolution de la végétation, maintenance de l'appareil). Un décalage même faible de l'orientation de la caméra peut entraîner des erreurs de géoréférencement post-acquisition. C'est pourquoi les analyses par imagerie photo réalisées sur la la plage de Dizac ne peuvent être produites pour le moment que sur une quantité restreinte d'images.

La séquence ci-dessous montre un échouage de sargasses le 25 mars 2020 sur la plage de Dizac, à proximité du profil P5. La position du trait de côte montre une certaine stabilité entre mars et avril 2020 avec aucune évolution significative suite à l'échouage des algues. La poursuite du réseau de suivi permettra de mieux caractériser ce type d'interaction et ainsi de mettre en évidence les évolutions morphologiques observées en lien avec ce type d'évènement.

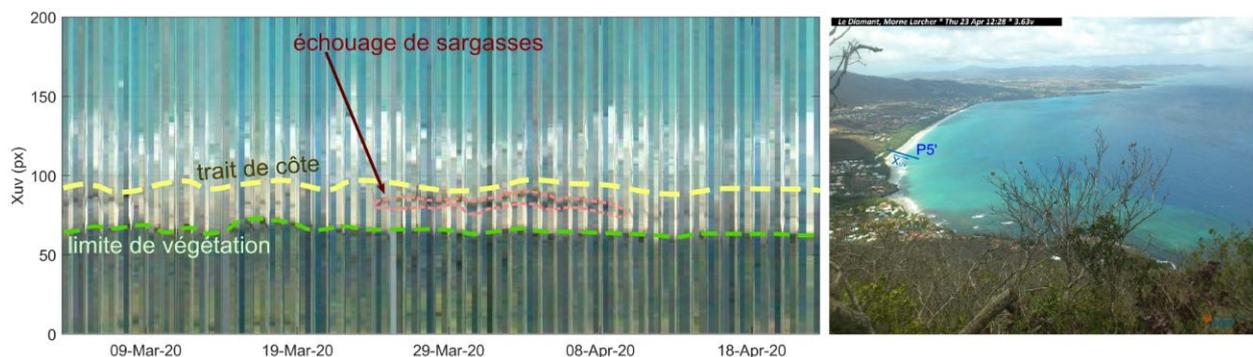


Illustration 77 : (à gauche) - Représentation visuelle (timestack) de l'évolution de la position du trait de côte, et de la limite de végétation le long du profil P5' (à droite) sur la plage de Dizac. Un échouage de sargasse est visible à partir du 25 mars 2020. Les pixels sont extraits à partir des images d'archives à un pas de temps horaire.

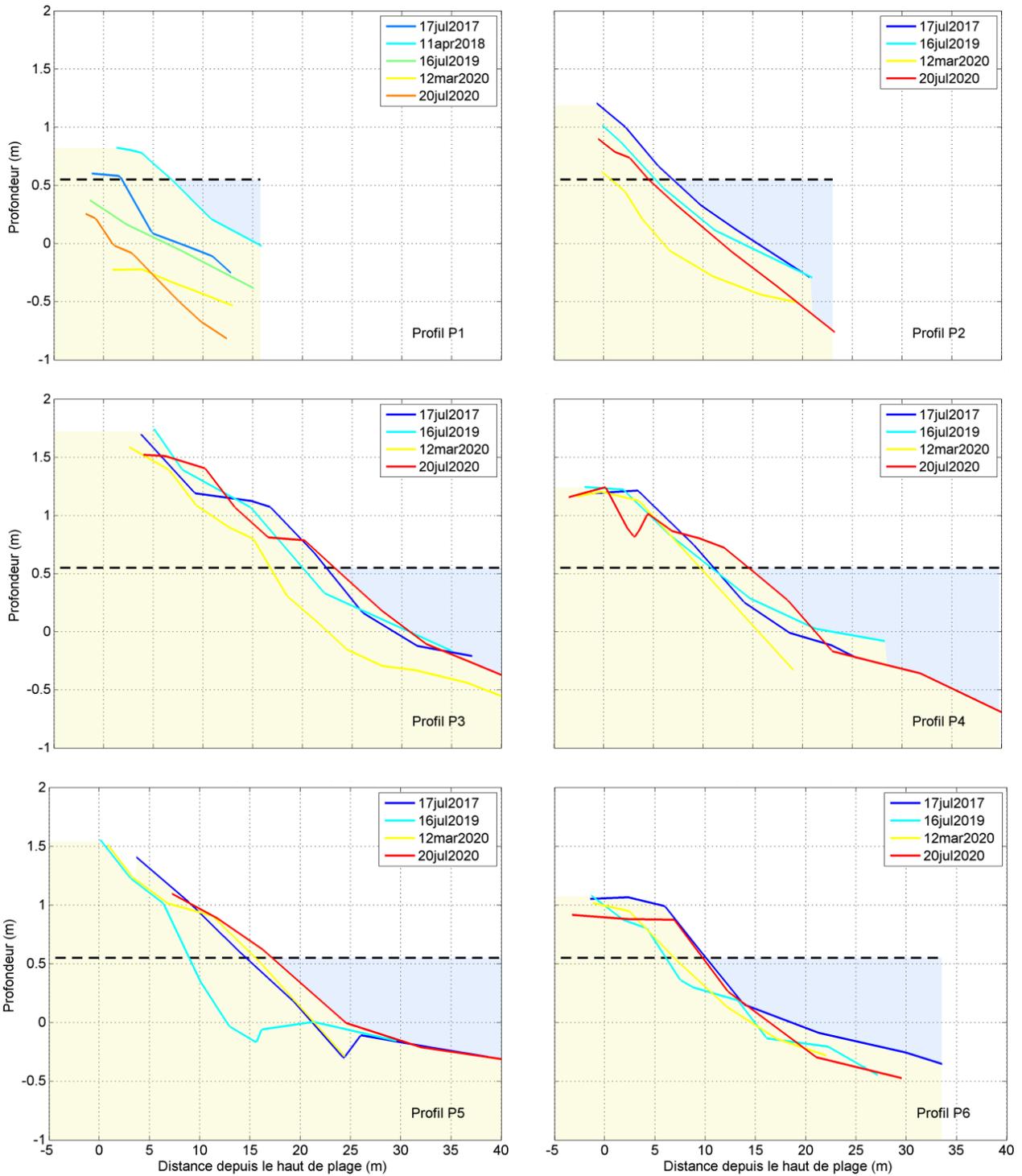


Illustration 78 : Évolution des profils de référence P1 à P6 sur la plage de Dizac en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

3.13. ANSE CAFARD (LE DIAMANT)

Introduction

La plage de anse Cafard est située sur la commune du Diamant (Illustration 79, à gauche) et s'étend sur environ 200 m de long. La cellule sédimentaire 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. Des sargasses échouées sont très fréquemment présentes en grande quantité sur la plage (Illustration 79, à gauche).

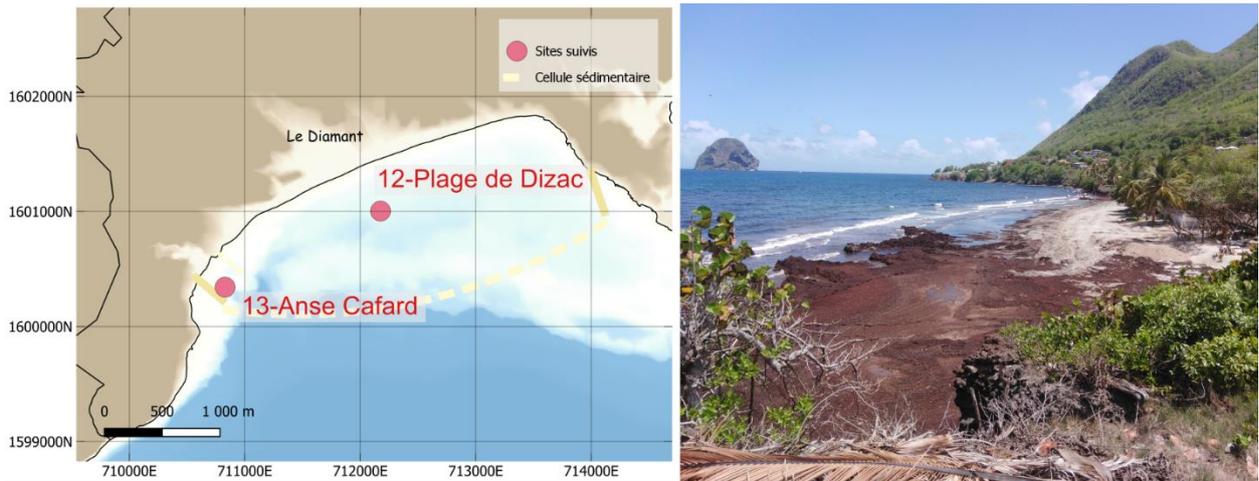


Illustration 79 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Cafard (Diamant). (à droite) - La plage est composée de sables fins mais reste largement exposée aux échouages de sargasses. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.



Illustration 80 : (à gauche) - Image illustrant un arrivage massif de sargasses sur l'anse Cafard capturé par le dispositif de suivi. La surface de sargasses estimée atteint alors plus de 20 000 m². (à droite) – Faisant suite à l'échouage des algues en grande quantité, une séquence de ramassage est souvent mise en place.

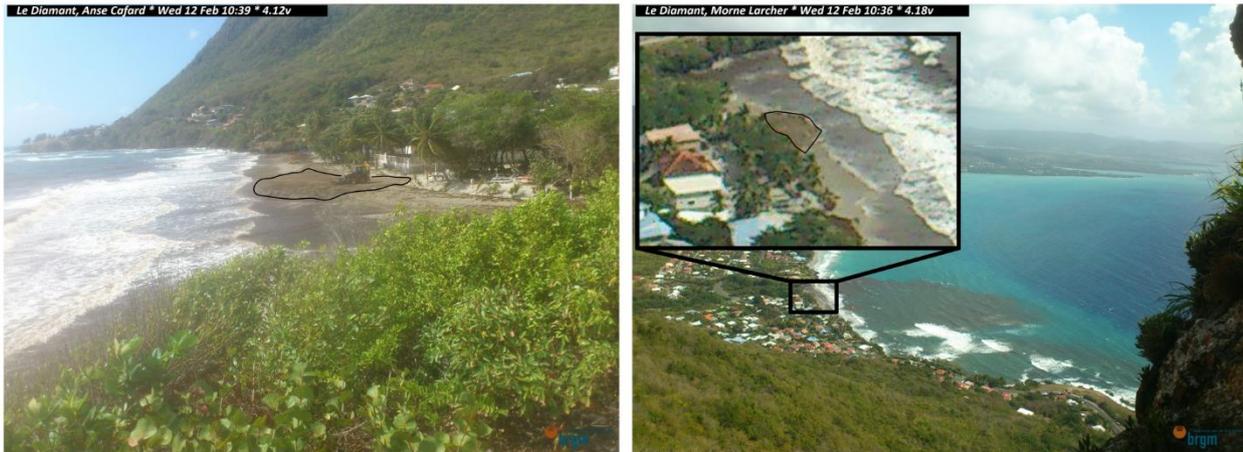


Illustration 81 : images illustrants le rechargement artificiel de la plage le 17 février 2020. La séquence a été capturée par le dispositif de suivi vidéo positionné sur l'anse Cafard (à gauche) et sur le Morne Larcher (à droite).

Au vue des différentes problématiques auxquelles est confrontée la plage, des travaux d'aménagement ont souvent été initiés sur cette cellule sédimentaire. Le passage d'engins mécaniques pour le ramassage des algues en cas d'échouages massifs a notamment eu lieu plusieurs fois en 2018 ou en 2019 (Illustration 80).

Les observations réalisées à l'aide du dispositif de suivi vidéo ont permis de mieux mettre en évidence la récurrence de ces échouages. Depuis le 1^{er} janvier 2018 jusqu'au 1^{er} septembre 2020, sur une durée de presque 3 ans (33 mois), une vingtaine d'échouages massifs ont été répertoriés avec une surface de sargasses estimée sur le site, à terre et en mer, qui excède de 20 000 m² comme le 16 juin 2018 (Illustration 80). Sur la période de suivi on note en moyenne 7 séquences d'échouages massifs d'algues sargasses, chacune ayant eu lieu entre janvier et septembre.

Evolution du trait de côte

La largeur de la plage est très variable selon le secteur avec au maximum 25 m en 2017 (juillet) sur la portion située à l'est de la cellule (P7, Illustration 82) et seulement 7 m au niveau de son extrémité ouest (P8, Illustration 82). La dynamique observée sur la position du trait de côte ne montre pas d'échanges sédimentaires significatifs entre les deux secteurs. Au contraire, les transferts sédimentaires semblent résulter principalement d'une dynamique transversale, dans la direction perpendiculaire à celle du trait de côte.

Sur toute la durée du suivi, la position du trait de côte montre une assez grande variabilité avec des variations mesurées sur la largeur de plage supérieures à 5 m. Entre 2017 et 2020, la plage perd en moyenne 2 à 5 m de large selon le secteur (Illustration 83). La dynamique de la plage résulte principalement d'une évolution progressive avec une tendance à l'érosion et ne semble pas montrer de saisonnalité marquée. Au centre de la baie la dynamique de la plage montre une certaine stabilité (Illustration 82).

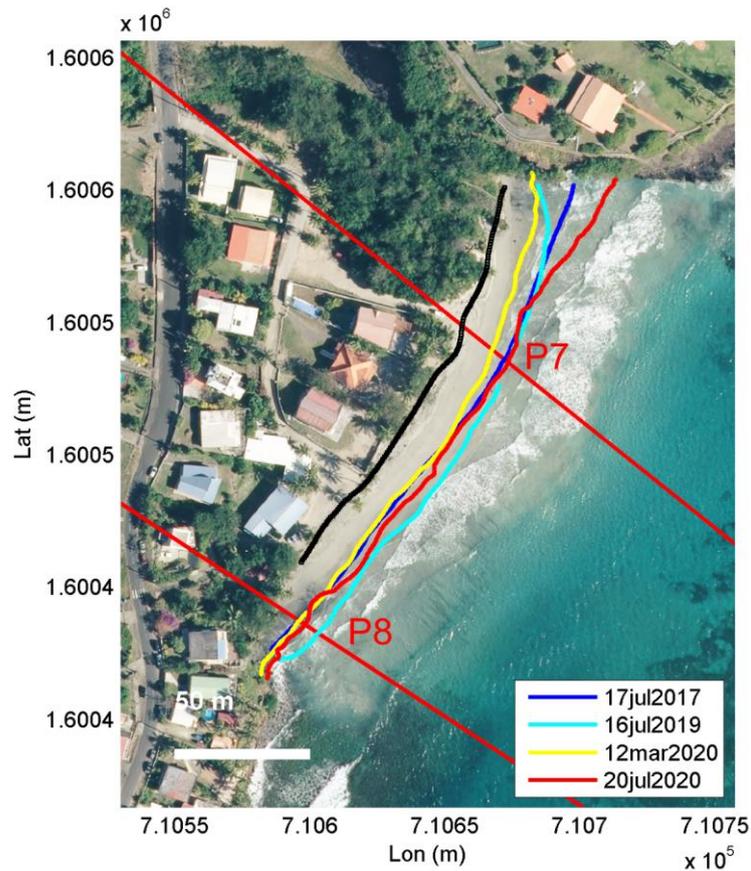


Illustration 82 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Cafard. Le trait noir indique le haut de plage mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P7 et P8) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

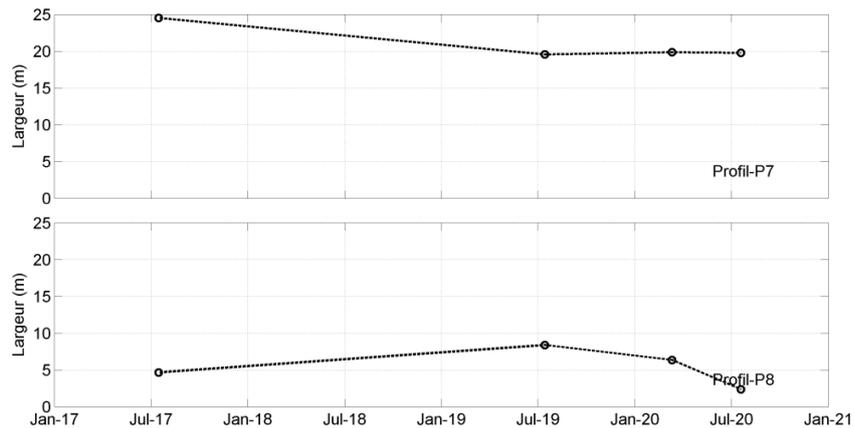


Illustration 83 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 à P6 sur anse Cafard. La largeur de plage est déterminée par la largeur entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Les profils de plage ne présentent pas une dynamique saisonnière marquée mais au contraire une évolution plus progressive avec une tendance vers l'érosion (Illustration 84). Si la pente ou la morphologie générale du profil de plage reste assez stable, on note toutefois un recul significatif du trait de côte sur plus de 2 m depuis la mise en place du suivi topographique en juillet 2017 jusqu'en juillet 2020. Ce phénomène d'érosion semble être provoqué par un affaissement global du profil de plage qui pourrait être la conséquence du ramassage mécanique des algues échouées sur la plage. Si le ramassage des algues reste à priori indispensable sur ce site, cette méthode est aussi connue pour entraîner une diminution du stock sédimentaire avec le prélèvement du sable en même temps que des algues. Certaines pratiques pourraient ainsi être mieux encadrées et notamment celles liées aux ramassages des sargasses (ramassage manuel à privilégier, stockages intermédiaires à prévoir hors zone végétalisée).

