

Projet de rechargement des plages de Sandy Ground et de Galisbay

Etude de modélisation hydrosédimentaire

Phase 1 : Diagnostic de la dynamique hydro-sédimentaire
des plages de Sandy Ground et de Galisbay



Etablissement Portuaire de Saint-Martin

Rapport d'étude

13 décembre 2022

Ce rapport a été préparé conformément au système qualité de DHI certifié ISO 9001 par Bureau Veritas.

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Projet de rechargement des plages de Sandy Ground et de Galisbay

Etude de modélisation hydrosédimentaire

Phase 1 : Diagnostic de la dynamique hydro-sédimentaire
des plages de Sandy Ground et de Galisbay

Préparé pour

Etablissement Portuaire de Saint-Martin

Représenté par

M. Albéric Ellis, Directeur du port



La plage de Galisbay,
août 2022 (Photo DHI)

Chef de Projet	Caroline TESSIER
Numéro de projet	21804505
Date de validation	16 décembre 2022
Révision	Final 3.0 (Correction de certaines analyses granulométriques)
Catégorie	Restreint



SOMMAIRE

1	Introduction	7
2	Présentation du site d'étude	8
2.1	Carte marine de la Grand'Baie de Marigot	9
2.2	Références altimétriques	11
2.3	Repères kilométriques	12
2.4	Photographies des plages de Sandy Ground et Galisbay	13
3	Conditions météocéaniques et hydrographiques	15
3.1	Climat	15
3.2	Vents	15
3.3	Vagues	20
3.4	Niveaux d'eau	27
3.5	Courants	29
3.6	Fonctionnement des cours d'eau	37
4	Contexte sédimentaire et nature des fonds	39
4.1	Matières en suspension	39
4.2	Nature des fonds et répartition des sédiments	39
4.3	Données granulométriques	42
4.3.1	Analyses granulométriques des plages (Eurofins 2022)	42
4.3.1.1	Prélèvements	42
4.3.1.2	Analyses granulométriques par laser	58
4.3.1.3	Analyses granulométriques par tamisage	60
4.3.2	Comparaison de la granulométrie du site dragué et des plages	66
4.3.2.1	D'après PARETO, 2013	66
4.3.2.2	D'après Antilles GEOTECHNIQUE, 2016 et 2020	68
4.3.3	Synthèse	86
5	Evolution historique et récente du littoral et des fonds	87
5.1	Topo-bathymétrie	87
5.1.1	Liste des données	87
5.1.2	Tableau de synthèse	89
5.1.3	Profils de plage	92
5.2	Evolution du trait de côte	94
5.2.1	Analyse sur 1950 – 2010 sur Saint-Martin (étude Cerema)	94
5.2.2	Analyse sur 1969 – 2010 sur la Grand'Baie de Marigot (données IGN)	96
5.2.3	Analyse sur 2015 – 2022 sur la Grand'Baie de Marigot (algorithme CoastSat)...	101
5.2.4	Analyse sur 2017 – 2019 sur la Grand'Baie de Marigot (données Cerema)	104
5.3	Impact des cyclones sur le trait de côte	107
5.4	Dynamique sédimentaire de la Grand'Baie de Marigot	116
5.4.1	Transits sédimentaires	116
5.4.2	Transport éolien	117
5.4.3	Apports fluviatiles	117
6	Interventions anthropiques	118
6.1	Historique des aménagements littoraux	118
6.1.1	Secteur Anse des Sables et Baie Nettlé ouest	119
6.1.2	Secteur Baie Nettlé	121

6.1.3	Secteur Sandy Ground	122	
6.1.4	Secteur passe de la lagune	124	
6.1.5	Secteur Marina Fort Louis	125	
6.1.6	Secteur Plage de Galisbay	126	
6.1.7	Secteur Port de Galisbay	127	
6.2	Dragages et extractions de sable		128
6.2.1	Au large de la pointe Arago	128	
6.2.2	Dans la Baie de la Potence	129	
6.3	Rechargements et clapages	129	
6.4	Captages et rejets d'eau de mer	130	
7	Synthèse	131	
8	Références	133	

ANNEXES

ANNEXE A – Analyse du trait de côte sur 2017 – 2019 (donnée Cerema)



FIGURES

Figure 1.1	Localisation des projets (source : CCTP).	7
Figure 2.1	Situation géographique de l'île de Saint-Martin et du port de Galisbay (Google Earth).	8
Figure 2.2	Carte marine de la Grand'Baie de Marigot (SHOM)	10
Figure 2.3	Schéma de rattachement des altitudes des repères géodésiques de Marigot (Réf. /14/)	11
Figure 2.4	Repères kilométriques le long du littoral de La Belle Créole jusqu'au Port de Galisbay.	12
Figure 2.5	Plage de Sandy Ground : au niveau du profil 2700 (haut) et du profil 2400 (bas)	. 13
Figure 2.6	Plage de Galisbay : vue globale (haut), granulométrie variable à l'ouest (milieu), beach rock à l'est (bas)	14
Figure 3.1	Rose des vents (direction d'où il vient) sur 2010-2020, à Saint-Martin – Données CFSSR	16
Figure 3.2	Roses des vents sur 2010-2020 à Saint-Martin, pour les quatre saisons – Données CFSSR	17
Figure 3.3	Trajectoires des cyclones dont la trajectoire est passée sur Saint-Martin entre 1851 et 2021 (https://coast.noaa.gov/hurricanes).	18
Figure 3.4	Champs de vagues du nord-est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : le 20/02/2018 lors d'Alizés de nord-est (en haut) et le 16/07/2018 en saison humide avec des vagues au large venant de l'est (en bas).	21
Figure 3.5	Champs de vagues du secteur nord-nord-est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : événement de Northers, situations au 3 et 7 mars 2018	22
Figure 3.6	Roses des vagues modélisées aux points P4-NW (gauche) et P3-NE (droite) sur 2010-2020	23
Figure 3.7	Roses des vagues 2010-2020 à <u>P4-NW</u> (à gauche) et à <u>P3-NE</u> (à droite) pour les saisons décembre-février, mars-mai, juin-juillet et août-novembre	24
Figure 3.8	Position des stations de mesures de houle aux abords de Saint-Martin	26
Figure 3.9	Niveaux d'eau mesurés en 2002 au marégraphe de Saint-Martin (en m par rapport au ZH). Données validées mises à disposition sur le site REFMAR	27
Figure 3.10	Position du marégraphe de Saint-Martin (SHOM)	28
Figure 3.11	Disponibilité des mesures validées horaires au marégraphe de Saint-Martin (SHOM)	28
Figure 3.12	Illustration des principaux courants de la Mer des Caraïbes (NBC : Courant Nord Brésilien, NEC : Courant Nord Equatorial, nCC : Courant nord Caraïbe, sCC : Courant sud Caraïbe, CCU : Sous Courant Côtier) (Réf. /16/)	29
Figure 3.13	Courantologie de la Baie de Marigot.	30
Figure 3.14	Courants de surface dans la Grand'Baie de Marigot en novembre 1990	31
Figure 3.15	Implantation des courantographes devant Marigot (les flèches indiquent le sens des courants) (Boujis, 2003)	33
Figure 3.16	Localisation des stations de mesures de courants réalisées en 2012 et 2013 par HOCER (Réf. /13/).	34
Figure 3.17	Période du 24 novembre 2012 au 03 janvier 2013 : vitesses (haut) et direction(bas) des courants sur la colonne d'eau mesurés par l'ADCP (HOCER)	34
Figure 3.18	Période du 22 mars au 02 mai 2013 : vitesses (haut) et direction des courants (bas) sur la colonne d'eau mesurés par l'ADCP (HOCER)	35
Figure 3.19	Position des stations de mesures de courants aux abords de Saint-Martin – campagne de mesures en cours	36
Figure 3.20	Bassin morphologique et bassin versant de la plage de Galisbay (Réf. /3/)	37
Figure 3.21	Photographies de l'exutoire de l'étang de Galisbay (DHI, août 2022)	38
Figure 4.1	Cartographie des habitats marins de la Grand'Baie de Marigot (Réf. /15/)	40
Figure 4.2	Cartographie simplifiée des habitats marins de la Grand'Baie de Marigot (Réf. /15/)	41

Figure 4.3	Carte des prélèvements sédimentaires	43	
Figure 4.4	Position des prélèvements secteur Anse des Sables	45	
Figure 4.5	Photos du site et des échantillons au profil P700	45	
Figure 4.6	Position des prélèvements secteur Baie Nettlé	46	
Figure 4.7	Photos des échantillons Baie Nettlé 1 et Baie Nettlé 3	46	
Figure 4.8	Photos du site et des échantillons au profil P1500	47	
Figure 4.9	Photos du site et des échantillons au profil P1900	48	
Figure 4.10	Photos du site et des échantillons au profil P2400	49	
Figure 4.11	Photos du site et des échantillons au profil P2700	50	
Figure 4.12	Position des prélèvements secteur Baie de Marigot	51	
Figure 4.13	Photo des échantillons Baie Marigot 1 et Baie Marigot 2	51	
Figure 4.14	Position des prélèvements secteur Baie de la Potence	52	
Figure 4.15	Photos de l'échantillon Baie Potence 2	52	
Figure 4.16	Photos du site et des échantillons du profil P5300	53	
Figure 4.17	Photos du site et de l'échantillons du profil P5350	54	
Figure 4.18	Photos du site et des échantillons du profil P5400	55	
Figure 4.19	Photos du site et échantillon de la Ravine	56	
Figure 4.20	Photos du site et des échantillons du profil P5500	57	
Figure 4.21	Courbes granulométriques obtenues par granulométrie laser. De haut en bas : P1500 0m, P2400 0m, P2400 -2m, P5300 0m, P5300 -2m.	59	
Figure 4.22	Courbes granulométriques de l'ensemble des échantillons	60	
Figure 4.23	Courbes granulométriques moyennées par secteur	61	
Figure 4.24	Courbes granulométriques des échantillons dans les petits fonds	61	
Figure 4.25	Courbes granulométriques des échantillons de la plage de l'Anse des Sables	61	61
Figure 4.26	Courbes granulométriques des échantillons des plages de Baie Nettlé	62	
Figure 4.27	Courbes granulométriques des échantillons des plages de Sandy Ground	62	
Figure 4.28	Courbes granulométriques de la plage de Galisbay	62	
Figure 4.29	Caractéristiques granulométriques des 30 échantillons – d'après l'analyse granulométrique par tamisage.	63	
Figure 4.30	Carte du diamètre médian et du type de sédiment d'après Eurofins 2022, classification de Wentworth.	65	
Figure 4.31	Plan d'échantillonnage des 10 stations de prélèvements (Réf. /19/)	66	
Figure 4.32	Diamètre médian des sédiments prélevés (Réf. /19/)	66	
Figure 4.33	Comparaison entre les courbes granulométriques Pareto au site dragué et de la moyenne des courbes granulométriques Eurofins en Baie Nettlé (haut), Sandy Ground (milieu) et Galisbay (bas)	67	
Figure 4.34	Plan d'implantation des reconnaissances géotechniques d'Antilles GEOTECHNIQUE 2016 (Réf. /1/)	69	
Figure 4.35	Plan d'implantation des stations de prélèvements par plongeurs d'Antilles GEOTECHNIQUE 2016 (Réf. /1/)	69	
Figure 4.36	Plan d'échantillonnage des sondages carottés d'Antilles GEOTECHNIQUE 2020 (Réf. /2/)	70	
Figure 4.37	Distributions granulométriques <u>sur les plages</u> (Eurofins, 2022), dans l'ordre de lecture : P1500 0m, P2400 0m, P2400 -2m, P5300 0m, P5300 -2m.	71	
Figure 4.38	Distributions granulométriques <u>dans la zone du projet</u> (Antilles-GEOTECHNIQUE, 2016) dans l'ordre de lecture : Ca1-1,0 m, Ca4-3,5 m, Ca5-3,0 m, Ca6-2,7 m, Ca7-2,5 m, Ca8-3,0 m (Réf. /1/)	71	
Figure 4.39	Distributions granulométriques <u>dans la zone du projet</u> à 0,5 m de profondeur (par plongeurs, Antilles-GEOTECHNIQUE, 2016), dans l'ordre de lecture : St1, St2, St3, St4, St5, St6, St7, St8, St9, St10, St11, St12 (Réf. /1/)	72	
Figure 4.40	Courbes granulométriques des échantillons Ca1 – 1.5 m et Ca1 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert)...	76	
Figure 4.41	Courbe granulométrique de l'échantillon Ca2 – 0.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).	77	
Figure 4.42	Courbes granulométriques des échantillons Ca3 – 0.5 m et Ca3 – 1.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert)...	78	

- Figure 4.43 Courbes granulométriques des échantillons Ca4 – 0.5 m et Ca4 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert)... 79
- Figure 4.44 Courbe granulométrique de l'échantillon Ca5 – 0.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert). 80
- Figure 4.45 Courbes granulométriques des échantillons Ca6 – 0.5 m et Ca6 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert)... 81
- Figure 4.46 Courbes granulométriques des échantillons Ca7 – 0.5 m et Ca7 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert)... 82
- Figure 4.47 Courbes granulométriques des échantillons Ca8 – 0.5 m et Ca8 – 1.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert)... 83
- Figure 4.48 Courbes granulométriques des échantillons Ca1 – 1.6 m et Ca1 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert)... 84
- Figure 4.49 Courbes granulométriques des échantillons Ca2 – 0.5 m et Ca2 – 4 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert)... 85
- Figure 5.1 Profils de plage représentatif par baie de la Grand'Baie de Marigot 92
- Figure 5.2 Profils de plage extraits du Litto3D 2019 du SHOM. 93
- Figure 5.3 Evolution du trait de côte sur la province (Réf. /6/) 95
- Figure 5.4 Photographie aérienne (IGN) de 1969 de l'Anse des Sables. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu) 97
- Figure 5.5 Photographie aérienne (IGN) de 2010 de l'Anse des Sables. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu) 97
- Figure 5.6 Photographie aérienne (IGN) de 1950-1965 de Sandy Ground. Trait de côte 1950-1965 (blanc) et trait de côte actuel (rouge) 98
- Figure 5.7 Photographie aérienne (IGN) actuelle de Sandy Ground. Trait de côte 1950-1965 (blanc) et trait de côte actuel (rouge) 98
- Figure 5.8 Photographie aérienne (IGN) de 2010 du secteur Plage de Marigot – Marina Fort Louis. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu) 99
- Figure 5.9 Photographie aérienne (IGN) de 2010 du secteur Plage de Marigot – Marina Fort Louis. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu) 99
- Figure 5.10 Photographie aérienne (IGN) de 1969 de la plage de Galisbay. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu) 100
- Figure 5.11 Photographie aérienne (IGN) de février 2010 de la plage de Galisbay. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu). 100
- Figure 5.12 Exemple de la détection du trait de côte sur la Plage de Sandy Ground à partir d'une image satellite du 6 mars 2018. 101
- Figure 5.13 Exemple de la détection du trait de côte sur la Plage de Galisbay à partir d'une image satellite du 6 mars 2018 101
- Figure 5.14 Positions du trait de côte de la Plage de Sandy Ground et des 3 profils de la Figure 5.15. 102
- Figure 5.15 Evolution temporelle (de 2016 à 2022) de la position du trait de côte sur 3 profils de la Plage de Sandy Ground 102
- Figure 5.16 Positions du trait de côte de la Plage de Galisbay et des 3 profils de la Figure 5.17. 103
- Figure 5.17 Evolution temporelle (de 2017 à 2022) de la position du trait de côte sur 3 profils de la Plage de Galisbay 103
- Figure 5.18 Traits de côte Cerema 2017-2019 Irma en Baie Nettlé et à Sandy Ground 105
- Figure 5.19 Traits de côte Cerema 2017-2019 sur la plage de Galisbay. 106
- Figure 5.20 Trajectoires des cyclones de 2017 autour de Saint-Martin (Source : [Historical Hurricane Tracks \(noaa.gov\)](https://www.noaa.gov/hurricane-tracks)) 107
- Figure 5.21 Impacts présumés des cyclones de septembre 2017 sur la position du trait de côte de l'île de Saint-Martin (Réf. /6/) 112
- Figure 5.22 Impact du cyclone Irma sur les habitations de Baie Nettlé, mai 2018 (cliché © Louis Portier, Réf. /6/) 114
- Figure 5.23 Marigot après Irma. La rue de Sandy Ground à l'entrée de Marigot a été submergée. La mer à droite est passée par-dessus la route et les constructions pour rejoindre le lagon sur la gauche (Réf. /10/). 115

Figure 5.24	Marigot après Irma. La mer a traversé de part en part le Beach Hotel situé sur la plage à Marigot (Réf. /10/).	115	
Figure 5.25	Carte des transits sédimentaires dans la Baie de la Potence.	117	
Figure 6.1	Perturbation des plages et des étangs de Saint-Martin (PPRN, 2018)		118
Figure 6.2	Photos aériennes de l'IGN, secteur Anse des Sables	119	
Figure 6.3	Photographies aériennes de 1989 (haut) et 1999 (bas) (IGN).	120	
Figure 6.4	Photos aériennes de l'IGN, secteur Baie Nettle.	121	
Figure 6.5	Photos aériennes de l'IGN, secteur Sandy Ground	122	
Figure 6.6	Photographies de 1969 (haut), 1984 (milieu), 1898 (bas).	123	
Figure 6.7	Photos aériennes de l'IGN, secteur passe de la lagune	124	
Figure 6.8	Photos aériennes de l'IGN, secteur Marina Fort Louis	125	
Figure 6.9	Photos aériennes de l'IGN, secteur Plage de Galisbay	126	
Figure 6.10	Photos aériennes de l'IGN, secteur Port de Galisbay.	127	
Figure 6.11	Zone d'extraction de sable au large de la Pointe Arago (Réf. /22/)	128	
Figure 6.12	Carte des transits sédimentaires dans la Baie de la Potence (Réf. /4/).		129
Figure 6.13	Schéma de l'usine de dessalement d'eau de mer de Galisbay (Réf. /21/)		130

TABLEAUX

Tableau 2.1 Niveaux de référence fournis par le SHOM en 2020	11
Tableau 3.1 Stations de mesures de houle aux abords de Saint-Martin	25
Tableau 3.2 Références Altimétriques à Saint-Martin (SHOM, RAM 2020). PHMA : Plus Hautes Mer Astronomiques ; PBMA : Plus basses Mers Astronomiques ; NM : Niveau Moyen ; ZH : Zéro Hydrographique.	27
Tableau 3.3 Caractéristiques des courants de surface et de leur transport par suspension de la Grand'Baie de Marigot en novembre 1990	32
Tableau 3.4 Stations de mesures de courant aux abords de Saint-Martin – Campagne océanographique en cours.	35
Tableau 4.1 Coordonnées géographiques et profondeurs des points de prélèvements – les échantillons ayant fait l'objet d'une analyse laser sont surlignés en bleu.	44
Tableau 4.2 Échantillons analysés par granulométrie laser	58
Tableau 4.3 Caractéristiques granulométriques des échantillons – d'après l'analyse granulométrique par tamisage.	64
Tableau 4.4 Comparaisons des diamètres médians selon la méthode : tamis ou laser.	65
Tableau 4.5 Profondeur et description des sédiments envisagés pour le rechargement des plages d'après l'analyse d'Antilles GEOTECHNIQUE 2016 (Réf. /1/)	70
Tableau 4.6 Pourcentage de sédiments fins d'après Eurofins 2022 (en surface)	73
Tableau 4.9 Pourcentage de sédiments fins d'après Pareto 2013 (sur 50 cm en surface)	73
Tableau 4.7 Pourcentage de sédiments fins d'après Antilles GEOTECHNIQUE 2016 & 2020 (profondeur indiquée, relativement au fond marin et non à la Cote Marine)	73
Tableau 4.10 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca1 (Réf. /1/).	76
Tableau 4.11 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca2 (Réf. /1/).	77
Tableau 4.12 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca3 (Réf. /1/).	78
Tableau 4.13 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca4 (Réf. /1/).	79
Tableau 4.14 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca5 (Réf. /1/).	80
Tableau 4.15 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca6 (Réf. /1/).	81
Tableau 4.16 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca7 (Réf. /1/).	82
Tableau 4.17 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca8 (Réf. /1/).	83
Tableau 4.18 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2020 : Ca1 (Réf. /2/).	84
Tableau 4.19 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2020 : Ca2 (Réf. /2/).	85
Tableau 5.1 Synthèse des données topo-bathymétriques disponibles	89
Tableau 5.2 Evolution des côtes d'accumulation de Saint-Martin entre 1947-1954 et 2010 (Réf. /6/.)	95
Tableau 5.3 Traits de côte produits par le Cerema.	104
Tableau 5.4 Inventaire des impacts du cyclone Irma (5 et 6 septembre 2017) sur les côtes de Saint-Martin (Réf. /6/)	108
Tableau 5.5 Caractéristiques d'accroissement observées après le passage des cyclones tropicaux de septembre sur l'île de Saint-Martin (Réf. /6/)	109
Tableau 5.6 Caractéristiques des érosions observées après le passage des cyclones tropicaux de septembre 2017 sur l'île de Saint-Martin (Réf. /6/)	110
Tableau 5.7 Variation des Net Shoreline Movement (NSM) sur les plages de la partie française entre le 12 février 2017 et le 14 septembre 2017 (Réf. /6/)	113

Tableau 6.1 Récapitulatif des quantités de sable extrait par année au large de la pointe Arago
(Réf. /6). 128

1 Introduction

Dans le cadre du projet d'extension du port de Galisbay, une opération de dragage est prévue permettant l'extraction d'une quantité importante de sables, dont un volume de près de 60 000 à 70 000 m³ pourrait être exploité pour recharger les plages du littoral voisin. Les plages de Sandy Ground (2,1 km de linéaire) et de Galisbay (0,2 km de linéaire) sont envisagées pour cela.



Figure 1.1 Localisation des projets (source : CCTP).

La présente étude a pour objectifs de :

- Consolider la connaissance du risque d'érosion sur ces plages
- Analyser les mécanismes hydro-sédimentaires en jeu
- Identifier les besoins en rechargement et définir les opérations nécessaires
- En option : évaluer l'impact potentiel des panaches turbides générés lors du rechargement, et après rechargement par remobilisation des fonds

Pour cela, l'étude est réalisée en 4 phases :

- Phase 1 : diagnostic de la dynamique hydrosédimentaire des plages de Sandy Ground et de Galisbay
- Phase 2 : Modélisation hydrosédimentaire du site – cas actuel
- Phase 3 : Définition des scénarios de rechargements
- Phase 4 (en option) : Modélisation de la dispersion des panaches turbides

Le présent rapport constitue le rapport de Phase 1 : diagnostic de la dynamique hydrosédimentaire des plages de Sandy Ground et de Galisbay.

2 Présentation du site d'étude

L'île franco-hollandaise de Saint-Martin / Sint-Maarten est située dans la partie nord de l'arc des Petites Antilles à 130 milles nautiques (240 km) au nord-nord-ouest de la Guadeloupe. Elle est située en zone cyclonique.

Le port de Galisbay-Bienvenue est situé dans la zone française, sur la côte nord de l'île, dans la baie de Marigot.

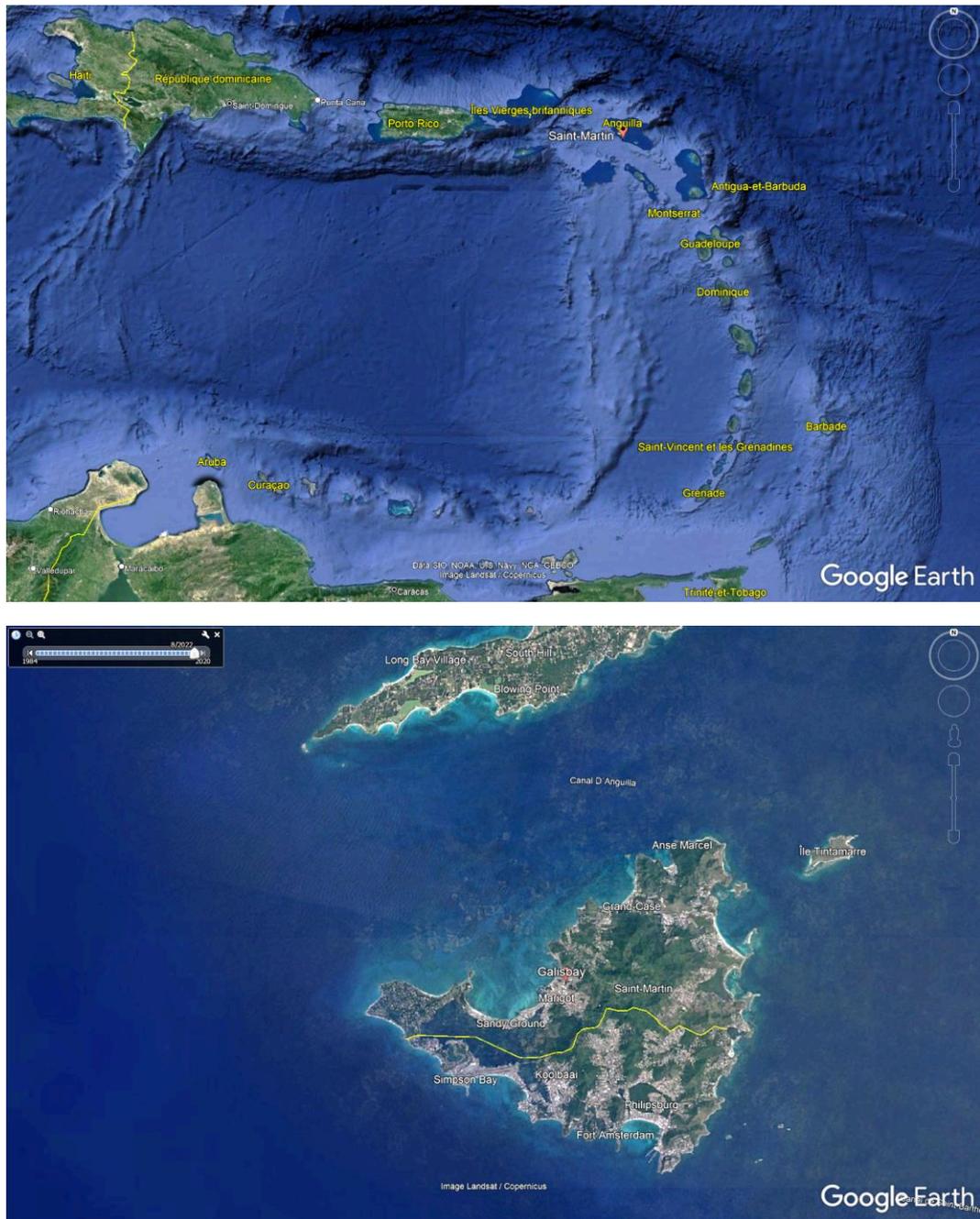


Figure 2.1 Situation géographique de l'île de Saint-Martin et du port de Galisbay (Google Earth).

2.1 Carte marine de la Grand'Baie de Marigot

La carte marine de la Grand'Baie de Marigot est présentée en Figure 2.2.

La Grand'Baie de Marigot est limitée par la Pointe du Bluff à l'ouest et par la Pointe Arago à l'est.

Le trait de côte est globalement orienté au nord/nord-ouest. Au nord-est le trait de côte est localement orienté à l'ouest tandis qu'au sud, il est orienté au nord.

Le littoral de la Grand'Baie de Marigot est constitué d'un cordon meuble sableux ancien accroché sur des points rocheux sédimentaires ou volcaniques :

- Pointe Falaise et pointes des Pierres à Chaux à l'ouest
- Colline Nettlé et Morne Rond dans sa partie centrale
- Pointe Arago et Pointe du Fort de Marigot à l'est

Ces pointes intermédiaires divisent la Grand'Baie de Marigot en différentes petites baies (d'ouest en est) :

- La Petite Baie
- La Baie de Nettlé
- La Baie de Marigot
- La Baie de la Potence

Dans la Baie Nettlé et dans la majeure partie de la Baie de Marigot, le cordon littoral sépare l'océan du Grand Étang de Simsonbaai, tandis qu'au nord du bourg de Marigot, il est adossé au relief d'origine volcanique.

Devant la baie, les isobathes correspondant aux profondeurs de plus de 10 mètres sont parallèles à la direction générale de la côte tandis que pour les plus faibles profondeurs, les isobathes s'incurvent pour suivre le littoral de la baie. Le fond de la baie est formé d'un plateau dont la profondeur est inférieure à 10 mètres. L'isobathe 5 mètres CM est à 600 mètres du trait de côte.

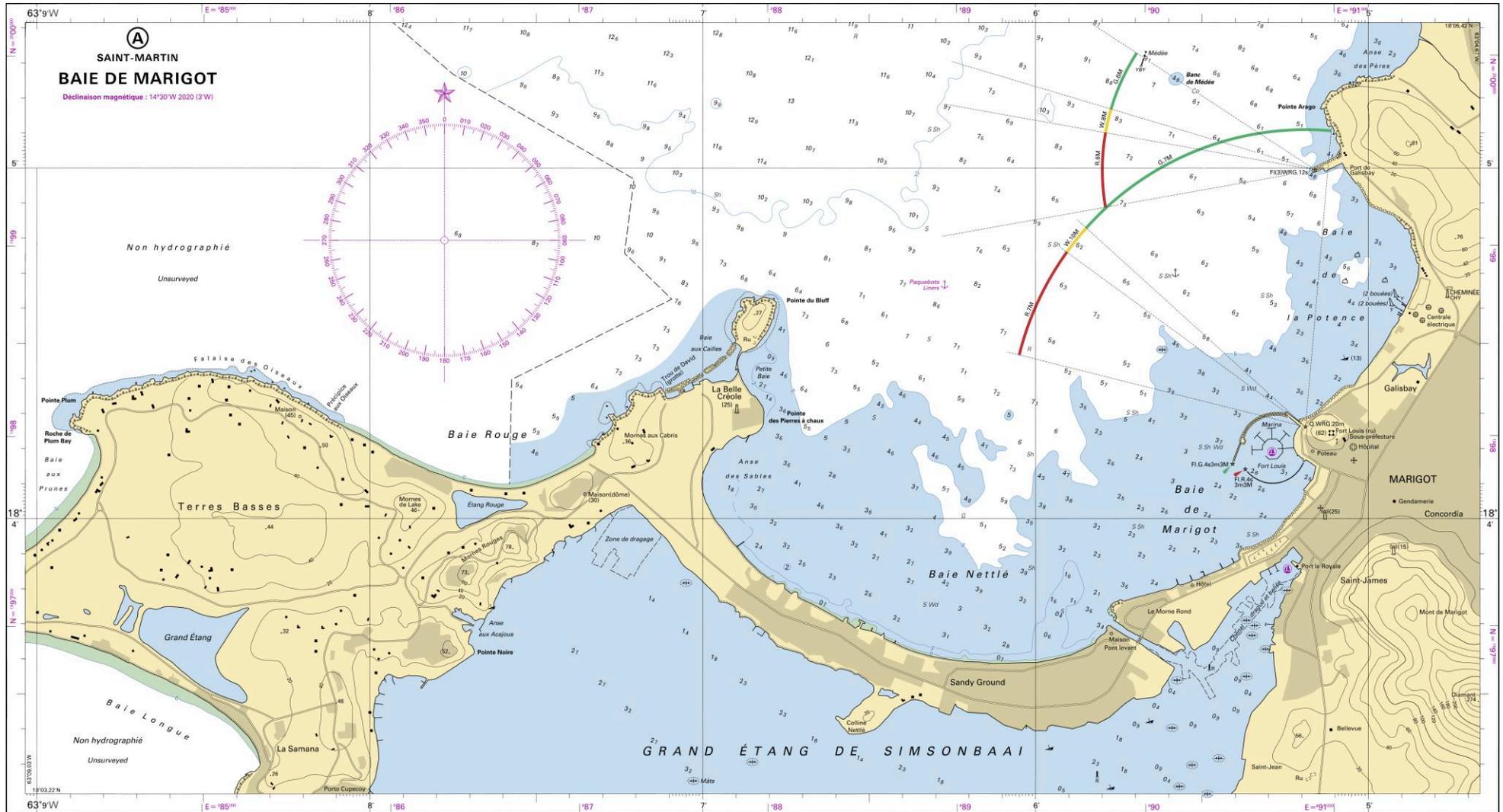


Figure 2.2 Carte marine de la Grand Baie de Marigot (SHOM)

2.2 Références altimétriques

Le zéro hydrographique à Saint-Martin Marigot est donc situé à 0,360 m au-dessous du zéro du nivellement terrestre de référence NGG (Tableau 2.1, Figure 2.3).

A noter que jusqu'en 2013, cette valeur était donnée par le SHOM à 0,351 m.

Tableau 2.1 Niveaux de référence fournis par le SHOM en 2020.

Nom	Type	Lat.	Long.	Et.	Année CH	PHMA	PMVE	NM	BMVE	PBMA
Saint-Martin Marigot ¹	R	18 04 N	63 05 W		2012	00.83	00.65	00.53	00.40	00.23
Saint-Martin et Saint-Barthélemy										

Nom	Repère fondamental	Organisme	Date	RF/ZH	RF/Ref	ZH/Ref	ZH/Elli	Ref
Saint-Martin Marigot ¹	AS-16	IGN	1988	22.099	21.739	-0.360	-43.71	IGN88
Saint-Martin et Saint-Barthélemy								

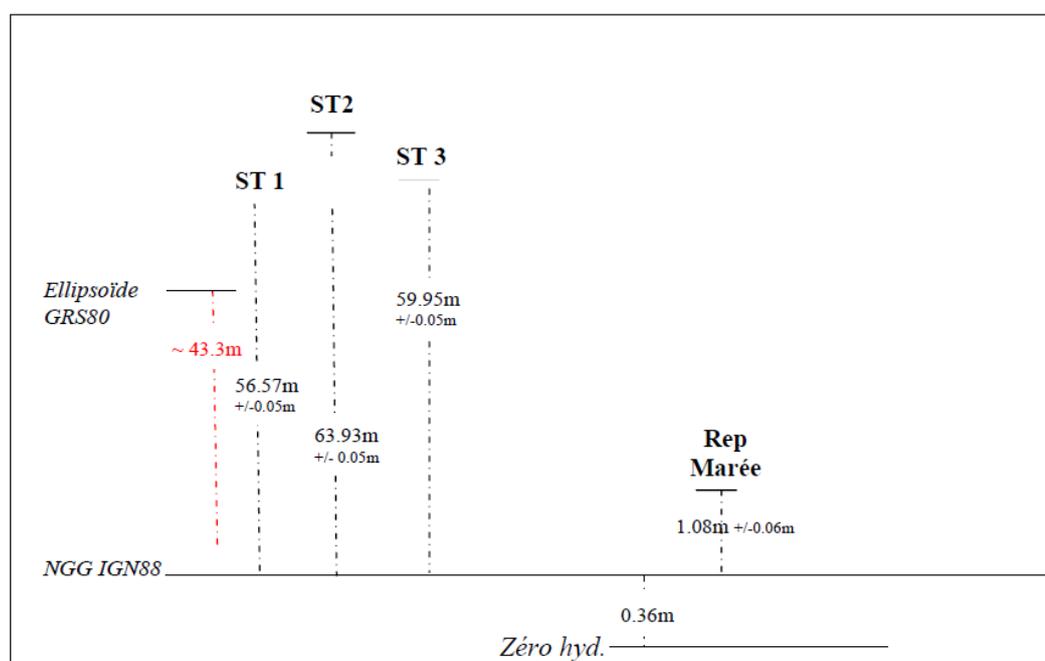


Figure 2.3 Schéma de rattachement des altitudes des repères géodésiques de Marigot (Réf. /14/)

2.3 Repères kilométriques

Dans le cadre de la présente étude, un repère kilométrique sous la forme de profils perpendiculaires au trait de côte a été défini depuis la Pointe des Pierres à Chaux à l'ouest (Profil 0) jusqu'au Port de Galisbay à l'est (Profil 6700), comme illustré en Figure 2.4.