Afin de compenser la diminution du stock sédimentaire, des travaux de rechargement artificiel de la plage ont été observés le 17 février 2020 (Illustration 81) par le dispositif de suivi vidéo mis en place sur le site. Si le système de suivi par imagerie mis en place sur l'anse Cafard capture parfaitement les différentes étapes de ce rechargement de plage, les campagnes de mesure permettent de compléter l'analyse et de mieux mettre en évidence la dynamique de la plage à la suite des travaux réalisés. Un mois après la réalisation des travaux de rechargement, des mesures DGPS ont été effectuées sur le terrain. Les données de la campagne terrain du 12 mars 2020, montrent qu'il n'y a aucune transition progressive entre la partie rechargée et le bas de plage à quelques dizaines de mètres plus au nord, et que ce stock sédimentaire ne se retrouve pas de façon significative, ni niveau du trait de côte, ni sur la partie marine. Le rechargement de la plage prend la forme d'une cuvette, probablement à cause du tassement lié aux passages successifs des camions ou voitures en son centre. Aux extrémités latérales du rechargement l'élévation peut atteindre 2 m par rapport au niveau marin et le sédiment disponible reste très peu mobile. Le 17 avril, un engin mécanique est venu étaler le sédiment consolidé vers le bas de plage, sur la partie peu profonde entre 0 et 0.25 m (ngm), au niveau du profil P7. Le sédiment a pu ensuite être remanié par les courants et se retrouve désormais au niveau de l'extrémité nord-est de la baie, provoquant localement un élargissement de la plage sur plus de 15 m (Illustration 85).

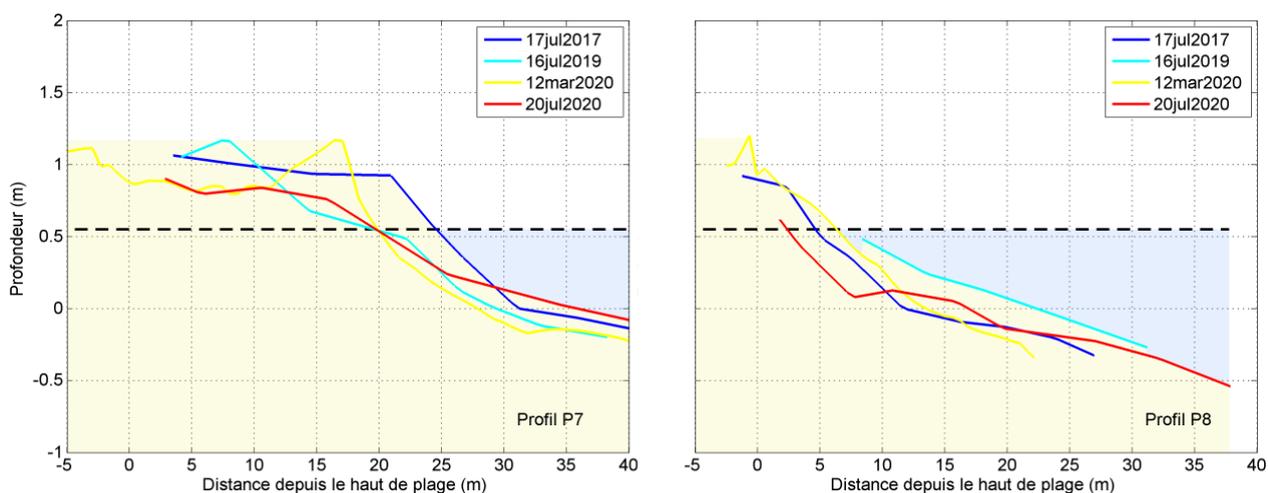


Illustration 84 : Évolution le long des profils de référence P1 à P6 sur anse Cafard en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

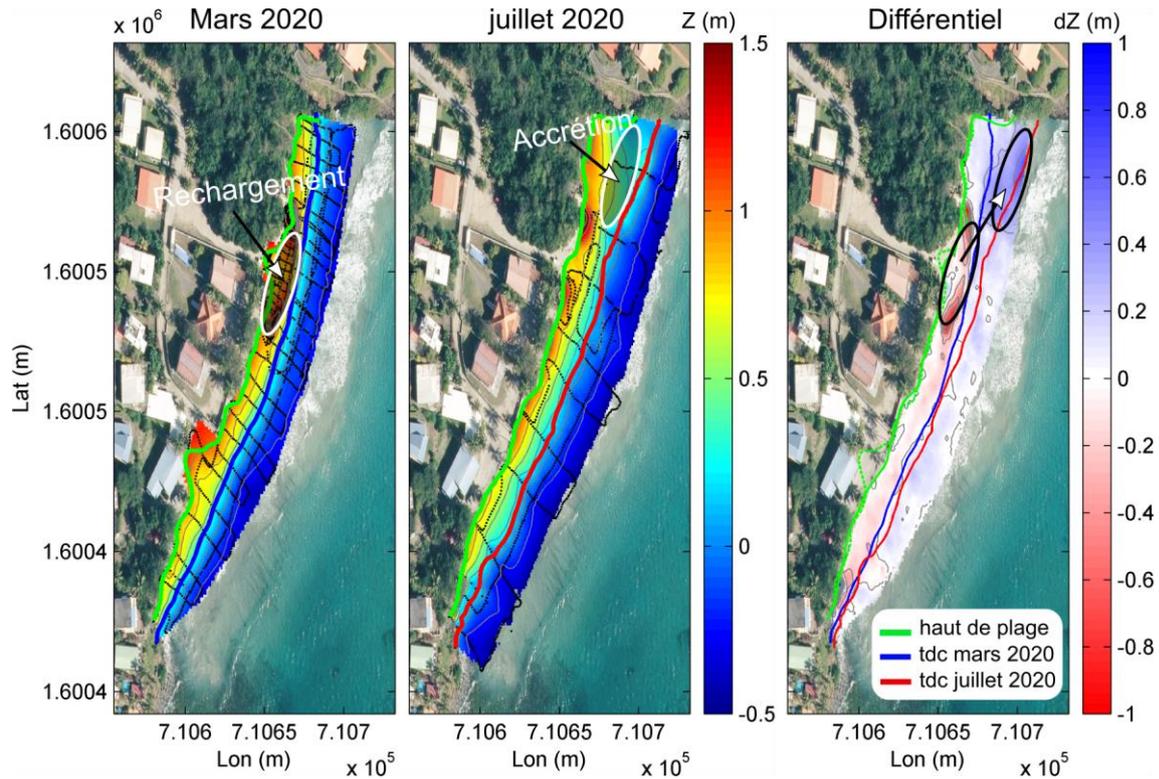


Illustration 85 : Vue en plan montrant les évolutions morphologiques sur anse Cafard suite aux travaux de rechargement. A gauche, le levé a été réalisé en mars 2020 (un mois après le début des travaux) et au centre en juillet 2020 (cinq mois après le début des travaux). Chacun des levés topographiques a été interpolé sur une grille régulière (1 x 1 m). Le différentiel ($Z_{mars_2020} - Z_{juillet_2020}$) altimétrique est illustré sur la figure de droite.

3.14. PLAGES DU COIN ET PLAGES DU BOURG (LE CARBET)

Introduction

La plage du Coin et la plage du Bourg sont situées sur la commune du Carbet et appartiennent à la même cellule sédimentaire qui s'étend sur environ 2.4 km de long (Illustration 86, à gauche). Orientée du nord vers le sud, l'ensemble de la cellule est souvent aussi désigné comme la plage du Carbet. C'est une plage ouverte caractérisée par un grand linéaire sableux de part et d'autre de l'embouchure de la rivière du même nom. La cellule sédimentaire est délimitée par des enrochements au nord qui ont pour objectif de protéger la route nationale des épisodes de forte mer et par une falaise rocheuse (pointe Guotony) au sud. La plage est occasionnellement exposée à un climat de vague énergétique, en particulier lorsque la houle en provenance du nord vient frapper la côte (Illustration 87). Bien que la plage abrite plusieurs zones à forts enjeux touristiques et urbains (bars, restaurants), la bande littorale reste assez préservée avec seulement un ponton sur le secteur central de la plage, et des enrochements assez peu étendus au sud, encadrant la ravine Thieubert. A quelques dizaines de mètres en arrière de la plage, le secteur a connu une importante urbanisation depuis les 30 dernières années.

Les précédentes études réalisées sur ce site ont permis de mettre en évidence une certaine stabilité de la limite de végétation entre 1951 et 2017 malgré la forte urbanisation de la forêt littorale située sur l'arrière plage (rapport BRGM/RP-63238-FR, 2015). Seuls les secteurs situés au niveau des embouchures des rivières apparaissent plus dynamiques. Ils sont caractérisés par une importante avancée de la limite de végétation vers l'océan (environ 50 m entre 1951 et 2010 à l'embouchure de la rivière du Carbet et environ 20 m à l'embouchure de la ravine Thieubert à l'extrémité sud de la plage). Si l'indicateur de haut de plage a peu évolué dans l'ensemble depuis 1951, la position du trait de côte montre plus de variabilité. La plage a gagné 20 m de large au niveau de la partie sud de la cellule et a diminué de plusieurs mètres sur la partie nord. La plage a d'ailleurs totalement disparu au droit des enrochements mis en place à l'extrémité nord de la cellule sédimentaire. La plage du Carbet s'est aussi montrée par le passé très vulnérable aux fortes houles induites par les épisodes cycloniques. Par exemple, le 18 septembre 2017, les vagues générées par l'ouragan Maria ont frappé le littoral du Carbet, entraînant d'importants dégâts matériels et la chute de plusieurs arbres. Les impacts observés sur la plage au cours de cet épisode se concentrent sur la partie centrale et se manifestent sous la forme d'un talus d'érosion de 1 à 2 m de hauteur apparu sur près de 1 km (rapport BRGM/RP-68470-FR, 2019).



Illustration 86 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de la plage du Carbet. (à droite) - La plage est composée de sables fins d'origine volcanique. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.

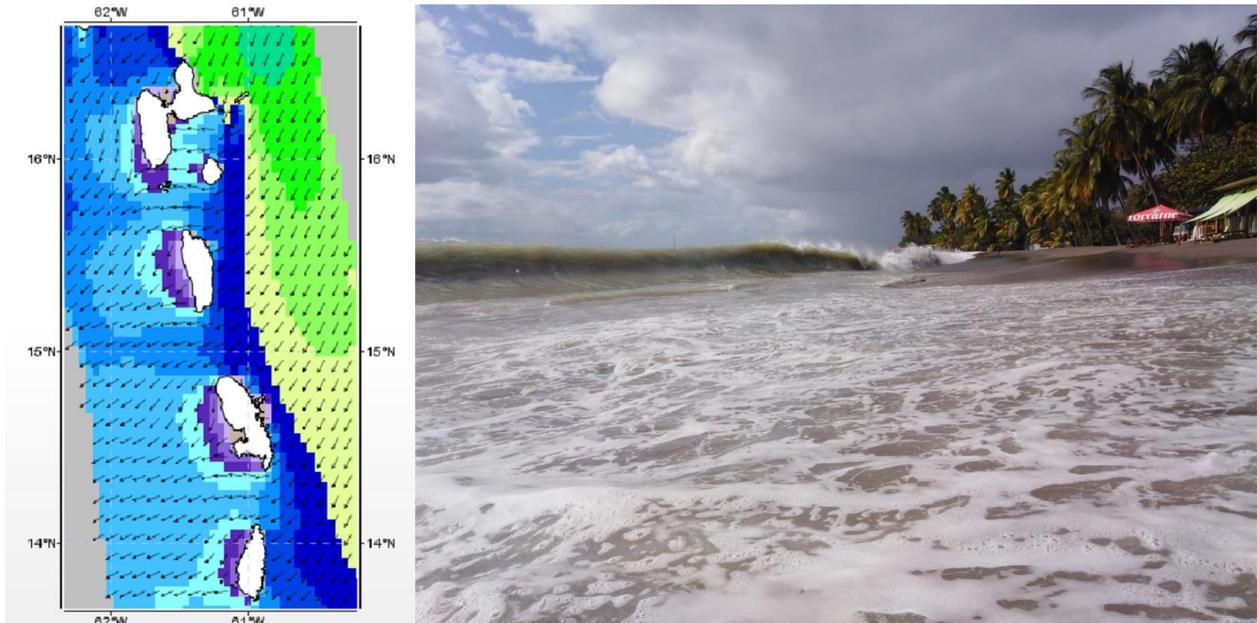


Illustration 87 : (à gauche) - Carte de prévision de la hauteur des vagues sur les petites Antilles le 10 mars 2020 à 10h (<http://marc.ifremer.fr/>). (à droite) - Vagues de plus de 1.5 m déferlant sur la plage du Carbet le même jour à la suite du passage d'une dépression au nord des petites antilles.

Suivi bathymétrique de la plage du Carbet

La cellule sédimentaire du Carbet est caractérisée par une morphologie très contrastée selon le secteur. Sur la première moitié sud de la plage, au droit des profils P1, P2, P3 et P4, la morphologie de l'avant-côte (entre 0 et 20 m de fond) est caractérisée par une pente en moyenne autour de 9 % et une profondeur qui atteint environ 20 m à une distance de 250 m de la position du trait de côte (Illustration 88 et Illustration 89). A la différence des profils P1 et P2 qui restent assez linéaires avec une pente relativement homogène, les profils P3 et P4 présentent un plateau entre 3 et 8 m de profondeur où la pente est relativement faible (~ 6 %) et un tombant où la pente excède 10 % à partir de 180 m au large (Illustration 89).

Sur la moitié nord de la cellule sédimentaire, entre les profils P5 et P6 (Illustration 89), le plateau peu profond décrit précédemment reste bien présent mais la seconde partie du profil de plage devient plus raide que sur les profils plus au sud, avec une pente en moyenne autour de 13 %, en particulier sur le profil P5.

Compte tenu de ces morphologies particulières et des pentes observées sur les profils de plage, le moindre écart de trajectoire du bateau par rapport à la position du profil de référence peut entraîner un écart dans la mesure par rapport aux levés réalisés les années précédentes. Bien qu'il soit toujours difficile d'estimer de façon précise les mouvements sédimentaires associés à la dynamique naturelle de l'avant-côte, nous considérons que la partie la plus dynamique de la plage se situe jusqu'à 10 m de profondeur. Au-delà de cette profondeur, le profil de plage peut être considéré comme relativement stable. Ce travail de comparaison des profils de plage entre les différentes dates de mesure peut donc être effectuée de façon précise sur les parties moins profondes, jusqu'à quelques mètres de profondeur (Illustration 92).

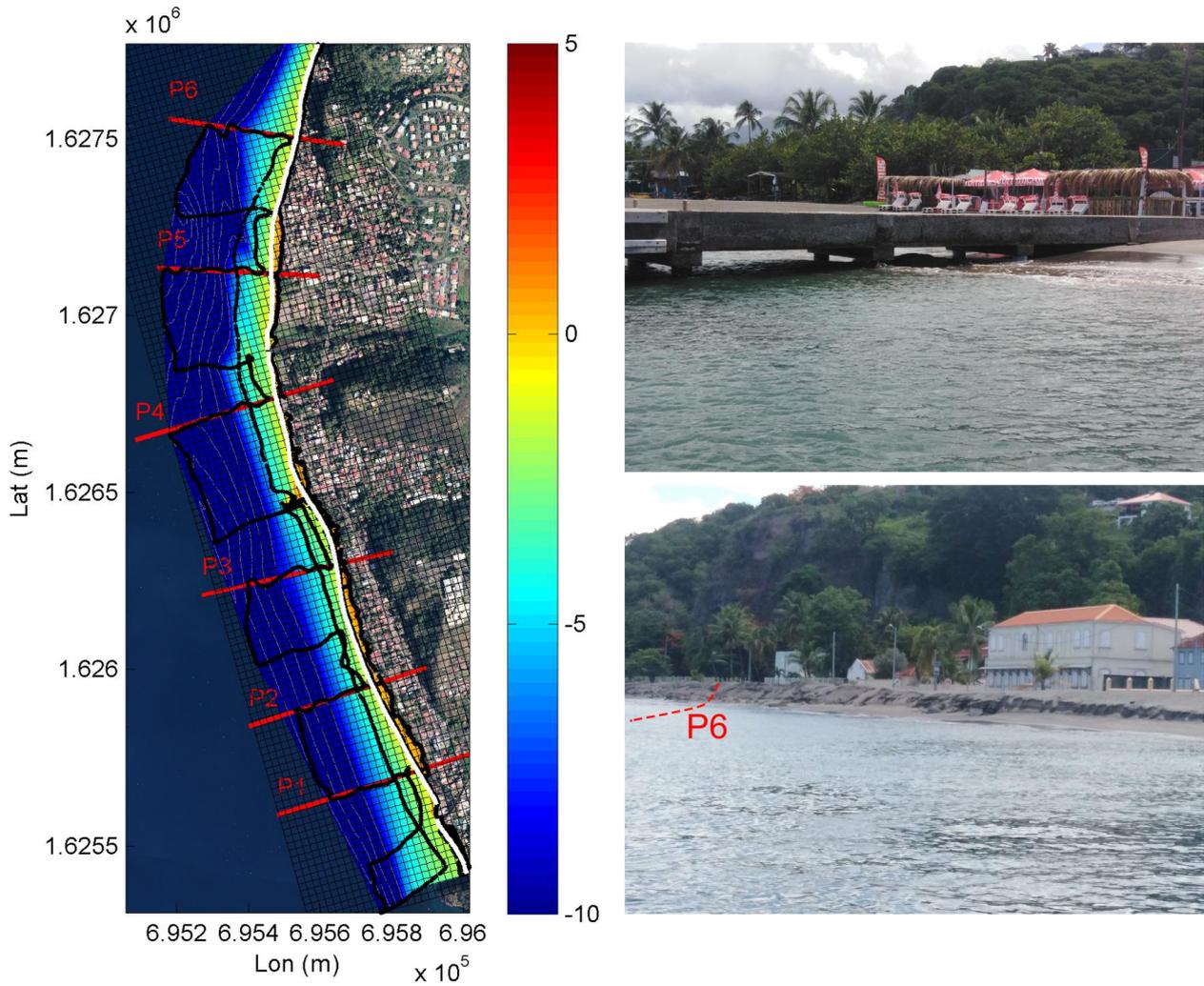


Illustration 88 : Vue en plan montrant la carte bathymétrique de la plage du Carbet. Chaque points de mesure (campagne du 23 juillet 2020) est illustré en pointillés. Les profondeurs mesurées sont interpolées sur grille régulière (2x2 m) orientée dans l'axe de la plage. (à droite) - Photographies prises depuis l'embarcation le 23 juillet 2020.

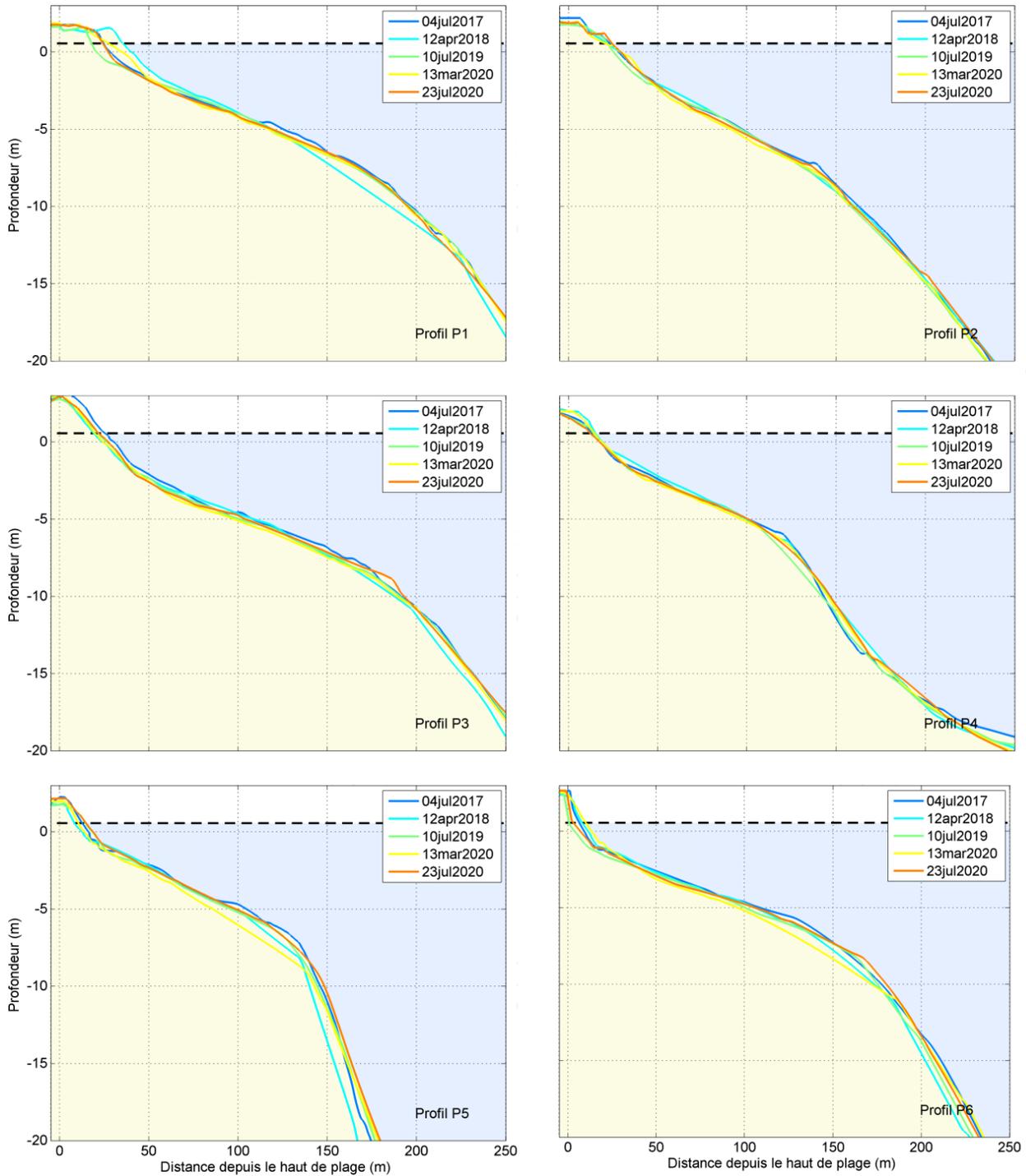


Illustration 89 : Évolution de la bathymétrie le long des profils de référence P1 à P6 sur la plage du Carbet en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

Evolution du trait de côte

La position du trait de côte est extraite à différentes dates à partir des campagnes de mesures réalisées (Illustration 90). Initialement en 2017 (trait bleu), la plage apparaît relativement large (~ 15 m) sur l'ensemble de la portion sud alors qu'elle se réduit fortement en allant vers le nord, jusqu'au profil P6 où sa largeur n'atteint plus que 2 m. En fonction des différentes années ou saisons, certaines portions de plage varient sur plus de 15 m de large selon le secteur, démontrant à quel point la cellule sédimentaire est dynamique (Illustration 91). La portion la plus au sud de la cellule est en particulier celle qui présente les variations les plus importantes.

Alors que la largeur de plage est restée relativement stable dans le secteur situé au centre de la baie à proximité des profils P2, P3 et P4, la cellule sédimentaire montre une dynamique saisonnière importante au niveaux de ses extrémités nord et sud.

Au niveau du profil P1, la largeur de plage varie entre 20 et 35 m sur toute la durée du suivi. En fin de carême, avant le début de la saison cyclonique (juillet-août), le stock sédimentaire est réduit et la largeur de plage atteint tout au plus 20 m de large. Après l'hivernage (mars-avril), ce secteur de la plage augmente en largeur sur une dizaine de mètres.

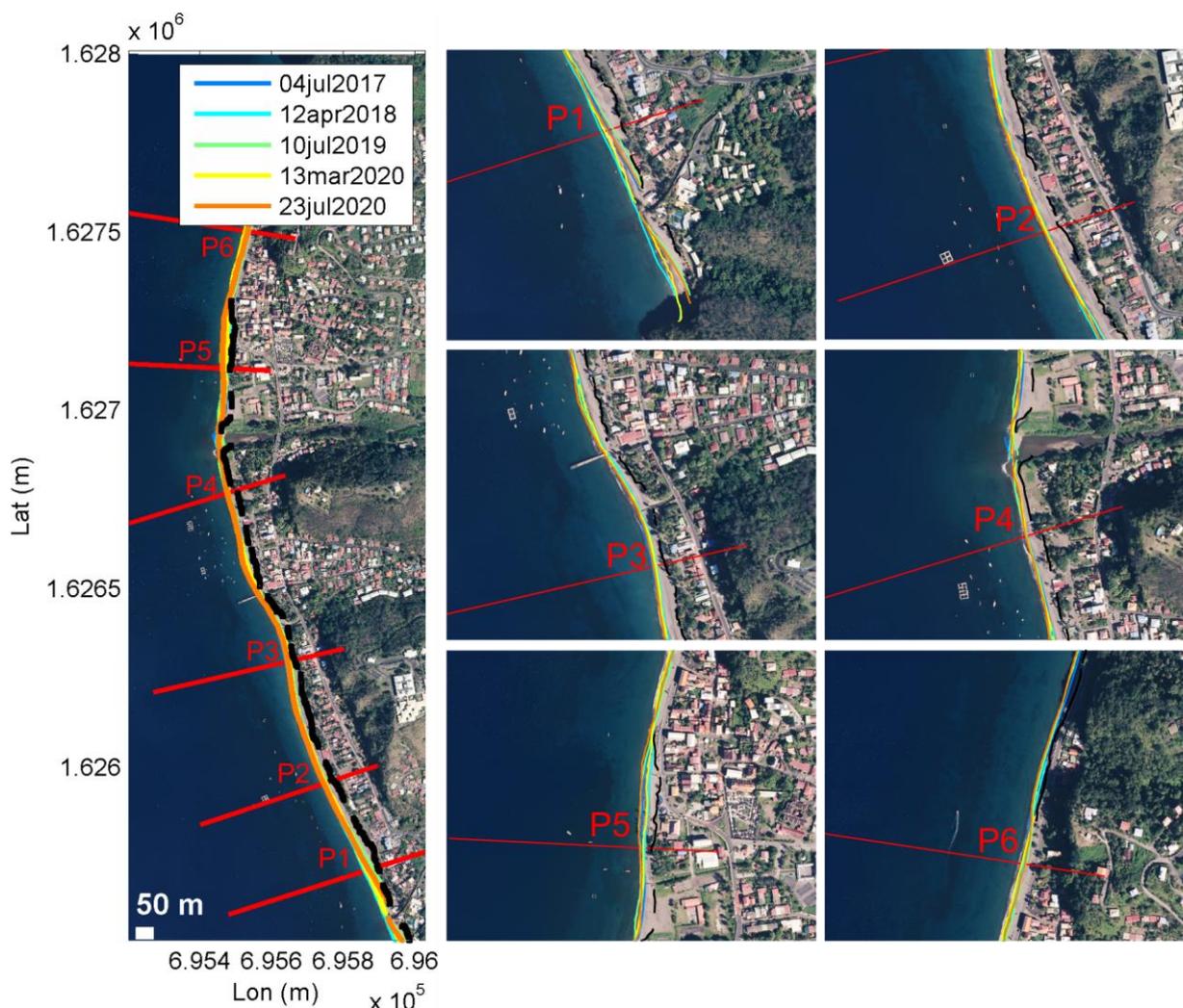


Illustration 90 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur la plage du Carbet. Le trait noir indique le haut de plage mesuré en mars 2020. Les trait rouges (P1 à P6) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

Alors que la dynamique observée est similaire autour du profil P6, avec toutefois des variations moins prononcées, les variations de la position du trait de côte autour des profils P3 et P5 montrent une dynamique inverse. Contrairement à ce qui peut être observé dans les secteurs de P1 et de P6, en fin de carême, le stock sédimentaire est plus important qu'à la fin de la période d'hivernage.

Il est également important de signaler que la plage du Carbet avait été particulièrement impactée lors des ouragans Irma et Maria en 2017 avec de façon plus brutale, un recul de la position du jet de rive sur 10 m entre juillet 2017 et avril 2018 sur la partie nord, en particulier à proximité des profils P3 et P5.

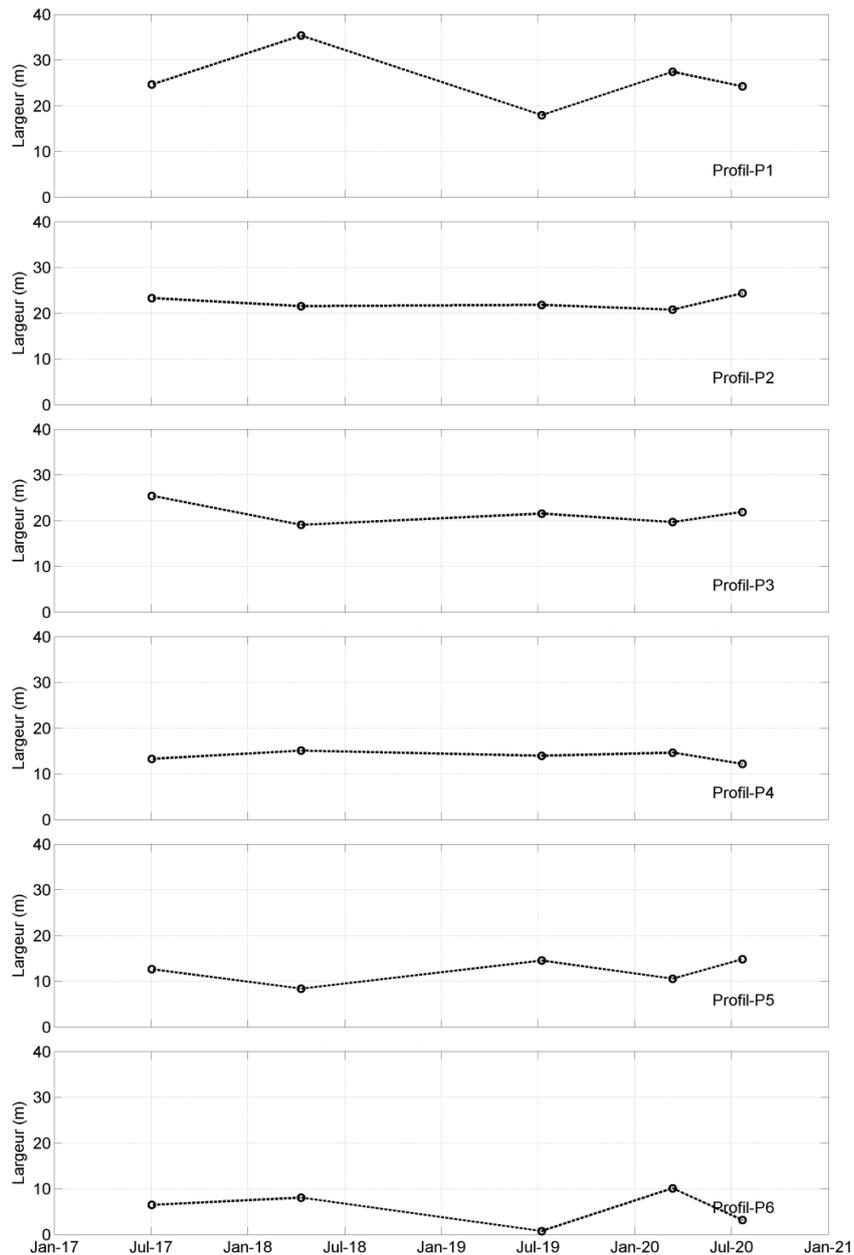


Illustration 91 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 à P6 sur la plage du Carbet. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Les changements de morphologies observés impliquent forcément d'importants mouvements sédimentaires. Des informations plus détaillées sur les évolutions morphologiques des profils de plage sont fournies par l'illustration 92. De façon assez visible, les profils de plage situés aux extrémités nord et sud de la cellule présentent une dynamique saisonnière très importante avec des variations qui peuvent atteindre plus de 30 m² au cours de la même année. Les profils P1 et P6 correspondent aux sections les plus dynamiques de la cellule sédimentaire.

En fin de période de Carême (juillet 2017, juillet 2019 et juillet 2020), le profil P1 est caractérisé par une forte pente (> 10 %) et une plage plus réduite en largeur (< 25 m). Au contraire en fin de période d'hivernage (janvier 2018, mars 2020), le profil de plage s'engraisse en sédiment, la plage devient plus large (> 30 m) et légèrement moins pentue. Ces évolutions morphologiques se traduisent également par des variations altimétriques localisée sur la portion immergée du profil de plage, à proximité du trait de côte et peuvent atteindre entre quelques décimètres et plus d'un mètre selon les secteurs de la cellule sédimentaire.

Dans le secteur de P2 et P3, au sud du ponton, à proximité du centre de la cellule sédimentaire, le profil de plage ne présente pas d'évolutions saisonnières significatives en comparaison aux extrémités de la baie. On observe au contraire une certaine stabilité de la morphologie du profil de plage. L'évolution de ces profils, est caractérisée par une érosion du haut de plage entre juillet 2017 et juillet 2020 (abaissement de 30 cm).