Figure 2.4 Repères kilométriques le long du littoral de La Belle Créole jusqu'au Port de Galisbay.

2.4 Photographies des plages de Sandy Ground et Galisbay

Des photographies des plages Sandy Ground (Figure 2.5) et de Galisbay (Figure 2.6) sont présentées ci-après.

Dans le quartier de Sandy Ground, le front de mer est occupé par une urbanisation dense qui a remplacé la plage d'origine à l'est. Plus à l'ouest, la plage s'élargit vers la Baie Nettlé, où le cordon littoral sépare l'océan du Grand Étang de Simsonbaai (Figure 2.5).

Dans la Baie de la Potence, où se situe la Plage de Galisbay, l'érosion de la couverture sableuse laisse apparaître des « beach-rocks » (Figure 2.6), témoins de niveaux marins anciens supérieurs à l'actuel et d'une attaque frontale de la quasi-totalité des houles.



Figure 2.5 Plage de Sandy Ground : au niveau du profil 2700 (haut) et du profil 2400 (bas)



Figure 2.6 Plage de Galisbay : vue globale (haut), granulométrie variable à l'ouest (milieu), beach rock à l'est (bas).

3 Conditions météocéaniques et hydrographiques

3.1 Climat

Le climat des îles du nord de l'Arc Antillais est de type tropical maritime, partagé entre :

- Une saison sèche (« carême », de décembre à mai) avec des pluies peu abondantes et des températures modérées ;
- Une saison humide et plus chaude (« hivernage », de juin à novembre), avec les Alizés tropicaux humides en juin-juillet puis une période de plus basse pression liée à la remontée de la ZCIT, d'août à novembre, saison propice aux cyclones.

3.2 Vents

Saint-Martin est soumis à trois types de vent principaux : les alizés, les northers, et les vents cycloniques.

Les alizés

Ils sont générés par l'Anticyclone des Açores. Pendant la saison sèche, il descend au sud et renforce les vents d'est-nord-est sur les Antilles. Pendant l'hivernage, il se déplace vers le nord, les Alizés sont alors affaiblis et irréguliers.

Les northers

Ce sont des vents froids de secteur nord-est à nord-ouest, qui atteignent parfois les Antilles pendant les mois d'hiver (novembre à mars). Ils soufflent derrière le front froid des perturbations qui se déplacent d'ouest à est dans l'Atlantique nord. Ils débutent généralement par un fort coup de vent de secteur ouest à nord-ouest accompagné de fortes averses. Après quelques heures, ils s'établissent au nord et peuvent souffler avec violence, parfois en tempête, pendant plusieurs jours. (Réf. /4/).

Roses des vents

Le modèle CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) a été développé par l'Administration Nationale Océanographique et Atmosphérique aux États-Unis (NOAA) et dirigé par le Centre National de Prévision Environnementale (NCEP). Le modèle CFSR est un système global de haute résolution, couplant les systèmes atmosphère-océan-terre et glace-surface de la mer, qui a été conçu et exécuté pour fournir les meilleures estimations possibles de l'état de chacun de ces domaines sur la période allant de 1979 à 2010. Le modèle CFSR actuel est étendu en système de prévision « Reforecast » à partir de 2011 (produit opérationnel, en temps réel). Les données CFSR globales sur les vents sont fournies par la NOAA du 01/01/1979 jusqu'à ce jour, avec des valeurs horaires. Le modèle a une résolution de 0,3° soit environ 38 km avant 2011 (système de réanalyse) puis de 0,2° soit environ 22 km (système de prévision).

Rose des vents globale (2010 – 2020)

L'analyse des données CFSR sur la période 2010 et 2020 confirme que le climat est dominé par les vents du secteur est-nord-est (Figure 3.1), avec sur l'année 93% des vents provenant du secteur SE à NE.

Seulement 2% des vents sont inférieurs à 2 m/s (7 km/h), mais 37% sont compris entre 6 et 8 m/s (20-30 km/h). De plus, 5% des vents sont supérieurs à 10 m/s (36 km/h).

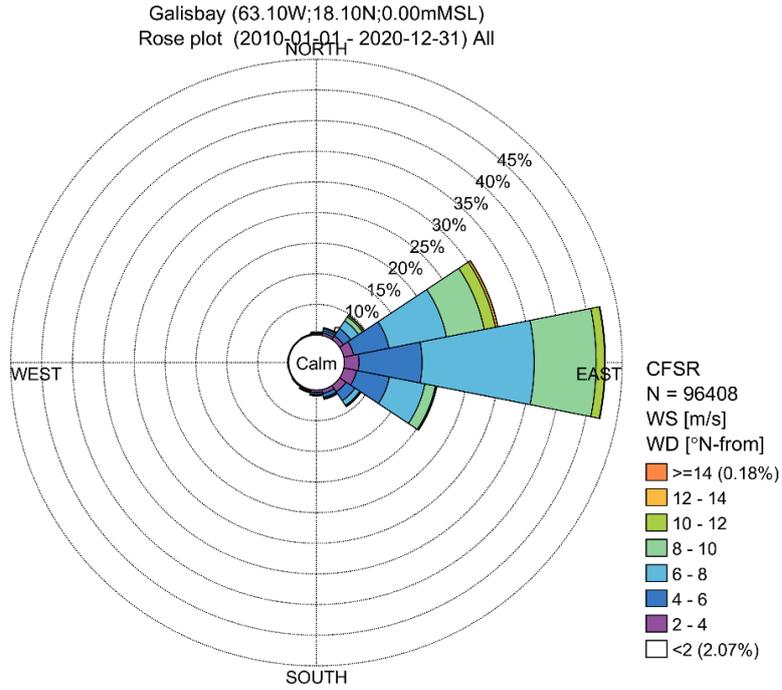


Figure 3.1 Rose des vents (direction d'où il vient) sur 2010-2020, à Saint-Martin – Données CFSR

Roses des vents saisonnières (2010 – 2020)

Les roses saisonnières (Figure 3.2) mettent en évidence que :

- En début d'hiver (décembre – février), les alizés d'E-NE se renforcent, avec 36% des vitesses supérieures ou égales à 8 m/s et 10% >10 m/s.
- En début de saison humide (juin-juillet), les vents sont en général plus faibles (25% > 8m/s et 2% >10 m/s) et orientés plus à l'est.
- Pendant l'hivernage (août-novembre), les vents sont à nouveau du secteur SE à NE, avec 3% des vitesses >10m/s mais pouvant aller jusqu'à 38 m/s (137 km/h). En cette saison, les vents de plus 35 m/s (125 km/h), associés aux tempêtes tropicales ou aux cyclones ont une probabilité d'occurrence de moins d'une heure par an.

À noter que événements cycloniques sont lissés et donc sous-estimés dans les données CFSR.

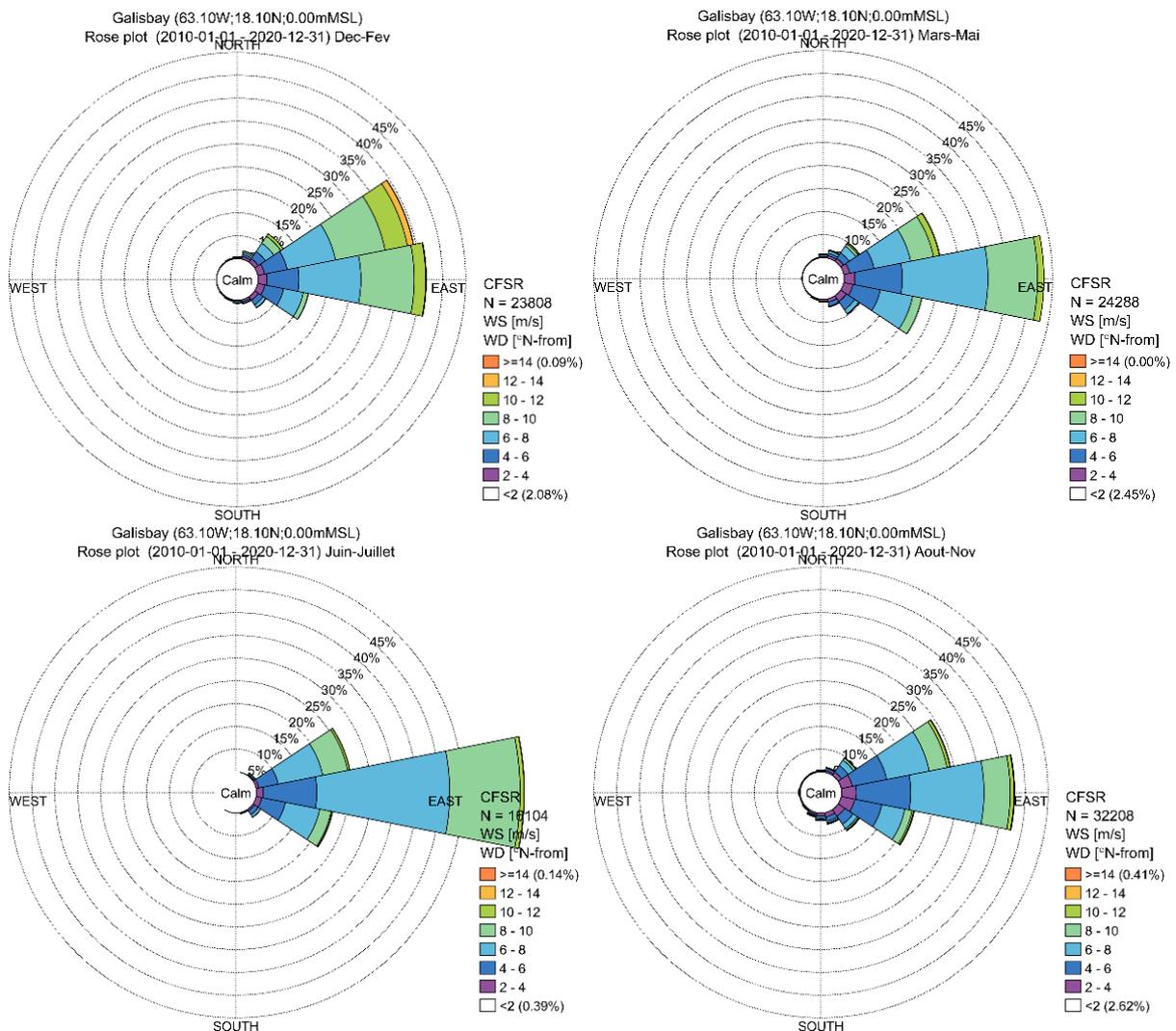


Figure 3.2 Roses des vents sur 2010-2020 à Saint-Martin, pour les quatre saisons – Données CFSR

Les vents cycloniques

Saint-Martin se trouve dans la zone de l'Atlantique où se développent et passent des dépressions cycloniques. La saison des cyclone dure essentiellement de juillet à octobre, avec une période de forte fréquence en août et septembre (Réf. /4/).

Entre 1851 et 2021, la NOAA recense 68 cyclones de catégorie 1 à 5 dont le centre est passé à moins de 200 km de Saint-Martin, soit en moyenne tous les 3 ans.

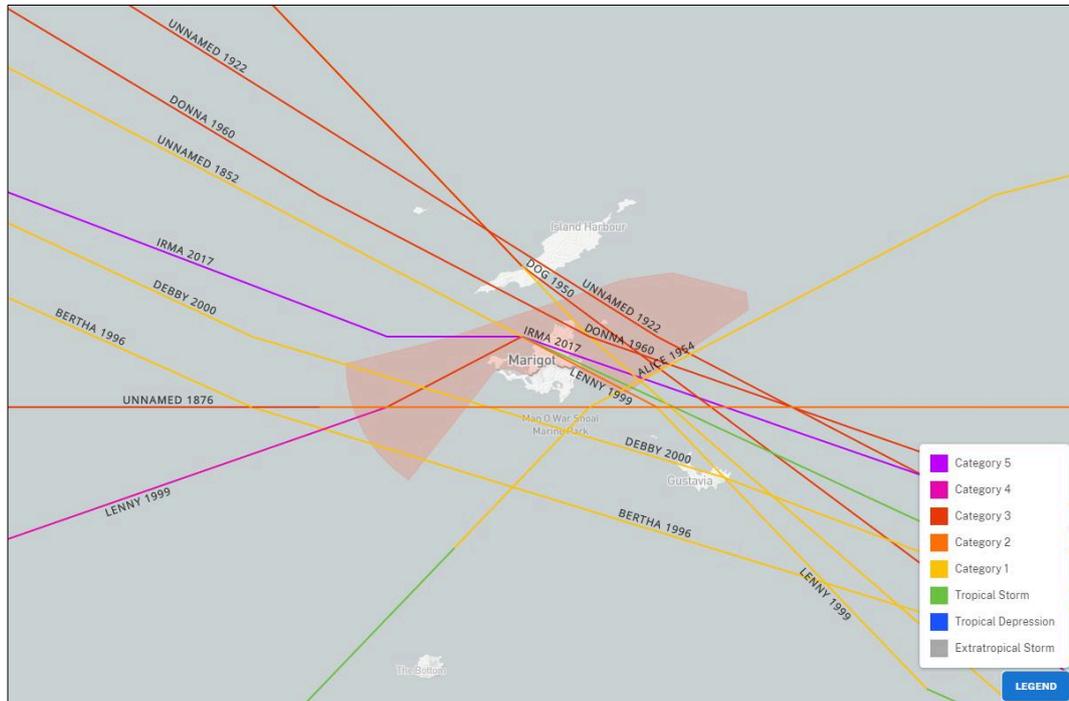


Figure 3.3 Trajectoires des cyclones dont la trajectoire est passée sur Saint-Martin entre 1851 et 2021 (<https://coast.noaa.gov/hurricanes>).

Les derniers cyclones ayant affecté l'île sont (Réf. /12/) :

- Irma, le 6 septembre 2017. Ouragan de classe 5
- Gonzalo, le 13 octobre 2014. Ouragan de classe 1
- Earl, le 31 août 2010. Ouragan de classe 3
- Omar, le 15 octobre 2008. Ouragan de classe 3
- Debby, le 22 août 2000. Ouragan de classe 1
- Lenny, le 19 novembre 1999, caractérisé par une forte houle d'orientation inhabituelle liée au déplacement d'ouest en est du cyclone
- José, le 20 octobre 1999
- Georges, le 21 septembre 1998
- Bertha, le 8 juillet 1996. Ouragan de classe 1
- Marylin, les 14 et 15 septembre 1995
- Luis, les 4 et 5 septembre 1995. Ouragan de classe 4, passe à proximité immédiate des Iles du nord, il crée d'importants dégâts, avec des vents enregistrés à 220 km/h. La forte houle cyclonique l'accompagnant a dévasté également les récifs peu profonds. La hauteur des vagues enregistrée à Port-Louis, en Guadeloupe, a atteint 6,5 m en moyenne, ce qui signifie que des vagues ont pu dépasser 10 m ;
- Iris, le 27 août 1995
- Klauss, le 06 octobre 1990 ;
- Hugo, les 16 et 17 septembre 1989
- Faith, le 27 août 1966
- Donna, le 5 septembre 1960. Ouragan de classe 4

L'ouragan Irma (source DEAL, 2019)

Irma est l'ouragan qui a généré les vents les plus forts dans les Petites Antilles depuis 1851 (Météo-France, 2017) et le seul ouragan de catégorie 5 enregistré à Saint-Martin. Ses effets ont commencé à se faire sentir sur l'île le 6 septembre 2017 vers 3 heures du matin (vents de 130 km/h) (CCR, 2018) et l'œil du cyclone a traversé Saint-Barthélemy et Saint-Martin entre 5h et 8h du matin (Météo-France, 2017). Lors de son passage, les vents soutenus ont été estimés à 287 km/h par le National Hurricane Center (Cangialosi et al., 2018). Une pression atmosphérique minimale de 915,9 hpa accompagnée de rafales à 244 km/h ont été enregistrées à Saint-Barthélemy vers 4h du matin, soit 30 à 45 minutes avant l'arrivée du mur de l'œil et juste avant l'arrêt de la station de mesure. Selon Météo-France (2017) malgré l'absence de mesures pendant le passage du mur de l'œil, il est vraisemblable que des rafales aient pu dépasser les 300 km/h.

3.3 Vagues

La caractérisation du climat de vagues à Saint-Martin réalisée ci-après repose sur le modèle régional de propagation des vagues développé par DHI dans le cadre de la présente étude (Réf. /9/).

Les résultats dans la baie de Galisbay seront précisés en Phase 2, à partir des résultats du modèle raffiné.

Champs de vagues

Les vagues dans ce secteur des Petites Antilles proviennent au large essentiellement du secteur nord-est :

- Les houles proviennent du nord-est
- alors que la mer de vent provient du secteur est-nord-est, en accord avec les vents dominants (Alizés).

Sur le plateau, les vagues du large se propagent en se réfractant autour des îles d'Anguilla, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. Dans le canal d'Anguilla, les vagues s'engouffrent facilement mais s'atténuent en se propageant dans les petits fonds, limitant ainsi fortement l'agitation au niveau de la baie de Galisbay, comparé à la côte est de Saint-Martin plus exposée. Ce phénomène est illustré sur les champs de vagues présentés Figure 3.4.

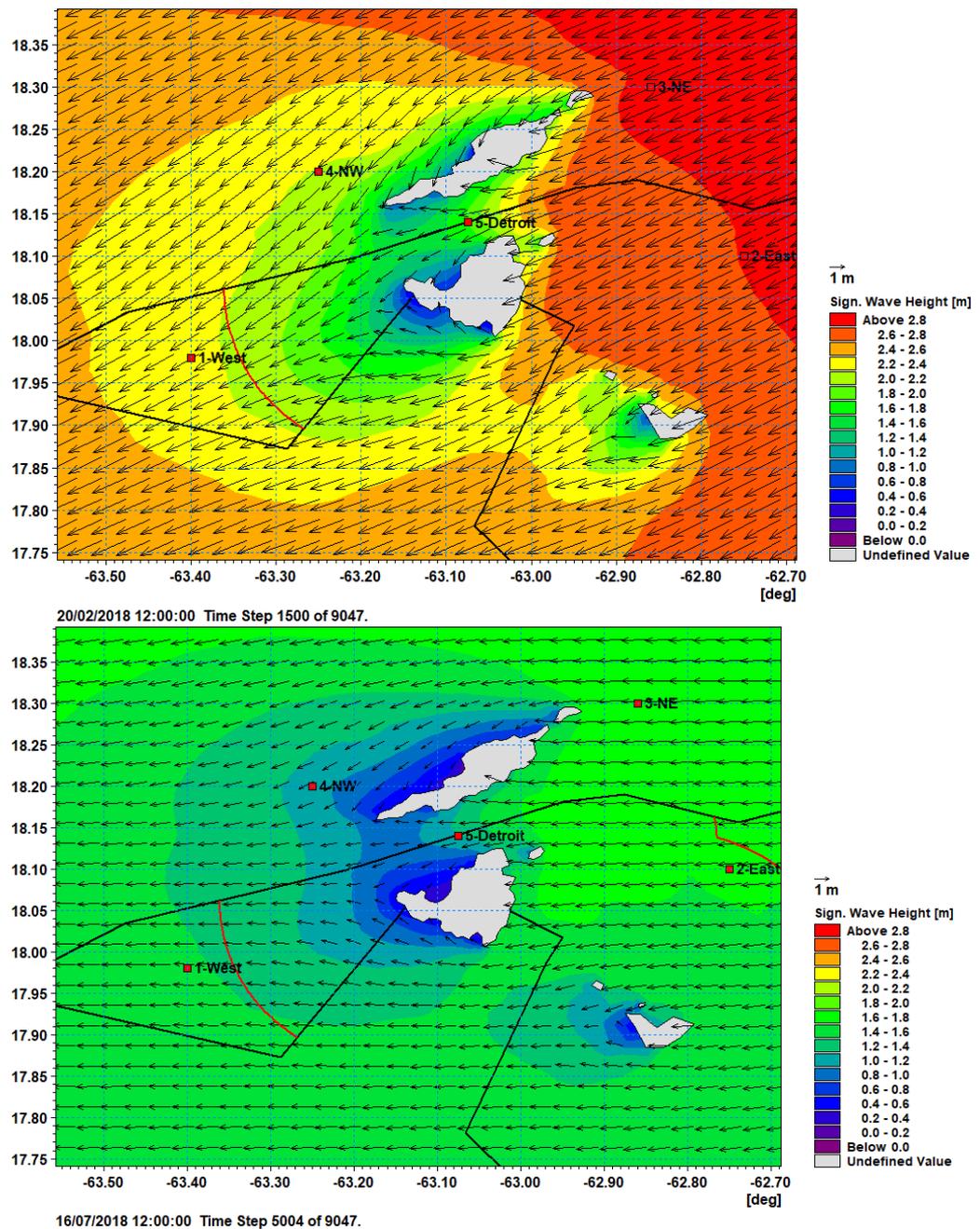


Figure 3.4 Champs de vagues du nord-est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : le 20/02/2018 lors d'Alizés de nord-est (en haut) et le 16/07/2018 en saison humide avec des vagues au large venant de l'est (en bas).

Les résultats du modèle montrent aussi que lorsque les houles au large s'orientent un peu plus au nord (direction de provenance), elles sont réfractées autour d'Anguilla et peuvent alors atteindre la baie de Galisbay et y induire des conditions d'agitation particulièrement fortes. Ces conditions sont en effet connues comme telles par les usagers locaux, notamment par les pêcheurs et les plongeurs. Cette situation est illustrée Figure 3.5 avec l'événement de Northers de début mars 2018.

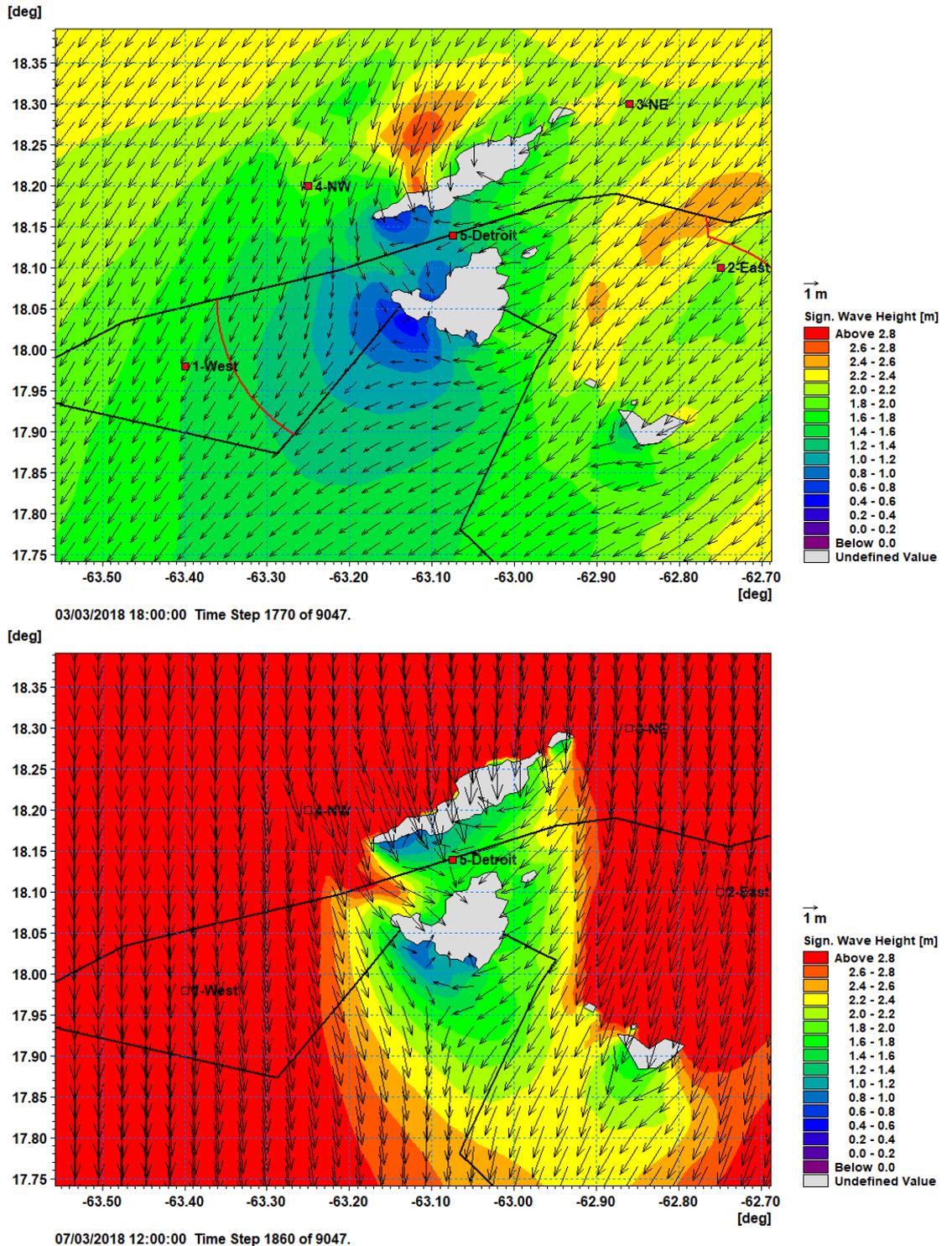


Figure 3.5 Champs de vagues du secteur nord-nord-est se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : événement de Northers, situations au 3 et 7 mars 2018.

Roses des vagues

Rose des vagues globale (2010 – 2020)

Les roses des houles sur 2010-2020 illustrées ci-dessous ont été extraites en deux points au nord-ouest (P4-NW) et au nord-est (P3-NE) de Saint-Martin, localisés en Figure 3.5.

La rose au point 4-NW montre bien l'effet de réfraction autour du plateau d'Anguilla avec une rose décalée vers le nord-nord-est et des hauteurs plus faibles qu'à l'est des îles.

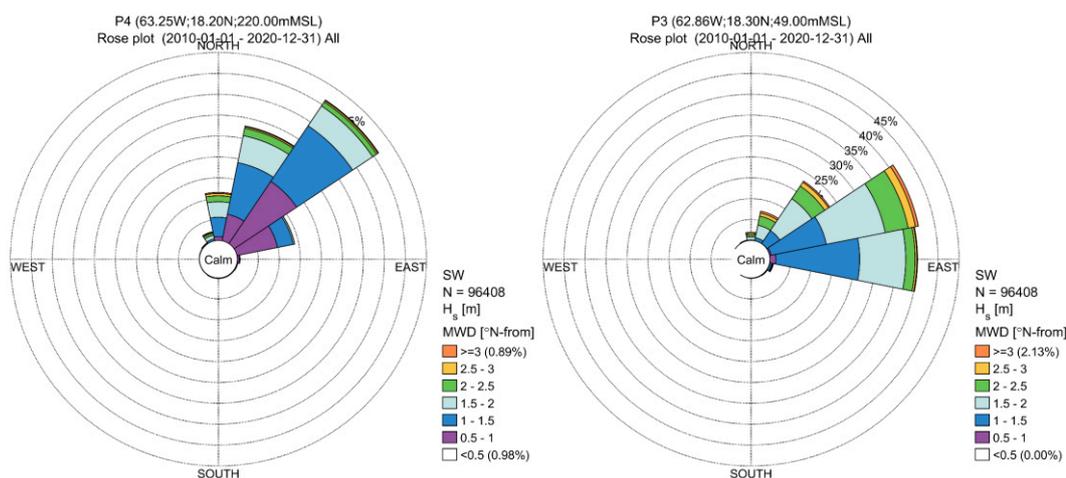


Figure 3.6 Roses des vagues modélisées aux points P4-NW (gauche) et P3-NE (droite) sur 2010-2020

Roses des vagues saisonnières (2010 – 2020)

Enfin, l'analyse saisonnière des vagues à P4 et P3 (Figure 3.7) met en évidence une période de plus faibles conditions d'agitation en juin-juillet, début de saison humide, avec des vagues orientées plus à l'est. C'est pendant la saison sèche de décembre-Février, que les conditions agitées sont les plus fréquentes, avec l'établissement des Alizés soufflant du nord-est. Pendant la saison cyclonique (Aout-Novembre) les vagues de plus de 3m au point 3-NE ne représentent ici que 1.5% du climat de houles.

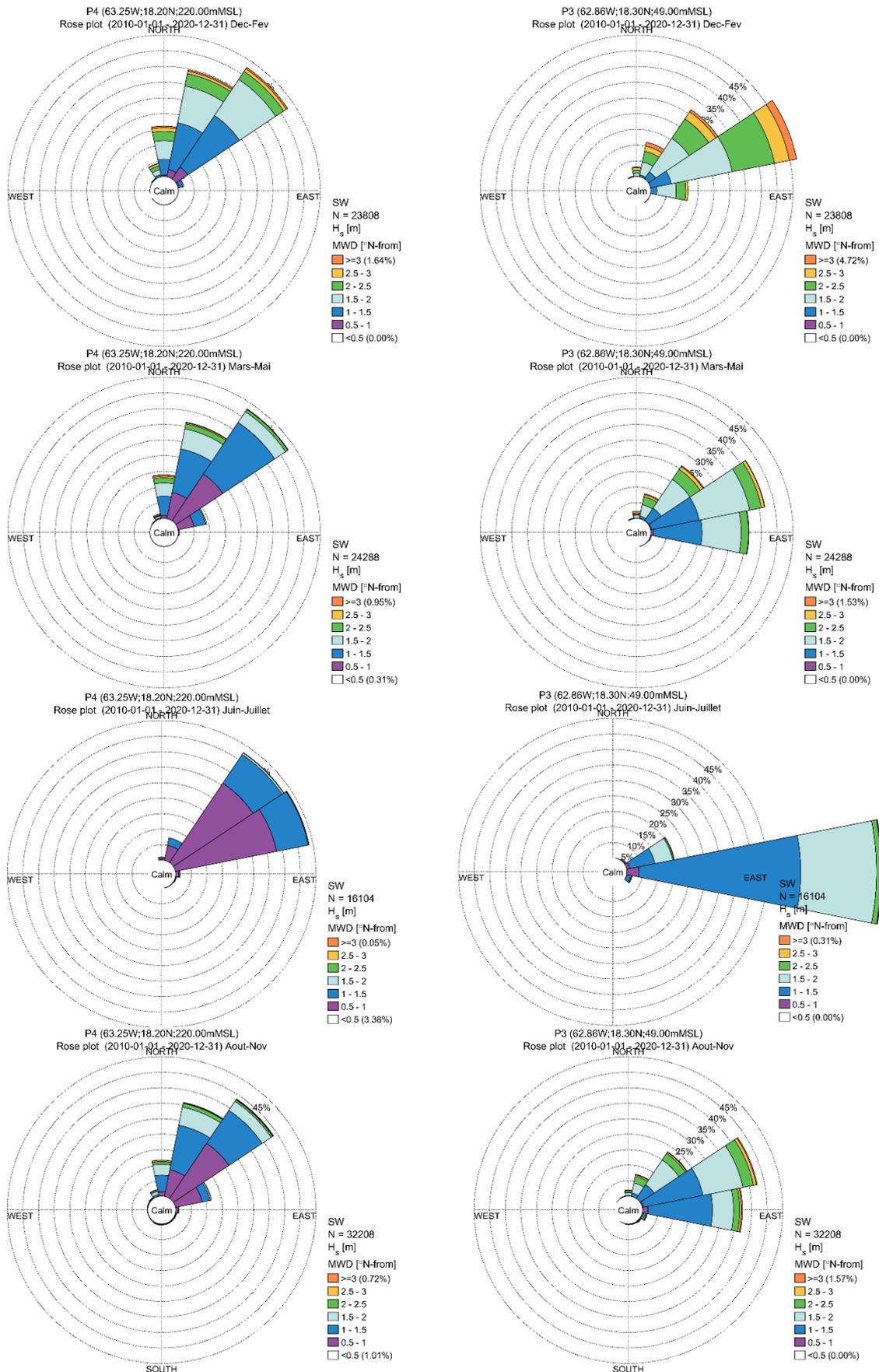


Figure 3.7 Roses des vagues 2010-2020 à P4-NW (à gauche) et à P3-NE (à droite) pour les saisons décembre-février, mars-mai, juin-juillet et août-novembre.

Les houles cycloniques

La houle cyclonique se forme à la périphérie du cyclone. Dans l'hémisphère nord, les lames générées sur le flanc droit du cyclone sont les plus redoutables. Pouvant précéder l'arrivée du cyclone, elles sont formées par les vents les plus violents qui résultent de l'addition de la vitesse du cyclone et de celle des vents tournant dans le sens trigonométrique.

La houle issue du flanc gauche peut se faire sentir sur la côte des Caraïbes longtemps après le passage de la tempête.

Lors du cyclone Lenny (1999), sur le littoral de Basse-Terre (Guadeloupe), des observateurs ont estimé la hauteur des vagues à environ 4 mètres. Toujours d'après la même source, la hauteur des vagues a été estimée à 5 mètres dans la rade de Gustavia sur l'île de Saint-Barthélemy. Au paroxysme de la tempête de la hauteur des lames a pu y atteindre 8 mètres, voire les dépasser.

D'après différentes observations satellitaires et les données de rapports d'étude, les houles cycloniques peuvent avoir, au large, des hauteurs (crête à creux) de l'ordre de 10 à 12 mètres.

La hauteur résiduelle de la houle à la côte peut être de l'ordre de 5 à 6 mètres et exceptionnellement dépasser 6 mètres (David en 1979 ou Luis en 1995) (Réf. /4/).

L'ouragan Irma

La hauteur des vagues lors de l'ouragan Irma n'a pas été mesurée, mais des simulations de vagues moyennes donnent des valeurs de 5 à 9 m à Saint-Barthélemy et de 4 à 6 m à Saint-Martin (Météo-France, 2017) (Réf. /12/).

Mesures disponibles

Jusqu'en 2021, il n'existait pas de mesures de houles aux abords de Saint-Martin.

Une bouée houlographe a été installée début 2021 par le BRGM et la Collectivité de Saint-Martin, dans le cadre du projet Carib-Coast (BRGM/Météo-France). Des mesures complémentaires en 3 points et sur 4 mois sont en cours depuis fin avril 2022, dans le cadre de la Phase 4 du projet d'extension du port de Galisbay.

Les noms et positions des stations sont données dans le Tableau 3.1. La Figure 3.8 illustre leur position.

Tableau 3.1 Stations de mesures de houle aux abords de Saint-Martin

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	Profondeur	Disponibilité des mesures
BRGM	-62.9912	18.137	35	15/09/2021 – auj.
ALIZE	-63.2329	18.0417	630	26/04/2022 – 09/2022
A1	-63.0850	18.1120	16	26/04/2022 – 09/2022
A2	-63.1210	18.0880	17	26/04/2022 – 09/2022

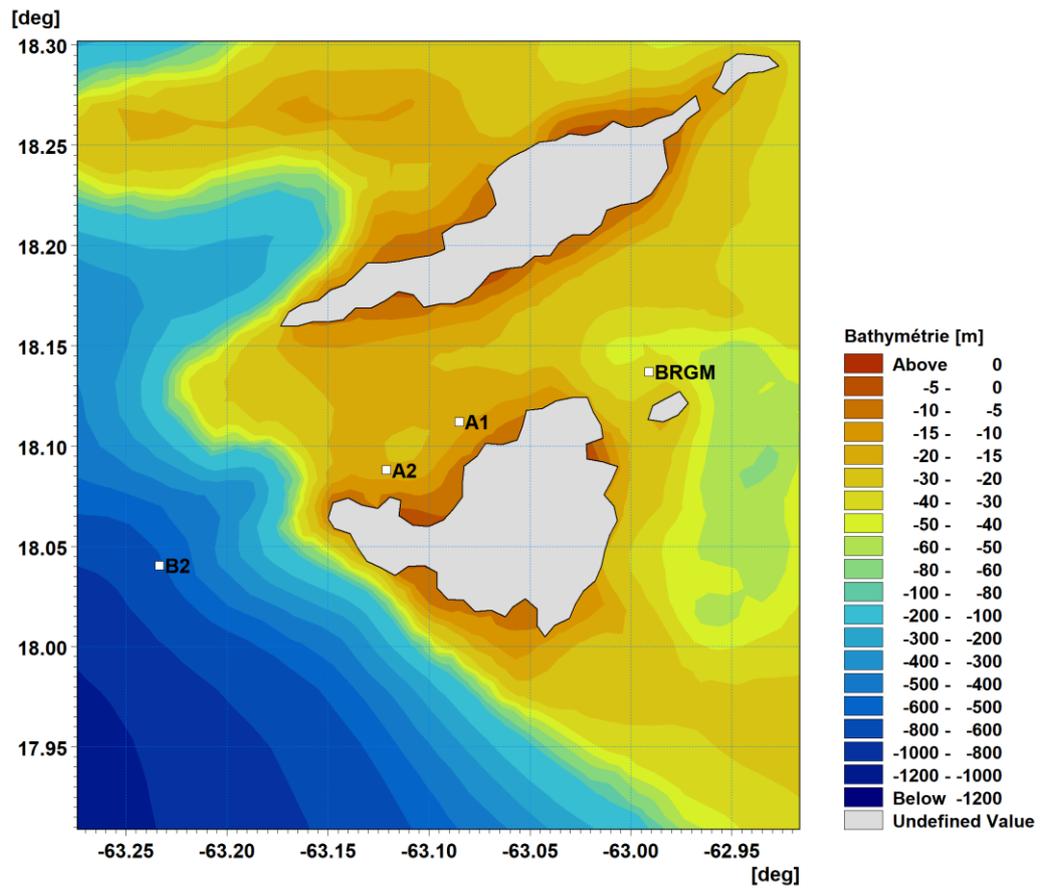


Figure 3.8 Position des stations de mesures de houle aux abords de Saint-Martin.

3.4 Niveaux d'eau

Marée astronomique

Dans la mer des Caraïbes, l'onde semi-diurne M2 possède deux points amphidromiques (amplitude nulle). Le premier est situé à 170 milles nautiques (315 km) au sud de la Jamaïque, et l'autre sur la côte sud de Porto-Rico. L'onde se propage dans le sens anti-trigonométrique autour du premier et dans le sens trigonométrique autour du second. Il en résulte que dans les petites Antilles, l'onde semi-diurne se propage du sud vers le nord. (Réf. /4/).

A Saint-Martin, la marée théorique est de type semi-diurne à inégalité diurne.

Le marnage est relativement faible : 0,25 m en vive-eau, et jusqu'à un maximum de 0,60 m en vive-eau extrême (selon le RAM 2020 du SHOM, Tableau 3.2).

Tableau 3.2 Références Altimétriques à Saint-Martin (SHOM, RAM 2020). PHMA : Plus Hautes Mer Astronomiques ; PBMA : Plus basses Mers Astronomiques ; NM : Niveau Moyen ; ZH : Zéro Hydrographique.

Nom	Type	Lat.	Long.	Et.	Année CH	PHMA	PMVE	NM	BMVE	PBMA
Saint-Martin Marigot ¹	R	18 04 N	63 05 W		2012	00.83	00.65	00.53	00.40	00.23
Saint-Martin et Saint-Barthélemy										

Nom	Repère fondamental	Organisme	Date	RF/ZH	RF/Ref	ZH/Ref	ZH/Elli	Ref
Saint-Martin Marigot ¹	AS-16	IGN	1988	22.099	21.739	-0.360	-43.71	IGN88
Saint-Martin et Saint-Barthélemy								

Surcotes météorologiques

Les niveaux d'eau à Galisbay dépendent aussi fortement des conditions météocéniques (vent, pression atmosphérique, onde de tempête, circulation générale et dynamique à plus grande échelle dans le bassin Nord Atlantique).

A l'échelle annuelle, le niveau moyen varie de plus de 25 cm sur l'année 2002 (Figure 3.9). L'augmentation des niveaux moyens clairement visible ici en septembre-octobre est un phénomène retrouvé aussi sur les autres années, sur des durées plus ou moins longues. Elle peut être expliquée par une saison de plus basses pressions atmosphériques, liée à la remontée vers le nord de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT), phénomène ayant lieu d'août à novembre, modifiant la position des centres d'action dépressions/anticyclones sur le bassin atlantique (remontée de l'anticyclone des Açores vers le nord). A contrario, les niveaux sont plus bas en début d'année, sur janvier-mars, du fait de plus hautes pressions atmosphériques (Réf. /8/).

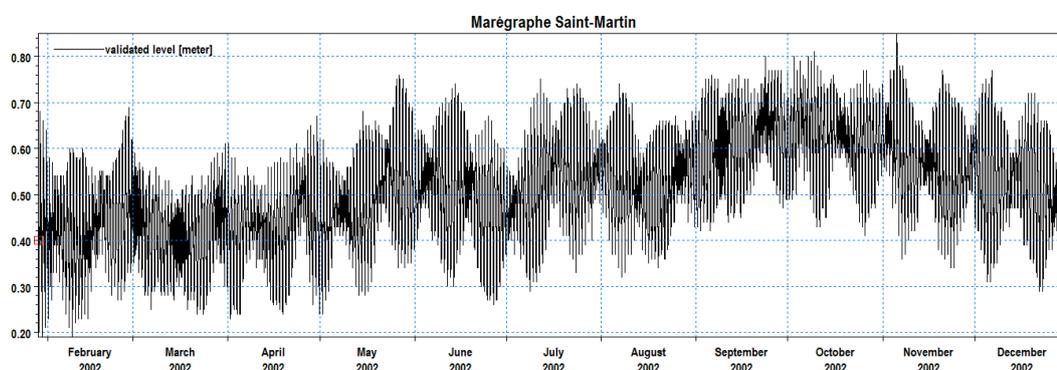


Figure 3.9 Niveaux d'eau mesurés en 2002 au marégraphe de Saint-Martin (en m par rapport au ZH). Données validées mises à disposition sur le site REFMAR.

Lorsque le vent souffle régulièrement pendant un temps suffisant, il fait basculer les plans d'eau. Ainsi, dans les Petites Antilles, lorsque les alizés sont établis, le niveau de la mer est plus haut de 0,30 à 0,40 m sur la côte est exposée au vent que sur la côte ouest (Réf. /4/).

En dehors des passages des cyclones, la contribution des variations de pression atmosphérique sur les niveaux marins est de l'ordre de +/- 0,20 m (Réf. /4/).

Les événements cycloniques peuvent induire ponctuellement de fortes surcotes. La surcote maximale engendrée par un ouragan de classe IV sur l'île de saint-Martin peut atteindre des valeurs supérieures à 2 m (Réf. /4/).

L'ouragan Irma

Lors de l'ouragan Irma, la surcote a été modélisée à plus de 3 mètres dans les baies exposées au nord de Saint-Martin (Météo-France, 2017). La submersion marine qui a accompagné cet ouragan a atteint plusieurs mètres d'eau pour certains quartiers. En octobre 2017, le CÉREMA a ainsi relevé des traces de submersion marine à plus de 4 mètres au-dessus du niveau de la mer (3,5 m à Grand Case, 2,5 m dans le centre de Marigot, 3 m au niveau de la Baie Nettlé, 4 m dans le quartier d'Orléans et presque 5 m à Oyster Pond).

Mesures disponibles

Il existe assez peu d'observations validées horaires du marégraphe de Saint-Martin, localisé au port de commerce de Galisbay (Figure 3.10), géré par la Collectivité et mises à disposition par le SHOM/REFMAR : l'année 2002, de décembre 2009 à janvier 2010, avril 2016 et du 25 juillet au 6 septembre 2017 (Figure 3.11).

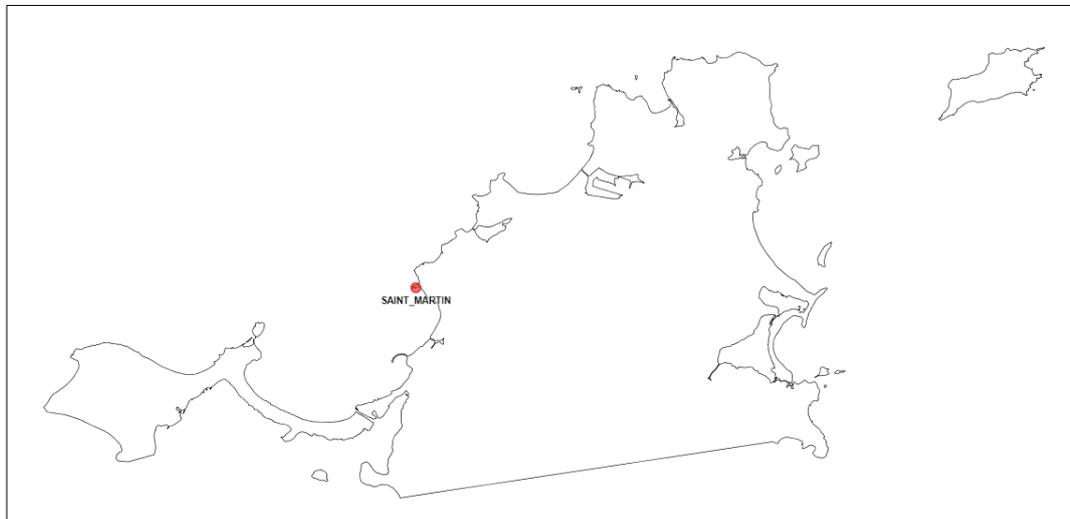


Figure 3.10 Position du marégraphe de Saint-Martin (SHOM)

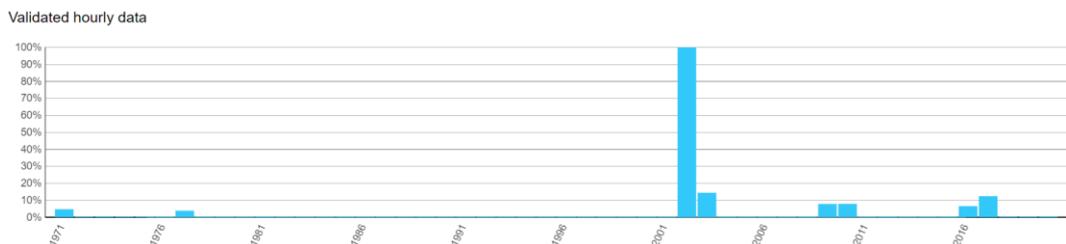


Figure 3.11 Disponibilité des mesures validées horaires au marégraphe de Saint-Martin (SHOM)

3.5 Courants

Courantologie générale

Autour des îles antillaises, les circulations sont complexes et interagissent avec le vent et la bathymétrie.

Elles sont liées principalement à deux courants engendrés par les alizés : la remontée vers le nord du Courant Nord-Equatorial et l'entrée du Courant des Guyanes dans la mer des Caraïbes par les Petites Antilles. Ce courant des Guyanes prolonge le courant Nord-Brazil et est caractérisé par des eaux dessalées de l'Amazonie.

Globalement au niveau des Petites Antilles, les courants généraux portent à l'ouest-nord-ouest avec une vitesse moyenne de l'ordre de 0,5 à 1 nœuds (0,25 à 0,5 m/s) notablement renforcée dans les chenaux entre les îles (Réf. /4/).

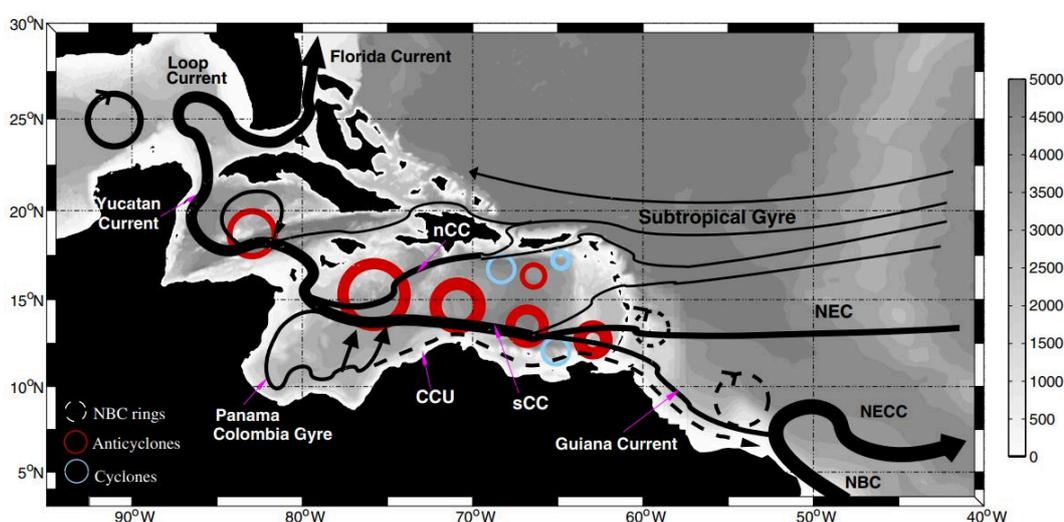


Figure 3.12 Illustration des principaux courants de la Mer des Caraïbes (NBC : Courant Nord Brésilien, NEC : Courant Nord Equatorial, nCC : Courant nord Caraïbe, sCC : Courant sud Caraïbe, CCU : Sous Courant Côtier) (Réf. /16/).

La circulation générale autour de Saint-Martin est influencée par :

- Les fluctuations du Courant Nord-Equatorial remontant à l'est vers le nord.
- Les entrées du Courant des Guyanes dans la mer des Caraïbes, associé à des méandres et tourbillons de grande échelle dans le bassin Vénézuélien, et dont une partie remonte vers Saint-Martin par le sud-ouest.
- Les effets du vent qui entraîne les masses d'eau de surface.
- Les différentes masses d'eau caractéristiques évoluant dans la colonne d'eau. L'eau sous-jacente subtropicale (Caribbean Subtropical Underwater, CSUW), est présente sous la couche mélangée de surface, elle est plus salée car formée par évaporation des eaux de surface. Plus en profondeur, on trouve l'eau de la mer des Sargasses (Sargasso Sea Water, SSW) et l'Eau Centrale de l'Atlantique Tropical (Tropical Atlantic Central Water, TACW).
- Les gradients de densité entre les différentes masses d'eau et les processus de mélange associés dans la colonne d'eau, par effets de cisaillement et effet de flottabilité.
- La marée, bien que d'amplitude faible, interagit avec les circulations et fait fluctuer également les courants sur la colonne d'eau.

Courantologie de la Baie de Marigot

Le fonctionnement courantologique de la Grand'Baie de Marigot a fait l'objet de plusieurs études et campagnes de mesures par le passé :

- Etude de R. Assor du GREGSAT de 1979
- Campagne du GREGSAT de novembre 1990
- Campagne de l'Université de Bordeaux de février 1997
- Campagne de HOCER en décembre 2012 et avril 2013
- Campagne de NORTEKMED en 2022

Les modélisations numériques qui seront réalisées en Phase 2 permettront de préciser le fonctionnement courantologique dans l'ensemble de la Grand'Baie de Marigot.

Etude de R. Assor du GREGSAT de 1979

En 1979, R. Assor du GREGSAT a réalisé une étude sur la courantologie et sédimentologie de la Grand'Baie de Marigot. Cette étude lui a permis de dresser une carte du fonctionnement courantologique du site (Figure 3.13).

Il apparaît que les courants de fond longent parfaitement le trait de côte de la Grand'Baie de Marigot d'est en ouest, tandis que les directions des courants de surface sont sensiblement décalées dans le sens dextrogyre d'un angle allant de l'ordre de 20° à 30° par les fonds de moins de 5 m CM à proximité du littoral jusqu'à 50° dans la partie centrale au nord de la baie par les fonds de 5 à 10 m CM (Réf. /4/).

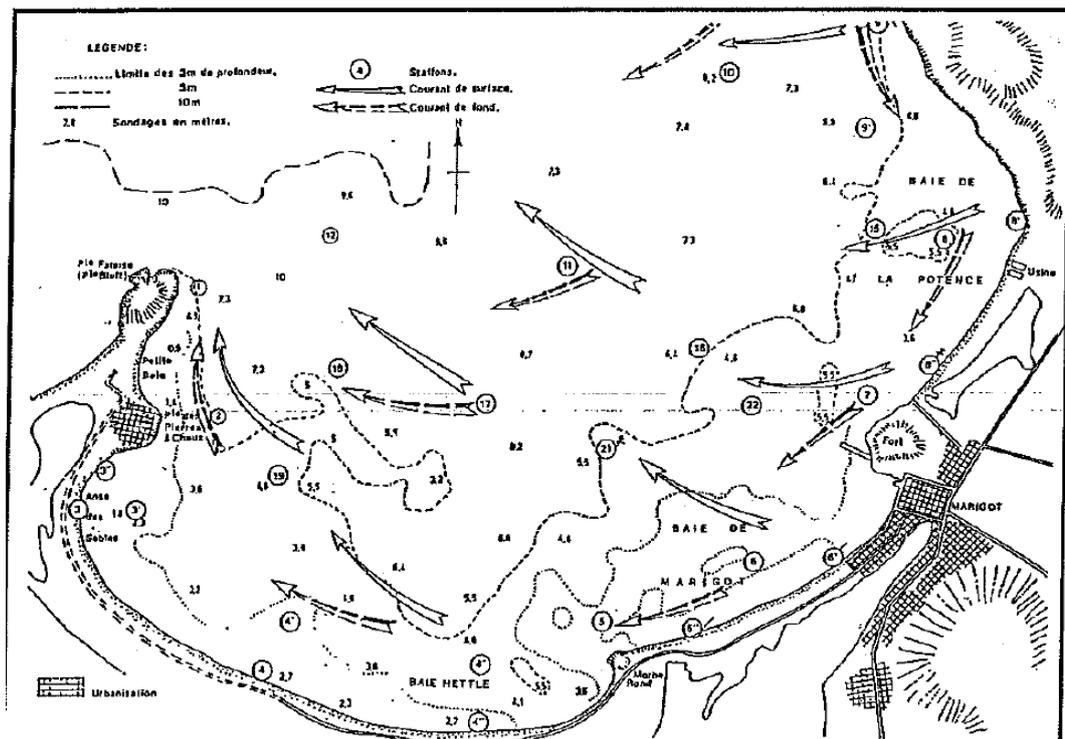


Figure 3.13 Courantologie de la Baie de Marigot.

Campagne de novembre 1990 du GREGSAT

Les conclusions de R. Assor ont été précisées par la campagne de mesures réalisée dans la Grand'Baie de Marigot en novembre 1990 par le GREGSAT.

La figure ci-après présente les courants de surface mesurés dans la partie orientale de la Grand'Baie de Marigot lors de cette campagne. Elle montre que quatre principales directions ont été relevées en surface. Les courants portent :

- D'est en ouest à la périphérie sud-ouest de la zone de mesure,
- Du nord-est au sud-ouest au sud du banc de la Médée et près de la Pointe d'Arago,
- Du sud-est au nord-ouest dans la moitié orientale du site étudié,
- Du sud au nord le long de la côte de Galisbay : du fait de l'action combinée du vent de terre et d'un mouvement tourbillonnaire autour de la Pointe Arago.

Les courants de surface principaux portent vers le nord-ouest et l'ouest (230°N - 360°N).

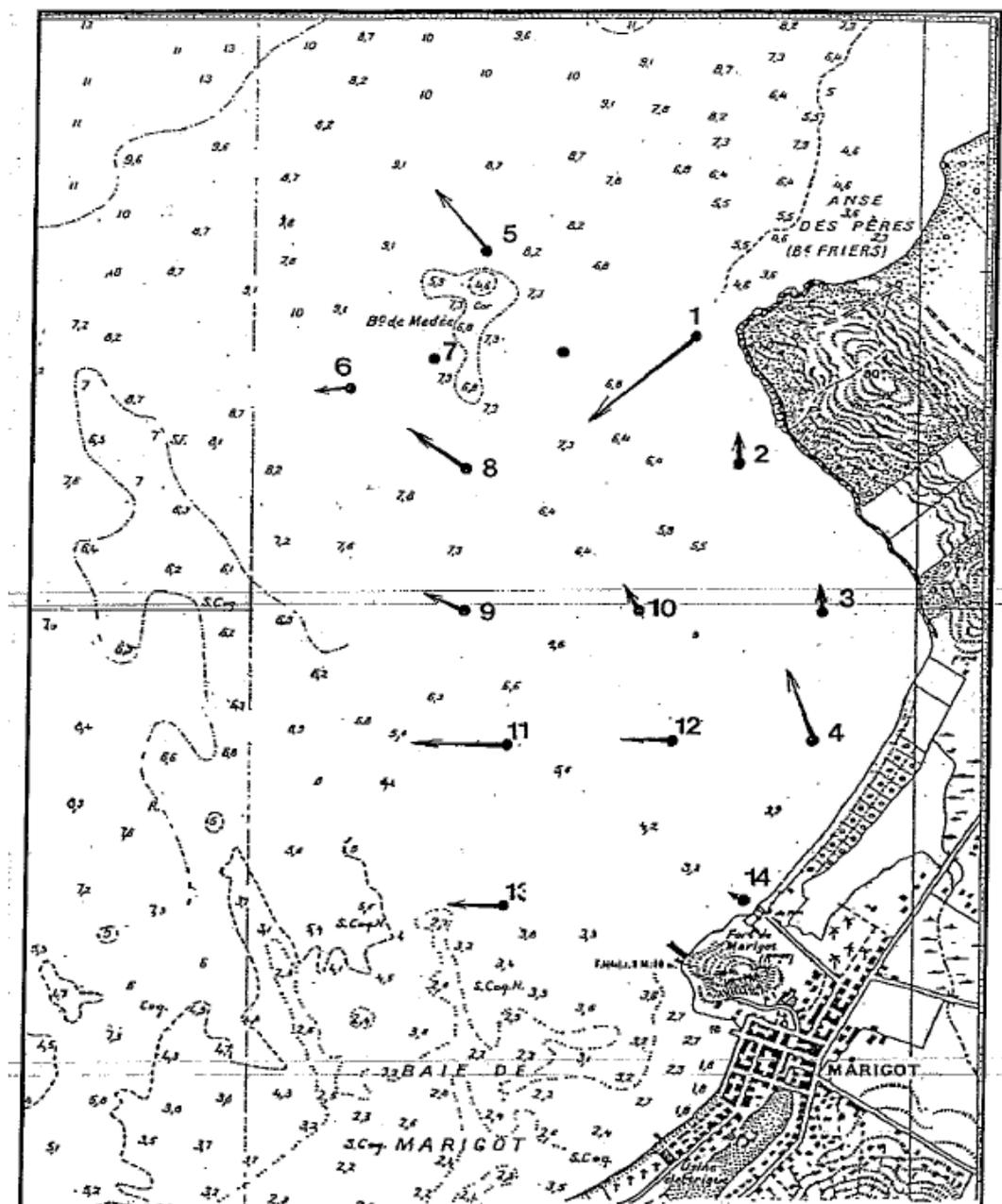


Figure 3.14 Courants de surface dans la Grand'Baie de Marigot en novembre 1990.

Le tableau ci-après présente les vitesses et les directions des courants enregistrées aux 14 stations de mesures.

Il apparaît que les vitesses sont faibles, au plus de l'ordre de 8 cm/s, sauf devant la Pointe Arago en raison de la présence des hauts fonds du banc de Médée.

Tableau 3.3 Caractéristiques des courants de surface et de leur transport par suspension de la Grand'Baie de Marigot en novembre 1990

Station	Vitesse (cm/s)	Direction (°N)	MES (mg/l)
1	12.0	230	18.8
2	2.6	360	-
3	2.1	355 / 340	90.0
4	7.0	340	62.0
5	7.2	320	36.0 / 59.0
6	2.8	265	38.4
7	-	-	62.8
8	6.4	305	35.2
9	4.0	295	38.4
10	3.0	330	-
11	8.3	270	38.0
12	4.5	270	48.0
13	5.0	270	-
14	1.0	315	75.6

Campagne de février 1997

Des mesures de courants ont également été effectuées en février 1997 par une équipe de l'université de Bordeaux avec deux courantographes enregistreurs situés au nord de Marigot à 1 m au-dessus du fond.

- Au point A (5 m de fond), dans le Baie de la Potence du 11 février à 9 h au 12 février à 9 h
- Au point B (4 m de fond), dans la Baie de Marigot, du 11 février à 10 h au 12 février à 10 h.

L'acquisition a été réalisée toutes les 20 minutes. Les conclusions du rapport sont rapportées ci-après.

Les marées des 11 et 12 février 1997 correspondaient aux grandes vives eaux (coefficients de 105 à 115). Pendant toute la période de mesure, l'état de mer était relativement calme et les conditions atmosphériques caractérisées par un régime de vent d'est -30-35 km/h avec des rafales pouvant atteindre 50 km/h et des pluies intermittentes sous forme d'averses.

- L'enregistrement de la station A de la Baie de la Potence montre l'existence d'un courant faible de 2 à 5 cm/s. Les courants ont porté dans deux directions principales, au 160°N et au 230°N.
- L'enregistrement de la station B de la Baie de Marigot fait également apparaître un courant faible de 3 à 5 cm/s. Suite à un incident, la direction du courant n'a pu être mesurée au point B.

Cette nouvelle mesure confirme toutefois le décalage dextrogyre de la direction du courant mesurée en surface (Figure 3.14) par rapport à celle mesurée au fond (Figure 3.15).

Compte tenu du faible ordre de grandeur des vitesses observées, et de la permanence de leur direction au cours de la marée, il apparaît que la dérive côtière dans la Grand'Baie de Marigot est essentiellement due aux houles et au vent prédominant de secteur est-nord-est.

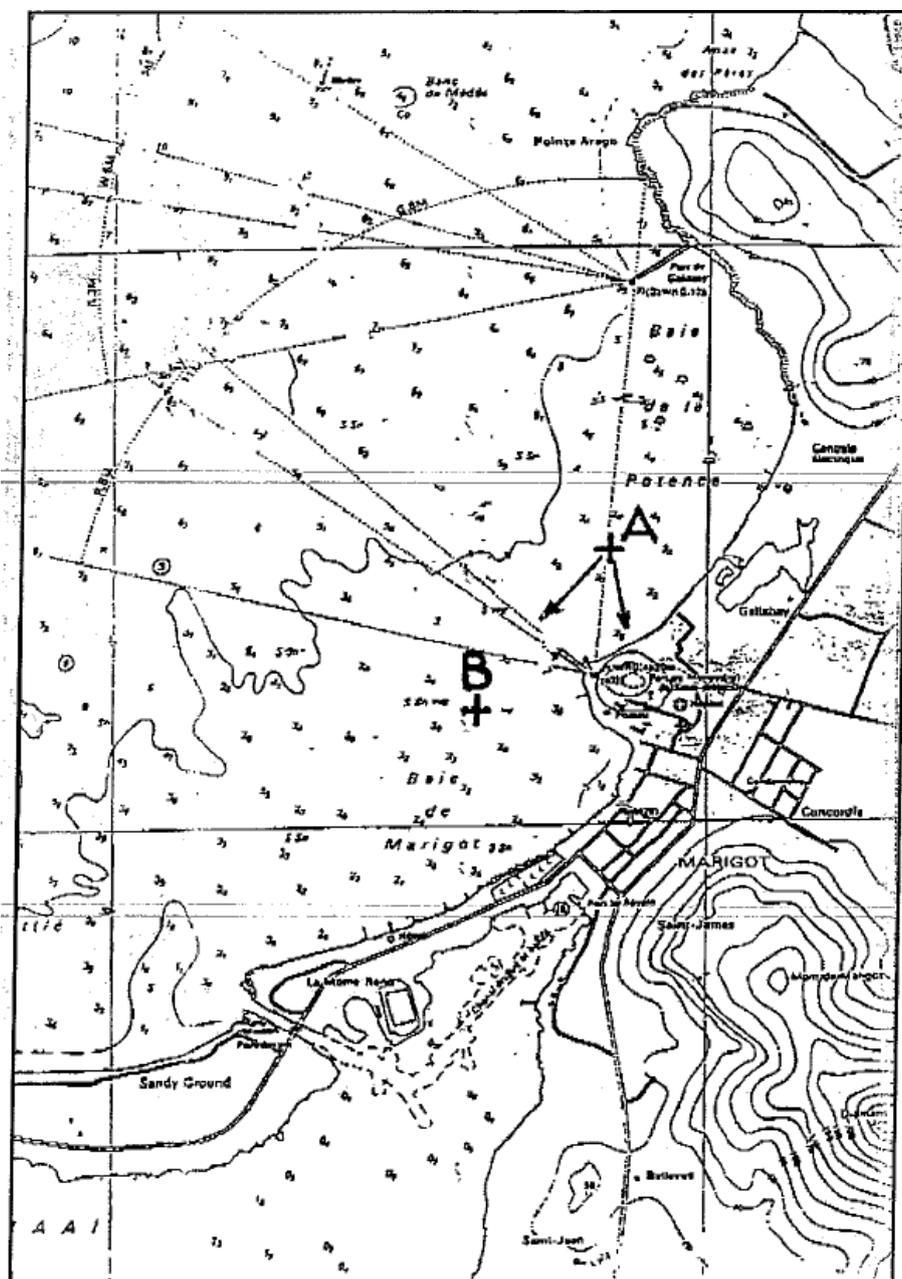


Figure 3.15 Implantation des courantographes devant Marigot (les flèches indiquent le sens des courants) (Bougis, 2003)

Campagne de HOCER (2012 et 2013)

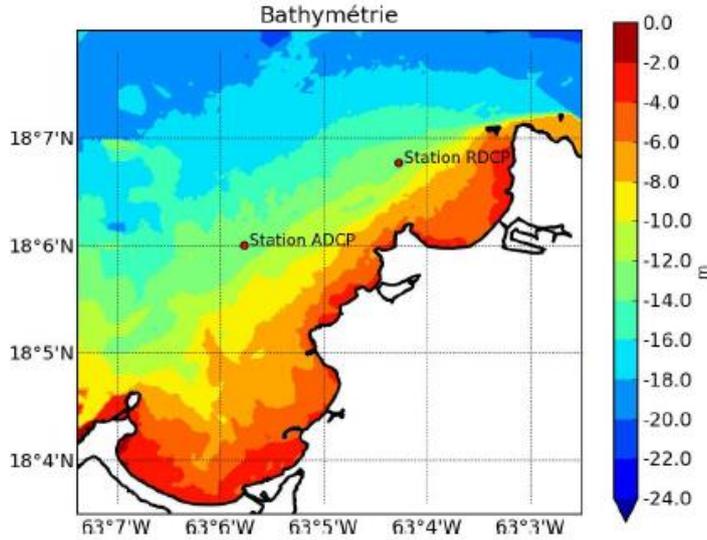


Figure 3.16 Localisation des stations de mesures de courants réalisées en 2012 et 2013 par HOCER (Réf. /13/).

En décembre 2012 (Figure 3.17), les vents proviennent essentiellement du secteur Est-Nord-Est, avec des vitesses de l'ordre de 6-8 m/s, et de 10-12 m/s du 10 au 14 décembre 2012. Sur ces quelques jours, les mesures ADCP, montrent une intensification des courants portant au Sud-Ouest ($> 0.35\text{m/s}$), alors que les courants de jusant vers l'Est sont très faibles voire inexistants, inversés par les effets du vent.

Les mesures montrent une dynamique assez homogène sur la colonne d'eau, mais il faut noter que l'ADCP n'échantillonne pas la couche de surface 0-2m ni celle proche du fond, zones de plus fort gradient.

Les inversions de direction de courant vers le Nord-Est sont visibles mais non régulières et en général de durée plus courtes que les courants portant au Sud-Ouest. Les courants de marée sont difficiles à identifier car ils sont faibles et souvent perturbés par les effets du vent et de la circulation dans le canal d'Anguilla.

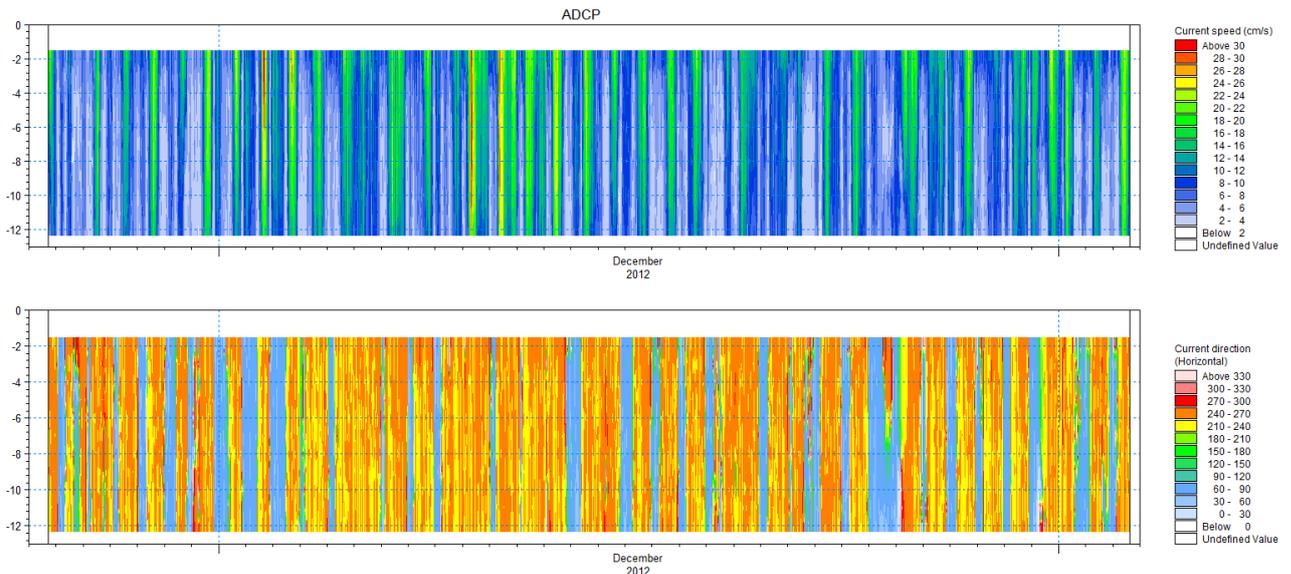


Figure 3.17 Période du 24 novembre 2012 au 03 janvier 2013 : vitesses (haut) et direction(bas) des courants sur la colonne d'eau mesurés par l'ADCP (HOCER)

En avril 2013, le vent est toujours de secteur Est et varie de 5 à 10 m/s.