Au sud de la rivière, le profil P4 situé à proximité de l'embouchure a connu une forte accrétion sur le haut de plage (élévation de + 0.60 m) entre juillet 2017 et avril 2018 probablement relié à des précipitations exceptionnelles entre janvier et février 2018 engendrant potentiellement un apport important de sédiments localement et temporairement. D'après le bulletin climatique mensuel de Météo France, pendant le mois de février 2018, il est tombé plus du double de la quantité de pluie habituelle. Plus récemment, les observations réalisées montrent que la morphologie du profil de plage est restée assez stable entre juillet 2019 et juillet 2020.

Dans le secteur nord de l'embouchure de la rivière du Carbet, au niveau du profil P5, d'importants phénomènes d'érosion sont observés entre juillet 2017 et avril 2018, faisant suite à l'ouragan Maria, avec un recul du trait de côte sur plus de 5 m, relié à un abaissement général du profil de plage sur plusieurs dizaines de centimètres (~ 0.30 m). Depuis, ce secteur de la plage semble avoir retrouvé un équilibre et conserve une certaine stabilité dans sa morphologie entre mars 2019 et juillet 2020.

Malgré la présence des enrochements dans le secteur du profil P6, la dynamique reste assez significative avec des évolutions saisonnières similaires à celles décrites sur le profil P1 situé à l'extrémité opposée de la cellule sédimentaire.

La poursuite du réseau de suivi devrait permettre de mieux qualifier la dynamique littorale sur la plage du Carbet. En particulier, ce phénomène caractéristique de basculement du stock sédimentaire observé au niveau des extrémités nord et sud de la cellule, est probablement causé par un changement d'orientation des houles incidentes morphogènes.

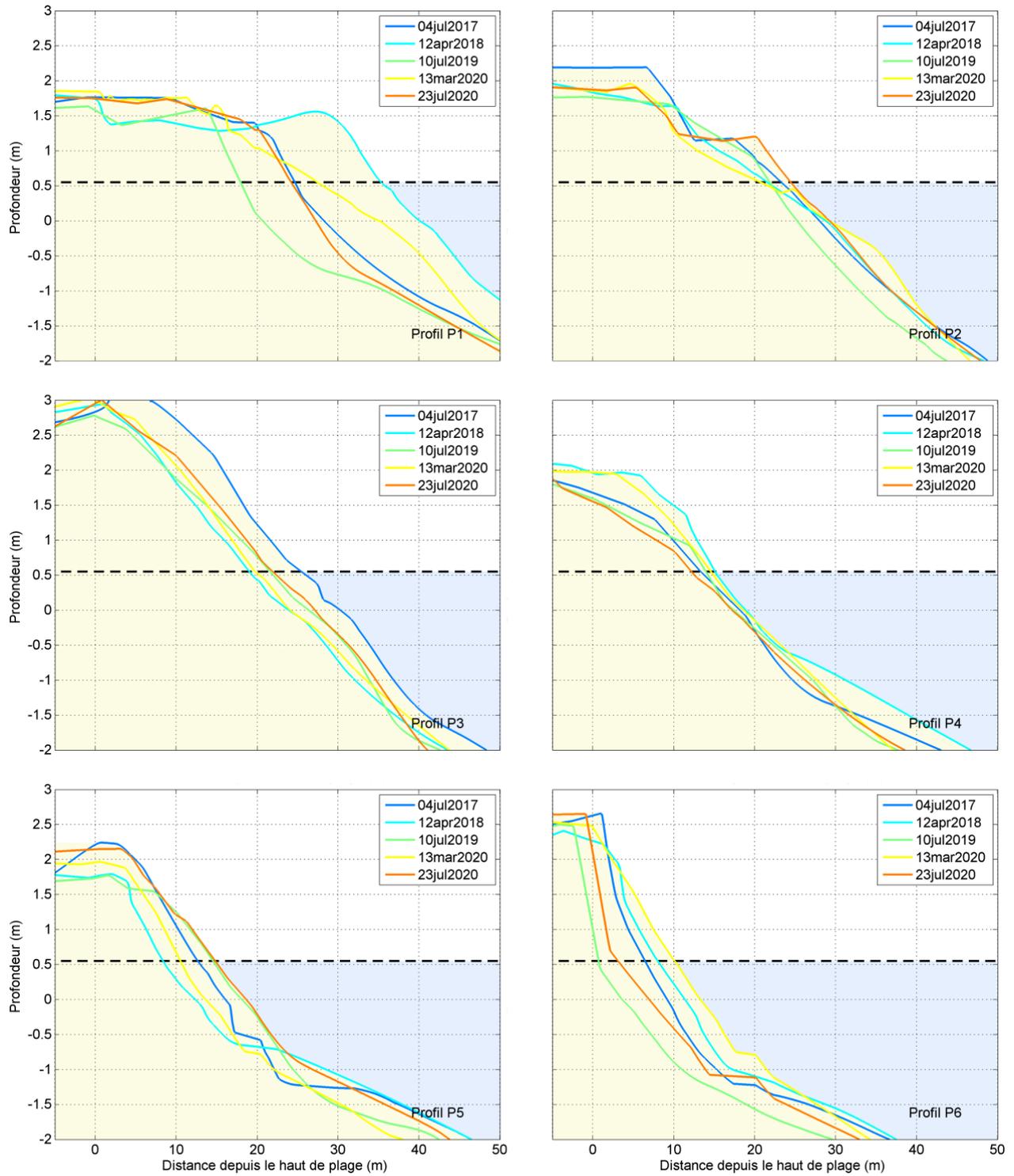


Illustration 92 : Évolution le long des profils de référence P1 à P6 sur la plage du Carbet en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

Suivi haute fréquence par imagerie vidéo

Les mesures topo-bathymétriques traditionnelles ne permettent pas de capturer toute la complexité de la dynamique sédimentaire de la plage du Carbet, 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. Le suivi vidéo, au contraire, peut fournir des données horaires sur l'évolution du trait de côte (section 2.3). Afin de mieux mettre en évidence les différentes échelles sur lesquelles évolue la dynamique de la plage du Carbet, nous proposons dans la suite de ce chapitre un suivi journalier de la position du trait de côte par imagerie vidéo.

• Conditions de vagues

Les caractéristiques des vagues sont issues du modèle *WaveWatchIII*, utilisé de façon opérationnelle pour la prévision des états de mer (<http://marc.ifremer.fr/>). Les données ont été extraites au niveau de l'isobathe 1400 m situé à environ 5 km au large de la plage du Carbet. Les vagues ont la majorité du temps des hauteurs significatives inférieures à 0.75 m et proviennent d'un secteur nord-nord-est à est-sud-est (Illustration 93), reflétant un climat de vagues dominé par les alizés. Si en moyenne on enregistre une hauteur significative et une période pic qui caractérise un climat de vagues faiblement énergétique (0.5 m et 9.5 s, respectivement), des événements de plus fortes vagues surviennent de façon événementielle généralement pendant la période cyclonique ou pendant l'hivernage, avec des vagues atteignant parfois des hauteurs supérieures à 1.5 m. Au cours de la période analysée, aucun événement majeur n'a été enregistré mais 11 événements classés comme énergétiques ($H_s > 1$ m pendant au moins 12 h) ont été répertoriés.

La variabilité saisonnière des conditions de vagues apparaît sur toute la gamme statistique (médiane, quartile, percentiles 10 et 90, Illustration 94). Les vagues présentent des caractéristiques similaires chaque année entre avril et août, pendant la période de carême, caractérisées par des hauteurs significatives moyennes comprises entre 0.3 à 0.5 m. De septembre à mars, pendant la période d'hivernage, les hauteurs significatives moyennes sont légèrement plus élevées et varient entre 0.4 et 0.65 m. De la même manière, la variabilité saisonnière ressort nettement sur les quartiles et percentiles supérieurs pour les mois situés entre septembre et mai qui apparaissent comme les plus énergétiques.

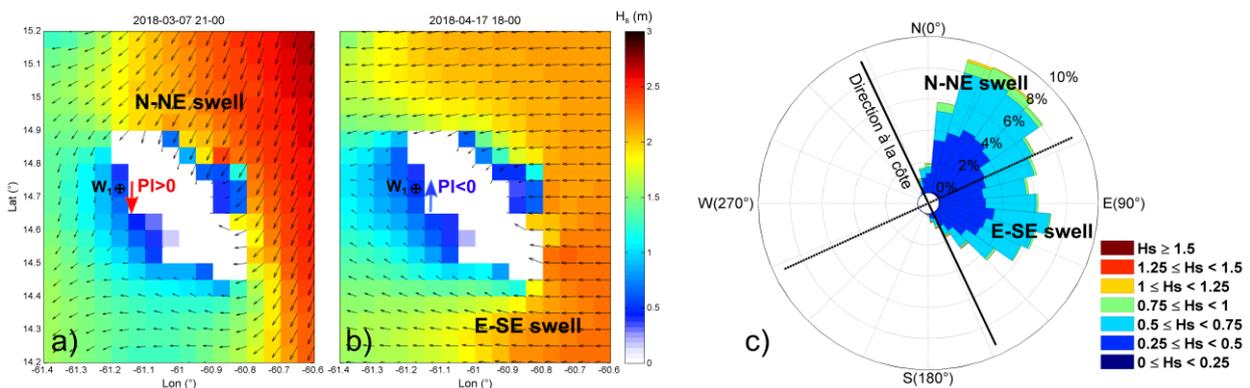


Illustration 93 : Caractéristiques des vagues au entre le 01-10-17 et le 01-06-20 (2.7 ans). Prévision des vagues pour une situation « classique » en période d'hivernage (a) et de carême (b). c) Diagramme directionnel en fréquence des hauteurs significatives des vagues (H_s). Simulations extraites à partir de <http://marc.ifremer.fr/>, configuration Antilles.

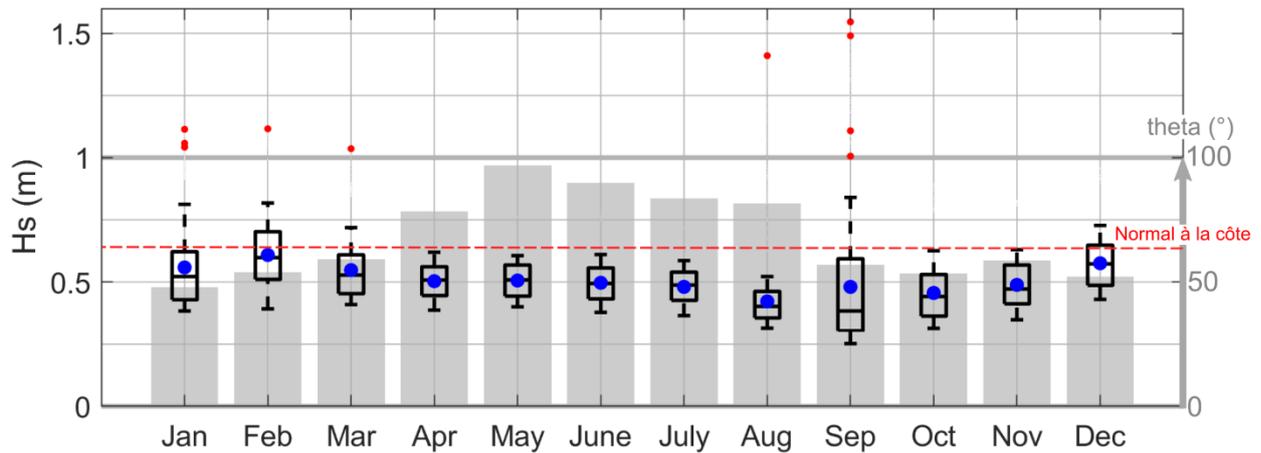


Illustration 94 : Diagramme en boîte mensuelle des hauteurs significatives des vagues simulées au large du Carbet (médiane, quartile, percentiles 10 et 90) entre le 01-10-17 et le 01-06-20 (2.7 ans). Les moyennes mensuelles sont représentées par les points bleus alors que les points rouges décrivent la hauteur significative des vagues simulées au cours des événements les plus extrêmes. Les barres grises représentent la direction moyenne de propagation des vagues.

Alors qu'entre septembre et mars les vagues ont plutôt tendance à provenir de la bande nord-nord-est avec des directions de propagation moyennes comprises entre 47° et 59° , les vagues proviennent plutôt de la bande est-sud Est avec des directions de propagation moyennes comprises entre 78° et 96° (barres grises, Illustration 94). Ainsi, on note une dominance des houles de nord pendant l'hivernage, entre septembre et mars, suggérant alors une importante contribution de la dérive littorale vers le sud au cours de cette période. Au contraire, pendant la période de carême, entre avril et septembre, la mer de vent générée par les alizés en provenance de l'est-sud-est suggère une importante contribution de la dérive littorale vers le nord.

• Evolution de la plage

Sur la plage du Carbet, l'évolution de la position du trait de côte est complexe car elle est très variable sur son linéaire et selon les échelles temporelles considérées. La plage du Coin est caractérisée par deux sous-cellules sédimentaires, séparées par des enrochements les rendant quasiment indépendantes l'une de l'autre. Dans la suite de ce paragraphe, les plages sont définies comme #1 pour la plage située au sud des enrochements et #2 pour la plage située au nord (Illustration 95a). Les plages #1 et #2 sont très dynamiques et peuvent présenter des morphologies très contrastées selon la saison. L'ensemble de la cellule adopte souvent une morphologie complètement linéaire avec une largeur de plage qui reste homogène entre les différents secteurs (T1 à T4, Illustration 95c). Au contraire les deux plages peuvent aussi montrer d'importantes disparités morphologiques entre les extrémités nord et sud où le secteur sud de chaque plage devient très étroit par rapport au secteur nord (T1 et T3, Illustration 95d).

Afin de mieux évaluer cette dynamique, les positions des différents traits de côtes ont été extraites à partir des images collectées par le dispositif de suivi vidéo mis en place depuis octobre 2017 (Illustration 11). La position du trait de côte a pu être relevée tous les jours à partir du 1^{er} octobre 2017 pendant 3.7 ans, sauf en cas de dysfonctionnement de la caméra ($\sim 10\%$ du temps, Illustration 9) avec une erreur maximale estimée entre ± 3 m et ± 6 m selon les précautions prises par l'opérateur. L'illustration 95b présente l'évolution de la largeur de plage sur les différents secteurs (points en couleur). Afin d'isoler la variabilité saisonnière de la position du trait de côte et d'en retirer les variations événementielles, un filtre de Hamming de demi-largeur 90 jours est appliqué (traits épais, Illustration 95b). Les évolutions observées peuvent être reliées aux caractéristiques des vagues (Illustration 95a) où la courbe noire illustre la hauteur significative

et les couleurs bleues et jaunes représentent la composante saisonnière de la direction de propagation des vagues (nord-nord-est et est-sud-est, respectivement).

Au début du suivi, entre octobre 2017 et janvier 2018 la plage est particulièrement large, homogène sur toute sa longueur et ne présente aucune évolution significative (Illustration 95b). Quelques semaines plus tard, entre le 25 janvier et le 7 mars, une série de 4 coups de mer consécutifs, où les vagues dépassent 0.75 m de hauteur significative en provenance du nord-nord-est viennent frapper le littoral du Carbet, entraînant une avancée significative de la position du trait de côte, provoquant un élargissement de la plage sur plus de 3 m sur le secteur T1 et dans une moindre mesure sur T3, au niveau des extrémités sud de chacune des plages (Illustration 95b, c).

La période entre avril et août 2018 est plus calme, avec des vagues qui restent inférieures à 0.5 m en provenance de l'est-sud-est. Sur ces 5 mois, alors que la position du trait de côte montre une certaine stabilité, voire une avancée sur les secteurs nord de chacune des plages (T2 et T4 Illustration 95b), les secteurs T1 et T2 présentent au contraire un recul constant très important qui atteint au total plus de 10 m (Illustration 95b). Ces évolutions très hétérogènes provoquent la rotation antihoraire de chacune des plages avec des secteurs très étroits localisés au niveau des extrémités sud (T1 et T3 Illustration 95d).

Les évolutions observées pendant le reste du suivi présentent les mêmes tendances que celles décrites ci-dessus où les périodes d'hivernage et de carême se succèdent et sont caractérisées par un forçage de vagues bien distinct de dominance nord-nord-est ou est-sud-est respectivement (Illustration 95a). Alors que les vagues de nord-nord-est générées pendant la période d'hivernage (entre octobre et février) provoquent un élargissement de la plage sur les secteurs de T1 et de T3 (entre 3 et 7 m), les vagues de est-sud-est qui dominent la période de carême, entraînent une érosion très importante (entre 4 et 13 m) de ces mêmes portions du littoral (Illustration 95b). A l'inverse, au niveau des secteurs T2 et T4, la période d'hivernage est plus favorable à l'érosion que la période de carême qui a tendance à générer localement une avancée de la position du trait de côte.

Sur le plus long terme, la plage présente une certaine vulnérabilité à l'érosion avec en moyenne une vitesse de recul estimée à plus de 2 m/an (tendance sur 3.6 ans). En particulier, les secteurs situés sur les portions les plus au sud présentent des vitesses de recul très significatives avec plus de 3 m/an sur la portion située à proximité de T3.