Les courants sont dans l'ensemble plus faibles qu'en décembre. Les courants moyens sur la colonne d'eau fluctuent entre 0.05 et 0.2 m/s.

Certaines périodes présentent des intensifications des courants vers le Sud-ouest, jusqu'à 0.35-0.40 m/s en surface : du 29 mars au 2 avril puis les 19-23 avril, avec très peu d'inversion des courants vers l'Est.

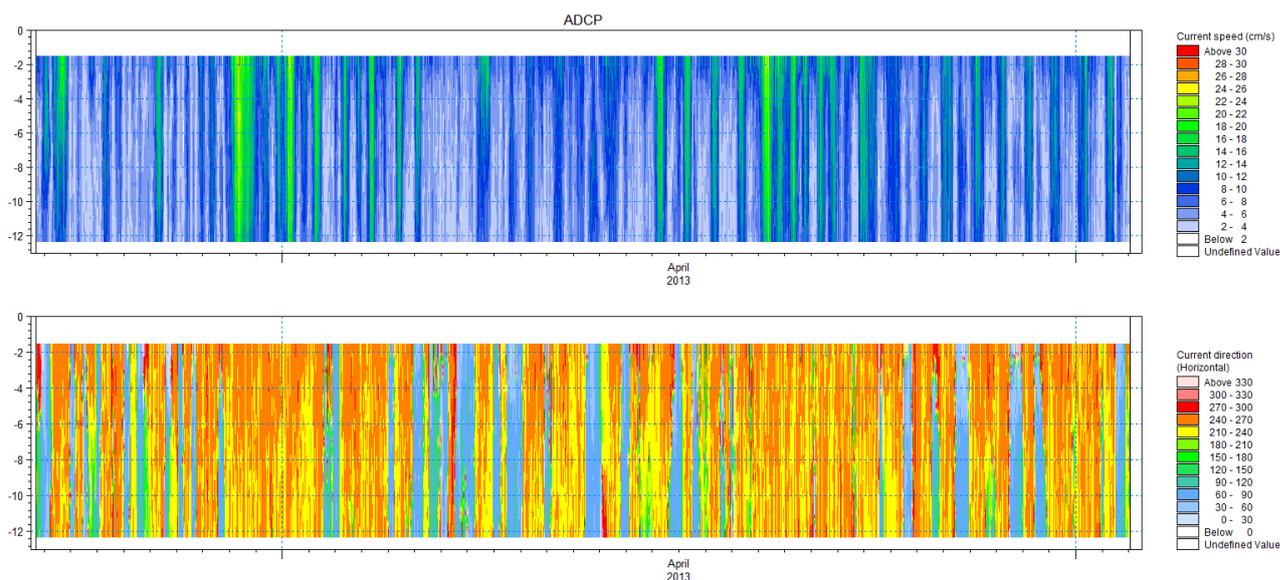


Figure 3.18 Période du 22 mars au 02 mai 2013 : vitesses (haut) et direction des courants (bas) sur la colonne d'eau mesurés par l'ADCP (HOCER)

Campagne de NORTEKMED (2022)

Des mesures complémentaires en 3 points et sur 4 mois sont en cours depuis fin avril 2022, dans le cadre de la Phase 4 du projet d'extension du port de Galisbay.

Les noms et positions des stations sont données dans le Tableau 3.1. La

Figure 3.8 illustre leur position.

Tableau 3.4 Stations de mesures de courant aux abords de Saint-Martin – Campagne océanographique en cours.

Station	Longitude (°)	Latitude (°)	Profondeur	Disponibilité des mesures
ALIZE	-63.2329	18.0417	630	26/04/2022 – 09/2022
A1	-63.0850	18.1120	16	26/04/2022 – 09/2022
A2	-63.1210	18.0880	17	26/04/2022 – 09/2022

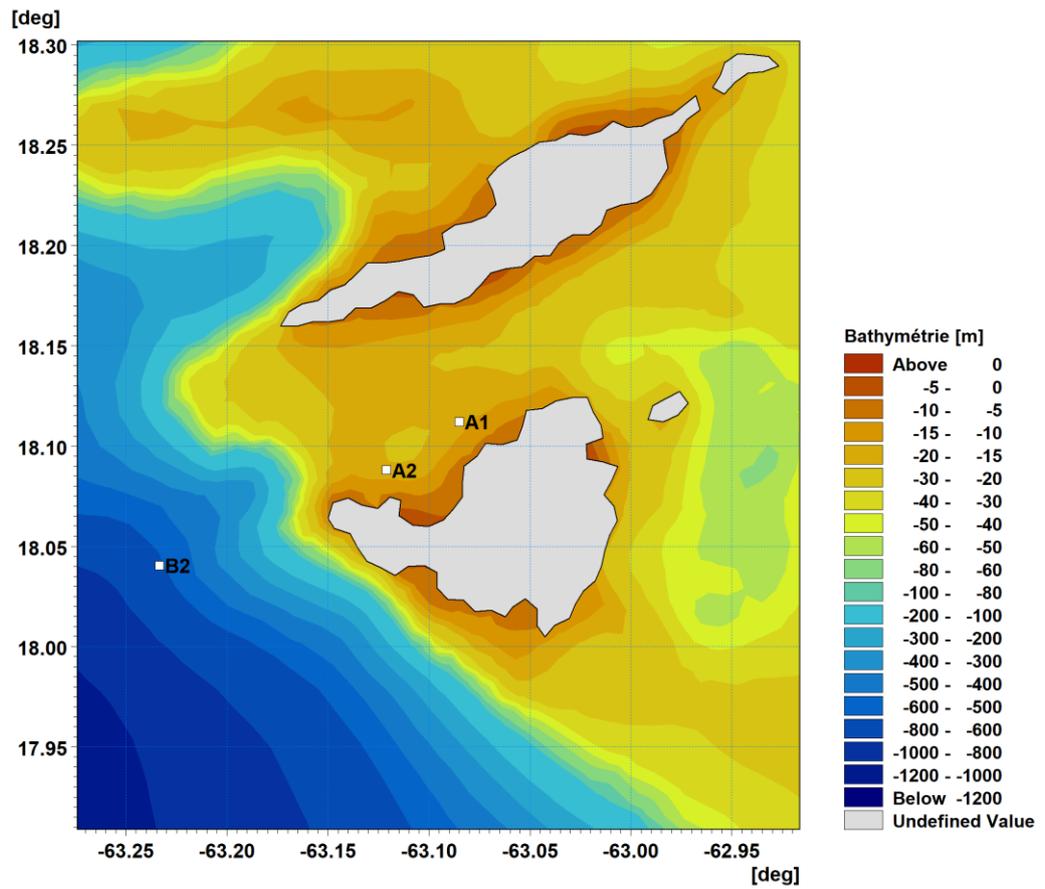


Figure 3.19 Position des stations de mesures de courants aux abords de Saint-Martin – campagne de mesures en cours.

3.6 Fonctionnement des cours d'eau

Il n'y a pas de cours d'eau permanents sur l'île de Saint-Martin. Les collines drainent les eaux de pluies et nourrissent des cours d'eau intermittents (ravines).

Lors des épisodes pluvieux, les eaux ruissellent sur les pentes des mornes et du Mont des Accords, rejoignent les ravines et débouchent dans l'étang de Galisbay, reliquat de la lagune de Galisbay suite à l'artificialisation du territoire depuis les années 1960.

L'écoulement de l'étang vers la mer est variable en volume selon la météo (sec ou pluvieux). Une estimation a été faite par SAFEGE en l'absence de données mesurées à Saint-Martin pour un évènement pluvieux caractérisé par une pluie de courte durée (30 min égale au temps de concentration du bassin versant) et pour une occurrence 10 ans. Le débit de pointe est estimé à 90 m³/s et le volume total de l'épisode pluvieux 274 000 m³. La concentration moyenne en MES a été estimée à 142 mg/l (Réf. /21/).



Figure 3.20 Bassin morphologique et bassin versant de la plage de Galisbay (Réf. /3/)



Figure 3.21 Photographies de l'exutoire de l'étang de Galisbay (DHI, août 2022).

4 Contexte sédimentaire et nature des fonds

4.1 Matières en suspension

Les taux de matières en suspension (MES) observés lors des mesures de courant de novembre 1990 caractérisent les conditions hydrodynamiques qui régnaient au moment de la campagne de prélèvements (Tableau 3.3, Réf. /4/).

D'après les auteurs de l'étude de novembre 1990, trois zones à relativement forts taux de matières en suspension se distinguent :

- Le secteur oriental de la baie, où les photos aériennes indiquent également une nappe turbide allongée du nord au sud et déplacée sous l'action du courant de surface induit par les vents de terre ;
- Le secteur périphérique du Banc de la Médée où la houle et le clapot mettent en suspension les sédiments fins du fond ;
- Le secteur méridional de la baie au nord de la Pointe du Fort de Marigot, qui, du fait de son faible dynamisme (~ 1 cm/s) sert de zone d'atterrissage à une partie de la charge turbide du courant de dérive qui balaie le fond de la baie.

Ailleurs, la sédimentation due à la turbidité des eaux est négligeable (Réf. /4/).

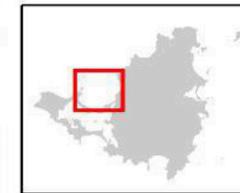
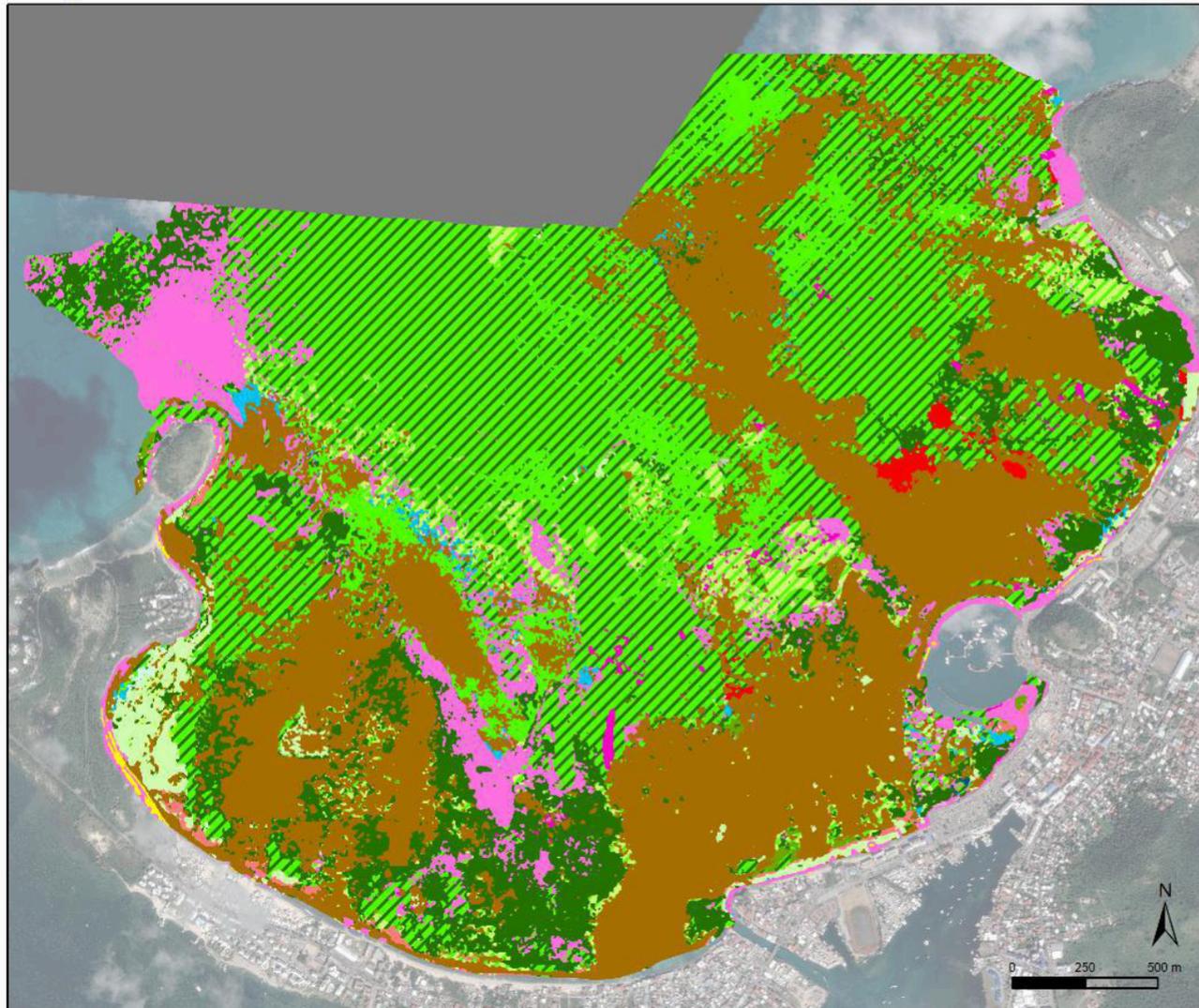
4.2 Nature des fonds et répartition des sédiments

La cartographie de la nature des fonds de la Grand'Baie de Marigot a été mise à jour par I-Sea en 2021 (Figure 4.1 et Figure 4.2, Réf. /15/).

De manière générale, les stocks sédimentaires dans la baie sont relativement peu importants et essentiellement répartis le long du trait de côte. Les fonds marins sont abondamment colonisés par des herbiers (Réf. /4/).

Cartographie des habitats marins par télédétection multitemporelle Pléiades 2020-2021 Baie de Marigot - Saint Martin

Editée le 29/07/2021

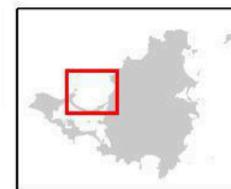
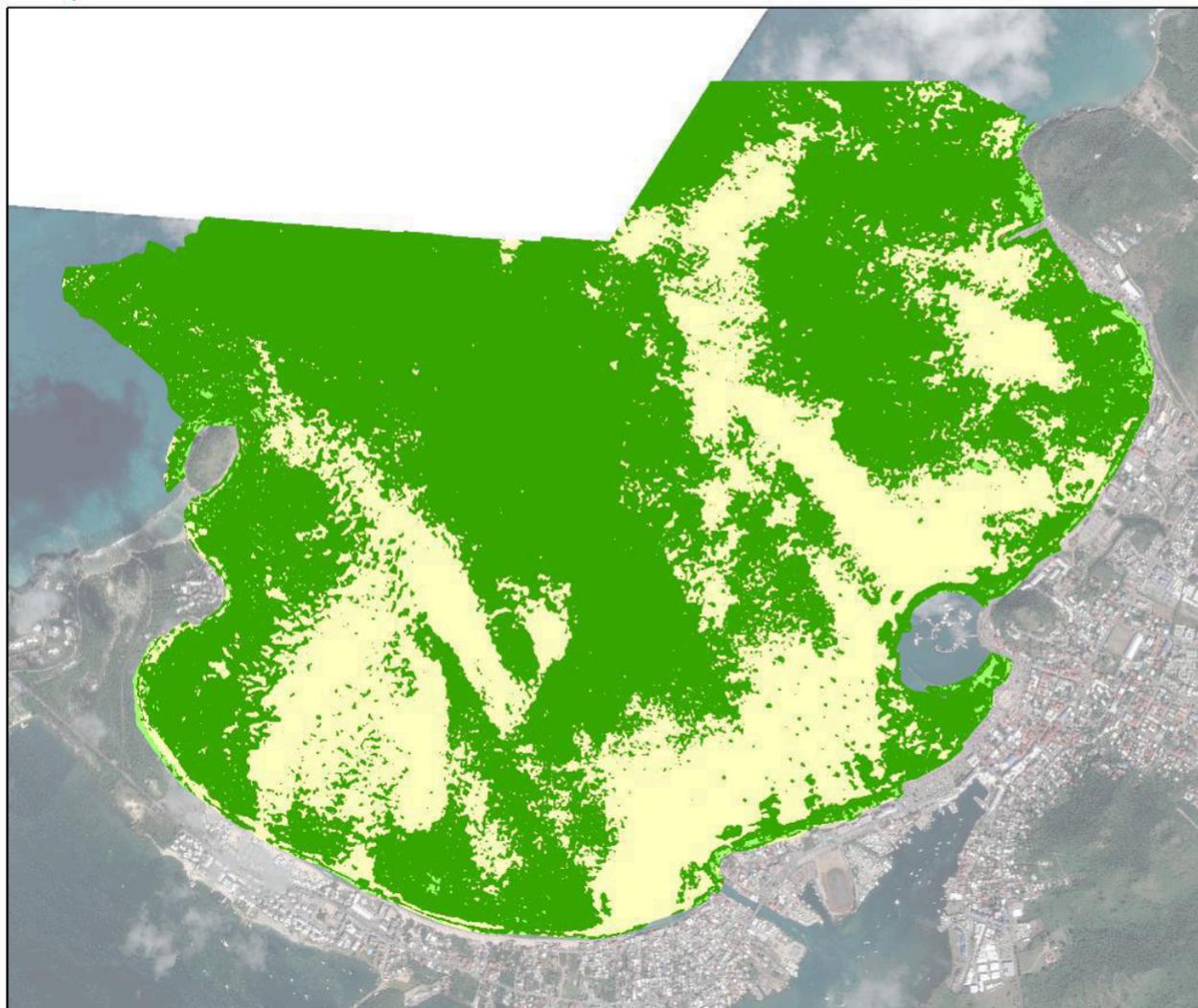


- Affleurement rocheux à peuplements algaux dominants et peuplements coralliens épars
- Affleurement rocheux à peuplements coralliens
- Blocs artificiels à peuplements coralliens
- Epave sur fond meuble
- Front pionnier à herbiers à *Halodule wrightii*
- Galets de bord de plage
- Plaine sédimentaire à herbiers mixtes à *S. filiforme* et *Halophila* sp
- Plaine sédimentaire à herbiers mixtes à *T. testudinum* et *Halophila* sp
- Plaine sédimentaire à herbiers mixtes à *T. testudinum* et *S. filiforme*
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *Halophila* sp
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *Halophila* sp et macroalgues
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *Halophila* sp et macroalgues *Dictyota*
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *S. filiforme*
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *S. filiforme* et macroalgues
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *T. testudinum*
- Plaine sédimentaire à herbiers monospécifiques à *T. testudinum* et macroalgues
- Plaine sédimentaire à macroalgues
- Plaine sédimentaire à macroalgues à *Halimeda* sp. dominante
- Plaine sédimentaire sableuse à sabio-vaseuse
- Substrat rocheux à peuplements algaux dominants et peuplements coralliens épars
- Substrat rocheux à peuplements coralliens

Réalisation : i-Sea 2021
Sources : 2020/2021 i-Sea, Impact Mer
Image : Pléiades 2020 © AIRBUS DS - tous droits réservés
Système de coordonnées :
RGAF09 UTM Zone20N

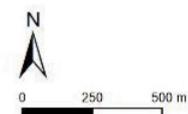


Figure 4.1 Cartographie des habitats marins de la Grand'Baie de Marigot (Réf. /15/).



Typologie

- Algues
- Coraux
- Herbiers
- Sédiment nu



Réalisation : i-Sea 2021
 Sources : 2020/2021 i-Sea, Impact Mer
 Image : Pléiades 13/02/2021 © AIRBUS DS -
 tous droits réservés
 Système de coordonnées :
 RGAF09 UTM Zone20N



Figure 4.2 Cartographie simplifiée des habitats marins de la Grand'Baie de Marigot (Réf. /15/).

4.3 Données granulométriques

Des analyses granulométriques réalisées dans la Grand’Baie de Marigot dans le cadre du projet de l’extension du chenal du port de commerce sont présentées dans les études suivantes :

- Prélèvement et analyse des sédiments de surface dans la zone d’influence du projet du Port de Galisbay – Pareto 2013 (Réf. /19/)
- Analyse chimique des sols – Antilles géotechniques 2016 (Réf. /1/)
- Analyse chimique des sols – Antilles géotechniques 2021 (Réf. /2/)

Par ailleurs, des analyses granulométriques d’échantillons prélevés sur les plages de la baie ont été réalisées en 2022, dans le cadre de la présente étude portant sur le rechargement des plages de Galisbay et Sandy Ground. Les résultats de ces analyses, ainsi qu’une comparaison entre les caractéristiques granulométriques de la zone à draguer et des potentielles plages à recharger sont également présentés ci-après.

4.3.1 Analyses granulométriques des plages (Eurofins 2022)

4.3.1.1 Prélèvements

Le mercredi 10 août ont eu lieu les prélèvements de 30 échantillons sédimentaires sur l’ensemble du littoral entre l’Anse des Sables et la Baie de la Potence.

En effet, il est nécessaire d’échantillonner et de caractériser le sable naturel de la plage afin d’obtenir une référence pour apprécier la compatibilité des sédiments d’emprunts envisagés. Les échantillons doivent être prélevés sur la surface du profil actif de la plage, qui s’étend depuis le niveau le plus haut soumis à l’action des lames jusqu’à la limite sous-marine des mouvements littoraux du sable (Réf. /7/).

Ainsi, la majorité des prélèvements ont été réalisés le long de profils de plage, à +1 m, 0 m et -2 m. Quelques prélèvements ont été réalisés autour de 3 m de profondeur pour caractériser la nature du sédiment dans les poches de sable en mer.

La carte des prélèvements réalisés est donnée en Figure 4.3. Les coordonnées géographiques et profondeurs sont données dans le Tableau 4.1.

Visuellement, les échantillons prélevés apparaissent typiquement plus grossiers sur la plage (+1 m et 0 m) qu’à -2 m. Ils sont également généralement beiges sur la plage, et gris à -2 m. Les sables en haut de plage semblent plus grossier à l’est, dans la Baie de la Potence (plage de Galisbay) qu’à l’ouest à l’Anse des Sables ou en Baie Nettlé.

Les échantillons prélevés à 3 m de profondeur semblent de deux natures distinctes selon les secteurs : soit des sables fins gris (Baie Nettlé 3), soit des sables coquillés grossiers (Baie Nettlé 1, Baie Marigot 1, Baie Marigot 2). Le prélèvement au point Baie Potence 2 semble plus mélangé. Les points Baie Potence 2 et Baie Nettlé 3 pourraient être affectés par des sédiments fins en provenance respectivement de la lagune de Simpsonbaai et de la ravine de la plage de Galisbay, situées en aval ou en face.

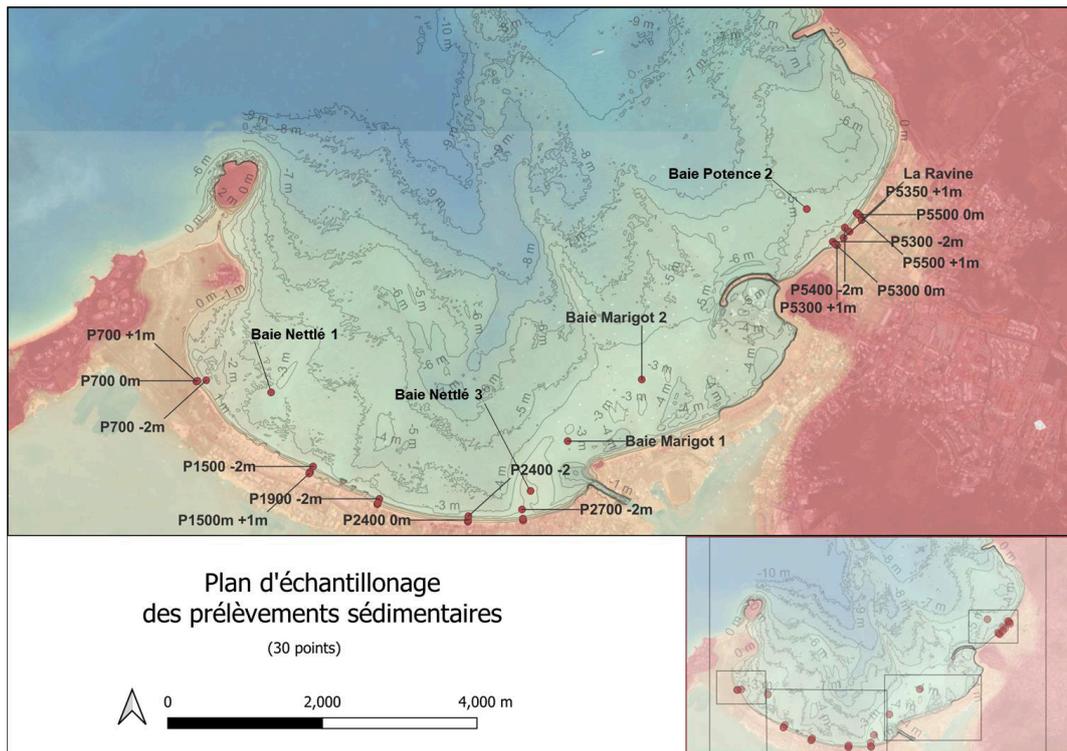


Figure 4.3 Carte des prélèvements sédimentaires

Tableau 4.1 Coordonnées géographiques et profondeurs des points de prélèvements – les échantillons ayant fait l'objet d'une analyse laser sont surlignés en bleu.

Nom	X (m)	Y (m)	Z (m)
Baie Marigot 1	489686	1997234	-3
Baie Marigot 2	490079	1997563	-3
Baie Nettlé 1	488113	1997494	-3
Baie Nettlé 3	489489	1996968	-2
Baie Potence 2	490954	1998473	-5
P700 +1m	487717	1997552	1
P700 0m	487723	1997556	0
P700 -2m	487769	1997559	-2
P1500 +1m	488315	1997061	1
P1500 0m	488320	1997069	0
P1500 -2m	488336	1997099	-2
P1900 +1m	488676	1996896	1
P1900 0m	488679	1996904	0
P1900 -2m	488687	1996926	-2
P2400 +1m	489157	1996804	1
P2400 0m	489158	1996813	0
P2400 -2m	489160	1996834	-2
P2700 +1m	489450	1996810	1
P2700 0m	489449	1996820	0
P2700 -2m	489444	1996869	-2
P5300 +1m	491114	1998279	1
P5300 0m	491105	1998286	0
P5300 -2m	491092	1998298	-2
P5350 +1m	491150	1998319	1
P5400 +1m	491181	1998353	1
P5400 -2m	491240	1998434	-2
P5500 +1m	491218.649	1998452.176	1
P5500 0m	491229	1998443	0
P5500 -2m	491219	1998452	-2
Ravine	491246	1998414	0.5