Le Tableau 3 présente la variabilité (écart type) de la hauteur significative des vagues et de la dynamique transversale du trait de côte, calculée sur différentes portions du littoral (secteurs T1 à T4). Les contributions de la variabilité interannuelle, saisonnière et événementielle sont calculées sous la forme d'un ratio pour chacune des variables analysées. La méthode est basée sur le travail effectué par Ruessink et al en 2009 où la composante interannuelle du signal a été obtenue en appliquant un filtre de Hamming de demi-largeur 365 jours. La différence entre le signal brut et le signal filtré est ensuite utilisée pour en isoler la variabilité saisonnière avec un filtre de Hamming sur une demi-largeur de 90 jours. La différence entre le signal brut et la somme des contributions obtenues à une échelle interannuelle et saisonnière donne alors une bonne estimation de la contribution événementielle du signal.

Alors que la variabilité des secteurs T2 et T4 qui correspondent à des secteurs situés au niveau des extrémités nord de chacune des plages reste inférieure à 3.5 m, la dynamique transversale de la position du trait de côte est plus importante (facteur 2) au niveau des extrémités sud, sur les secteurs T1 et T3, où elle atteint respectivement 5.5 m et 7.0 m. Sur chacun des secteurs analysés, la composante interannuelle de cette variabilité est bien représentée, notamment sur les secteurs T1, T3 et T4 où elle dépasse 40 % soit plus de 2 m en moyenne.

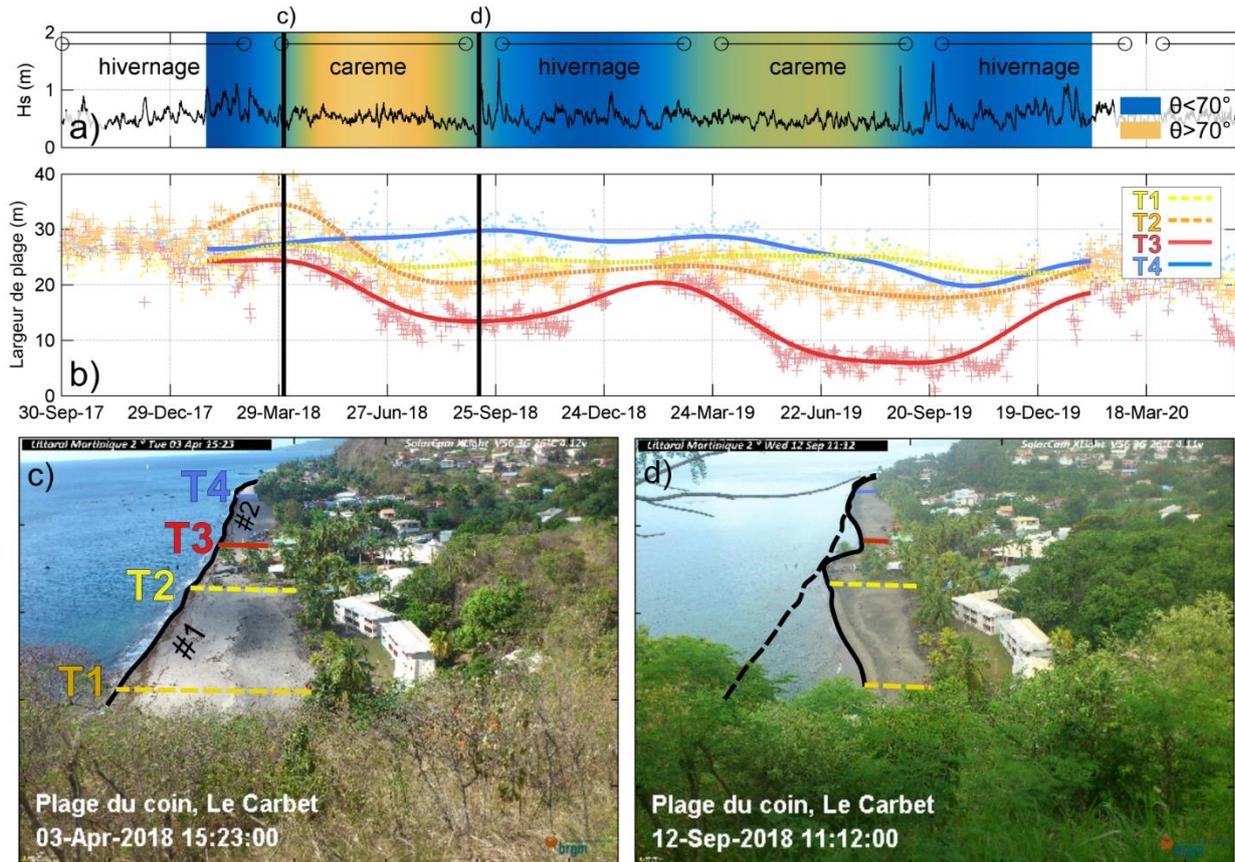


Illustration 95 : Séquence érosive observée sur la plage du Coin pendant la période de Carème entre avril (c) et septembre 2018 (d). a) Hauteur significative (trait noir) et composante saisonnière de la direction des vagues (couleurs) au point d'extraction du modèle WWIII. b) Evolution de la largeur de plage sur différents secteurs (cercles en couleur par transects) avec en traits épais la composante interrannuelle du signal. (c-d) séries d'images brutes permettant de visualiser l'évolution de la position du trait de côte entre les deux dates (selon les transects T1 à T4 et les plages #1 et #2) .

Si la dynamique interannuelle est importante, la composante saisonnière du signal reste dominante avec une contribution qui varie entre 40 % et 54 %. Cette contribution atteint son maximum sur le secteur de T3 avec 54 % et se caractérise par des variations sur la largeur de plage d'une amplitude qui excède 10 m. Au contraire, les variations saisonnières minimales enregistrées sont localisées autour de T2 avec une contribution à hauteur de 40 %.

Alors que la dynamique interannuelle et saisonnière sont largement dominantes, la dynamique événementielle observée sur la plage du Carbet reste négligeable sur la période étudiée avec une contribution qui reste inférieure ou égale à 15 % pour les secteurs associés aux profils T1, T3 ou T4, soit une variabilité de quelques dizaines de centimètres. Au niveau du secteur T2, la contribution événementielle apparaît plus importante avec 34 % mais reste négligeable en termes de dynamique (< 1 m), probablement associée à la précision de la mesure (géoréférencement, détection du jet de rive). Il convient toutefois de signaler que sur la série temporelle analysée, entre octobre 2017 et juin 2020, les événements cycloniques majeurs de ces dernières années (e.g. ouragans Maria) n'ont pas pu être pris en compte puisque le dispositif de suivi par imagerie vidéo n'avait pas été encore installé. A la suite de l'ouragan Maria, on rappelle que sur certains secteurs de la plage, une érosion très marquée avait pu être observée, notamment sur le secteur situé au sud du ponton (recul sur ~8 m).

Tableau 3 : Variabilité (écart type) de la hauteur significative des vagues et de la position du trait de côte calculées sur les secteurs T1, T2, T3 et T4. Contribution (%) de la variabilité totale par les composantes interannuelles, saisonnières et évènementielles du signal.

	variabilité (m)	interannuelle (%)	saisonnaire (%)	évènementielle (%)
H_s	0.14 m	20 %	46 %	34 %
T1	5.5 m	43 %	53 %	4 %
T2	2.4 m	24 %	40 %	36 %
T3	7.0 m	45 %	54 %	1 %
T4	3.4 m	44 %	41 %	15 %

Les observations réalisées sur la plage du Carbet montrent que la composante interannuelle domine la dynamique du trait de côte, avec une saisonnalité marquée entre les périodes de carême et d'hivernage. Le paragraphe suivant vise à décrire les mécanismes généraux associés à cette dynamique complexe.

Pour les deux plages indépendantes, la position d'équilibre théorique a été obtenue en moyennant dans le temps chacune des positions du trait de côte (X_{tdc}). Afin de quantifier un recul ou une avancée du trait de côte à partir des images, l'écart (ΔX_{tdc}) par rapport à cette position d'équilibre théorique est calculé pour chacune des dates analysées.

L'illustration 96c présente l'évolution de la dynamique saisonnière du trait de côte en fonction de la position *longshore* (latitude) et permet d'analyser les échanges latéraux entre les différents secteurs de la plage. Afin de mieux mettre en évidence ces échanges et le mécanisme de rotation de plage, l'évolution temporelle de la direction moyenne (°) du trait de côte est fournie par l'illustration 96b pour la plage #1 (gris) et la plage #2 (noir). Les évolutions observées peuvent être reliées aux caractéristiques des vagues (Illustration 96a) où la courbe noire illustre la hauteur significative et la courbe bleue représente la composante saisonnière de la direction de propagation des vagues ($\theta < 70^\circ$ pour des vagues en provenance du nord-nord-est et $\theta > 70^\circ$ pour des vagues en provenance de l'est-sud-est).

De façon très marquée, les dynamiques de rotation des plages #1 et #2 présentent des caractéristiques identiques avec une direction moyenne du trait de côte positive entre novembre et mars et négative entre juin et décembre (Illustration 96b). Ce phénomène de rotation est complètement relié à la direction de propagation des vagues où les houles de nord-nord-est (qui dominent la période d'hivernage) ont tendance à provoquer une rotation horaire. Au contraire, la mer de vent en provenance de l'est-sud-est (qui domine la période de carême) a tendance à induire une rotation antihoraire de la plage. Les observations réalisées montrent que l'érosion d'une extrémité de la plage est suivie par une accrétion à l'extrémité opposée, traduisant des échanges sédimentaires entre les différents secteurs (Illustration 96c). Ce mécanisme est provoqué par le sens de la dérive littorale qui évolue en fonction des saisons et qui génèrent des transferts latéraux du stock sédimentaire.

Ces analyses montrent que la largeur de la plage peut varier sur plus d'une dizaine de mètres selon les secteurs, provoquant un phénomène complexe de rotation. Il est très important de comprendre que ces oscillations sont complètement naturelles et que le sable est simplement transporté temporairement vers d'autres secteurs de la plage. A la prochaine saison, la plage retrouvera une situation semblable à celle qu'elle a connu l'année d'avant. Bloquer ce phénomène naturel aura inévitablement des répercussions très importantes sur les secteurs voisins.

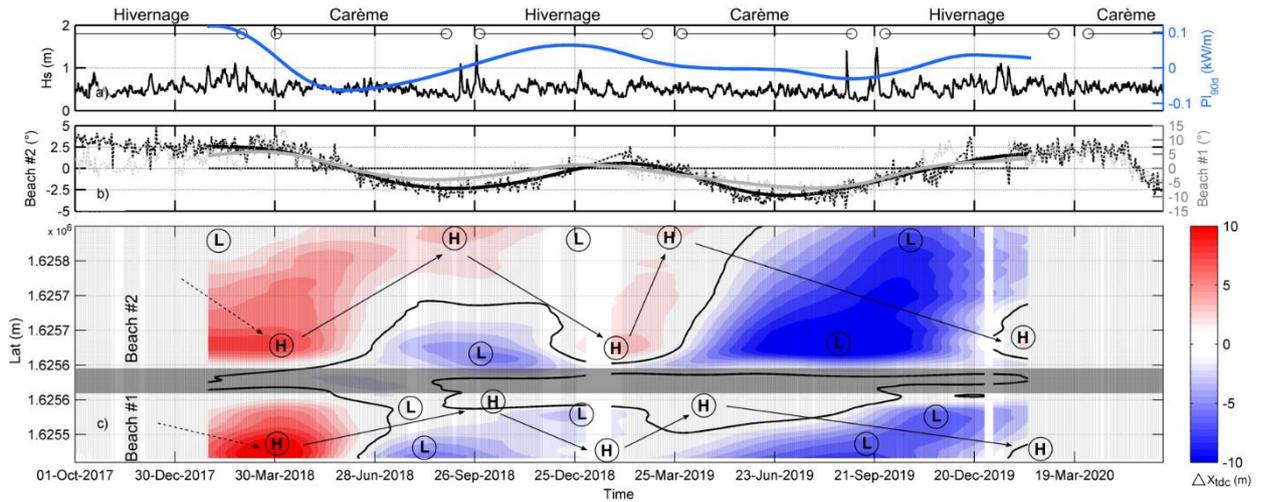


Illustration 96 : Dynamique saisonnière du trait de côte sur le Le Carbet. (a) Hauteur significative des vagues (Hs) et composante saisonnière de la direction des vagues (θ_{90d}) simulées au large. (b) Direction moyenne de la plage #1 (gris) et de la plage #2 (noir) avec en traits épais les composantes saisonnières du signal. (c) Evolution interannuelle de la position du trait de côte en fonction de la latitude. $[H]$ et $[L]$ désignent respectivement les secteurs où la largeur de plage apparaît en excès et en défaut. Les échanges sédimentaires sont schématisés par $[H] \rightarrow [H]$.

3.15. ANSE CERON (LE PRECHEUR)

Introduction

La plage de l'anse Céron est située sur la commune du Prêcheur au nord-ouest de la Martinique (Illustration 97, à gauche). Cette cellule sédimentaire indépendante s'étend sur 500 m de long, elle est délimitée par une côte rocheuse au sud-ouest et une falaise escarpée au nord-est. Alimentée par une rivière, Anse Céron est majoritairement composée de sables fins (Illustration 97, à droite) même si des sédiments plus grossiers (galets) peuvent également être présents sur certaines portions de la cellule sédimentaire, en particulier au sud. La baie est orientée vers le nord-ouest, elle est exposée à un climat de vagues énergétiques lors des épisodes de fortes houles en provenance du nord (Illustration 98).

Lors d'éruptions volcaniques explosives comme celles qu'a subi la Montagne Pelée (1902, 1929), les reliefs, les versants, les rivières et la zone littorale à proximité de l'anse Céron ont été recouverts par des matériaux volcaniques de toute nature (apports primaires). Après l'éruption, l'érosion des versants, les mouvements de terrain et le transport solide parfois intense dans les cours d'eau remobilisent ces matériaux qui sont alors transportés jusqu'au littoral par les embouchures (apports secondaires). Enfin, les courants côtiers redistribuent ces matériaux le long du littoral (apports tertiaires), notamment à proximité de la plage de l'anse Céron dont la morphologie actuelle a été largement influencée par l'activité volcanique de la Montagne Pelée et en particulier à la suite de l'éruption de 1902 (rapport BRGM/RP-68341-FR, 2019).

Les observations et les photographies prises sur le terrain permettent de souligner à quel point la plage de l'anse Céron est dynamique et que ses évolutions sont principalement contrôlées par l'énergie des vagues. De façon occasionnelle (une dizaine d'occurrences par an), une houle de nord dont la hauteur significative peut atteindre plus de 2 m déferle sur la côte (Illustration 98). Des marqueurs d'érosion sont d'ailleurs souvent visibles sur l'arrière plage avec une berme qui peut être plus ou moins prononcée accompagnée d'une érosion sur le bas de plage. Le haut de plage est délimité par de la végétation arborée.



Illustration 97 : (à gauche) - Vue en plan montrant la localisation de l'anse Céron (Prêcheur). (à droite) - La plage est composée de sables fins d'origine volcanique issue de l'activité récente de la montane Pelée. Photographie prise pendant la campagne de mesure en juillet 2020.



Illustration 98 : vagues de plus de 2 m déferlant à anse Céron le 28 octobre 2019 faisant suite au passage d'une dépression sur le bassin Nord-Atlantique.

Evolution du trait de côte

Les analyses réalisées au cours d'une précédente étude (rapport BRGM/RP-68341-FR, 2019) ont pu montrer que la portion du littoral située entre l'anse Céron et les Abymes (pointe située à 3.5 km au sud de l'anse) présente sur le long terme des taux de recul parmi les plus prononcés de l'île (plus de 100 m en 30 ans sur certains secteurs). Ces secteurs littoraux sont essentiellement caractérisés par des sédiments très récents, issus de l'activité volcanique de la Montagne Pelée, plus facilement mobilisables que les apports sédimentaires classiques qui constituent habituellement les plages. Sur la plage de l'anse Céron, la position du trait de côte est en revanche restée relativement stable entre 1951 et 2017, par rapport à ce qui a pu être observé sur d'autres secteurs avec des variations maximales enregistrées inférieures à 10 m.

La position du trait de côte est extraite à différentes dates à partir des campagnes de mesures réalisées (Illustration 100). Initialement, en juillet 2019 (trait bleu), la plage est assez étroite (> 6 m) sur l'ensemble du linéaire côtier. En fonction des levés réalisés, entre 2017 et 2020, les observations montrent que sur certaines portions de plage, la position du trait de côte varie entre 5 et 15 m selon le secteur, démontrant à quel point la cellule sédimentaire est dynamique. Sur le secteur sud-ouest de la baie, à proximité du profil P2, alors que la position du trait de côte se situe à environ 10 m de la limite de végétation (trait noir) en juillet 2019, la plage gagne plus de 5 m de large jusqu'en mars 2020. Plus récemment, en juillet 2020, on observe que ce même secteur a connu une érosion significative où la plage a perdu une dizaine de mètres de large. Au contraire le secteur situé à proximité du profil P1 est resté plus stable sur toute la durée du suivi.

L'évolution temporelle de la largeur de plage permet de caractériser sa dynamique à l'échelle interannuelle et saisonnière (Illustration 101). Alors que la largeur de plage est restée relativement stable sur le secteur situé au centre de la baie, à proximité de P1, la cellule sédimentaire montre une dynamique saisonnière importante au niveaux de ses extrémités nord-est et sud-ouest. Au niveau du profil P2, la largeur de plage varie entre 5 et 15 m sur toute la durée du suivi. En fin de Carême, avant le début de la saison cyclonique (juillet-août), le stock sédimentaire est faible et la largeur de plage atteint moins de 10 m. Après l'hivernage (mars-avril), ce secteur de la plage augmente en largeur sur ~ 5 m.

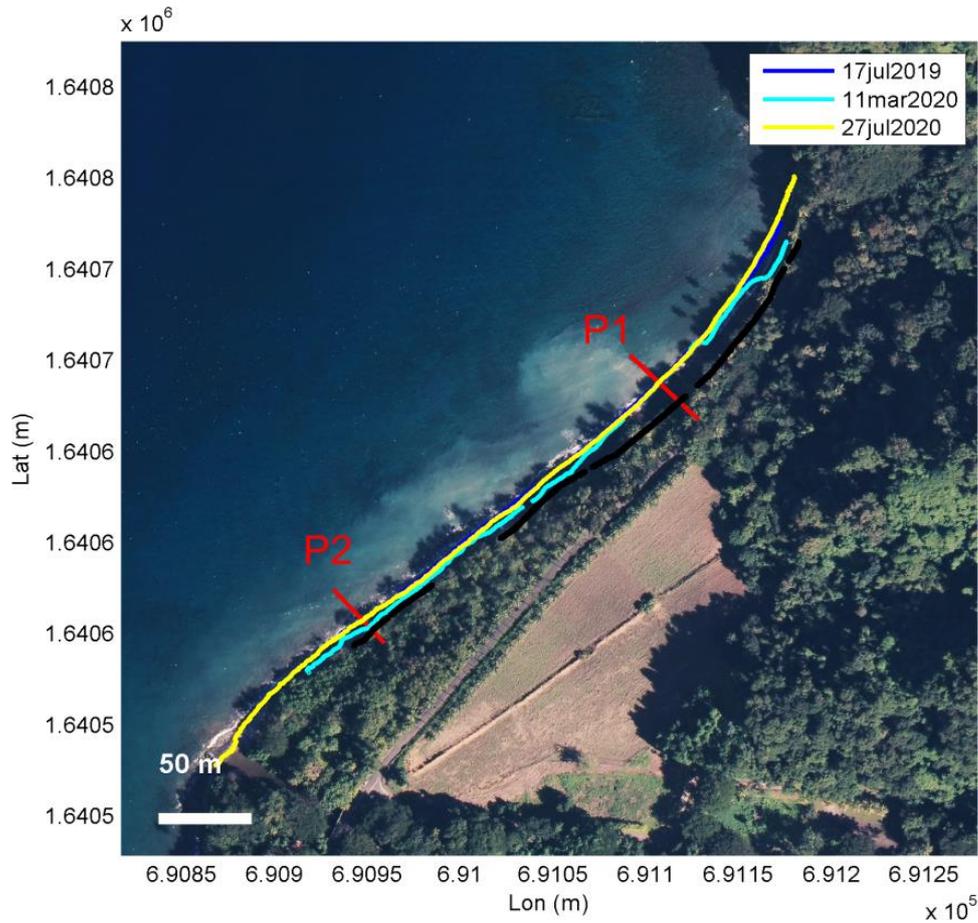


Illustration 99 : Position du trait de côte mesurée par DGPS à différentes dates sur anse Céron. Le trait noir indique le haut de plage (limite de végétation) mesurée en mars 2020. Les trait rouges (P1 et P2) présentent la localisation des profils de références. Fond de carte : orthophoto 2017 (IGN).

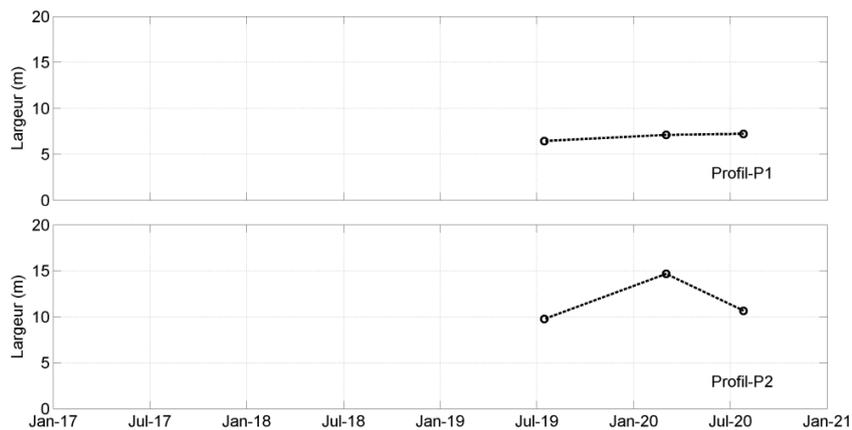


Illustration 100 : Évolution de la largeur de plage calculée à partir des différents profils de référence P1 et P2 sur anse Céron. La largeur de plage est déterminée par la distance entre la limite du haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020) et le jet de rive.

Déplacements sédimentaires saisonniers et annuels

Au regard des données disponibles, la dynamique saisonnière des différents profils de plage semble remarquable, en particulier au niveau des extrémités sud-ouest et nord-est de la cellule (Illustration 101). Sur le secteur situé le plus au sud, au niveau du profil P2, le stock sédimentaire disponible en fin de période de Carême, au début de la saison cyclonique (juillet 2019 et juillet 2020) est nettement inférieur au stock disponible à la fin de la période d'hivernage (mars 2020). Cette variation saisonnière du stock sédimentaire se répercute inévitablement sur la largeur de la plage qui varie alors sur ~ 5 m. Ces évolutions sont à chaque fois reliée à des variations altimétriques du profil de plage (jusqu'à 0.50 m), en particulier localisée sur le bas de plage (portion immergée). A l'inverse, sur le secteur situé au niveau du profil P1, le stock sédimentaire présente une certaine stabilité.

Toutefois, le jeu de données topo-bathymétriques disponibles à ce jour (trois campagnes de mesures entre 2019 et 2020) ne nous permet pas d'établir un diagnostic précis de la dynamique saisonnière et interannuelle du site de l'anse Céron. La poursuite du réseau de suivi est indispensable pour à terme mieux qualifier la dynamique littorale sur ce site.

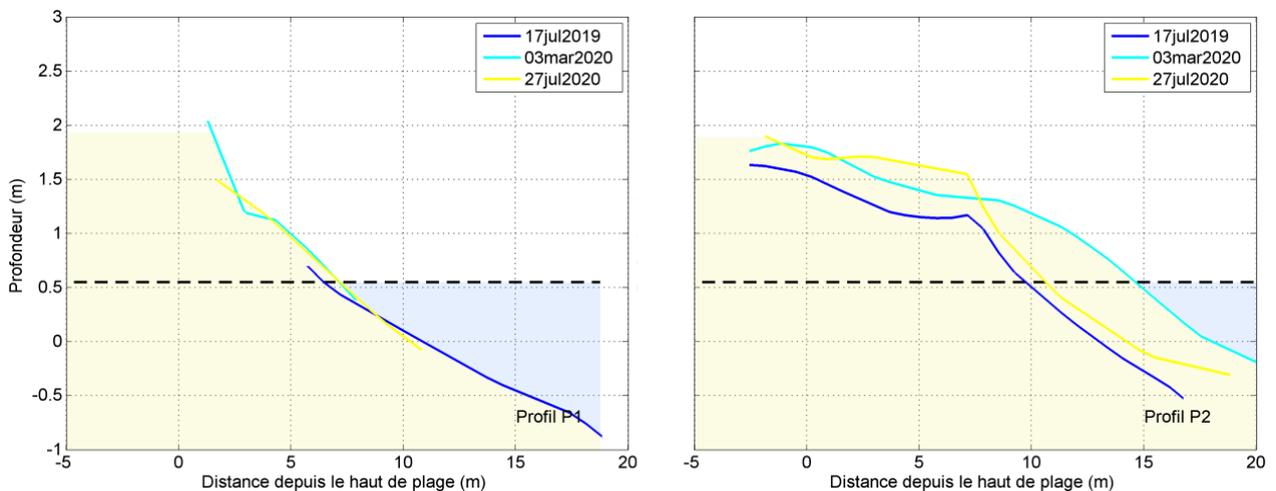


Illustration 101 : Évolution le long des profils de référence P1, P2 sur anse Céron en fonction de la distance depuis le haut de plage (ici la limite de végétation mesurée en mars 2020).

Suivi haute fréquence par imagerie vidéo

Comme sur la plage du Carbet, le système de suivi par imagerie vidéo mis en place sur la plage de l'anse Céron, permet de fournir des informations à haute fréquence sur l'évolution de la cellule sédimentaire. Un suivi journalier de l'évolution de la position du trait de côte sur une zone située à proximité du dispositif de suivi (secteur nord-est de la cellule sédimentaire) a été effectué (Illustration 102).

Contrairement aux images capturées par le dispositif mis en place au Carbet (3.14), on note ici que l'angle de vue de la caméra peut varier plus ou moins dans le temps pour différentes raisons (vent, évolution de la végétation, maintenance de l'appareil). Un décalage même faible de l'orientation de la caméra peut entraîner des erreurs de géoréférencement post-acquisition. Ainsi, Les analyses produites sur l'anse Céron ont été effectuées sur une quantité restreinte d'images.

Afin de compléter ces observations, les caractéristiques des vagues ont été extraites au niveau de l'isobathe 800 m située à environ 3 km au large de la plage de anse Céron (simulations du modèle *WWIII*, configuration Antilles, <http://marc.ifremer.fr/>).

Les images à disposition montrent que l'évolution de la position du trait de côte est complexe car elle est très variable spatialement sur le linéaire de la plage et selon les différentes échelles temporelles considérées (Illustration 102). Sur le court-terme, au cours des épisodes les plus énergétiques (houle de nord), le secteur nord-est de la plage montre généralement un recul significatif (~ 5 m). Ainsi la morphologie de la cellule sédimentaire est souvent très différente au cours de la même année où le secteur nord de plage est plus large en avril qu'en janvier (Illustration 102b, c et d). La récurrence des épisodes de houle de nord concentrée entre le mois de septembre et le mois de janvier semble provoquer sur ce secteur un recul plus marqué que pendant la saison de Carême au cours de laquelle la plage semble se recharger de façon tout à fait naturelle (entre mars et juin 2020, Illustration 102).

La poursuite du réseau de suivi devrait permettre de mieux qualifier la dynamique saisonnière du trait de côte sur ce site. En particulier, un phénomène caractéristique d'un basculement du stock sédimentaire de la plage causée par un changement d'orientation des houles incidentes morphogènes est possible.

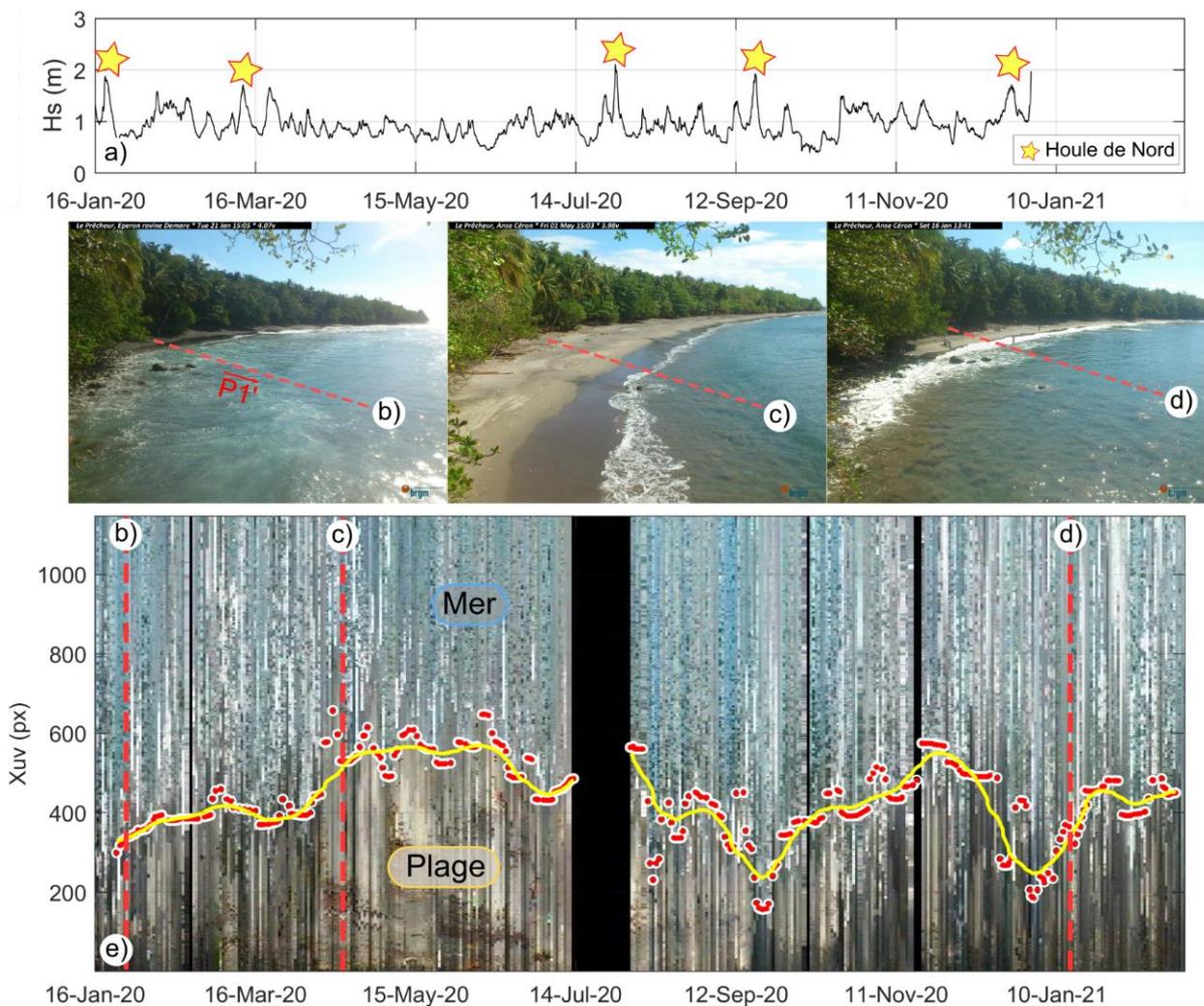


Illustration 102 : a) Evolution de la hauteur significative des vagues simulées au large de la plage de l'anse Céron (simulations extraites du modèle WWIII, plateforme MARC, configuration Antilles). Les étoiles signalent les événements énergétiques de type « houle de nord ». b-d) Images capturées par le dispositif à environ 6 mois d'intervalle entre le 16 janvier 2020 et le 21 janvier 2021. e) Représentation visuelle (timestack) de l'évolution de la position du trait de côte le long du profil Xuv (b). Les bandes noires correspondent aux périodes d'inactivité du dispositif de suivi photo.

4. Vue d'ensemble sur le réseau de suivi

Il reste encore difficile de proposer une vue d'ensemble du réseau de suivi sur une telle variété de plages caractérisées par des géomorphologies et des conditions hydrodynamiques très différentes. Contrairement à certains types de côtes définies par de grands linéaires sableux, comme sur la côte Aquitaine (rapport BRGM/RP-67152, 2018) ou sur la côte Catalane (rapport BRGM/RP-63774-FR, 2014), le littoral martiniquais se dessine sous la forme d'une succession de baies, de caps et d'anses, orientées vers toutes les directions et donc exposés à des climats de vagues très variés. Cette diversité se retrouve dans la géomorphologie des plages, dont les caractéristiques (géologie, typologie, stock sédimentaire, granulométrie, évolution, résilience, enjeux) restent très spécifiques au sein de chacune des cellules sédimentaires. La généralisation de l'aléa érosion à grande échelle (par exemple à l'échelle d'une commune) risquerait de simplifier de façon démesurée la complexité et la singularité qui composent le paysage littoral martiniquais.

Néanmoins, devant autant de diversité et dans le contexte actuel de montée des niveaux marins, la mise à disposition d'éléments de comparaison inter-sites, notamment afin d'évaluer la vulnérabilité de certains d'entre eux devient de plus en plus incontournable. Dans ce chapitre, nous présentons sous une forme synthétique des éléments de comparaison et de discussion sur quelques indicateurs qui comprennent la typologie, la dynamique et la capacité naturelle de résilience de chacune des 15 cellules sédimentaires. L'objectif de cette analyse est d'apporter une vision d'ensemble sur les plages suivies par l'Observatoire.

4.1. VERS LA CONSTRUCTION D'UN INDICATEUR DE VULNERABILITE

Bien qu'aucun indicateur quantitatif ne permette aujourd'hui de définir avec précision la situation d'une zone côtière face au changement climatique, certains outils peuvent être utilisés pour fournir une évaluation synthétique de la résilience des littoraux (Gornitz et al., 1994; Pendleton et al., 2012; Thieler and Hammar-Klose, 1999). Pour chacun des sites suivis par l'Observatoire, un indicateur de vulnérabilité des zones littorales (IVL) a été mis en place avec l'objectif de résumer simplement l'information issue des différentes campagnes de mesure.