Secteur Anse des Sables

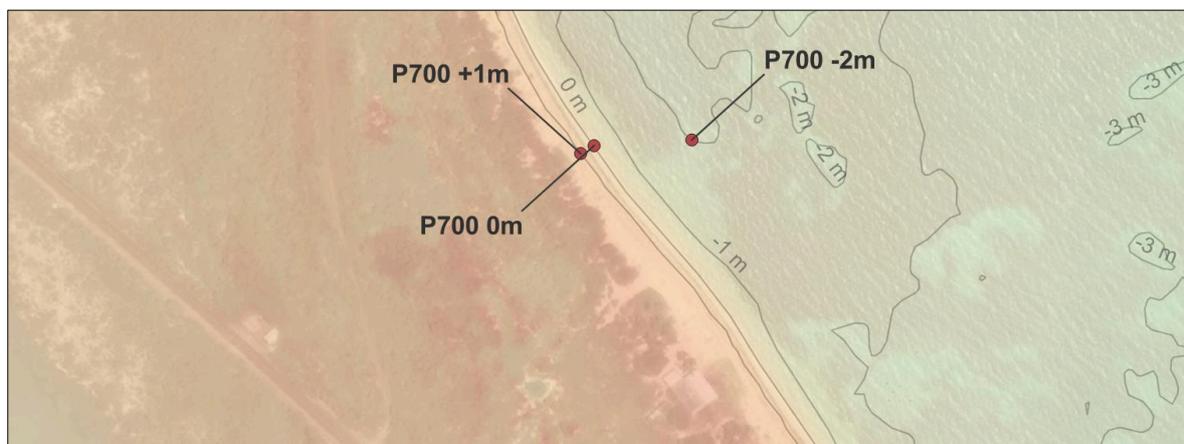


Figure 4.4 Position des prélèvements secteur Anse des Sables



Figure 4.5 Photos du site et des échantillons au profil P700

Secteur Baie Nettlé

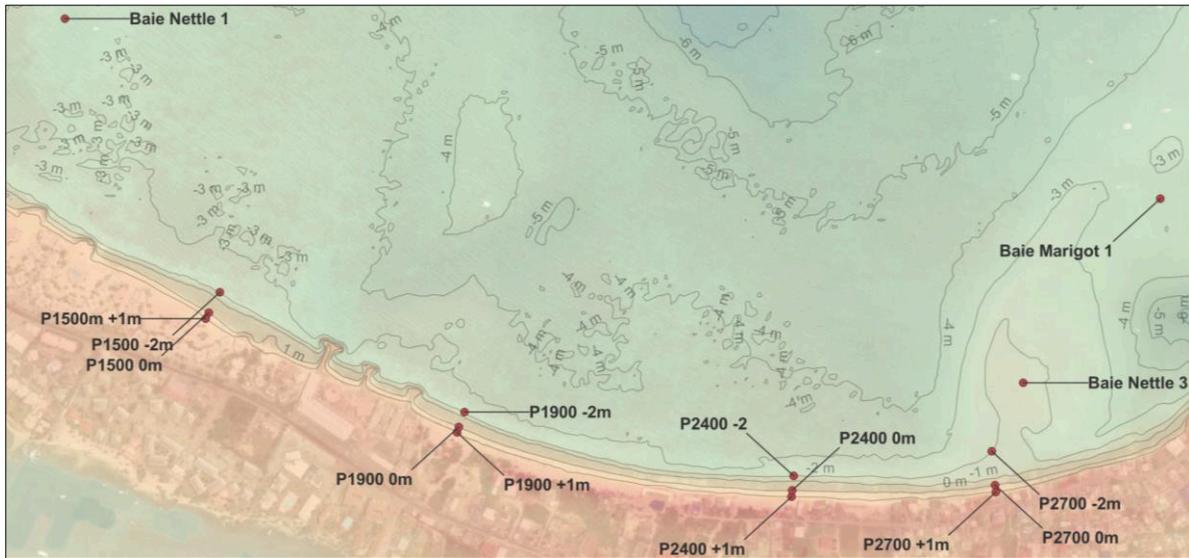


Figure 4.6 Position des prélèvements secteur Baie Nettlé

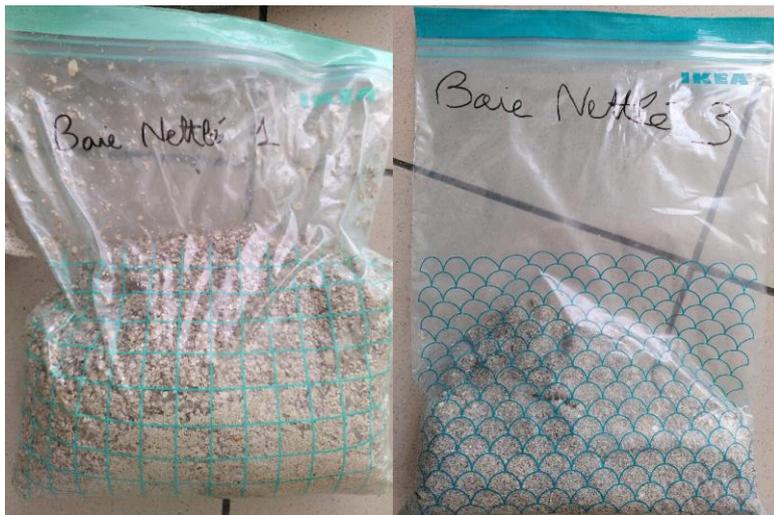


Figure 4.7 Photos des échantillons Baie Nettlé 1 et Baie Nettlé 3

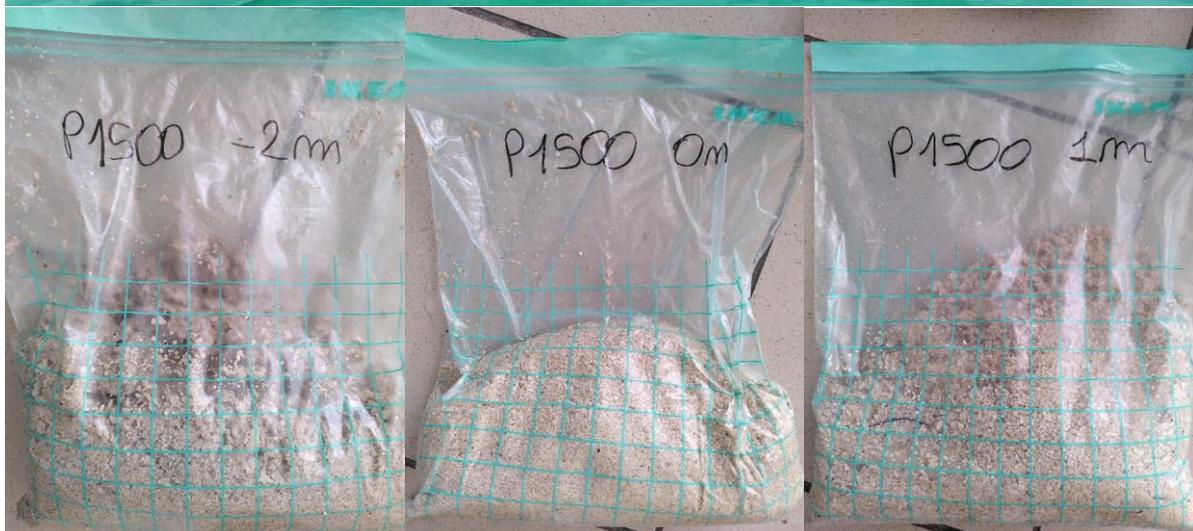


Figure 4.8 Photos du site et des échantillons au profil P1500



Figure 4.9 Photos du site et des échantillons au profil P1900



Figure 4.10 Photos du site et des échantillons au profil P2400

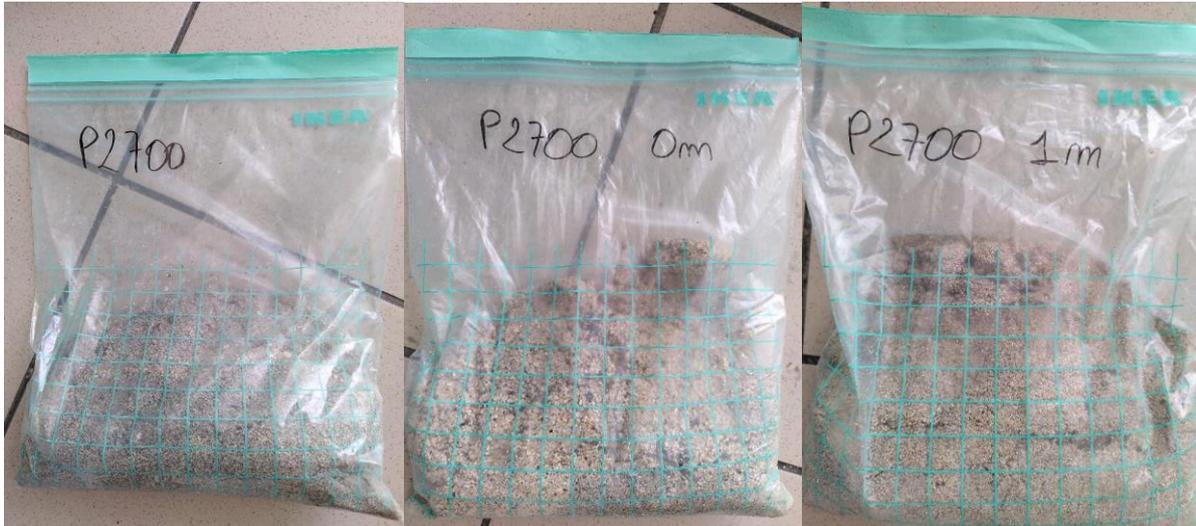


Figure 4.11 Photos du site et des échantillons au profil P2700

Secteur Baie de Marigot



Figure 4.12 Position des prélèvements secteur Baie de Marigot

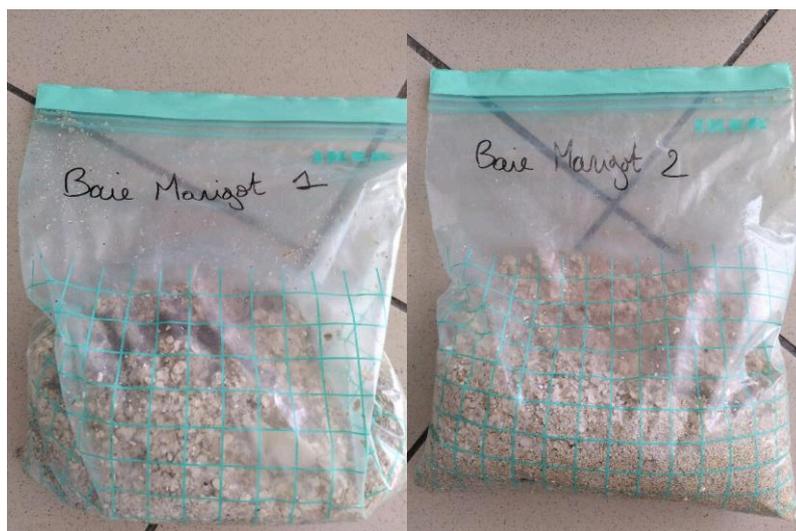


Figure 4.13 Photo des échantillons Baie Marigot 1 et Baie Marigot 2

Secteur Baie de la Potence

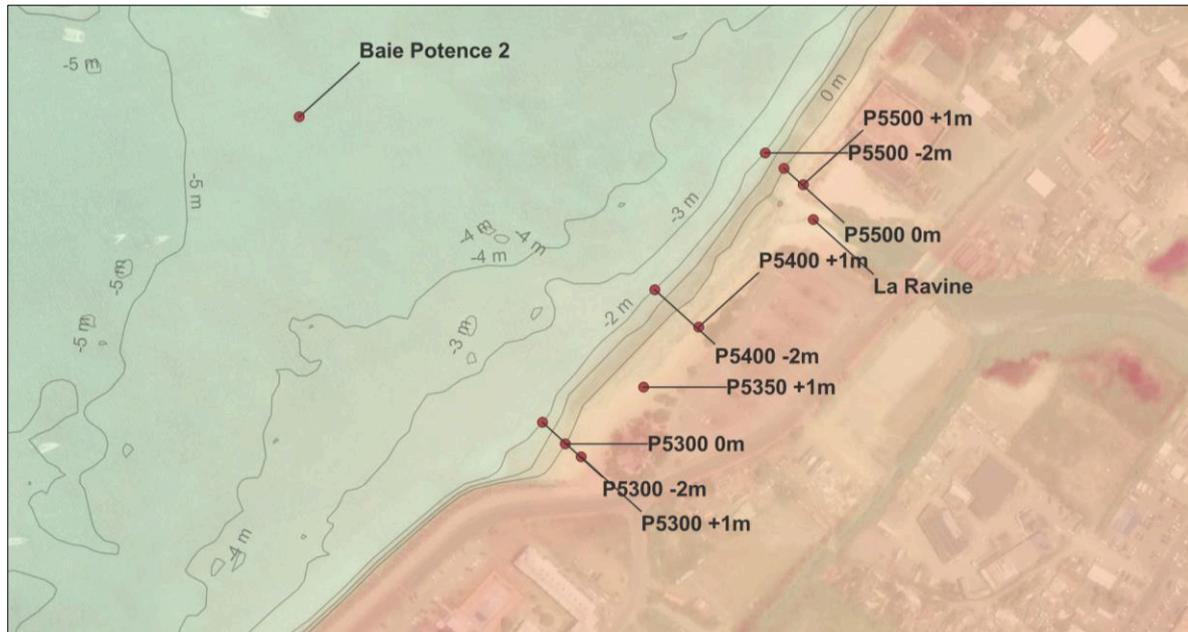


Figure 4.14 Position des prélèvements secteur Baie de la Potence

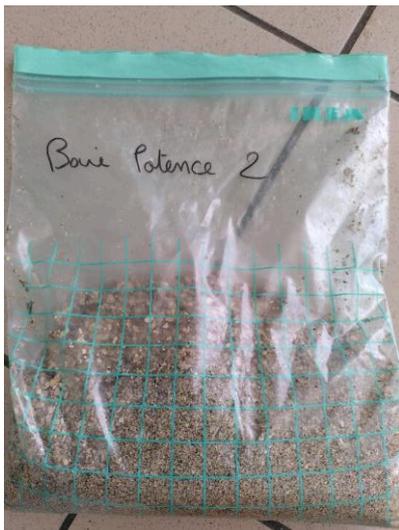


Figure 4.15 Photos de l'échantillon Baie Potence 2

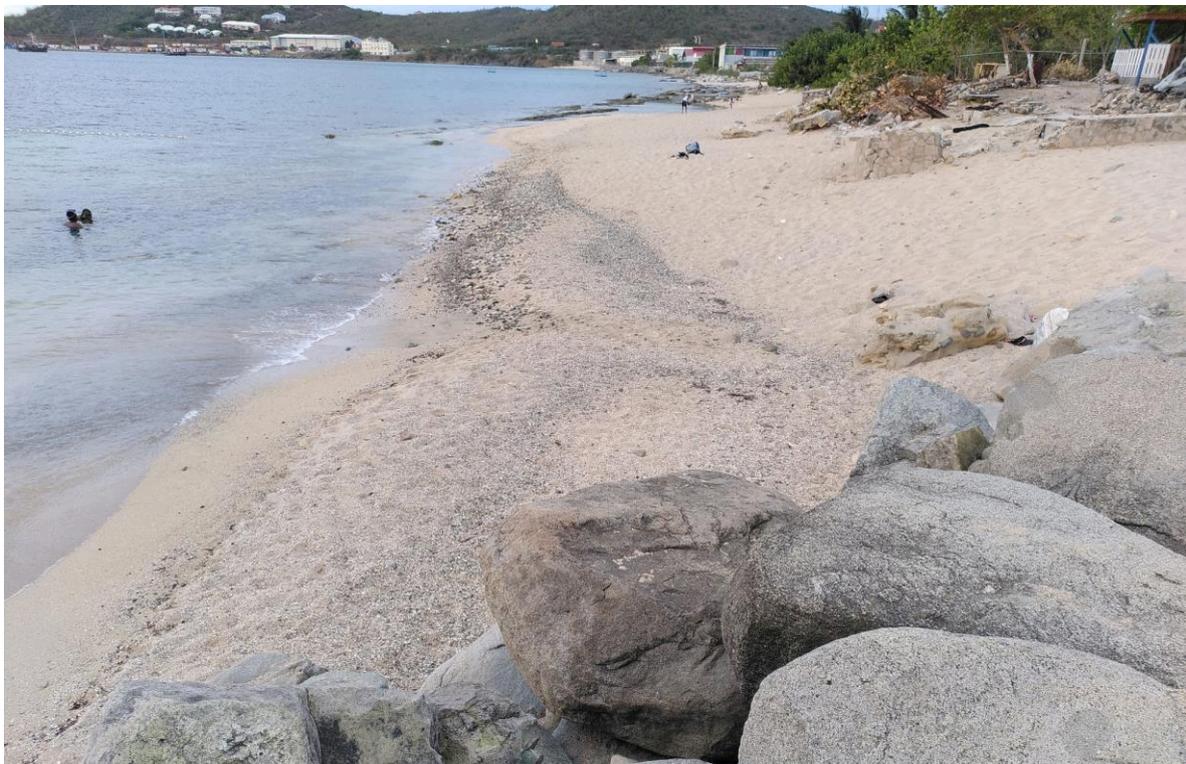


Figure 4.16 Photos du site et des échantillons du profil P5300

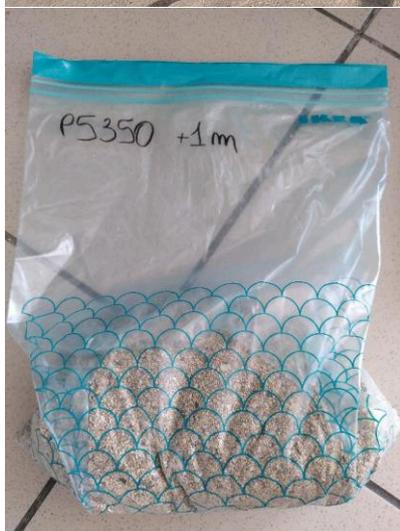


Figure 4.17 Photos du site et de l'échantillons du profil P5350

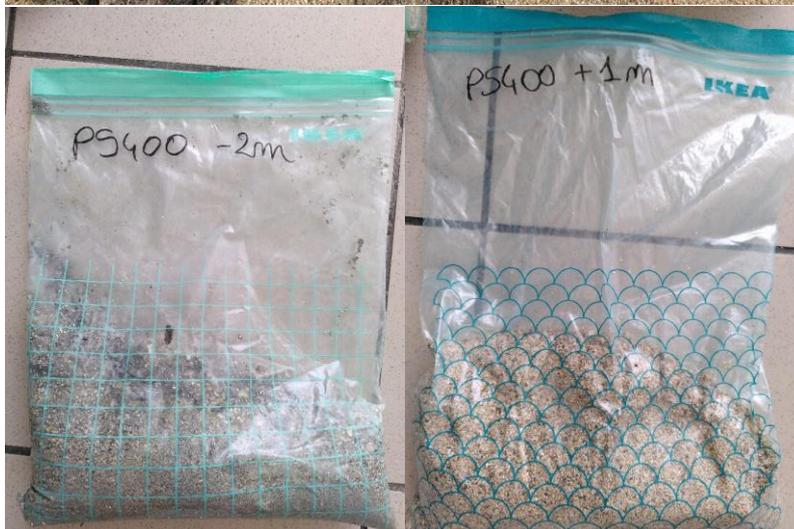


Figure 4.18 Photos du site et des échantillons du profil P5400



Figure 4.19 Photos du site et échantillon de la Ravine



Figure 4.20 Photos du site et des échantillons du profil P5500

4.3.1.2 Analyses granulométriques par laser

La granulométrie par laser à pas variable a été réalisée pour les 5 échantillons listés dans le Tableau 4.2.

Les courbes granulométriques obtenues via cette analyse sont présentées en Figure 4.21. Les modes de chacun de ces échantillons sont rapportés dans le Tableau 4.2.

Les courbes granulométriques obtenues par analyse laser sur ces échantillons sont unimodales. Ce mode est typiquement compris entre environ 0,9 et 1 mm (sable grossier), sauf au point P2400 -2m où il est de 0,3 mm (sable moyen) et au point P5300 -2m où il est de 1,1 mm (sable très grossier).

Le pourcentage de limons inférieurs à 63 μm est très faible, moins de 5% pour l'ensemble des 5 échantillons.

Le pourcentage de sables très fins à fins (63 μm – 200 μm) est négligeable, sauf au point P2400 -2m où ils constituent 14 % de l'échantillon.

Le diamètre médian moyen de ces échantillons est de 0,76 mm – il est de 0,83 mm en ne considérant que les échantillons pris à 0 m.

Le coefficient de classement (« grading », σ_g)¹ moyen de ces échantillons est de 1,67.

Tableau 4.2 Échantillons analysés par granulométrie laser

Nom	d50 (mm)	Mode (mm)	Grading	Fines < 63 μm (%)	Sables fins et très fins 63 μm – 200 μm (%)
P1500 0m	0,89	0,96	1,59	0	0
P2400 0m	0,83	0,91	1,67	1	<1
P2400 -2m	0,33	0,32	1,70	4	14
P5300 0m	0,77	0,92	1,83	3	1
P5300 -2m	0,96	1,08	1,57	2	<1

¹ Le coefficient de classement caractérise l'étalement granulométrique et est défini de la manière suivante :
 $\sigma_g = \sqrt{d_{84}} / \sqrt{d_{16}}$

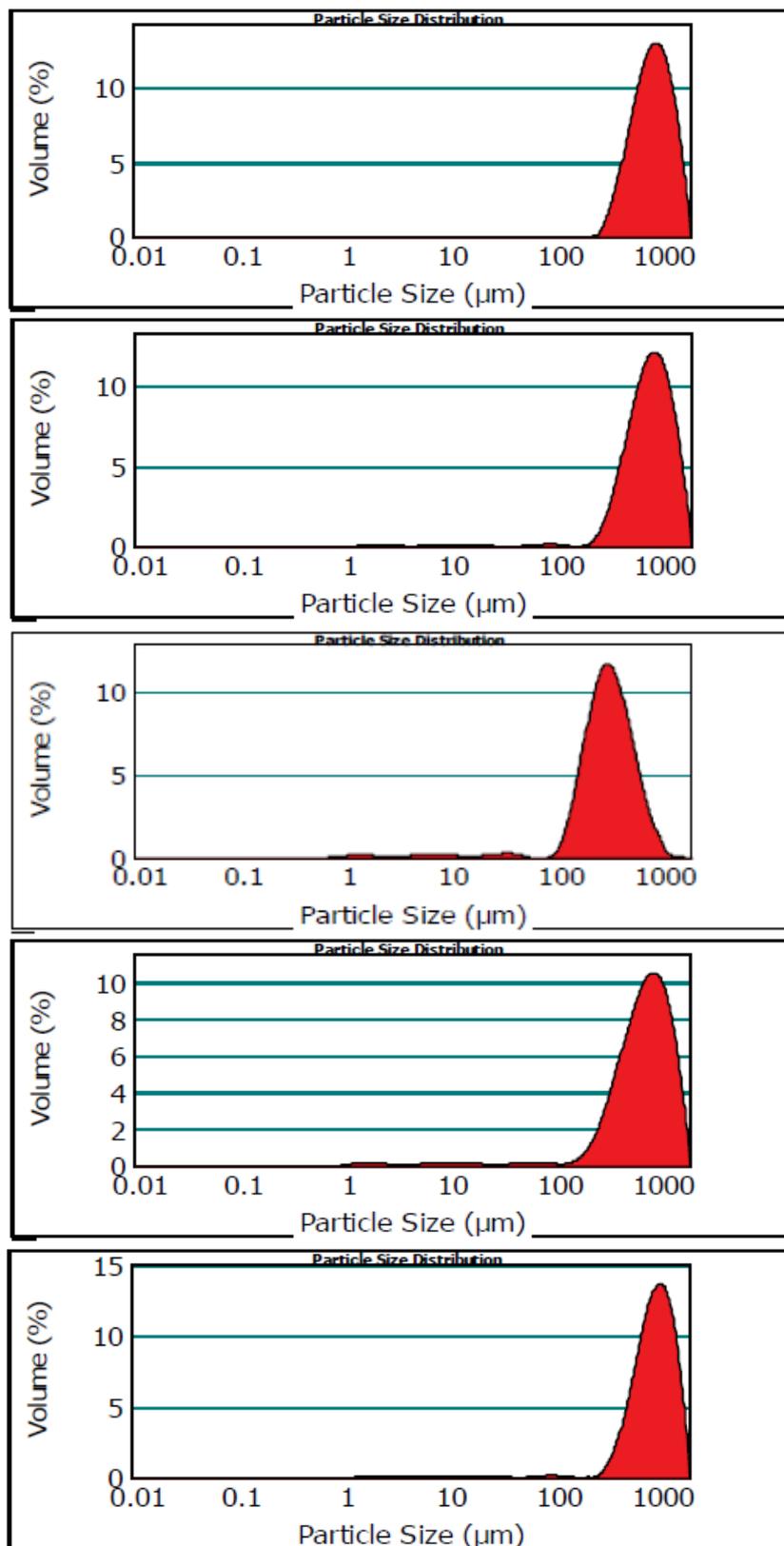


Figure 4.21 Courbes granulométriques obtenues par granulométrie laser.
De haut en bas : P1500 0m, P2400 0m, P2400 -2m, P5300 0m, P5300 -2m.

4.3.1.3 Analyses granulométriques par tamisage

La granulométrie par tamisage a été réalisée pour l'ensemble des 30 échantillons listés dans le Tableau 4.1.

La Figure 4.22 présente l'ensemble des 30 courbes granulométriques.

La Figure 4.23 présente les courbes granulométriques moyennées par secteur selon les définitions suivantes :

- Anse des Sables : P700 (0 m et +1 m)
- Baie Nettle : P1500 et P1900 (0 m et +1 m)
- Sandy Ground : P2400 et P2700 (0 m et +1 m)
- Galisbay : P5300 à P5500 (0 m et +1 m)
- Dans les petits fonds : Baie Marigot, Baie Nettle et Baie Potence ainsi que les échantillons à -2 m

Le détail de l'ensemble des courbes granulométriques secteur par secteur est présenté de la Figure 4.24 à la Figure 4.28.

Les échantillons de sédiments les plus fins se trouvent typiquement à -2m de profondeur des plages de Baie Nettle – Sandy Ground : les courbes jaune, orange et bleue situées à gauche de la Figure 4.22 correspondent respectivement à P1900 -2m, P2400 -2m et P2700 -2m.

Les échantillons les plus grossiers (courbes jaune et bleue à droite sur la Figure 4.22) proviennent respectivement de Baie Nettle 1 et P5300 +1m, soit dans les petits fonds à l'ouest de la baie et dans le haut de plage à l'ouest de la plage de Galisbay.

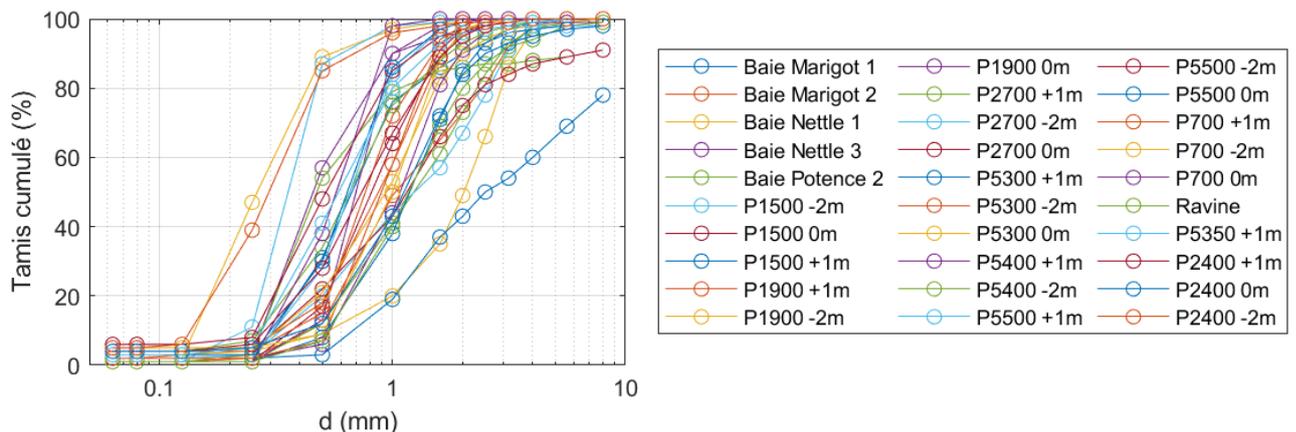


Figure 4.22 Courbes granulométriques de l'ensemble des échantillons

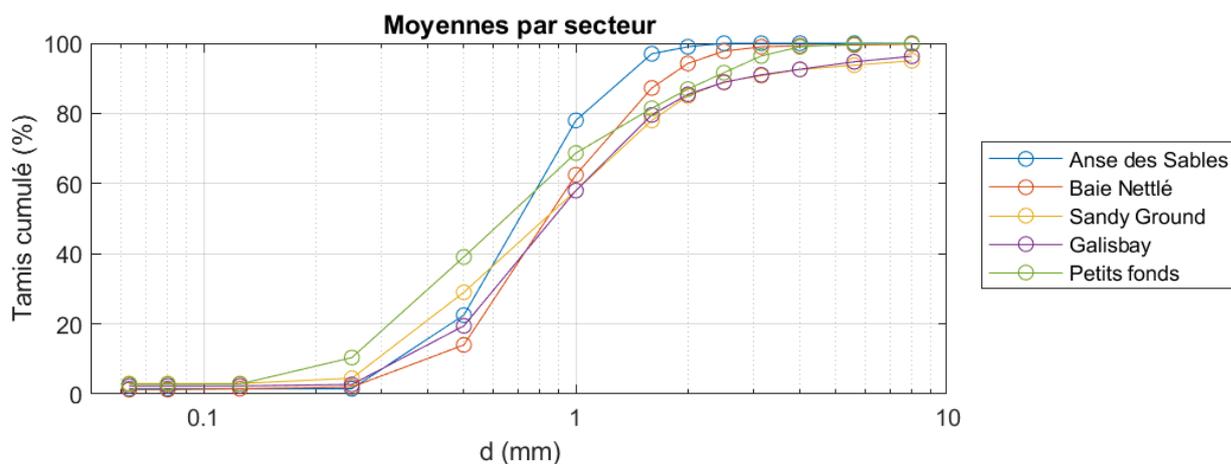


Figure 4.23 Courbes granulométriques moyennées par secteur.

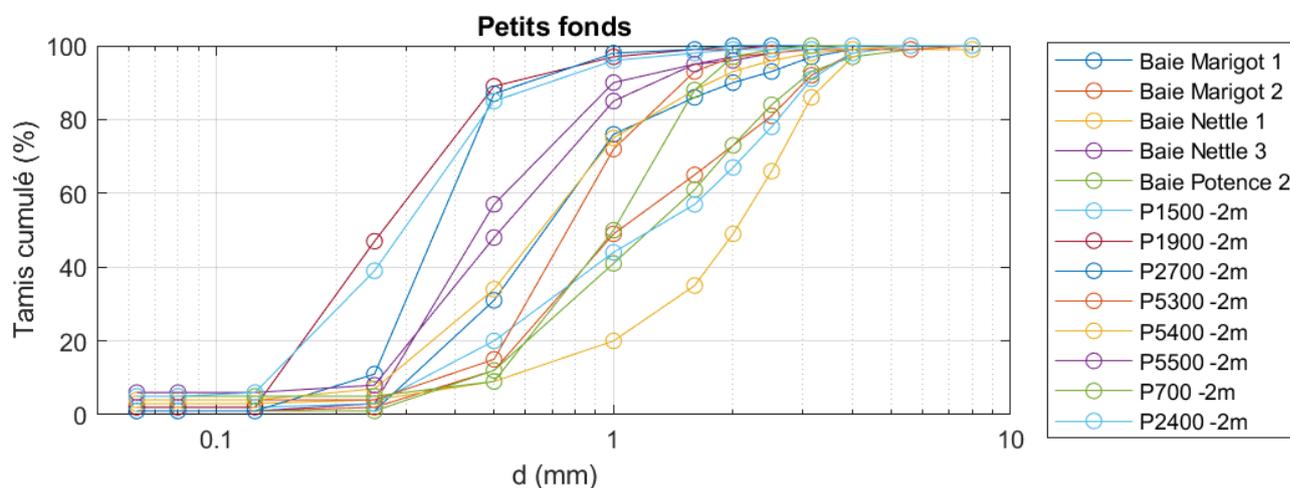


Figure 4.24 Courbes granulométriques des échantillons dans les petits fonds

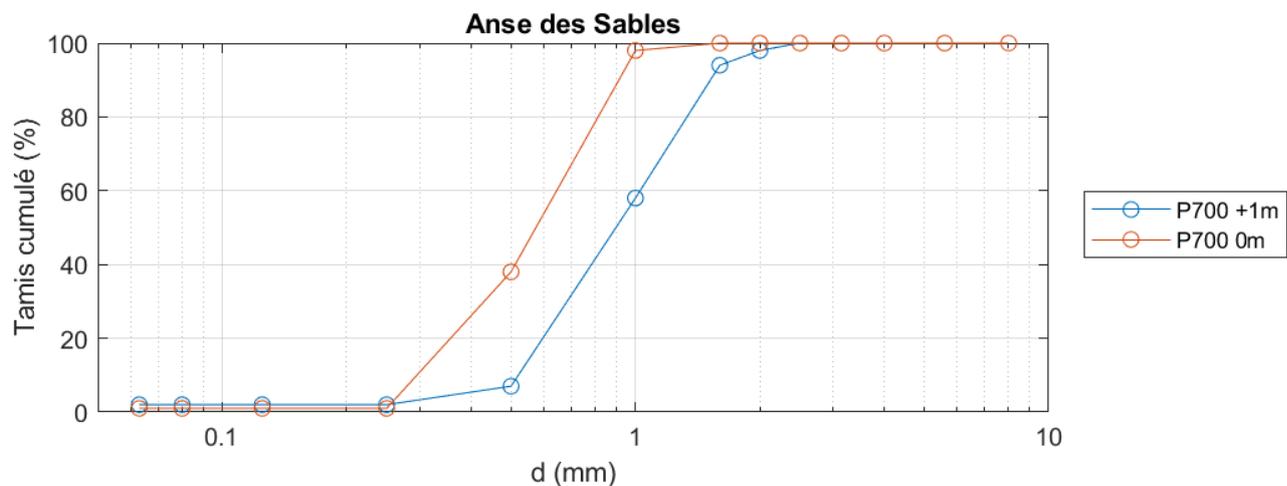


Figure 4.25 Courbes granulométriques des échantillons de la plage de l'Anse des Sables

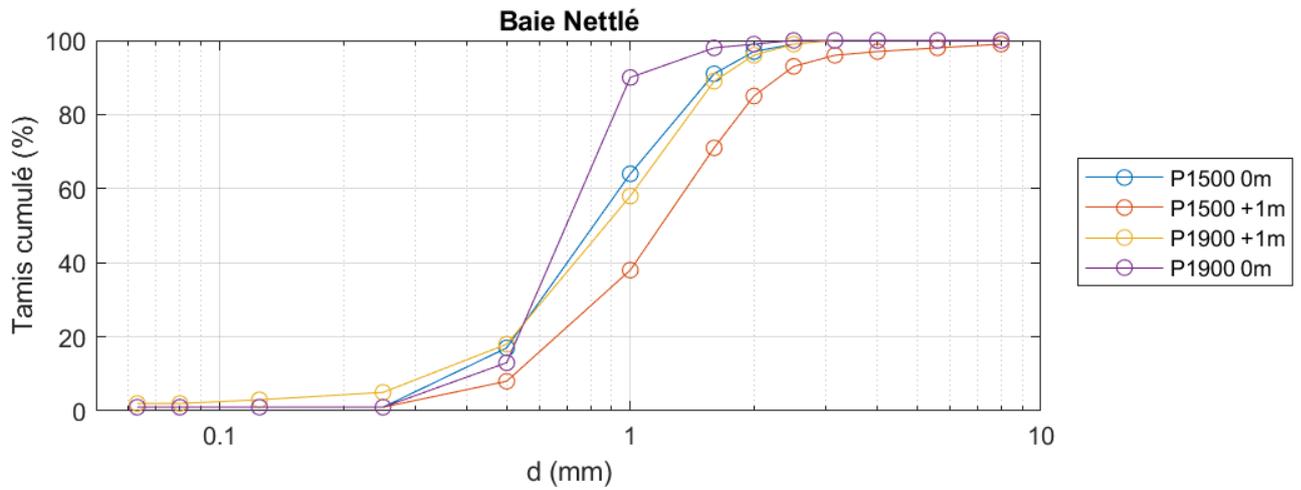


Figure 4.26 Courbes granulométriques des échantillons des plages de Baie Nettlé

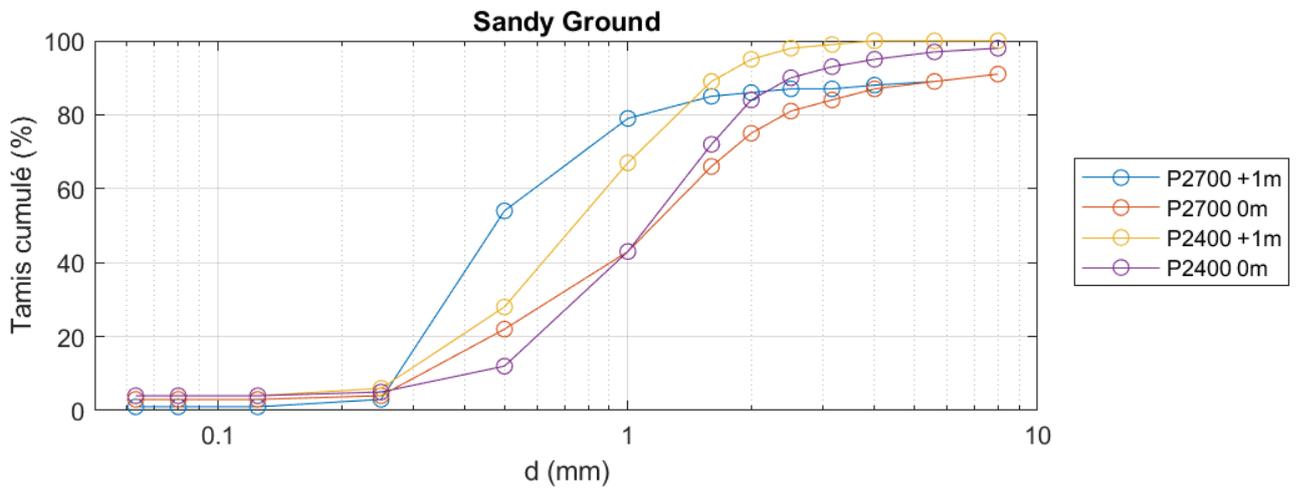


Figure 4.27 Courbes granulométriques des échantillons des plages de Sandy Ground

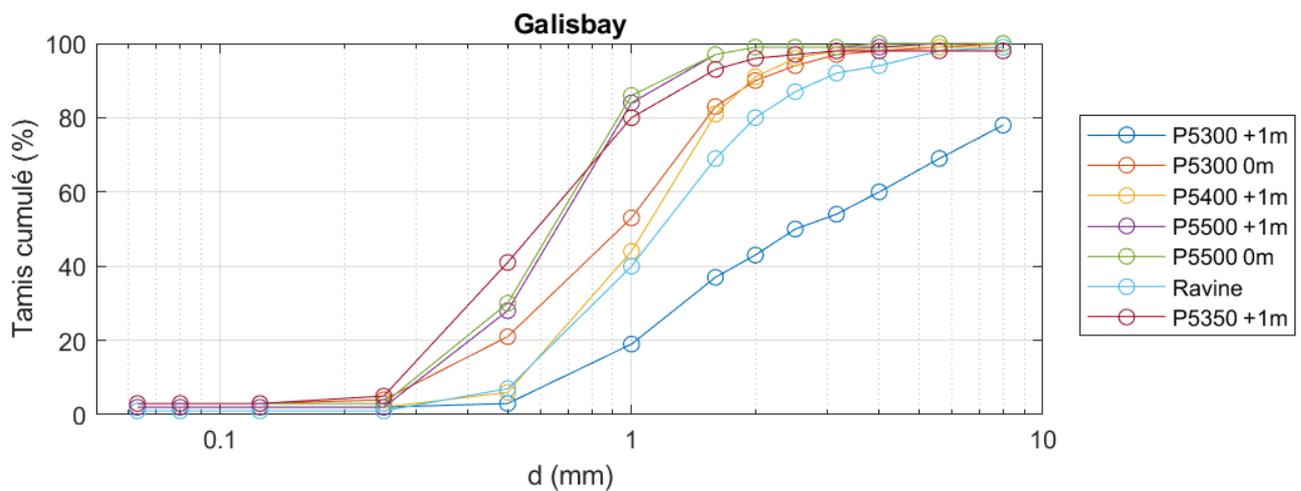


Figure 4.28 Courbes granulométriques de la plage de Galisbay

Les diamètres d_{16} , d_{50} , d_{80}^2 et les coefficients de classement (« grading », σ_g)³ de chaque échantillon sont donnés dans le Tableau 4.3 et leur variabilité illustrée en Figure 4.29.

Les diamètres médians (d_{50}) moyens estimés par profondeur sont les suivants :

- 1,02 mm à +1 m
- 0,88 mm à 0 m
- 0,66 mm à -2 m
- 1,10 mm dans la baie, au-delà des profils de plage.

Et les diamètres médians (d_{50}) moyens par secteur (en moyennant les caractéristiques granulométriques des échantillons à 0 m et +1 m) :

- 0,76 mm à l'Anse des Sables
- 0,93 mm en Baie Nettle
- 0,90 mm à Sandy Ground
- 1,11 mm à la plage de Galisbay

Le diamètre médian moyen des échantillons à 0 et +1 m est de 0,96 mm. En incluant également -2 m il est de 0,86 mm. Sur la totalité des échantillons, il est de 0,91 mm.

Le coefficient de classement (grading) moyen est de 1,89.

Moyenner les propriétés granulométriques de tous les échantillons permet de caractériser l'échantillon « composé naturel » utilisé comme référence granulométrique de la plage naturelle (Réf. /7/).