L'indicateur a été adapté de Pendleton et al. (2012) et combine la typologie du système côtier, sa dynamique et sa capacité naturelle à s'adapter aux conditions environnementales changeantes (résilience naturelle). Cet indicateur permet d'obtenir une mesure quantitative, bien que relative, de la vulnérabilité des sites suivis par l'Observatoire. La méthodologie se concentre sur quatre variables essentielles de la dynamique littorale dont les contributions influencent l'évolution du risque d'érosion et la résilience d'une plage sur le moyen terme (10 – 20 ans) :

- (1) la typologie côtière (falaise, côte rocheuse, plage sableuse, mangrove) ;
- (2) la largeur de plage (mesure la plus récente) ;
- (3) l'élévation du sol en arrière plage (mesure la plus récente) ;
- (4) l'évolution de la position du trait de côte (tendance depuis la mise en place du suivi).

Les variables choisies prennent alors en compte d'une certaine façon (1) la résistance relative d'une typologie côtière à l'érosion, (2) la tendance d'évolution du trait de côte calculée sur les trois dernières années, (3 et 4) sa résilience face à une érosion chronique ou aux tempêtes. Un système de classement relatif simple permet d'intégrer ces quatre variables dans une équation qui produit l'indicateur (IVL). La construction de l'indicateur est basée sur celle proposée par Pendleton et al. (2012) et a été adaptée pour s'intégrer au contexte martiniquais. Une valeur de

vulnérabilité relative comprise entre 1 et 5 (1 pour très faible vulnérabilité, 5 pour très forte vulnérabilité) a été attribuée pour chacune des variables décrites plus haut selon le Tableau 4.

Nous rappelons également que les mesures effectuées au cours des différentes campagnes de suivi prennent en compte de manière intrinsèques les échouages de sargasses, les interventions de nettoyage ou l'influence des ouvrages de protection. Ainsi, l'indicateur de vulnérabilité « naturel » prend forcément ces critères en compte qui sont inévitablement des facteurs d'évolution.

Tableau 4 : Système de classement relatif pour chacune des variables évaluées. La classification est basée sur celle proposée par Pendleton et al. (2012) et a été adaptée pour s'intégrer au contexte martiniquais.

Variables	Très faible 1	Faible 2	Moyen 3	Forte 4	Très forte 5
Typologie côtière (<i>M</i>)	Falaise	Côte rocheuse	Côte mixte	Plage sableuse	Mangroves
Largeur (<i>W</i>) en m	$W \geq 20$	$20 < W \leq 15$	$15 < W \leq 10$	$5 < W \leq 10$	$W \leq 5$
Élévation (<i>Z</i>) en m	$Ds \geq 3$	$3 < Z \leq 2.5$	$2.5 < Z \leq 2$	$2 < Z \leq 2.5$	$Z \leq 1.5$
Vitesse de recul (<i>Ds</i>) en m/an	$Ds \geq 1.5$	$0.5 < Ds \leq 1.5$	$-0.5 < Ds \leq 0.5$	$-1.5 < Ds \leq -0.5$	$Ds \leq -1.5$

l'IVL est calculé selon Pendleton et al. (2012), comme le produit des valeurs attribuées (comprises entre 1 et 5) pour chacune des variables évaluées :

$$IVL = \sqrt{M \cdot W \cdot Z \cdot Ds / 6},$$

où *M* est l'attribut pour la typologie côtière, *W* pour la largeur de plage, *Z* pour l'élévation de la limite de végétation et *Ds* pour l'évolution du trait de côte calculée depuis la mise en place du suivi.

4.2. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS

Le Tableau 5 présente les résultats obtenus à la fois en termes de valeurs quantitatives et d'attributs pour chacune des variables évaluées. L'IVL est d'abord calculé pour chacun des profils puis moyenné sur l'ensemble des profils d'une même cellule sédimentaire afin de donner une valeur globale pour chacune des plages suivies par l'Observatoire. Une plage où la vulnérabilité est maximale a un IVL élevé (5.6 au maximum) tandis qu'une plage où la vulnérabilité est minimale présente un IVL faible (0.5 au minimum). Afin de mieux visualiser l'ensemble des résultats, l'illustration 103 présente les valeurs d'IVL obtenues par profil et en moyenne sur chaque plage. Ainsi, les sites qui présentent le plus fort indice de vulnérabilité sont :

- anse la Richer (4.2)
- anse Cosmy (3.6)
- anse Four à chaux (3.7)
- anse au Bois (5.2)
- anse Michel (5.2)
- plage de Dizac (3.7)

De façon plus spécifique, avec des vitesses de recul qui excèdent 2 m/an sur certains profils et une résilience a priori très faible (plage très étroite, faible hauteur par rapport au niveau de la mer), les plages de l'anse aux Bois et de l'anse Michel présentent les plus fortes valeurs de vulnérabilité et font alors parties des plages les plus exposées aujourd'hui à l'aléa érosion.

Si au contraire certains sites présentent un IVL relativement faible, comme sur l'anse Charpentier, anse l'Etang, Chez Fréfré, Les Salines ou sur la plage du Carbet, il est important de souligner à

quel point les résultats peuvent être contrastés au sein d'une même cellule sédimentaire. Par exemple, sur la plage de l'anse Charpentier, alors que sur les secteurs situés au nord de la cellule sédimentaire (P1 and P2) présentent un IVL faible avec une plage relativement large ($W > 20$ m) et une dynamique qui tend vers un élargissement progressif de la plage, le secteur situé au sud de la cellule présente une vitesse de recul significative ($Ds < -1$ m) et une plage beaucoup plus étroite ($W < 15$ m). L'IVL estimé dans ce secteur est de 3.5 soit le double de ceux évalués dans les autres secteurs. Autre exemple sur la plage des Salines où certaines portions présentent une dynamique d'accrétion tandis que le secteur situé le plus au sud présente un IVL très élevé à 5.0 avec des vitesses de recul estimées à plus de 1 m/an.

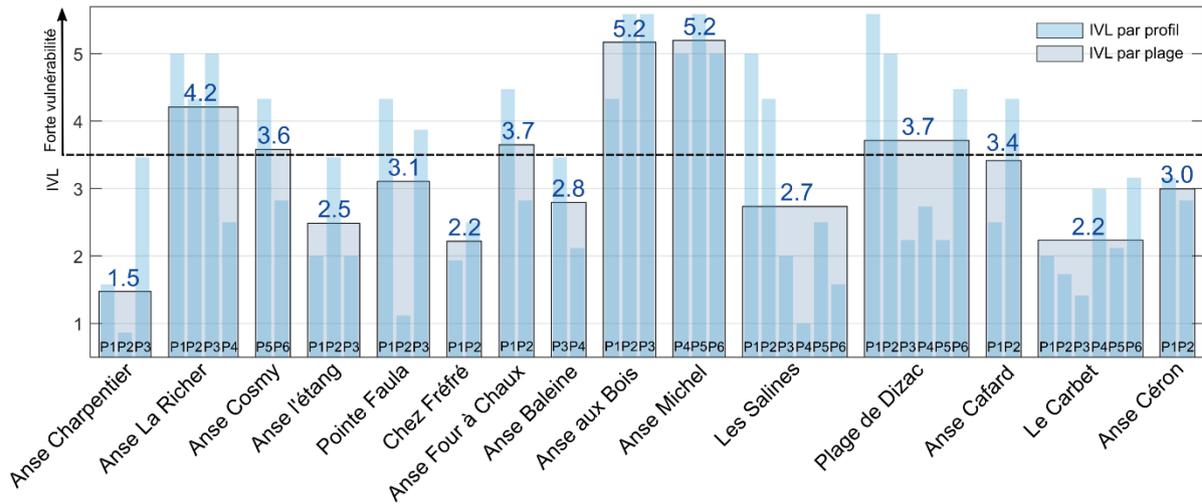


Illustration 103 : Indicateur de vulnérabilité (IVL) calculé par profil et par plage. Une plage où la vulnérabilité face au phénomène d'érosion est maximale a un IVL élevé (5.2 au maximum), tandis qu'une plage où la vulnérabilité est minimale présente un IVL faible (1.5 au minimum).

Les résultats présentés ici constituent une indication synthétique de la vulnérabilité des sites suivis face à l'aléa érosion et sont basés sur les observations réalisés depuis la mise en place de l'Observatoire. L'IVL ne se substitue en aucune façon aux résultats obtenus et décrits au paragraphe 3 de ce rapport.

Tableau 5 : Indicateur de vulnérabilité (IVL) calculé par profil et par plage. Une plage où la vulnérabilité face au phénomène d'érosion est maximale a un IVL élevé (5.6 au maximum) tandis qu'une plage où la vulnérabilité est minimale présente un IVL faible (0.5 au minimum). La variable N indique le nombre d'observations réalisés pour le calcul de l'indicateur d'évolution du trait de côte.

		Indicateur de vulnérabilité (IVL)						Variable quantitative						
		Site	Profil	M	W	Z	Ds	Max IVL	Mean IVL	Min IVL	W (m)	Z (m)	Ds (m/y)	N (val)
								5,6	3,0	0,5				
							Score	Beach Score						
Atlantique Nord	Charpentier	P1	4	1	5	2	1,6	1,5	28	1,8	1,4	5		
		P2	4	1	3	1	0,9		21	2,5	2,6	5		
		P3	4	3	4	4	3,5		12	1,8	-1,3	5		
	La Richer	P1	4	5	5	4	5,0	4,2	0	0,3	-0,9	4		
		P2	4	5	5	3	4,3		2	1,0	-0,2	4		
		P3	4	5	5	4	5,0		4	1,2	-0,8	4		
		P4	4	5	5	1	2,5		5	0,8	2,0	4		
	Anse Cosmy	P5	4	5	5	3	4,3	3,6	1	0,6	-0,2	5		
		P6	4	4	4	2	2,8		6	1,6	1,0	5		
	Anse Etang	P1	4	2	2	4	2,0	2,5	19	2,7	-0,9	3		
		P2	4	4	4	3	3,5		8	2,0	-0,4	3		
		P3	4	4	4	1	2,0		6	1,8	2,7	3		
	Atlantique Sud	Pointe Faula	P1	4	3	5	5	4,3	3,1	11	1,5	-2,7	5	
			P2	4	1	5	1	1,1		25	0,9	2,4	5	
			P3	4	4	5	3	3,9		10	1,2	-0,5	5	
Chez Fréfré		P1	4	3	5	1	1,9	2,2	14	1,1	7,1	5		
		P2	4	5	5	1	2,5		2	1,2	4,2	5		
Anse Four à Chaux		P1	4	4	5	4	4,5	3,7	7	1,5	-1,4	5		
		P2	4	4	4	2	2,8		9	2,0	-0,6	5		
Anse Baleine		P3	4	4	3	4	3,5	2,8	7	2,5	-0,9	4		
		P4	4	3	2	3	2,1		12	3,0	-0,5	4		
Anse aux Bois		P1	4	5	5	3	4,3	5,2	2	0,7	0,2	5		
		P2	4	5	5	5	5,6		5	0,3	-4,4	5		
		P3	4	5	5	5	5,6		0	0,2	-2,3	5		
Anse Michel		P4	4	5	5	4	5,0	5,2	0	0,5	-1,3	5		
		P5	4	5	5	5	5,6		4	1,0	-2,6	5		
		P6	4	4	5	5	5,0		7	1,2	-2,8	5		
Sud	Les Salines	P1	4	5	5	4	5,0	2,7	5	0,9	-1,4	4		
		P2	4	5	5	3	4,3		1	0,7	0,2	4		
		P3	4	1	4	4	2,0		21	1,6	-0,7	4		
		P4	4	1	4	1	1,0		40	2,0	6,3	3		
		P5	4	5	5	1	2,5		5	0,9	7,7	3		
		P6	4	2	5	1	1,6		18	1,4	4,7	3		
	Plage de Dizac	P1	4	5	5	5	5,6	3,7	0	0,2	-1,8	5		
		P2	4	5	5	4	5,0		5	0,8	-1,4	4		
		P3	4	1	5	4	2,2		24	1,5	-0,6	4		
		P4	4	2	5	3	2,7		15	1,2	0,5	4		
		P5	4	2	5	2	2,2		16	1,0	0,6	4		
		P6	4	4	5	4	4,5		10	0,8	-0,6	4		
	Anse Cafard	P7	4	1	5	5	2,5	3,4	20	0,8	-1,7	4		
		P8	4	5	5	3	4,3		3	0,6	-0,2	4		
	Caraïbes	Plage du Coin	P1	4	1	4	4	2,0	2,2	25	1,7	-1,5	5	
P2			4	1	4	3	1,7	25		1,9	0,0	5		
P3			4	1	2	4	1,4	21		3,0	-0,9	5		
P4			4	3	4	3	3,0	11		1,8	-0,3	5		
P5			4	3	3	2	2,1	13		2,1	0,8	5		
P6			4	5	2	4	3,2	2		2,6	-0,6	5		
Anse Céron		P1	4	4	5	2	3,2	3,0	7	1,5	0,8	3		
		P2	4	4	4	2	2,8		10	1,7	1,5	3		

5. La création d'une carte interactive

5.1. INTRODUCTION

Les littoraux de la Martinique apparaissent comme des zones à forte attractivité et sont souvent exposés à des pressions environnementales et économiques importantes. Cette bande côtière est complexe, souvent très dynamique et vulnérable à la submersion marine et à l'érosion côtière. Ces mécanismes interagissent sur différentes échelles spatiales et temporelles qui s'étendent de l'évolution instantanée des rides sableuses (quelques secondes) jusqu'aux évolutions du prisme littoral (plusieurs millénaires). Face aux questionnements actuels qui surviennent dans un contexte de réchauffement climatique et de montée du niveau moyen des mers, l'amélioration de nos connaissances et la capitalisation de l'information, permettent aujourd'hui de renforcer notre capacité d'adaptation. L'Observatoire de la dynamique du littoral martiniquais (OLiMar) compte parmi ses objectifs de communiquer ses données en les mettant à disposition du grand public et des gestionnaires sous une forme adaptée, afin de partager la connaissance et la culture des risques.

Une des actions phares du plan de communication de l'Observatoire fut la création du site Internet de l'OLiMar : <https://www.observatoire-olimar.fr/>. Aujourd'hui, le site Internet est l'un des principaux outils de communication de l'Observatoire. Parmi les différentes fonctionnalités proposées, une cartographie interactive permet de visualiser en ligne l'évolution du littoral martiniquais : <https://www.observatoire-olimar.fr/page/carte-donnees>; (Illustration 104). Les informations mises à disposition sur cette interface sont référencées par le biais du catalogue de métadonnées. Les données correspondantes sont la propriété des partenaires financeurs et des partenaires producteurs de données associés à ce projet.



Illustration 104 : Rubrique « Cartes et données » du site internet de l'Observatoire (<https://www.observatoire-olimar.fr/page/carte-donnees>).

5.2. ERGONOMIE, NAVIGATION ET FONCTIONNALITE UTILISATEUR

L'espace de l'Observatoire OLiMar a été constitué à partir de la plateforme nationale mutualisée CARMEN mise en œuvre par la Direction de l'eau et de la biodiversité du Ministère de la transition écologique et hébergée par le BRGM : <http://carmen.naturefrance.fr>. Cette mutualisation permet de bénéficier des développements informatiques existants et des évolutions régulières de l'outil offrant au projet une économie de moyens. L'application CARMEN est dédiée aux producteurs de données souhaitant les partager à travers le web.

Les outils de navigation de base sont présents sur la carte (zoom+, zoom-, déplacement, mesure). Une carte globale du littoral martiniquais localise l'enveloppe géographique affichée selon un rectangle et une liste d'échelle prédéfinie. Un bouton permet d'imprimer la carte affichée. Une recherche par zone favorite est également proposée sur l'interface (Illustration 105).

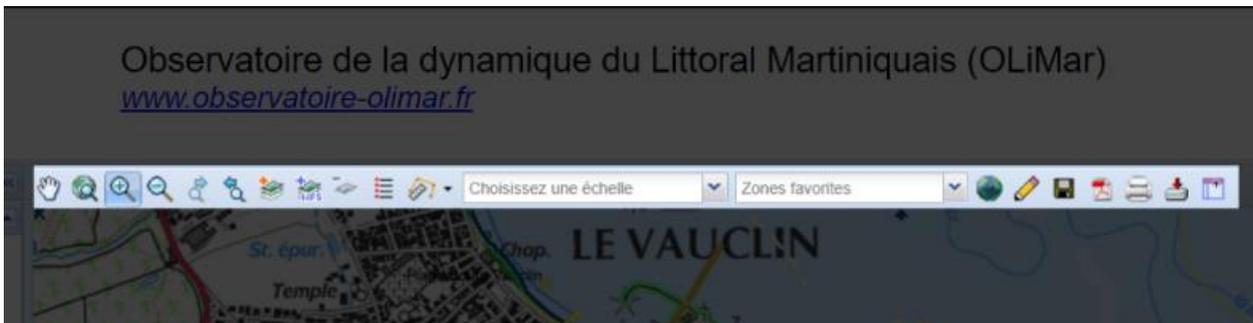


Illustration 105 : Les fonctionnalités de l'interface cartographique interactive.

La carte mise à disposition par l'Observatoire reprend les informations collectées des années passées auxquelles s'ajouteront les données des prochaines campagnes de mesure réalisées dans le cadre de cette convention (Illustration 106). La transparence de chaque couche sera gérée par l'utilisateur. Une transparence par défaut est proposée dans le service cartographique. Les couches proposées par défaut lors de l'ouverture d'une session utilisateur sont :

- Les communes de la Martinique (BD TOPO®)
- Le nom et la localisation des sites suivis par l'Observatoire (rapport BRGM/RP-68470-FR, 2019)
- Les différents substrats qui composent les fonds sous-marins (Hélène Legrand, 2008)
- Les isobathes 10 m à 80 m (SHOM 2018)
- La largeur, le nom (échelle < 1/80000) et les limites (échelle < 1/30000) de chacune des 117 cellules sédimentaires (rapport BRGM/RP-64499-FR, 2015)
- Le fond de carte IGN, échelle < 1/30000 (BD TOPO®)
- La limite du haut de plage (végétation, falaise) issue des images de type orthophoto, échelle < 1/30000 (rapport BRGM/RP-63238-FR, 2015)
- Les évolutions sur le long (1951, 2010) et le moyen terme (2004, 2010) de la limite de végétation, échelle < 1/30000 (rapport BRGM/RP-63238-FR, 2015)
- La localisation des profils de référence du réseau de suivi de l'Observatoire, échelle < 1/30000 (présent rapport)
- La position du trait de côte pour chacune des campagnes de mesure réalisées sur les sites suivis par l'Observatoire, échelle < 1/30000 (présent rapport)
- Les limites parcellaires (BD TOPO®)
- Le fond de carte orthophoto de 1951, 2010 et 2017, échelle < 1/10000 (BD ORTHO®)

Le système de projection utilisé est WGS84/UTM 20°N.

La zone cartographique est bornée afin de ne pas permettre à l'utilisateur une navigation en dehors de la zone d'étude (extension maximale du projet). Cette extension sera cependant maximisée de manière à permettre à l'internaute une marge de liberté, en centrant sa carte tel qu'il l'entend. Une indication visuelle au niveau de la page cartographique est utilisée pour notifier à l'internaute qu'une couche visualisable ne l'est plus s'il se trouve en dehors de la plage de zoom recommandée. Les données collectées par l'Observatoire sont également téléchargeables au format Shapefile (.shp) lisible avec ArcGis (ou Qgis). Le site propose également l'accès aux flux WMS/WFS de l'OLiMar.

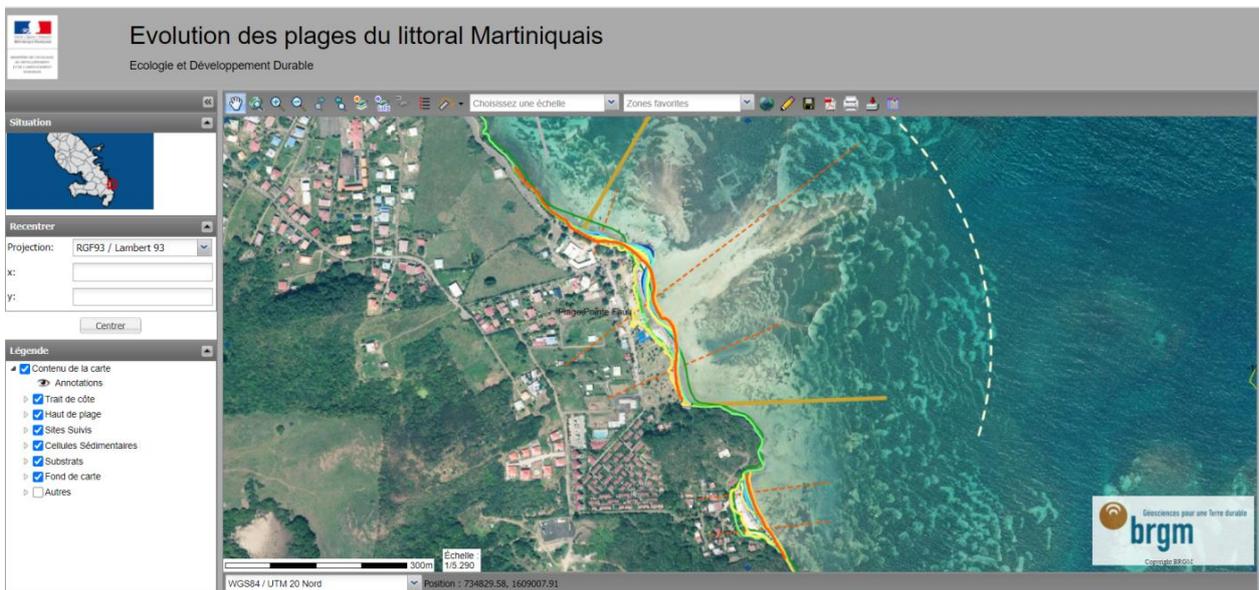


Illustration 106 : Différents niveaux de zoom proposés sur le secteur du Vaucelin à la Pointe Faula (<http://carmen.carmencarto.fr/288/observatoire-olimar.map>).

6. Conclusion

Le littoral martiniquais se dessine sous la forme d'une succession de baies, de caps et d'anses, orientés dans toutes les directions et donc exposés à des climats de vagues très variés. Cette diversité se retrouve dans la géomorphologie des plages, dont les caractéristiques (géologie, typologie, stock sédimentaire, granulométrie, évolution, résilience, enjeux) restent très spécifiques à l'échelle de chaque cellule sédimentaire.

• Synthèse des observations

De manière générale, les observations réalisées mettent en évidence une forte dynamique interannuelle du littoral, tant sur les profils de plage, que sur la position du trait de côte. Parmi les 15 sites suivis par l'Observatoire, 40 % présentent des vitesses de recul significatives, supérieures à 0.5 m/an (tendance entre juillet 2017 et juillet 2020). Les secteurs les plus concernés par l'érosion et le recul du trait de côte sont les plages situées sur la commune de Sainte-Anne (anse aux Bois, anse Michel) et sur la commune du Marin (anse Four à Chaux) qui montrent des vitesses de recul très élevées, supérieures à 1 m/an (tendance entre juillet 2017 et juillet 2020).

Certaines plages suivies par l'Observatoire montrent au contraire une dynamique inverse avec en moyenne un élargissement de la plage et un gain en termes de stock sédimentaire. Environ 30 % des sites suivis montrent une accrétion significative, comme sur la plage des Salines qui a gagné en moyenne plus de 6 m en largeur depuis 2017.

D'autres plages peuvent apparaître relativement stables sur le moyen terme depuis 2017 (~ 30 %). En revanche, des évolutions morphologiques saisonnières ont pu être précisément identifiées sur certaines d'entre elles, comme sur la plage du Carbet. Les techniques récentes associées à l'imagerie vidéo permettent de suivre cette dynamique et apparaissent comme des outils essentiels à l'observation et à la meilleure gestion de la dynamique littorale.

Concernant la dynamique événementielle, reliée aux épisodes de tempêtes et aux ouragans, aucun épisode d'intensité remarquable n'est venu frapper les côtes martiniquaises depuis les Ouragans Irma et Maria en 2017 et jusqu'aux derniers levés pris en compte dans la présente étude (juillet 2020).

On retiendra sur ces trois dernières années les sites sensibles suivants qui montrent une certaine vulnérabilité face à l'aléa érosion :

- anse la Richer (La Trinité) ;
- anse Cosmy (La Trinité) ;
- anse Four à chaux (Le Marin) ;
- anse au Bois (Sainte-Anne) ;
- anse Michel (Sainte-Anne) ;
- plage de Dizac, portion nord-est (Le Diamant) ;

Si au contraire certains sites présentent de façon globale une vulnérabilité moins prononcée, comme sur le site de l'anse Charpentier, la plage des Salines ou au Carbet, il est important de souligner à quel point les résultats peuvent être contrastés au sein d'une même cellule sédimentaire :

- sur la plage de l'anse Charpentier, le secteur situé au sud de la cellule présente une vitesse de recul significative (> 1 m) et une plage beaucoup plus étroite que sur les autres secteurs ;
- sur la plage des Salines, le secteur situé au sud-est présente des vitesses de recul estimées à plus de 1 m/an ;
- au Carbet, la partie sud de la plage montrent des vitesses de recul plus élevées que sur les autres secteurs (> 1.5 m/an).

La poursuite du réseau de suivi est indispensable pour à termes mieux qualifier ces évolutions et en préciser les tendances sur le plus long terme.

- **Gestion et aménagement des littoraux**

Si les évolutions morphologiques observées reflètent la plupart du temps des processus naturels, il est important de rappeler que les mesures réalisées depuis la mise en place de l'Observatoire prennent également en compte, de façon intrinsèque, les échouages de sargasses, les interventions de nettoyage, l'influence des ouvrages de protection ou tout simplement les effets de la sur-fréquentation d'une cellule sédimentaire.

Les sargasses échouées peuvent souvent jouer le rôle de protection naturelle (rapport BRGM/RP-69651-FR, 2020), mais elles pourraient aussi parfois avoir un effet inverse, notamment lorsque le tassement des algues échouées prend la forme d'une « banquette ». La formation d'une telle « structure » à proximité du jet de rive a pour effet de renforcer la réflexion des vagues et ne favorise pas la reconstruction naturelle de la plage (e.g. anse La Richer, anse aux Bois, anse Michel). Toutefois, le ramassage mécanique des algues échouées constitue un plus gros facteur et entraîne systématiquement une diminution conséquente du stock sédimentaire (e.g. anse Cafard, Pointe Faula). Certaines pratiques pourraient être privilégiées et mieux encadrées (e.g. ramassage manuelle, stockages intermédiaires à prévoir hors zone végétalisée).

Relié à la présence d'ouvrage de protection ou à la sur-fréquentation d'une plage (circulation des véhicules ou piétinement sur l'arrière plage), certains secteurs de l'île montrent une plus forte vulnérabilité que d'autres face à l'aléa érosion. Nous rappelons ici que certains aménagements modifient les équilibres sédimentaires et peuvent provoquer ou accentuer localement le phénomène érosif (e.g. anse l'Etang, plage de Dizac). La sur-fréquentation des sites littoraux peut également constituer un facteur d'érosion, reliée à la dégradation de la végétation par le piétinement ou par la circulation des véhicules (e.g. Grandes Salines). La restauration des plages peut faire intervenir des « techniques douces » qui s'appuient sur les processus naturels visant à traiter les causes et non se prémunir des effets. Ces techniques consistent par exemple à faire appel au génie écologique afin de restaurer les milieux dégradés, à améliorer la gestion de la fréquentation du public afin de préserver le développement de la végétation (Guide BRGM/ONF/DEAL, 2019).

- **De nouveaux outils de communication**

Une des actions phares du plan de communication de l'Observatoire est la création du site Internet de l'OLiMar : www.observatoire-olimar.fr. Parmi les différentes fonctionnalités proposées, une cartographie interactive permet de visualiser en ligne l'évolution du littoral martiniquais. Les données publiées sont la propriété des partenaires financeurs et des partenaires producteurs de données associés à ce projet. L'OLiMar se veut un outil mutualisé pérenne d'acquisition, de compréhension et de capitalisation des connaissances sur l'évolution du littoral martiniquais. Les données collectées au cours des prochaines années seront capitalisées, archivées et mises en forme pour pouvoir alimenter la plateforme de cartographie de l'OLiMar.

Le travail réalisé dans le cadre de l'Observatoire de la dynamique du littoral martiniquais montre l'importance de l'amélioration des connaissances et de la capitalisation de l'information, pour offrir un outil utile et nécessaire à la gestion d'un milieu à la fois riche et menacé. Cette démarche scientifique s'inscrit notamment dans un contexte qui nécessite dès aujourd'hui de renforcer notre capacité d'adaptation face au réchauffement climatique et de montée du niveau moyen des mers.

7. Bibliographie

- Aarninkhof, S.G.J., Turner, I.L., Dronkers, T.D.T., Caljouw, M., Nipius, L., 2003. A video-based technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coast. Eng.* [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(03\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(03)00064-4)
- Bouvier, C., Castelle, B., Balouin, Y., 2019. Modeling the Impact of the Implementation of a Submerged Structure on Surf Zone Sandbar Dynamics. *J. Mar. Sci. Eng.* <https://doi.org/10.3390/jmse7040117>
- BRGM/ONF/DEAL, 2019. Guide pour la gestion de l'érosion littorale en Martinique.
- BRGM/RP-63238-FR, 2015. Nachbaur A., Paulineau M., Le Roy M. Evolution multidécennale (1951 - 2010) et décennale (2004 - 2010) du trait de côte de la Martinique.
- BRGM/RP-64499-FR, 2015. Nachbaur A., Balouin Y., Nicolae Lerma A., Douris L., Pedreros R. Définition des cellules sédimentaires du littoral martiniquais. Rapport final.
- BRGM/RP-66351-FR, 2016. Belon R., Bodéré G. Réseau d'Observation du Littoral de la Corse – Rapport d'observations 2015.
- BRGM/RP-67286-FR, 2016. De la Torre Y., de Santis C., Balouin Y., Belon, R., Maldan F. Observatoire de la côte sableuse catalane - OBSCAT: rapport technique d'année 1. Rapport final.
- BRGM/RP-68341-FR, 2019. Nachbaur A., Lalubie G., Garcin M., Legendre Y. Evolution pluri décennale d'un littoral en contexte volcanique actif : constats et projection autour de la Montagne Pelée (Martinique). Rapport final. BRGM/RP-68341-FR, p 93, 80 illustrations, 4 anne.
- BRGM/RP-68470-FR, 2019. Nachbaur A., Lombard M. et Longueville F. Suivi de la mobilité du trait de côte de la Martinique – Résultats de mesures de terrain 2017- 2018 concernant les plages du Carbet, des Salines, de Coco l'Echelle et de onze plages soumises aux échouages 83.
- BRGM/RP-69071-FR, 2019. Lombard M., De Cathelineau T., Nachbaur A. Suivi des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Bilan de la phase d'installation du dispositif photographique. Rapport final. 41.
- BRGM/RP-69651-FR, 2020. Bouvier C., De Cathelineau T. et Valentini N. Suivi de la dynamique des échouages de sargasses sur le littoral martiniquais – Développement et application des algorithmes. Rapport final.
- BRGM et ONF, 2018. BRGM et ONF. Atlas morphodynamique de la côte sableuse aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-67152-FR, 280p., 227 ill., 6 ann. 280.
- Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W., Birdwell, K.R., 1994. The Development of a Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast. *J. Coast. Res.*
- Grinsted, A., 2020. Tidal fitting toolbox (<https://www.mathworks.com>), MATLAB Central File

Exchange. Retrieved August 10, 2020.

- Hélène Legrand, 2008. Cartographie des biocénoses benthiques du littoral martiniquais et eutrophisation en zone récifale en relation avec les sources de pression d'origine anthropique. Thèse Dr.
- Holland, K.T., Holman, R. a, Lippmann, T.C., Stanley, J., Plant, N., 1997. Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies - Oceanic Engineering, IEEE Journal of. IEEE J. Ocean. Eng. 22, 81–92.
- Holman, R.A., Stanley, J., 2007. The history and technical capabilities of Argus. Coast. Eng. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.01.003>
- Lippmann, T.C., Holman, R.A., 1989. Quantification of sand bar morphology: A video technique based on wave dissipation. J. Geophys. Res. 94, 995. <https://doi.org/10.1029/JC094iC01p00995>
- MEEM, 2017. Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Programme d'actions.
- Pendleton, E.A., Barras, J.A., Williams, S.J., Twichell, D.C., 2012. Coastal vulnerability assessment of the Northern Gulf of Mexico to sea-level rise and coastal change, in: Vulnerable U.S. Shorelines and Coasts: Select Assessments.
- Ruessink, B.G., Pape, L., Turner, I.L., 2009. Daily to interannual cross-shore sandbar migration: Observations from a multiple sandbar system. Cont. Shelf Res. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.05.011>
- Shom, 2018. MNT bathymétrique de façade de la Guadeloupe et de la Martinique (Projet Homonim).
- Thieler, E.R., Hammar-Klose, E.S., 1999. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise. Open-File Rep. 00-179.
- Van Enckevort, I.M.J., Ruessink, B.G., 2001. Effect of hydrodynamics and bathymetry on video estimates of nearshore sandbar position. J. Geophys. Res. 106979, 969–16. <https://doi.org/10.1029/1999JC000167>
- Vos, K., Harley, M.D., Splinter, K.D., Simmons, J.A., Turner, I.L., 2019. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. Coast. Eng. 150, 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Martinique

4, lot. Miramar

Route Pointe des Nègres

97200 – Fort-de-France – Martinique

Tél. : 05 96 71 17 70