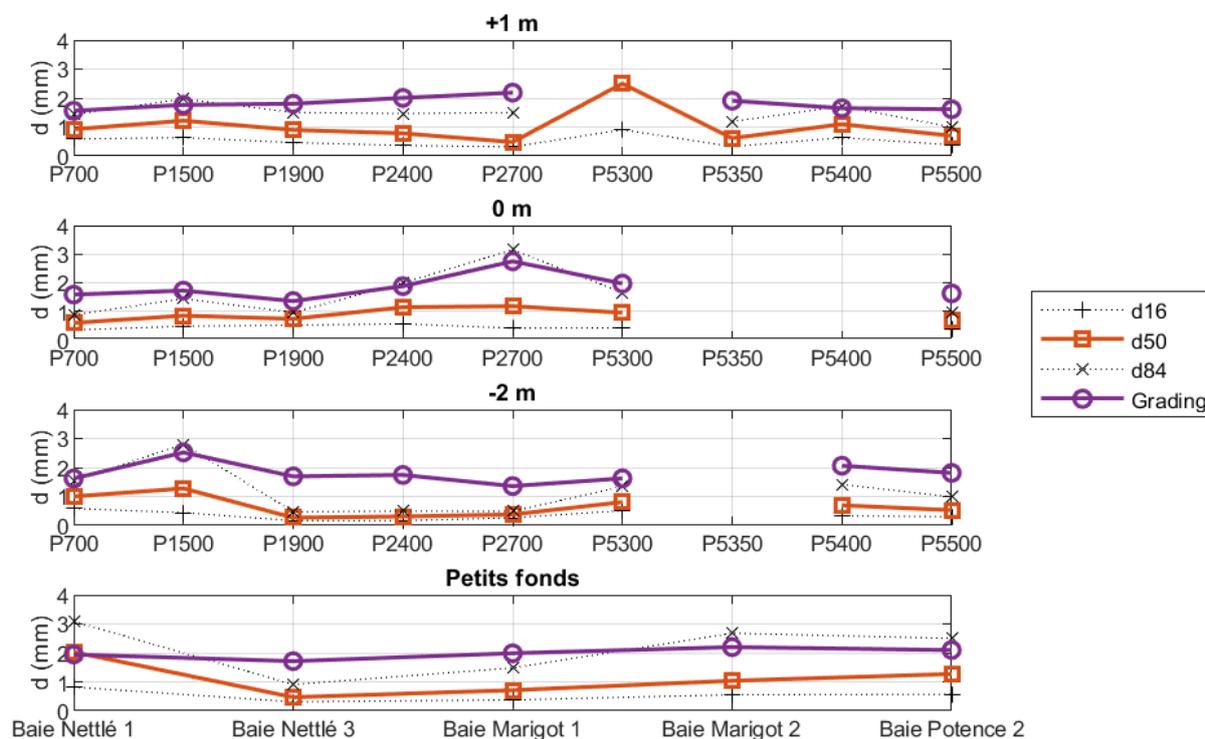


Figure 4.29 Caractéristiques granulométriques des 30 échantillons – d'après l'analyse granulométrique par tamisage.

² On appelle d_x le diamètre de tamis qui laisse passer $x\%$ de la masse de l'échantillon.

³ Le coefficient de classement caractérise l'étalement granulométrique et est défini de la manière suivante : $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$

Tableau 4.3 Caractéristiques granulométriques des échantillons – d'après l'analyse granulométrique par tamisage.

Nom	d ₁₆ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₈₄ (mm)	σ_g
Baie Marigot 1	0.38	0.71	1.48	1.99
Baie Marigot 2	0.55	1.04	2.68	2.20
Baie Nettlé 1	0.82	2.03	3.09	1.94
Baie Nettlé 3	0.31	0.47	0.91	1.71
Baie Potence 2	0.57	1.27	2.50	2.10
P700 +1m	0.59	0.92	1.43	1.56
P700 0m	0.35	0.60	0.88	1.59
P700 -2m	0.59	1.00	1.54	1.62
P1500 +1m	0.63	1.22	1.97	1.76
P1500 0m	0.48	0.85	1.44	1.73
P1500 -2m	0.44	1.28	2.80	2.52
P1900 +1m	0.46	0.90	1.50	1.80
P1900 0m	0.52	0.74	0.96	1.36
P1900 -2m	0.16	0.27	0.47	1.69
P2400 +1m	0.36	0.78	1.46	2.01
P2400 0m	0.57	1.15	2.00	1.88
P2400 -2m	0.16	0.31	0.50	1.74
P2700 +1m	0.31	0.48	1.50	2.19
P2700 0m	0.42	1.18	3.15	2.75
P2700 -2m	0.27	0.38	0.49	1.36
P5300 +1m	0.91	2.50	8.00	2.97
P5300 0m	0.43	0.95	1.66	1.97
P5300 -2m	0.51	0.81	1.34	1.62
P5350 +1m	0.33	0.62	1.19	1.91
P5400 +1m	0.63	1.10	1.72	1.65
P5400 -2m	0.33	0.70	1.42	2.06
P5500 +1m	0.39	0.70	1.00	1.61
P5500 0m	0.37	0.68	0.98	1.63
P5500 -2m	0.30	0.53	0.99	1.81
Ravine	0.64	1.21	2.29	1.90

A noter que les diamètres médians issus des analyses laser sont plus précis que ceux dérivés des courbes granulométriques obtenues par tamisage (Tableau 4.4) : les analyses granulométriques par tamisage ont une résolution de l'ordre de 0,5 mm autour du diamètre médian (tamis de 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm) alors que les analyses laser permettent une résolution maximale de l'ordre de 0,2 mm sous un diamètre médian de 1 mm.

Tableau 4.4 Comparaisons des diamètres médians selon la méthode : tamis ou laser.

Profil	d ₅₀ (mm) d'après tamis	d ₅₀ (mm) d'après laser
P1500 0m	0,85	0,89
P2400 0m	1,15	0,83
P2400 -2m	0,31	0,33
P5300 0m	0,95	0,77
P5300 -2m	0,81	0,96

Une carte de la répartition des diamètres médians et des types de sédiment en présence est présentée en Figure 4.30. D'après la classification de Wentworth, les sédiments du littoral de la baie de Galisbay sont essentiellement des sables grossiers (15/30 échantillons), avec quelques échantillons de sables très grossiers (8/30 échantillons), quelques sables moyens (5/30 échantillons sur 30) et des galets très fins (2/30 échantillons).

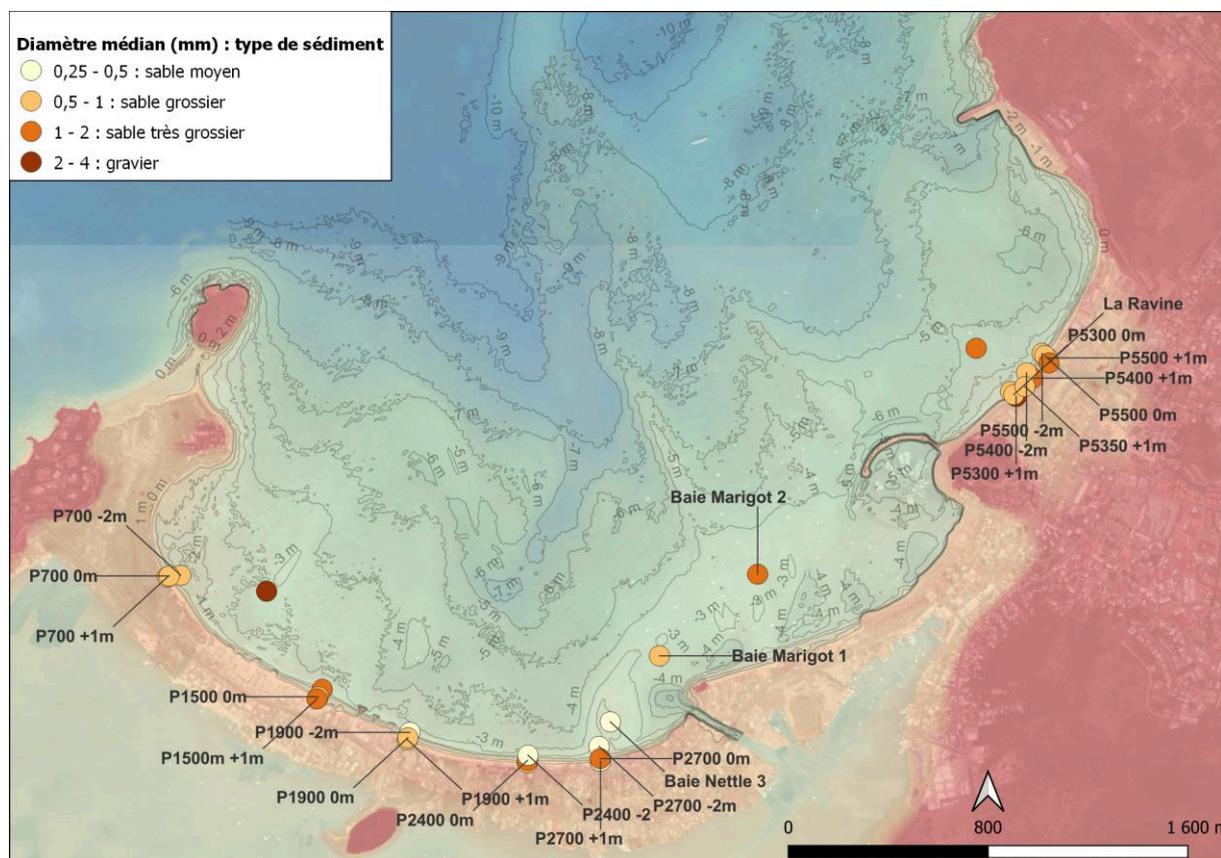


Figure 4.30 Carte du diamètre médian et du type de sédiment d'après Eurofins 2022, classification de Wentworth.

4.3.2 Comparaison de la granulométrie du site dragué et des plages

4.3.2.1 D'après PARETO, 2013

Des prélèvements de sédiments superficiels ont été effectués par Pareto du 3 au 4 juin 2013 (Réf. /19/), en plongée avec un carottier à piston de 50 cm de long. Pour chaque station, l'échantillonnage a consisté à prélever trois répliqués, mélangés par la suite à volume égal. Le tracé du projet (de la figure ci-dessous et de celles suivantes) correspond à celui de 2017, qui a été abandonné.

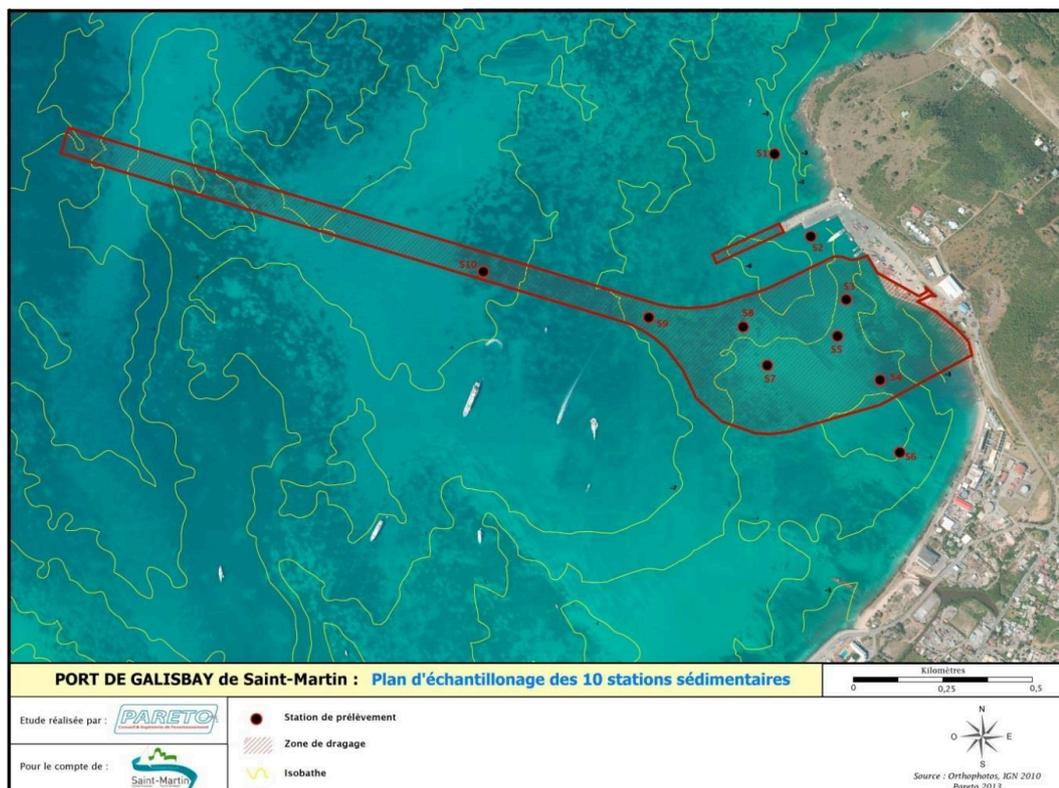


Figure 4.31 Plan d'échantillonnage des 10 stations de prélèvements (Réf. /19/).

À l'exception de la station 10 (la plus au large), avec une teneur importante en sédiments fins, tous les échantillons sont caractérisés par un grain médian de type sable grossier à très grossier. L'hétérogénéité relevée entre les typologies sédimentaires de la station 10 et les autres stations reste difficilement explicable naturellement. Cette concentration de vase en sortie de baie pourrait trouver sa source au niveau d'un rejet anthropique (Réf. /12/).

À l'exception de la station 10 (la plus au large), dont la teneur en sédiments fins est bien plus importante que les autres, tous les échantillons de Pareto sont caractérisés par un grain médian de type sable grossier à très grossier : le diamètre médian d_{50} est compris entre 0,50 mm et 1,01 mm, avec une moyenne de 0,80 mm (Figure 4.32).

Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_{50} (μm)	740	705	1010	1070	880	500	935	815	510	27

Figure 4.32 Diamètre médian des sédiments prélevés (Réf. /19/)

Ces diamètres médians sont assez proches, mais légèrement inférieurs, aux diamètres médians des échantillons pris sur les plages, qui sont de 0,96 mm (0,86 mm en moyenne en incluant les échantillons à -2 m).

Les figures suivantes montrent la superposition, sur un même graphique de :

- l'ensemble des courbes granulométriques Pareto aux 10 stations (traits fins colorés) ;
- la moyenne de ces courbes granulométriques, avec (trait noir épais pointillé) et sans (trait noir épais pointillé plein) intégrer la Station 10 ;
- la moyenne des courbes granulométriques Eurofins sur les plages étudiées (trait épais rouge) : Baie Nettlé, Sandy Ground et Galisbay.

Sur les 3 secteurs : Baie Nettlé, Sandy Ground et Galisbay, les courbes granulométriques moyennes des plages sont assez similaires à celles du site dragué, avec toutefois une part de sédiments les plus fins inférieure sur les plages de Baie Nettlé et Galisbay par rapport au site dragué.

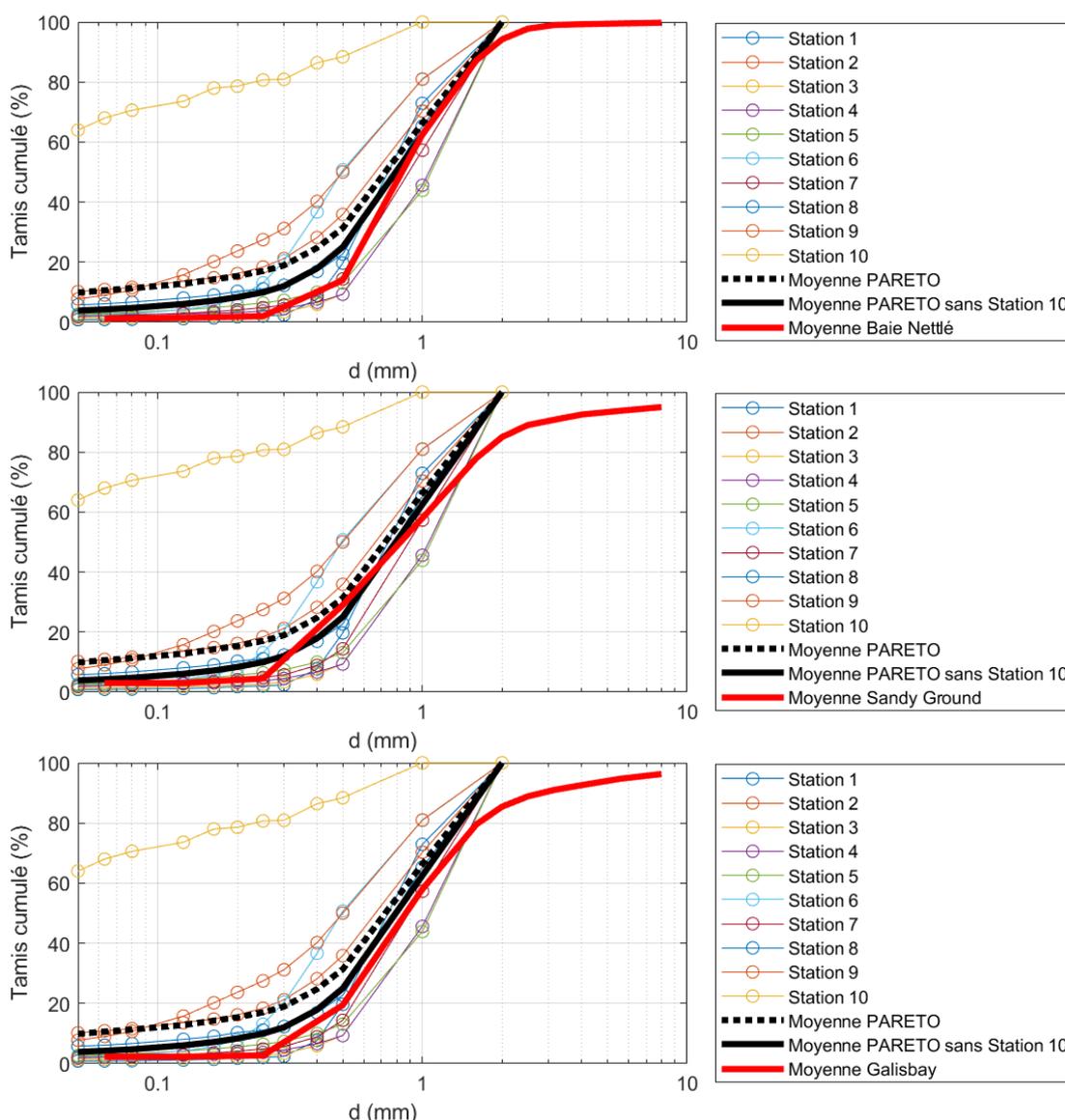


Figure 4.33 Comparaison entre les courbes granulométriques Pareto au site dragué et de la moyenne des courbes granulométriques Eurofins en Baie Nettlé (haut), Sandy Ground (milieu) et Galisbay (bas).

4.3.2.2 D'après Antilles GEOTECHNIQUE, 2016 et 2020

Pour le compte de l'établissement portuaire de Saint-Martin, le groupement de sociétés Balineau, Labco Antilles et Antilles GEOTECHNIQUE a réalisé des campagnes de reconnaissances et études géotechniques dans le cadre du projet d'extension du port de Galisbay de 2016 (Réf. /1/), puis en 2020 (Réf. /2/).

Les données d'Antilles GEOTECHNIQUE analysées ici sont :

- Les sondages carottés réalisés en 2016 en 8 points (Figure 4.34) ;
- Les analyses granulométriques laser réalisées en 2016 (Figure 4.34 et Figure 4.35) ;
- Les analyses granulométriques par tamisage réalisées en 2020 (Figure 4.36).

Les sondages carottés montrent que de façon générale, des dépôts marins sableux se trouvent sur les 3 premiers mètres en surface. Au-delà se trouvent typiquement des argiles de démantèlement ou des calcaires coralliens. Seuls les sables sont susceptibles d'être utilisés pour le rechargement des plages, ainsi, seule cette partie est analysée ici. Le Tableau 4.5 indique les profondeurs où se situent les sables en chaque point ainsi qu'une description plus précise du sédiment. A noter que selon les secteurs, le sable peut être gris ou beige.

Les distributions granulométriques issues des analyses laser qui ont été réalisées sur les plages et sur le site du projet sont données en Figure 4.37, Figure 4.38 et Figure 4.39.

Il ressort de cette comparaison des distributions granulométriques que la part de fines dans les échantillons prélevés sur le site à draguer est significativement plus importante que la part de fines sur la plage.

Pour quantifier cela, du Tableau 4.6 au Tableau 4.8 sont reportées les parts de limons < 63 μm et de sables fins [63 μm – 200 μm] des échantillons sédimentaires analysés sur les plages et sur le site du projet d'après Pareto 2013 et Antilles GEOTECHNIQUE 2016 et 2020.

- Sur les plages (prélèvements superficiels), la part de limons < 63 μm est en moyenne de 2%, celle des sables fins [63 μm – 200 μm] est de 3%, soit une quantité très faible de sédiments fins.
- D'après les analyses de Pareto (sur les 50 cm de surface), ces parts sont de 3% et 3% respectivement en excluant la station 10 ; 9% et 4% en l'incluant, soit une quantité faible de sédiments fins, supérieure à celle des plages mais d'un ordre de grandeur similaire sans la station 10.
- D'après les analyses Antilles GEOTECHNIQUE, ces parts sont de 32% et 11% respectivement, soit significativement plus que les résultats obtenus par Pareto, et significativement plus que sur les plages.
- D'après l'ensemble des analyses Antilles GEOTECHNIQUE (entre 0,5 m et 3,6 m sous la surface), ces parts sont de 22% et 10%, ces analyses ne montrent pas de tendance nette selon la profondeur du sédiment.

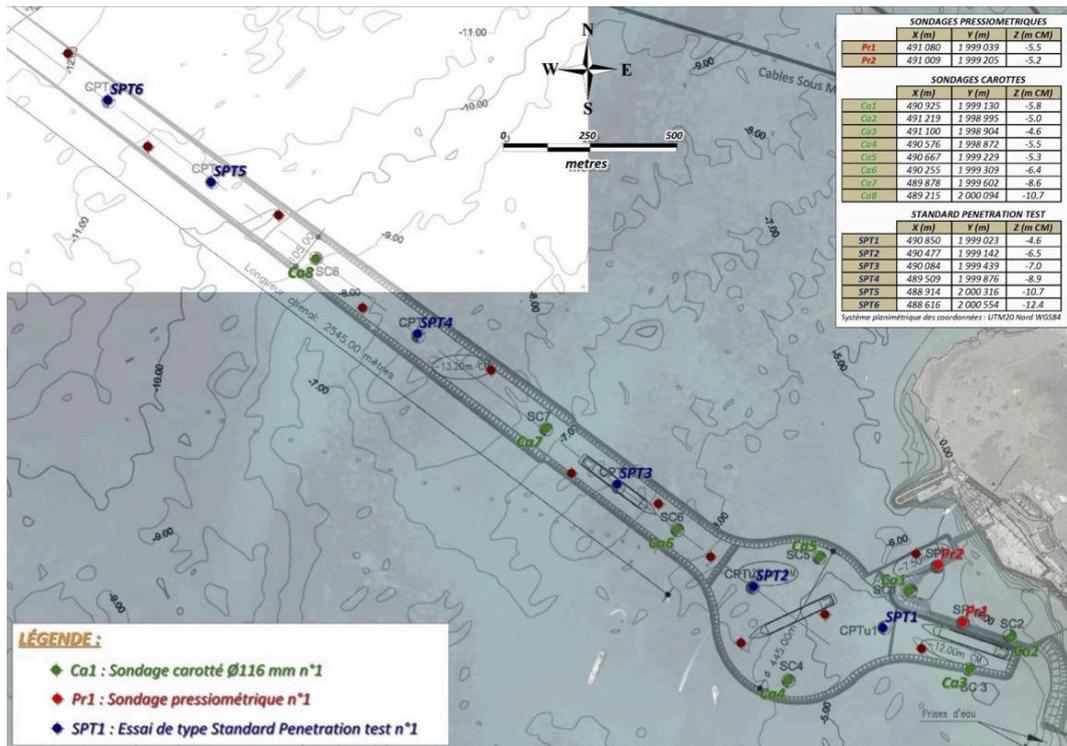


Figure 4.34 Plan d'implantation des reconnaissances géotechniques d'Antilles GEOTECHNIQUE 2016 (Réf. /1/)

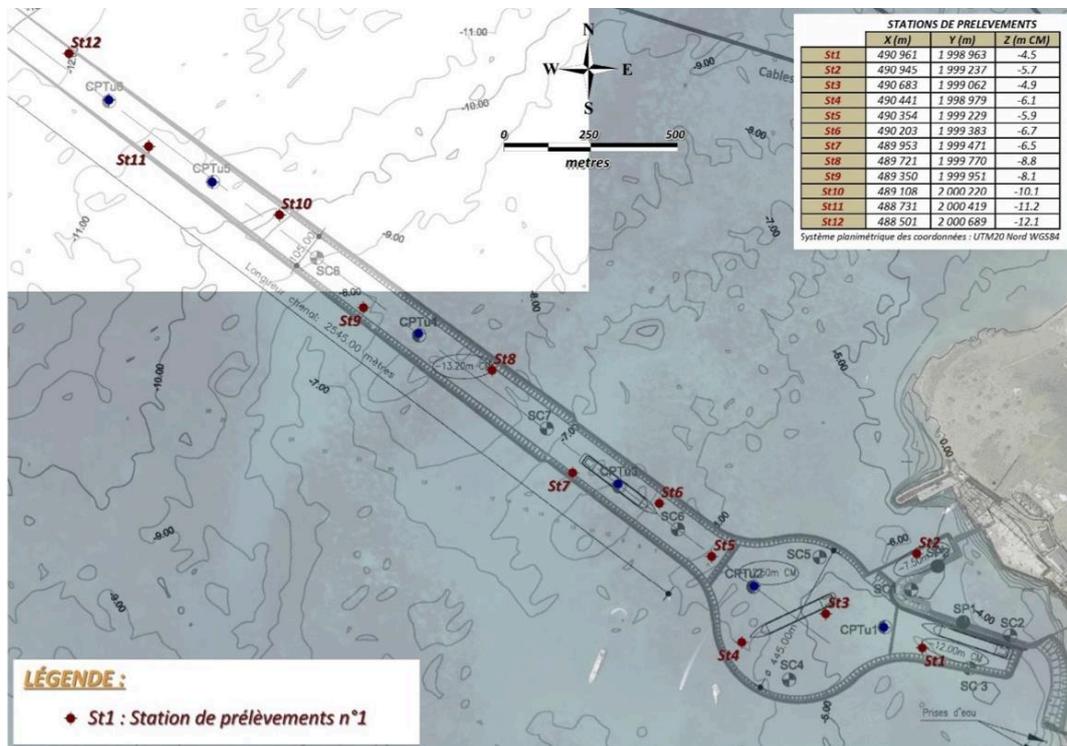


Figure 4.35 Plan d'implantation des stations de prélèvements par plongeurs d'Antilles GEOTECHNIQUE 2016 (Réf. /1/)

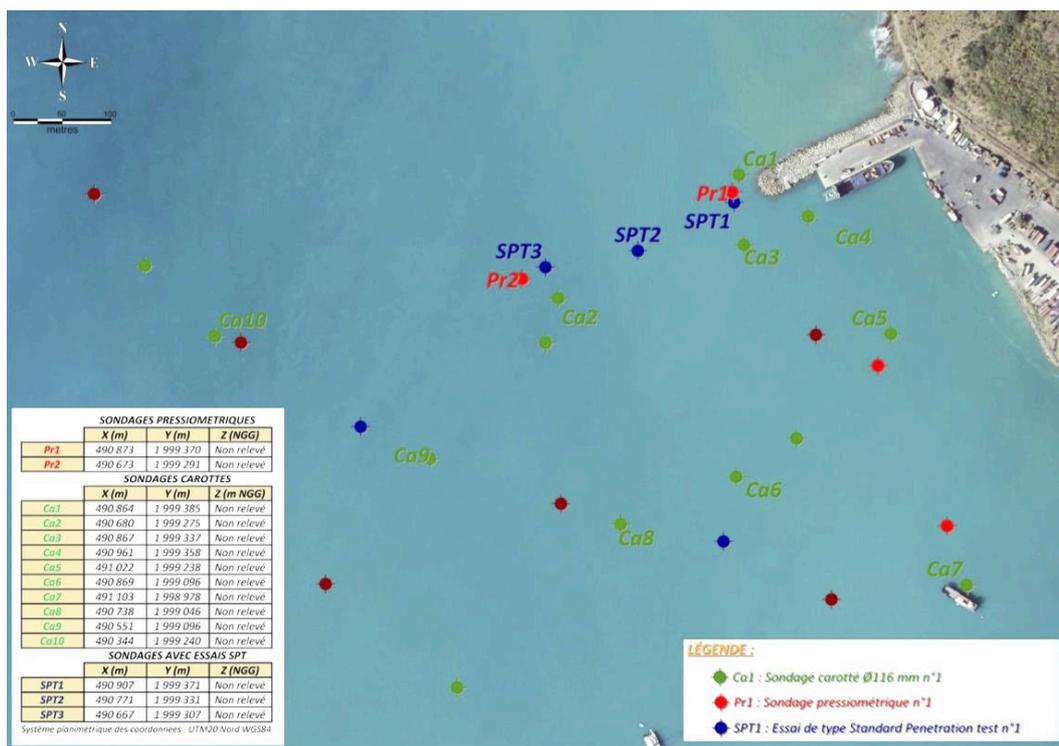


Figure 4.36 Plan d'échantillonnage des sondages carottés d'Antilles GEOTECHNIQUE 2020 (Réf. /2/)

Tableau 4.5 Profondeur et description des sédiments envisagés pour le rechargement des plages d'après l'analyse d'Antilles GEOTECHNIQUE 2016 (Réf. /1/).

Échantillon	Profondeur (m)	Description lithologique de la nature du terrain
Ca1	[0,0 – 3,0]	Dépôts marins sableux : sables marins coquillés grisâtres avec des graviers polygéniques
Ca2	[0,0 – 1,2]	Dépôts marins sableux : sables marins coquillés grisâtres avec des graviers polygéniques
Ca3	[0,0 – 1,5]	Dépôts marins : sables marins siliceux relativement fins de teinte beige à grise
	[1,5 – 2,8]	Dépôts marins : sables marins grossiers gris avec des graviers et gros galets ainsi que des coquillages
Ca4	[0,0 – 2,8]	Dépôts marins : sables marins coquillés gris à blanchâtres relativement grossiers. Présence d'une fraction fine vasarde
	[2,8 – 3,5]	Dépôts marins : sables marins à grossiers gris avec des graviers et des coquillages
Ca5	[0,0 – 1,8]	Sables marins coquillés blanchâtres
	[1,8 – 3,0]	Dépôts marins : sables marins grossiers gris avec des graviers et gros galets ainsi que des coquillages
Ca6	[0,0 – 3,0]	Dépôts marins : sables marins coquillés gris à blanchâtres relativement grossiers
Ca7	[0,0 – 3,6]	Dépôts marins : sables marins coquillés gris
Ca8	[0,0 – 2,7]	Dépôts marins : sables marins coquillés gris
	[2,7 – 3,2]	Dépôts marins : sables gris argilo-vasards avec des coquilles

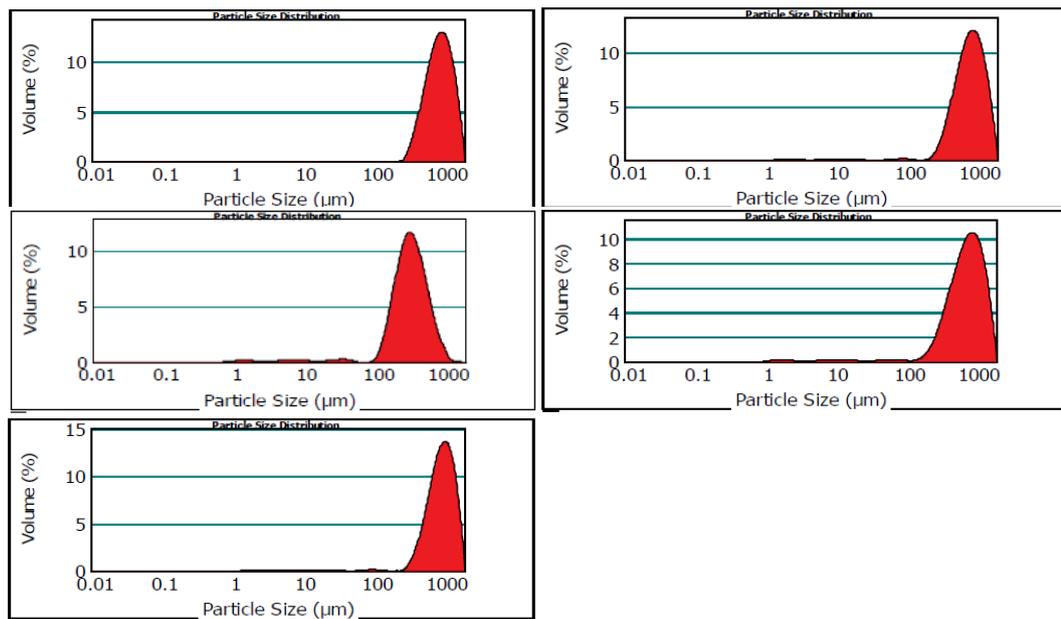


Figure 4.37 Distributions granulométriques sur les plages (Eurofins, 2022), dans l'ordre de lecture : P1500 0m, P2400 0m, P2400 -2m, P5300 0m, P5300 -2m.

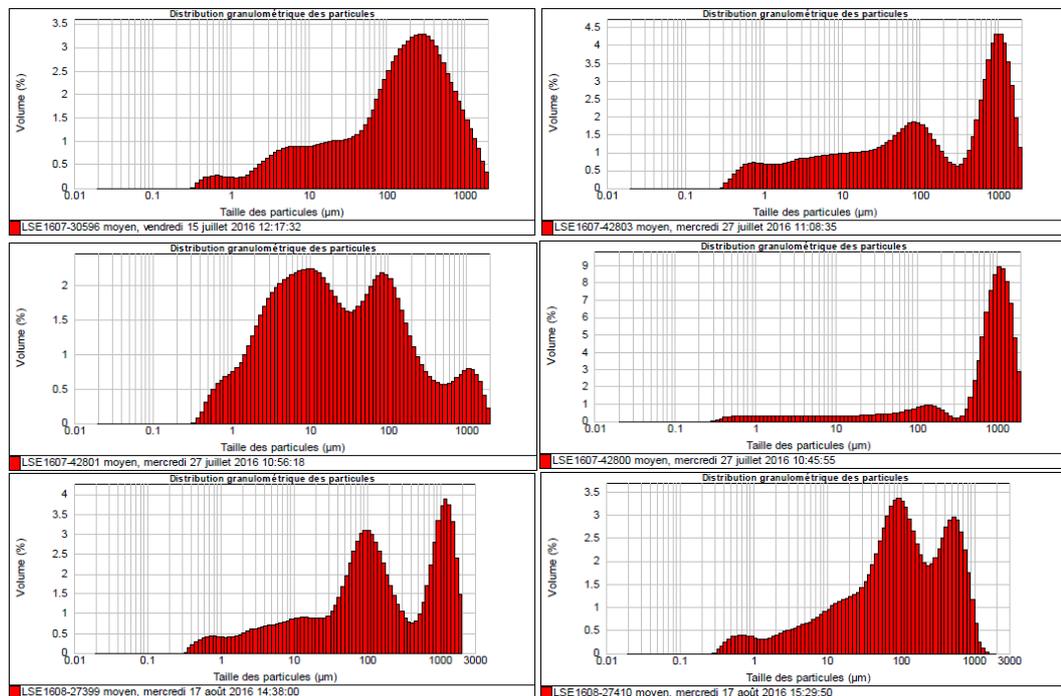


Figure 4.38 Distributions granulométriques dans la zone du projet (Antilles-GEOTECHNIQUE, 2016) dans l'ordre de lecture : Ca1-1,0 m, Ca4-3,5 m, Ca5-3,0 m, Ca6-2,7 m, Ca7-2,5 m, Ca8-3,0 m (Réf. /1/).

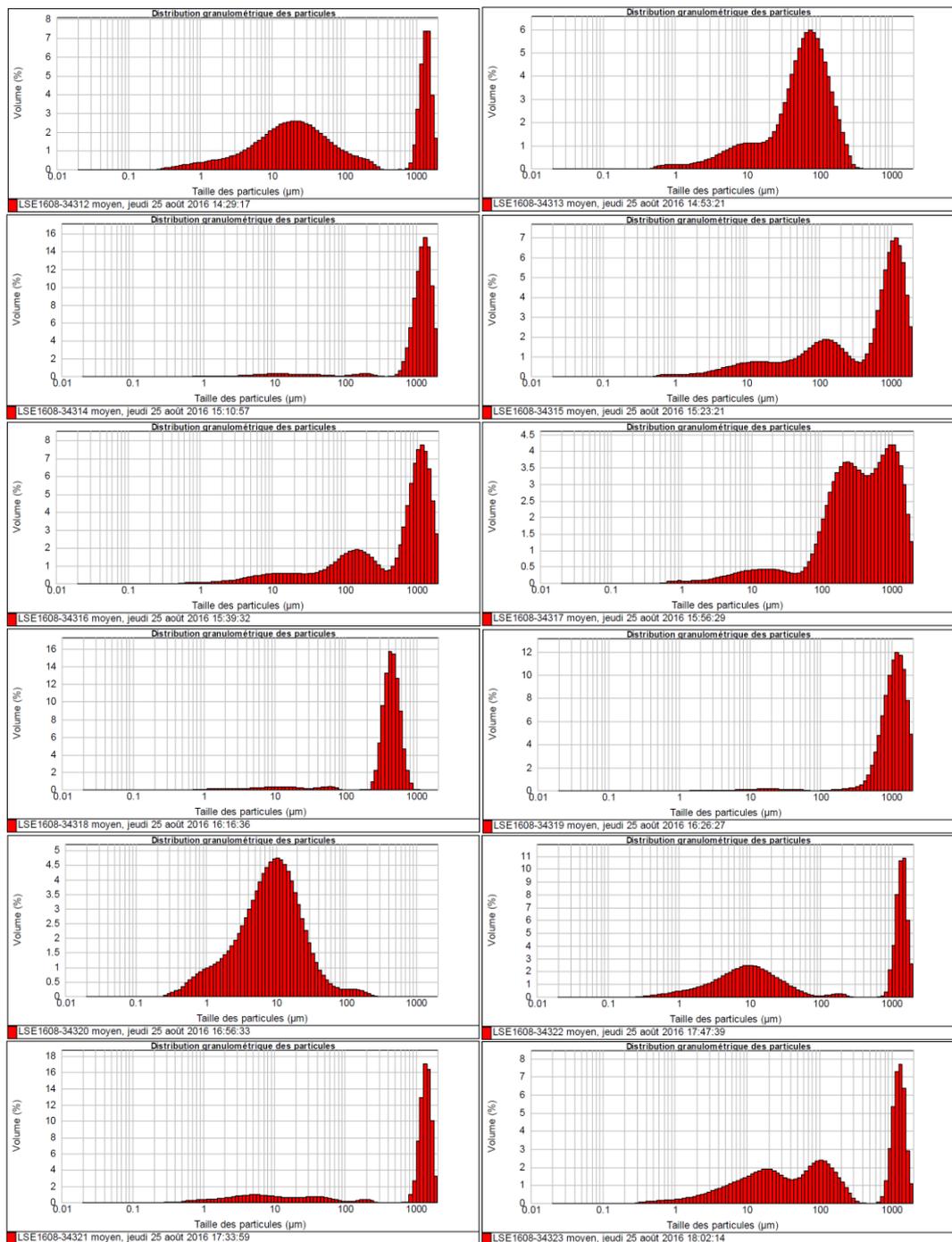


Figure 4.39 Distributions granulométriques dans la zone du projet à 0,5 m de profondeur (par plongeurs, Antilles-GEOTECHNIQUE, 2016), dans l'ordre de lecture : St1, St2, St3, St4, St5, St6, St7, St8, St9, St10, St11, St12 (Réf. /1/).

Les pourcentages exprimés ci-après le sont en fonction de l'échantillon total (le refus de tamis est pris en compte, et non pas seulement les fractions sédimentaires inférieures à 2 mm). Seuls les échantillons d'Antilles GEOTECHNIQUE analysés au-dessus de 3.6 m sous le fond marin (limite basse de la présence potentielle de sable) sont rapportés ci-dessous.

Tableau 4.6 Pourcentage de sédiments fins d'après Eurofins 2022 (en surface)

Nom	Fines < 63 µm (%)	Sables fins et très fins 63 µm – 200 µm (%)	Total < 200 µm (%)
P1500 0m	0	0	0
P2400 0m	1	1	2
P2400 -2m	4	14	18
P5300 0m	3	1	4
P5300 -2m	2	1	3

Tableau 4.7 Pourcentage de sédiments fins d'après Pareto 2013 (sur 50 cm en surface)

Nom	Fines < 63 µm (%)	Sables fins et très fins 63 µm – 200 µm (%)	Total < 200 µm (%)
Station 1	1	1	2
Station 2	6	3	9
Station 3	1	0	1
Station 4	0	1	1
Station 5	2	2	4
Station 6	2	5	7
Station 7	2	2	3
Station 8	4	3	7
Station 9	7	12	20
Station 10	61	10	71

Tableau 4.8 Pourcentage de sédiments fins d'après Antilles GEOTECHNIQUE 2016 & 2020 (profondeur indiquée, relativement au fond marin et non à la Cote Marine)

Nom	Fines < 63 µm (%)	Sables fins et très fins 63 µm – 200 µm (%)	Total < 200 µm (%)
St1 – 0.5	48	8	56
St2 – 0.5	52	45	97
St3 – 0.5	4	1	5
St4 – 0.5	18	15	32
St5 – 0.5	12	13	25
St6 – 0.5	7	15	22
St7 – 0.5	8	1	8
St8 – 0.5	2	0	2
St9 – 0.5	97	2	100
St10 – 0.5	53	2	55
St11 – 0.5	26	2	28
St12 – 0.5	41	20	62
Ca2 – 0.5	–	–	20
Ca2 – 0.5	–	–	28
Ca3 – 0.5	–	–	8
Ca4 – 0.5	–	–	35
Ca5 – 0.5	–	–	37
Ca6 – 0.5	–	–	14
Ca7 – 0.5	–	–	30

Ca8 – 0.5	–	–	25
Ca3 – 1	13	6	20
Ca4 – 1	26	4	30
Ca5 – 1	18	10	28
Ca6 – 1	20	9	29
Ca7 – 1	16	8	24
Ca9 – 1	17	18	35
Ca10 – 1	15	9	24
Ca1 – 1	13	11	24
Ca1 – 1.5	–	–	31
Ca2 – 1.5	–	–	23
Ca3 – 1.5	–	–	24
Ca8 – 1.5	–	–	42
Ca1 – 1.6	15	6	21
Ca2 – 2.5	31	30	61
Ca7 – 2.5	12	10	21
Ca1 – 2.5	–	–	15
Ca1 – 2.5	–	–	46
Ca2 – 2.5	–	–	36
Ca3 – 2.5	–	–	8
Ca4 – 2.5	–	–	27
Ca5 – 2.5	–	–	15
Ca6 – 2.5	–	–	30
Ca7 – 2.5	–	–	28
Ca6 – 2.7	3	1	4
Ca8 – 2.7	–	–	30
Ca5 – 3	25	7	32
Ca8 – 3	16	12	28
STP1 – 3	21	8	29
STP5 – 3	14	3	17
STP6 – 3	19	13	32
Ca4 – 3.5	12	5	17
STP2 – 3.5	30	8	37
STP4 – 3.5	10	4	14
Ca1 – 3.5	–	–	68
Ca1 – 3.5	27	14	40
Ca2 – 3.5	–	–	62
Ca7 – 3.5	–	–	35

Dans les tableaux ci-après sont reportés les diamètres médians issus des analyses granulométriques d'Antilles GEOTECHNIQUE (2016 et 2020) pour chaque échantillon et profondeur. Le type de sédiment prélevé est également rapporté.

- Les lignes surlignées en vert identifient les sables de d_{50} similaire à celui des plages
- Les lignes surlignées en jaune identifient les sables de d_{50} significativement inférieur (ou supérieur) à celui des plages
- Les lignes surlignées en gris identifient les sédiments incompatibles (limons, argiles indurées, ...)

Ces tableaux sont accompagnés des courbes granulométriques des sables de la zone du projet (rouge), superposées avec les courbes granulométriques moyennes des plages de Sandy Ground (bleu) et Galisbay (vert).

La plupart des échantillons présente en surface (entre 2,5 et 0,5 m sous le fond selon les endroits) des diamètres médians similaires à ceux des sédiments situés sur les plages (entre 0,84 mm et 1,21 mm).

La superposition des courbes granulométriques illustre néanmoins que les 40 à 50% es sédiments les plus fins sont souvent significativement plus fins dans les sédiments provenant du site du projet que dans les sédiments de la plage. Cela est visible par exemple en Figure 4.40 : la courbe granulométrique rouge de droite correspond à l'échantillon Ca1 – 1.5 m ($d_{50} = 0,88$ mm, similaire aux plages). Elle se superpose presque aux courbes granulométriques moyennes des plages pour les 65% des sédiments les plus grossiers. Les 35% les plus fins sont nettement plus fins dans l'échantillon Ca1 que dans les échantillons des plages.

Toujours sur la Figure 4.40, la courbe granulométrique rouge de gauche correspond à l'échantillon Ca1 – 2,5 m ($d_{50} = 0,23$ mm, nettement inférieur aux plages). Ici, les courbes granulométriques illustrent que la totalité du sédiment composant le rechargement est plus fine que le sédiment naturellement en place sur les plages.

Deux conséquences à l'exploitation de ce sédiment source comme sable de rechargement peuvent être anticipées :

- les limons les plus fins entraîneront de la turbidité le long des plages au moment du rechargement, et lorsqu'ils seront mis en suspension par les vagues déferlant sur les plages, tant qu'ils n'auront pas été lessivés et emportés plus au large par les conditions hydrodynamiques.
- les sables les plus fins ne se maintiendront pas sur le haut de plage mais alimenteront le bas du profil de plage ou la baie.

A noter qu'il s'agit pour partie de sables gris, soit du sédiment de couleur différente de celle présente naturellement sur les plages de la baie.

Tableau 4.9 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca1 (Réf. /1/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca1	1.5	0.88	Sable gris avec coquilles
	2.5	0.23	Sable gris avec coquilles
	3.5	0.47	Limon brun ferme avec graviers
	4.6	0.07	Limon brun
	6.2	0.13	Limon brun
	7.5	0.10	Limon brun très mou

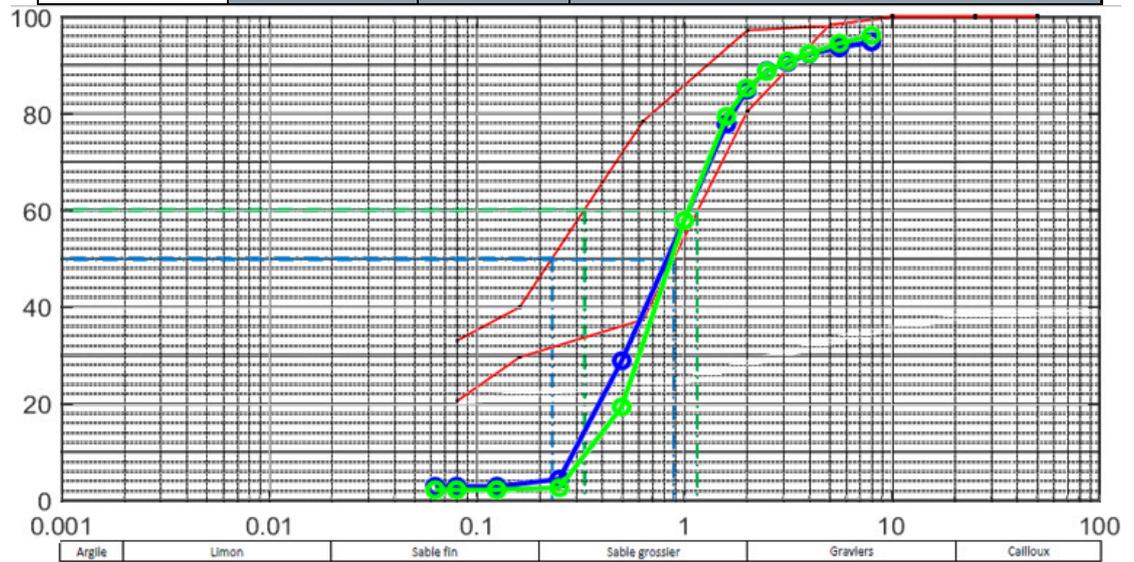


Figure 4.40 Courbes granulométriques des échantillons Ca1 – 1.5 m et Ca1 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

Tableau 4.10 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca2 (Réf. /1/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca2	0.5	0.77	Sable gris avec coquilles
	1.5	2.50	Limon brun
	2.5	1.06	Limon brun avec blocs
	3.5	0.08	Argile brune à bariolée
	5.2	5.73	Limon brun mou avec blocs ronds
	6.5	0.72	Argile brune sablo-graveleuse
	7.5	1.38	Argile brune graveleuse
	8.5	3.37	Argile brune graveleuse
	9.3	6.32	Grave argileux brune
	10.5	29.04	Grave argileux
	11.5	SO	Argile d'altération bariolée

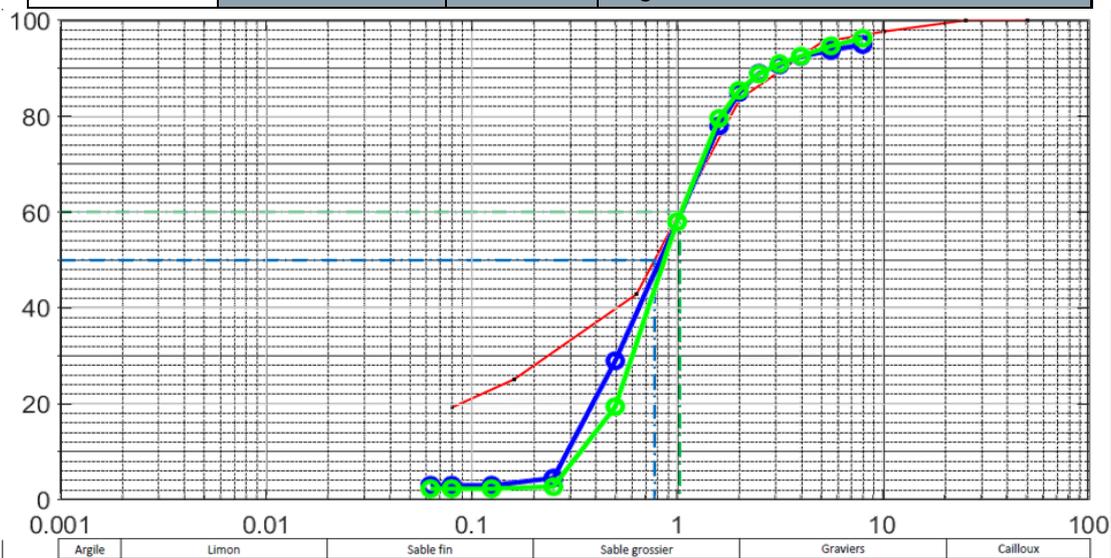


Figure 4.41 Courbe granulométrique de l'échantillon Ca2 – 0.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

Tableau 4.11 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca3 (Réf. /1/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca3	0.5	1.21	Coquillage
	1.5	0.84	Coquillage sablo-graveleuse
	2.5	29.66	Roche grise bleu
	4.5	0.48	Argile graveleuse sableuse
	6.5	SO	Limon graveleux
	8.5	0.15	Argile limoneuse brune

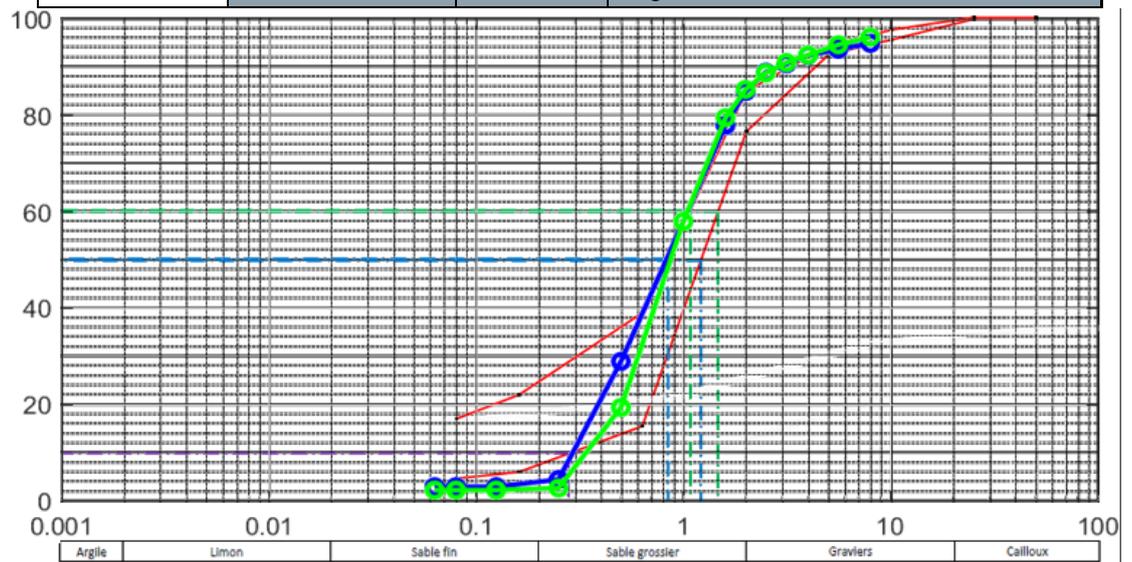


Figure 4.42 Courbes granulométriques des échantillons Ca3 – 0.5 m et Ca3 – 1.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

Tableau 4.12 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca4 (Réf. /1/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca4	0.5	0.57	Coquillages à sable
	2.5	0.90	Coquillages à sable
	4.5	4.09	Sable graveleux vaseux
	5.2	2.00	Grave sablo-vaseux
	6.5	SO	Argile plastique kaki à bloc calcaire
	7.6	SO	Argile bariolée
	8.5	1.09	Argile limoneuse à bloc calcaire

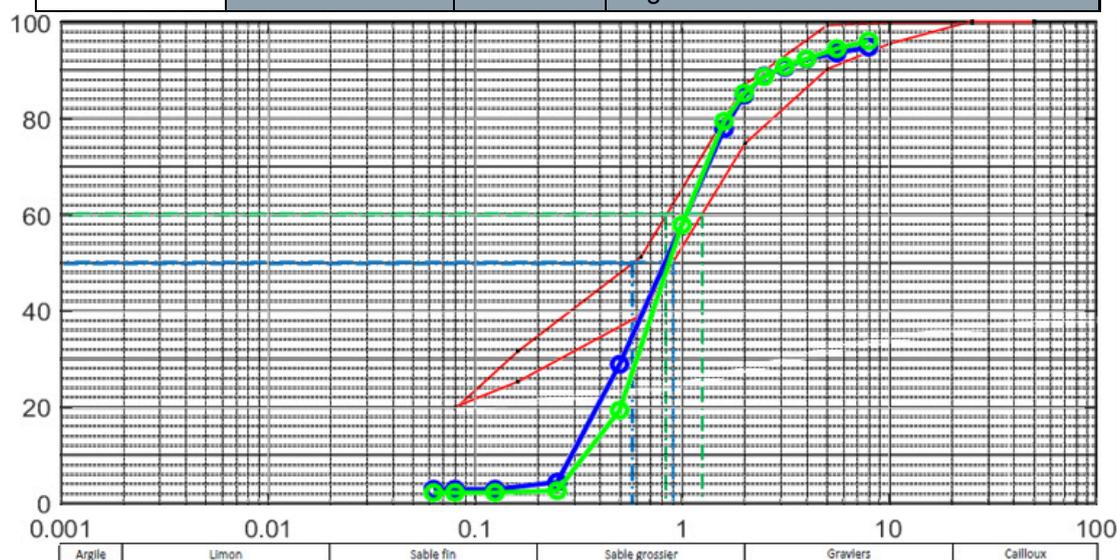


Figure 4.43 Courbes granulométriques des échantillons Ca4 – 0.5 m et Ca4 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

Tableau 4.13 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca5 (Réf. /1/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca5	0.5	0.55	Coquillage et sablo-vaseux
	2.5	6.34	Sable graveleux
	4.3	SO	Argile brune à bloc de calaire avec altération
	9.5	0.19	Limon graveleux
	11.5	0.32	Limon brune à bloc calcaire

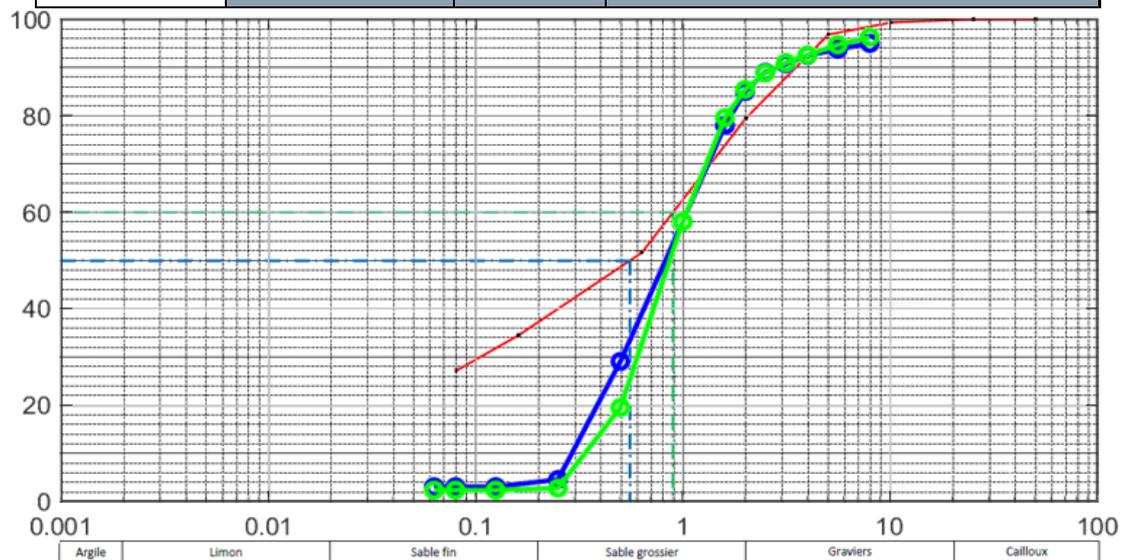


Figure 4.44 Courbe granulométrique de l'échantillon Ca5 – 0.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

Tableau 4.14 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca6 (Réf. /1/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca6	0.5	0.97	Coquillage à sable
	2.5	0.61	Sable coquiller

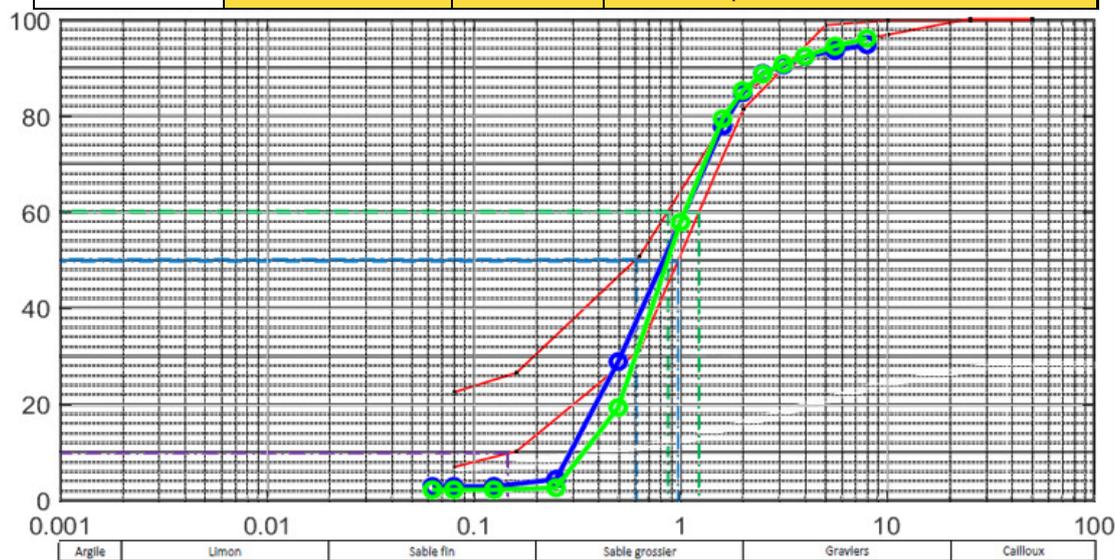


Figure 4.45 Courbes granulométriques des échantillons Ca6 – 0.5 m et Ca6 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

Tableau 4.15 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca7 (Réf. /1/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca7	0.5	0.72	Coquillage à sable
	2.5	0.91	Sable coquiller
	3.5	0.98	Bloc calcaire
	5.5	1.15	Bloc calcaire

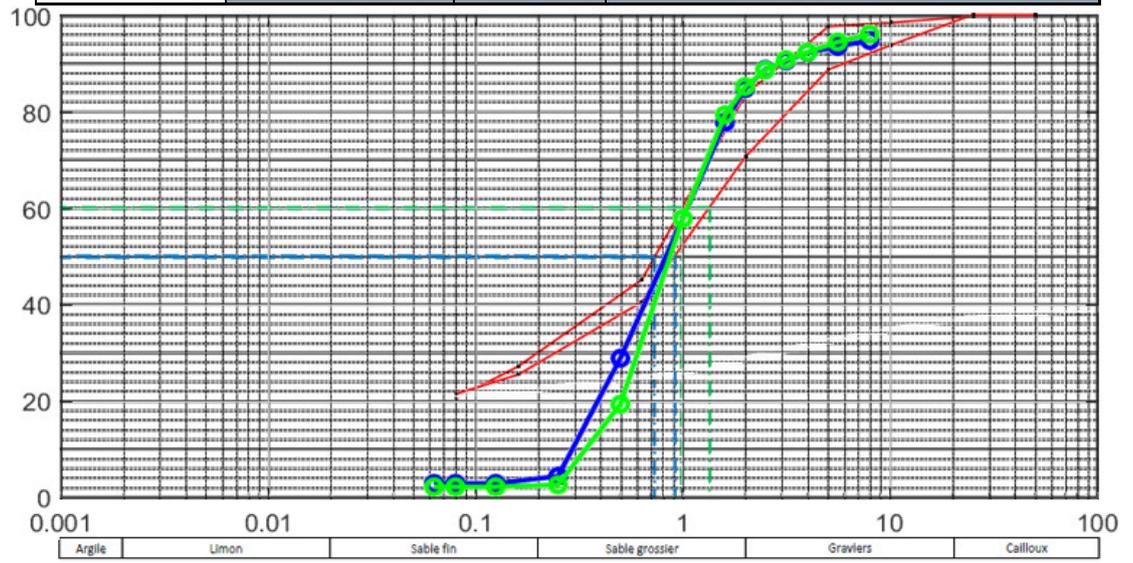


Figure 4.46 Courbes granulométriques des échantillons Ca7 – 0.5 m et Ca7 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

Tableau 4.16 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2016 : Ca8 (Réf. /1/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca8	0.5	1.09	Coquillage à sable
	1.5	0.40	Sable coquiller
	2.7	1.90	Sable argilo-vasarde coquillée
	4.5	1.16	Bloc calcaire

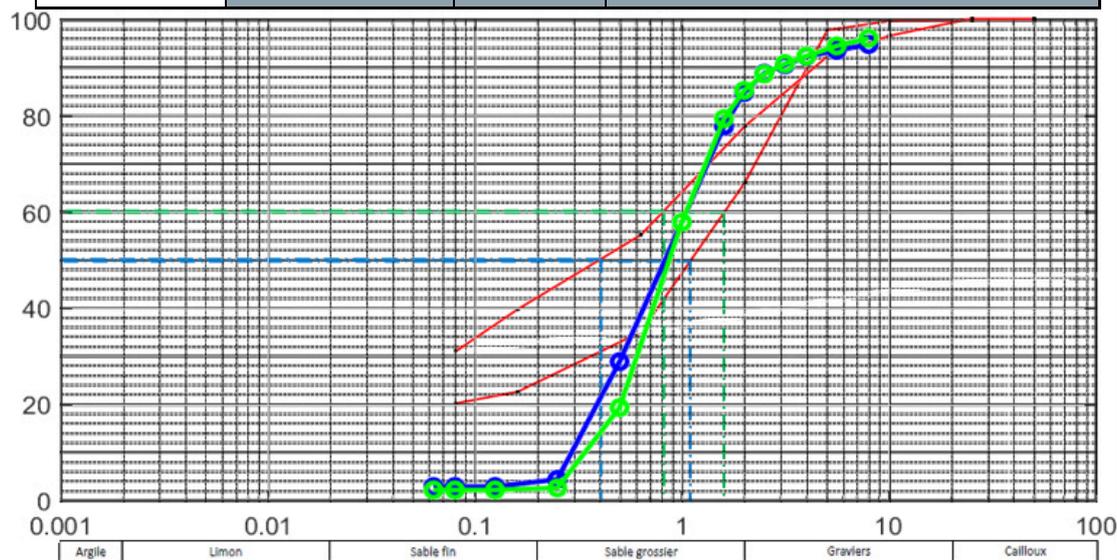


Figure 4.47 Courbes granulométriques des échantillons Ca8 – 0.5 m et Ca8 – 1.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

Tableau 4.17 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2020 : Ca1 (Réf. /2/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca1	1.6	0.85	Sable gris humide
	2.5	0.96	Sable gris humide
	3.5	SO	Argile ± sableuse plastique
	5.5	0.05	Argile ± sableuse plastique

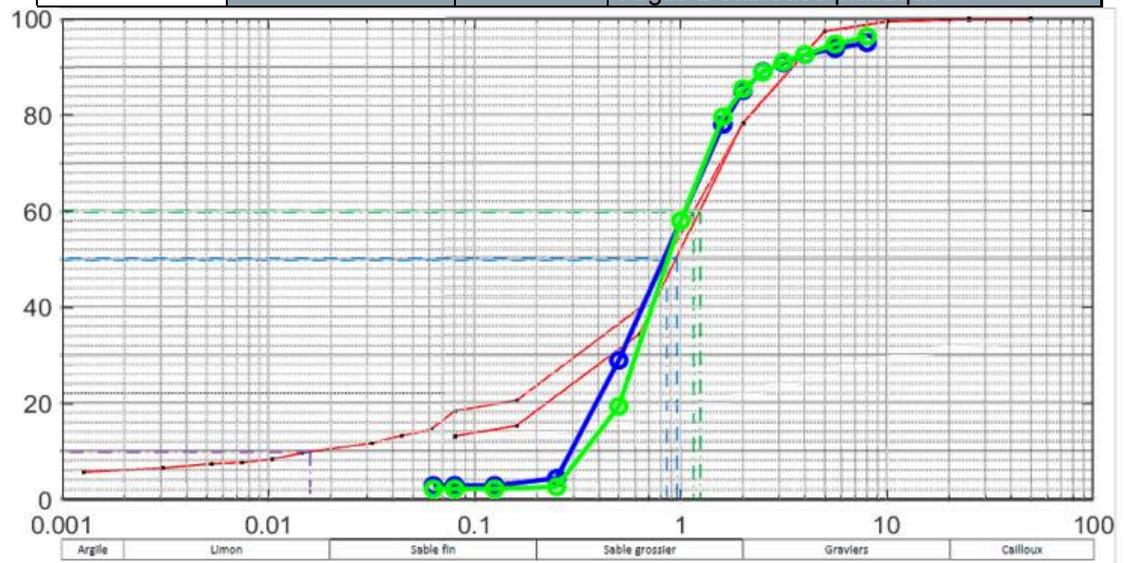


Figure 4.48 Courbes granulométriques des échantillons Ca1 – 1.6 m et Ca1 – 2.5 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

Tableau 4.18 Caractéristiques granulométriques des sédiments analysés par Antilles GEOTECHNIQUE 2020 : Ca2 (Réf. /2/).

Échantillon	Profondeur (m)	d50 (mm)	Type de sédiment
Ca2	0.5	1.11	Sable gris / débris de coquillages
	4	2.51	Sable gris + cailloux
	7.5	0.04	Argile légèrement sableuse à cailloux
	10.5	0.53	Argile humide brune à blocs

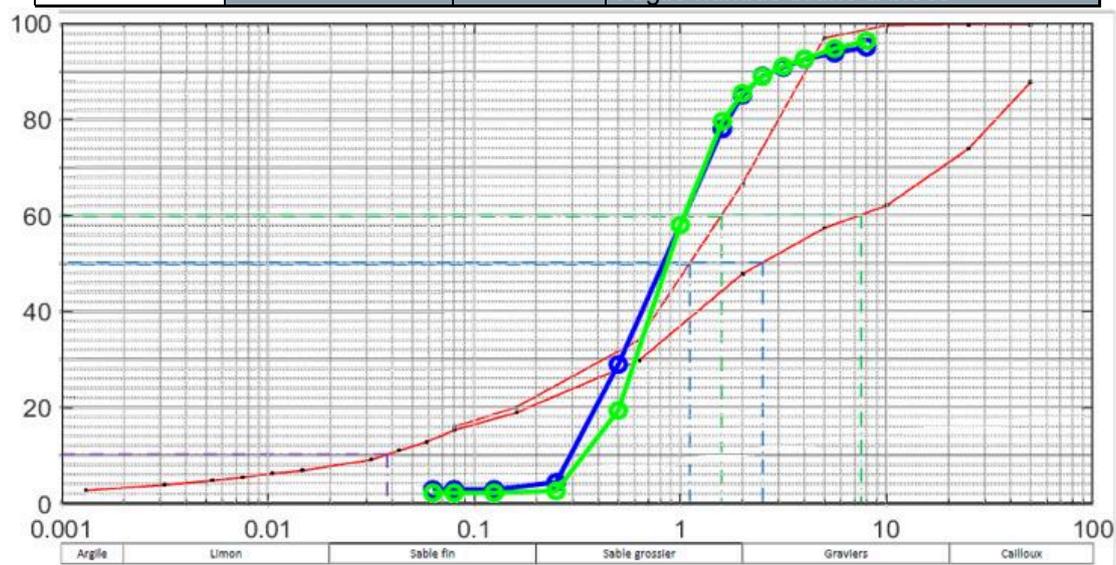


Figure 4.49 Courbes granulométriques des échantillons Ca2 – 0.5 m et Ca2 – 4 m (rouge), moyenne de la plage de Sandy Ground (bleu) et de la plage de Galisbay (vert).

4.3.3 Synthèse

En résumé, les analyses granulométriques montrent qu'il existe à l'endroit du site dragué des dépôts marins sableux, typiquement situés sur les 3 premiers mètres en surface.

La comparaison des courbes granulométriques des échantillons pris dans cette couche de 3 m au niveau du site du projet avec celles des échantillons pris sur les plages montre que les sédiments sont partiellement compatibles : les d_{50} et les hauts de courbes granulométriques sont généralement cohérents, mais la part des sédiments fins à très fins voire de limons est plus importante au niveau du site du projet que sur les plages.

Sur les plages, la part de limons $< 63 \mu\text{m}$ est en moyenne de 2% et celle des sables fins [$63 \mu\text{m} - 200 \mu\text{m}$] est de 3%, tandis que d'après les analyses d'Antilles GEOTECHNIQUE dans les 3,6 m de dépôts marins sableux potentiels au niveau du site du projet la part de limons est de l'ordre de 22% et celle des sables fins de 10%.

Ainsi, on trouve 5% de sédiments $< 200 \mu\text{m}$ sur les plages contre 32% sur le site du projet d'après les analyses d'Antilles GEOTECHNIQUE.

Il est attendu qu'un rechargement de plage réalisé à partir de sédiments en partie plus fins que les sédiments naturellement en place sur les plages voie cette partie plus fine que celle en place ne pas se maintenir dans le temps :

- Les limons vont entraîner une turbidité temporaire le long des plages, au moment du rechargement ainsi que lors de la mise en suspension par les vagues de ces limons, tant que ceux-ci n'auront pas été lessivés par les conditions hydrodynamiques.
- Les sables les plus fins seront entraînés au-delà du profil actif de la plage, contribuant ainsi à l'engraissement du bas de plage et des petits fonds.

D'après la comparaison des courbes granulométriques d'Antilles GEOTECHNIQUE sur le site dragué et celles des plages, on peut estimer qu'environ 50% du sédiment est compatible. Ainsi, pour un volume de sable disponible estimé de $154\,262 \text{ m}^3$ (Réf. /24/), environ $75\,000$ à $80\,000 \text{ m}^3$ semblent compatibles.

Afin de minimiser la turbidité et de favoriser la stabilité d'un rechargement, nous recommandons de privilégier l'apport de sédiments de caractéristiques granulométriques les plus semblables à celles en place, ainsi que les sédiments un peu plus grossiers. Nous recommandons également d'envisager de mettre en œuvre des méthodes de pré-traitement avant rechargement telles que l'hydrocyclonage, permettant de séparer les particules les plus fines ($< 63 \mu\text{m}$) des sables fins.

A noter également que les sédiments présents sur le site du projet sont en partie des sables gris, soit du sédiment de couleur différente de celle présente naturellement sur les plages de la baie.

5 Evolution historique et récente du littoral et des fonds

5.1 Topo-bathymétrie

5.1.1 Liste des données

Les données topo-bathymétriques du site d'étude sont présentées dans cette section.

Le Tableau 5.1 synthétise les données topo-bathymétriques disponibles par ordre antéchronologique et illustre l'emprise de ces levés sur la zone d'étude.

MNT bathymétrique de façade de Saint-Martin et Saint-Barthélemy (SHOM, 2018)

Le MNT bathymétrique de façade de Saint-Martin et Saint-Barthélemy à une résolution de 0.001° (~ 100 m) a été réalisé dans le cadre du projet HOMONIM (Réf. /25/).

Le MNT englobe une partie des îles des petites Antilles, depuis Anguilla au nord jusqu'à Saba au sud. Il s'étend au large jusqu'à 3 275 m de profondeur.

Le MNT est destiné à être implémenté dans les modèles hydrodynamiques afin de produire des prévisions aussi précises que possible des hauteurs d'eau et d'états de mer à la côte.

Ce MNT est disponible à deux références verticales : niveau moyen (NM) et niveau des plus basses mers astronomiques (PBMA).

Litto3D de Saint-Martin (SHOM, 2019)

Le programme national Litto3D® vise à produire un modèle numérique altimétrique de référence, continu terre-mer et précis, sur la frange du littoral métropolitain et ultramarin. Il met en œuvre des moyens de levés par lasers aéroportés (LIDAR), permettant de mesurer les profondeurs dans les zones d'estran difficilement accessibles, en complément des sondeurs multifaisceaux embarqués à bord des navires.

Litto3D® décrit la bande littorale :

- en mer, jusqu'à l'isobathe 10 m et au plus jusqu'à 6 milles marins des côtes,
- sur terre, jusqu'à l'altitude +10 m et à au moins 2 km à l'intérieur des terres.

Ce référentiel Litto3D® a été réalisé par le Service hydrographique et océanographique de la marine (Shom) et l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) en partenariat avec l'Etat (DEAL Guadeloupe).

Il possède une résolution de 1 m et 5 m.

Le système d'altitude est le système légal de la zone (GUAD88SM pour Saint-Martin).

Lots bathymétriques (SHOM, 1972, 2003, 2018)

Les lots bathymétriques correspondent à l'extraction des sondes bathymétriques non protégées de la base de données bathymétriques du Shom.

Chaque lot est constitué de sondes mesurées sur le terrain et validées.

Cette base de données contient des lots bathymétriques de 1972, 2003 et 2018 sur le site d'étude.

Ces données sont référencées au 159 Guadeloupe - St Martin (ile) Marigot (ZH) qui est assimilé à la Plus Basse Mer Astronomique (PBMA).

Levé topo-bathymétrique de la baie de Marigot (ACRI-IN, 2018)

Suite au passage du cyclone Irma, l'établissement portuaire de Saint-Martin a mandaté la société ACRI-IN pour réaliser des mesures bathymétriques et d'imagerie du fond au sonar latéral sur les sites de Marigot, Grand Case et Anse Marcel.

Cette série de mesures a été programmée et réalisée du 5 au 21 novembre 2018.

L'objectif du levé bathymétrique est de déterminer les évolutions de la morphologie des fonds par comparaison avec les levés antérieurs au cyclone.

Les profondeurs sont données en Cote Marine 96 (CM96). Cette cote marine correspond au zéro hydrographique du marégraphe de la marina de Marigot situé à -0,351 sous le zéro du Nivellement Général de la Guadeloupe.

Levé bathymétrique du port de Galisbay (BATHYS, 2020)

Ce levé bathymétrique est un état des lieux avant travaux d'extension portuaire. Il s'agit de relevés ayant pour objectif la constitution d'un modèle numérique de terrain (MNT). Pour cela, la bathymétrie a été effectuée au sondeur multifaisceau.

Le levé a été réalisé entre le 29 novembre et le 3 décembre 2020.

Le système d'altitude est l'IGN88 (Guadeloupe et Saint-Martin).

Levé topo-bathymétrique de la Baie Nettle et de la plage de Sandy Ground (INGEO, 2016)

Un levé topographique et bathymétrique de reconnaissance d'une partie de la Baie Nettle entre la bathymétrie existante et le haut de plage de Sandy Ground, ainsi que le long du quai principal du port de Galisbay a été réalisé par la société INGEO en mars 2016.

Les données sont référencées par rapport au zéro hydrographique de Marigot, qui se situe à 0,36 m sous le niveau des altitudes normales.

Levé bathymétrique du port de Galisbay (LANDMARK, 2010)

Un levé bathymétrique du port de Galisbay a été réalisé par la société LANDMARK en septembre 2010.

Les données sont référencées par rapport au zéro hydrographique, approximativement - 0,36 m sous le niveau moyen.

Levé bathymétrique du port de Galisbay et de la marina Fort Louis (LANDMARK, 2019)

Un levé bathymétrique de la marina Fort Louis a été réalisé par la société LANDMARK en septembre 2019.

Un levé bathymétrique du port de Galisbay a ensuite été réalisé par la même société en décembre 2019.

Les données sont référencées par rapport au zéro hydrographique, approximativement - 0,36 m sous le niveau moyen.

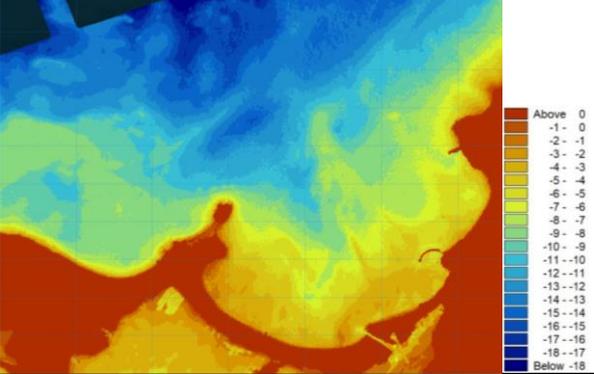
Levé topo-bathymétrique de Marigot et Galisbay (OPSIA, 2003)

Un levé topo-bathymétrique du secteur de la Baie de Marigot et de la Baie de la Potence a été réalisé par la société OPSIA en février 2003.

Le nivellement de ces données topographiques et bathymétriques est rattaché au système altimétrique NGG.

5.1.2 Tableau de synthèse

Tableau 5.1 Synthèse des données topo-bathymétriques disponibles

Nom	Source	Date d'acquisition	Aperçu
MNT bathymétrique de façade de Saint-Martin et Saint-Barthélémy	SHOM	Assemblage (diffusion : 2018)	
Bathymétrie du port de Galisbay	BATHYS	Novembre – décembre 2020	
Litto3D de Saint-Martin	SHOM	Mars 2019	
Bathymétrie du port de Galisbay	LANDMARK	Décembre 2019	

<p>Bathymétrie de la marina Fort Louis</p>	<p>LANDMARK</p>	<p>Septembre 2019</p>	
<p>Topo-bathymétrie de la Baie de Marigot</p>	<p>ACRI-IN</p>	<p>Novembre 2018</p>	
<p>Lot bathymétrique 2018</p>	<p>SHOM</p>	<p>Juin 2018</p>	
<p>Topo-bathymétrie de la Baie Nettlé et de la Plage de Sandy Ground</p>	<p>INGEO</p>	<p>Mars 2016</p>	
<p>Lot bathymétrique 2003</p>	<p>SHOM</p>	<p>Mai 2003</p>	

<p style="text-align: center;">Topo- bathymétrie de Marigot et Galisbay</p>	<p style="text-align: center;">OPSIA</p>	<p style="text-align: center;">Février 2003</p>	
<p style="text-align: center;">Lot bathymétrique 1972</p>	<p style="text-align: center;">SHOM</p>	<p style="text-align: center;">1972</p>	

5.1.3 Profils de plage

La Figure 5.2 représente les profils de plage extraits du Litto3D 2019 du SHOM en chaque profil défini en Figure 2.4, et regroupé par petites baies de la Grand'Baie de Marigot (Anse des Sables, Baie Nettlé, Baie de Marigot, Baie de la Potence).

Le profil de plage moyen de chacune de ces baies est reporté sur la Figure 5.1.

Il s'apparaît que les profils de plage côté Anse des Sables présentent une pente plus douce que ceux des baies Nettlé et de Marigot, qui eux-mêmes sont moins pentus que les profils de plage de la Baie de la Potence.

Cela traduit une variabilité de la granulométrie des sédiments dans la Grand'Baie de Marigot : les sédiments sont a priori plus grossiers à l'est (Baie de la Potence) et plus fins à l'ouest (Anse des Sables). Les analyses granulométriques réalisées dans le cadre de la présente étude devraient permettre de confirmer cela.

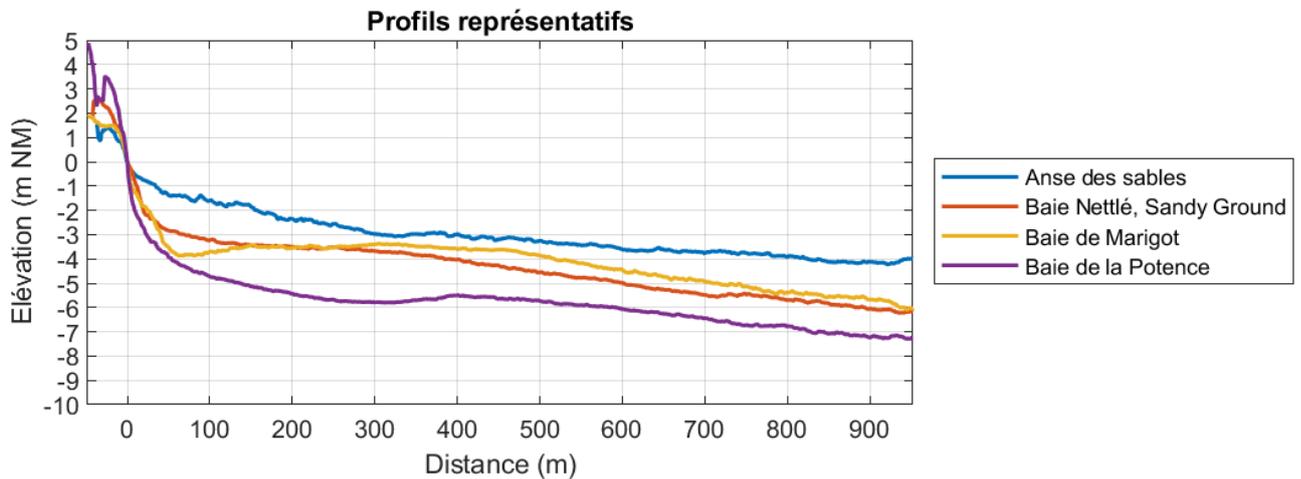


Figure 5.1 Profils de plage représentatif par baie de la Grand'Baie de Marigot.

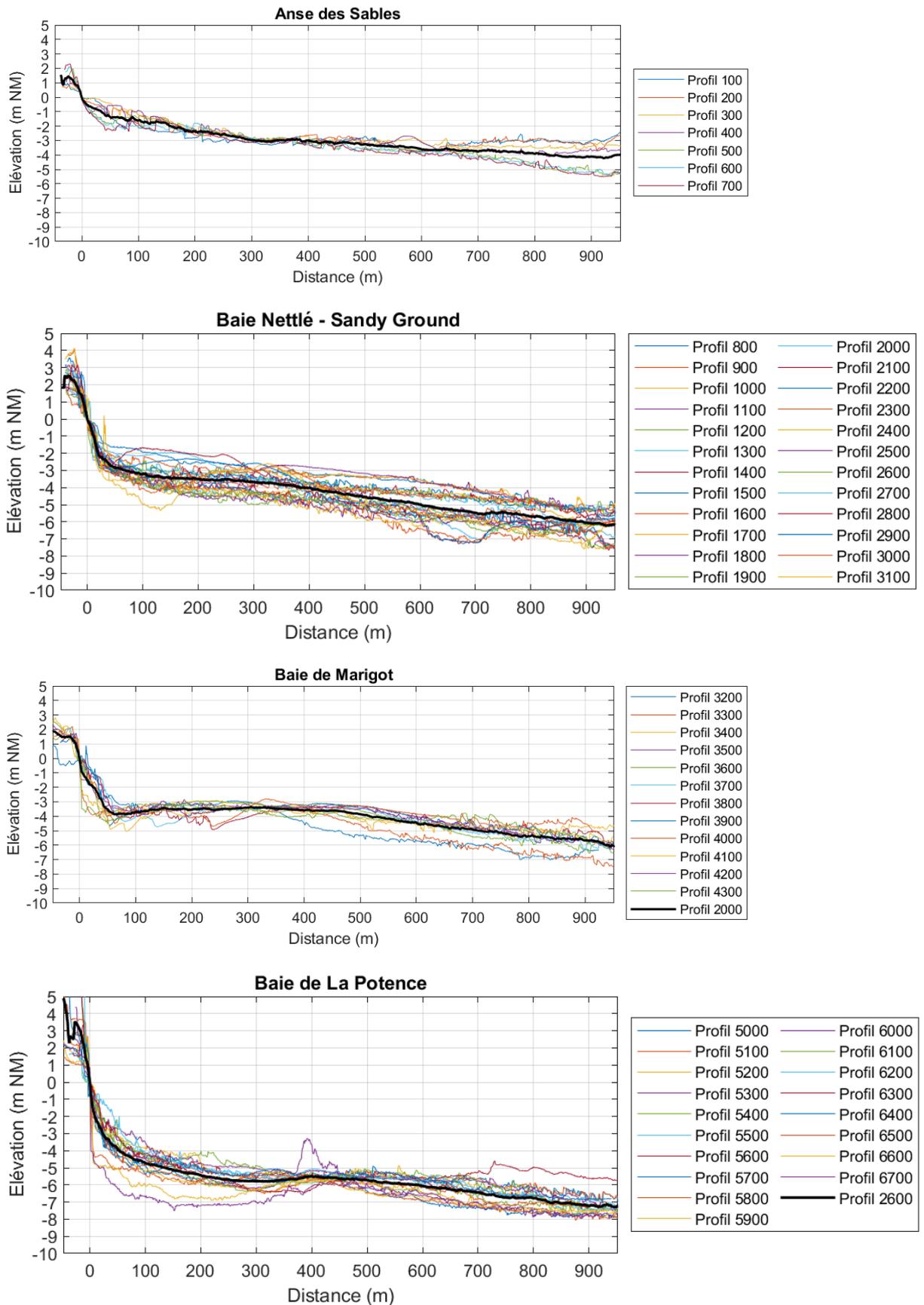


Figure 5.2 Profils de plage extraits du Litto3D 2019 du SHOM.

5.2 Evolution du trait de côte

5.2.1 Analyse sur 1950 – 2010 sur Saint-Martin (étude Cerema)

L'indicateur national rend compte des évolutions passées du trait de côte sur de longues périodes (supérieures à 50 ans). Il a été cartographié au 1/100 000 sur l'ensemble du linéaire côtier français (Figure 5.3) et repose sur la comparaison de la position du trait de côte (cartographiée au 1/2 500) entre deux orthophotographies, les plus éloignées possible dans le temps ; la plus récente utilisée à Saint- Barthélemy datant de 2016 et la plus ancienne de 1954 et entre 1947/1954 et 2010 pour Saint-Martin. Les vitesses d'évolution ont été calculées tous les 200 m à partir des distances divisées par le nombre d'années d'écart entre les orthophotographies. En présence d'ouvrage ou d'aménagement du littoral sur le trait de côte, aucun calcul n'a été mené. Cet indicateur ne prend donc pas en compte les conséquences de l'année cyclonique de 2017 sur les littoraux de ces deux îles (Réf. /6/).

D'après cette analyse, à Saint-Martin, le trait de côte de la plage de la Baie de la Potence (au droit de la centrale électrique) est resté stable entre 1947 et 1989, certainement en raison de la présence de beach-rocks qui arment le cordon sableux. Durant la même période, la plage diminue en volume, laissant apparaître de plus en plus le soubassement rocheux. Cette évolution semble être antérieure à l'exploitation de sable en mer au large de la pointe Arago (voir Section 6.2.1).

En 1992, le remblaiement de l'étang de Galisbay se poursuivait, diminuant son rôle tampon et augmentant le débit au niveau de l'exutoire. C'est à ce niveau qu'affleuraient le plus largement les beach-rocks. Le sable avait totalement disparu et le cordon sableux restant était le témoin de l'érosion aggravée par des prélèvements de sable non-autorisés. Entre 1989 et 1992, la plage de l'hôtel n'a pas évolué, les zones rocheuses commençaient au niveau du premier bosquet nord et s'étendaient jusqu'à la centrale électrique. La majorité des cordons de l'île montrent des signes d'érosion, excepté le cordon de la Baie Nettlé qui est en progradation. Cette érosion est attestée par la présence de beach-rocks, par des micro-falaises dans le matériel des cordons et par une végétation ancienne jusqu'au trait de côte, avec souvent des arbres déchaussés sur la plage (Réf. /6/).

Le Tableau 5.2 présente les évolutions des côtes d'accumulation de Saint-Martin entre 1947/1954 et 2010. Les secteurs concernés par la présente étude sont encadrés en rouge.

En résumé, d'après cette étude, entre 1950 et 2010 :

- Le trait de côte de l'Anse des Sables, à l'ouest, s'est montré relativement stable, voire a avancé de 0,18 m/an à l'extrémité ouest.
- Le trait de côte du secteur Baie Nettlé / Sandy Ground a reculé de l'ordre de - 0,15 m/an.
- Le trait de côte de la Baie de la Potence a peu évolué, mais seulement du fait de la présence de beach rocks, car la plage a significativement diminué de volume.

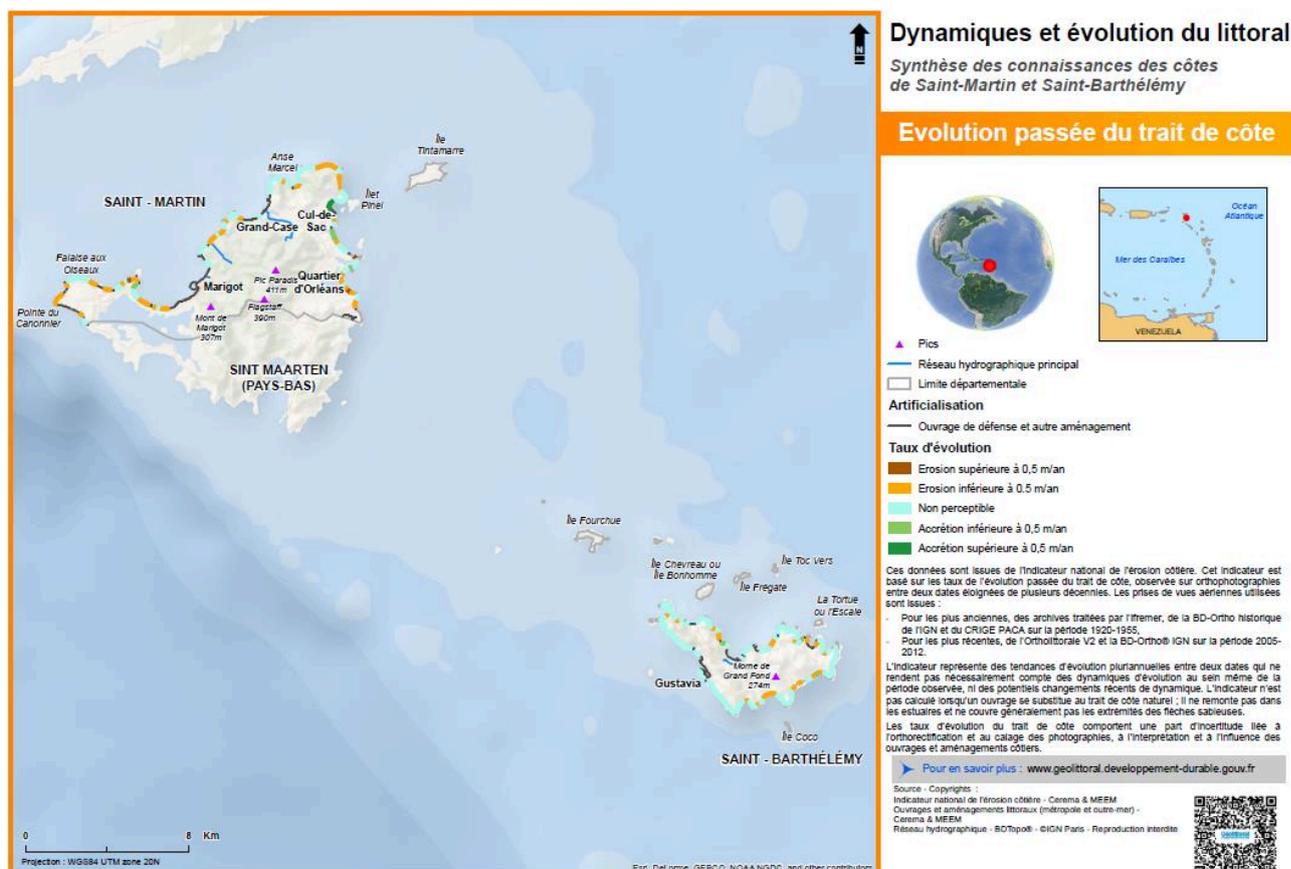


Figure 5.3 Evolution du trait de côte sur la province (Réf. /6/).

Tableau 5.2 Evolution des côtes d'accumulation de Saint-Martin entre 1947-1954 et 2010 (Réf. /6/.)

Lieux	Années	Variations (m/an)
Baie Lucas	1947-2010	-0,16
Baie de l'Embouchure – sud et centre	1947-2010	-0,41
Baie de l'Embouchure - nord	1947-2010	0,05
Baie Orientale	1954-2010	0,16
Cul-de-Sac	1954-2010	1,45
Grandes Cayes	1954-2010	-0,18
Petites Cayes	1954-2010	-0,18
Anse Marcel	1954-2010	-0,17
Happy Bay	1954-2010	-0,15
Friar's Bay	1954-2010	-0,37
Anse des Pères - ouest	1954-2010	-0,28
Baie Nettlé	1954-2010	-0,15
Anse des Sables	1954-2010	0,18
Petite Baie	1954-2010	-0,15
Baie aux Cayes	1954-2010	-0,73
Baie Rouge - est	1954-2010	-0,08
Baie Rouge - ouest	1954-2010	-0,06
Plum Bay sud et Pointe du Canonnier nord	1954-2010	-0,19
Baie Longue - est	1954-2010	-0,17

5.2.2 Analyse sur 1969 – 2010 sur la Grand’Baie de Marigot (données IGN)

Les photographies aériennes exploitées dans cette section proviennent de la base de données de l'IGN : [Remonter le temps \(ign.fr\)](http://remonter.letemps.ign.fr). Il s'agit de photographies datées de février 1969 et février 2010, soit 41 ans d'écart, avant et après l'urbanisation du littoral de Galisbay – et avant l'ouragan Irma.

A noter que le géoréférencement réalisé de la photographie aérienne de 1969 est soumis à des incertitudes, car il existe peu de points de repères communs entre la situation en 1969 et les photographies aériennes plus récentes, le développement et l'urbanisation du littoral s'étant faits entre temps.

Le trait de côte de 1969 est dessiné en blanc ; le trait de côte de 2010 est dessiné en bleu sur les secteurs sableux et rouge sur les secteurs fixés (enrochements naturels ou artificiels).

Anse des Sables et Baie Nettlé

La comparaison des photographies aériennes de 1969 et 2010 sur le secteur de l'Anse des Sables et de l'ouest de la Baie Nettlé montre relativement peu d'évolution. Un léger recul du trait de côte est visible à l'ouest, dans l'Anse des Sables, mais il peut être dû à l'incertitude sur le géoréférencement.

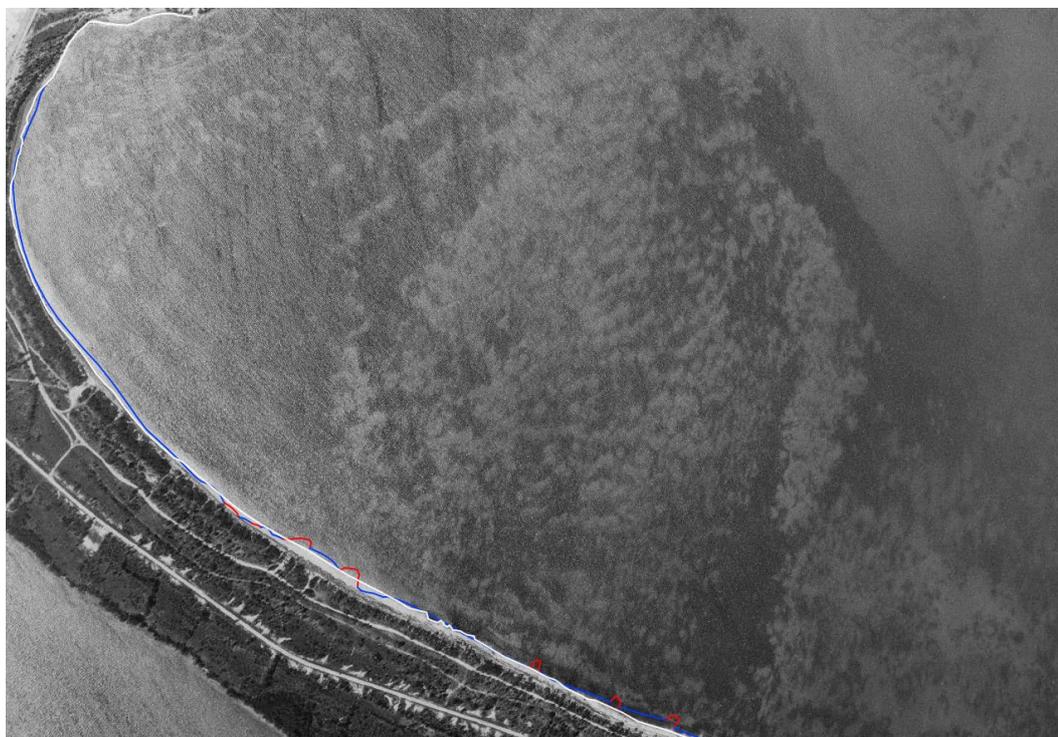


Figure 5.4 Photographie aérienne (IGN) de 1969 de l'Anse des Sables. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu).

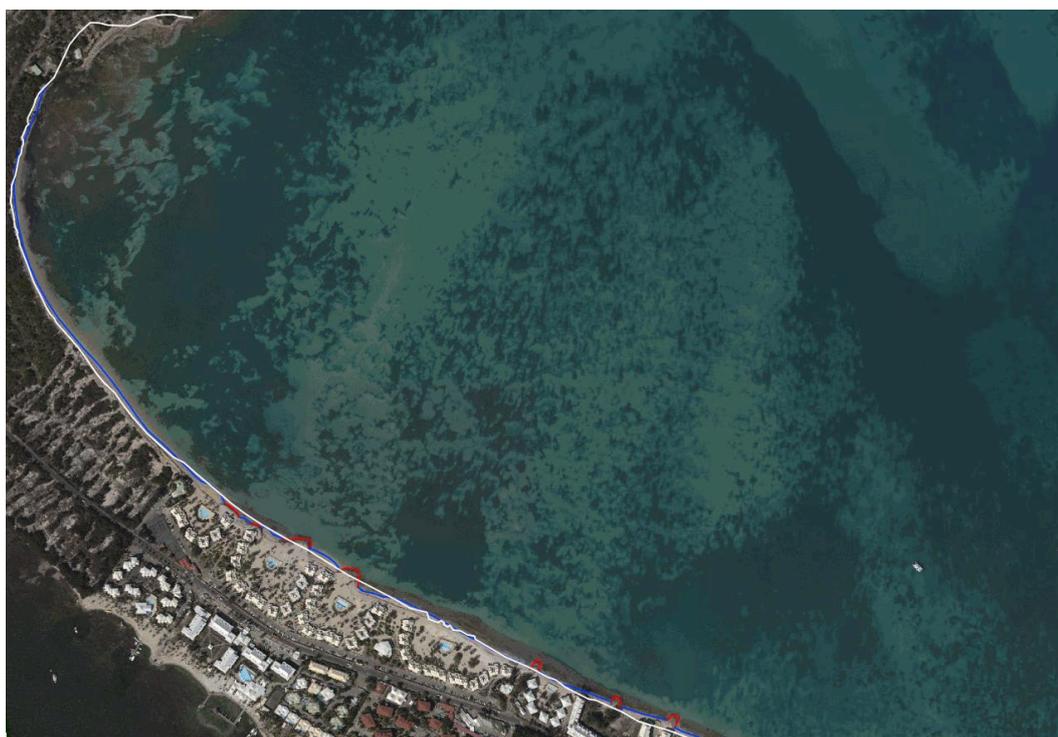


Figure 5.5 Photographie aérienne (IGN) de 2010 de l'Anse des Sables. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu).

Plage de Sandy Ground

La comparaison des photographies aériennes de 1950-1965 et aujourd'hui sur le secteur de Sandy Ground montre un recul important de la plage, surtout à l'est. Les bâtiments ont été construits particulièrement proches de la plage, de plus en plus proches en allant vers l'est, voire sur la plage pour ceux situés complètement à l'est.

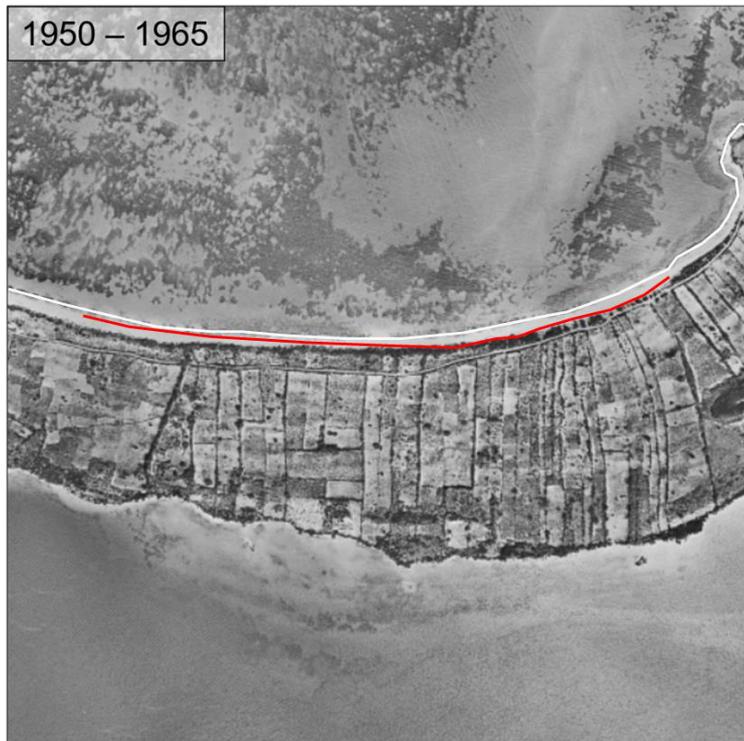


Figure 5.6 Photographie aérienne (IGN) de 1950-1965 de Sandy Ground. Trait de côte 1950-1965 (blanc) et trait de côte actuel (rouge).

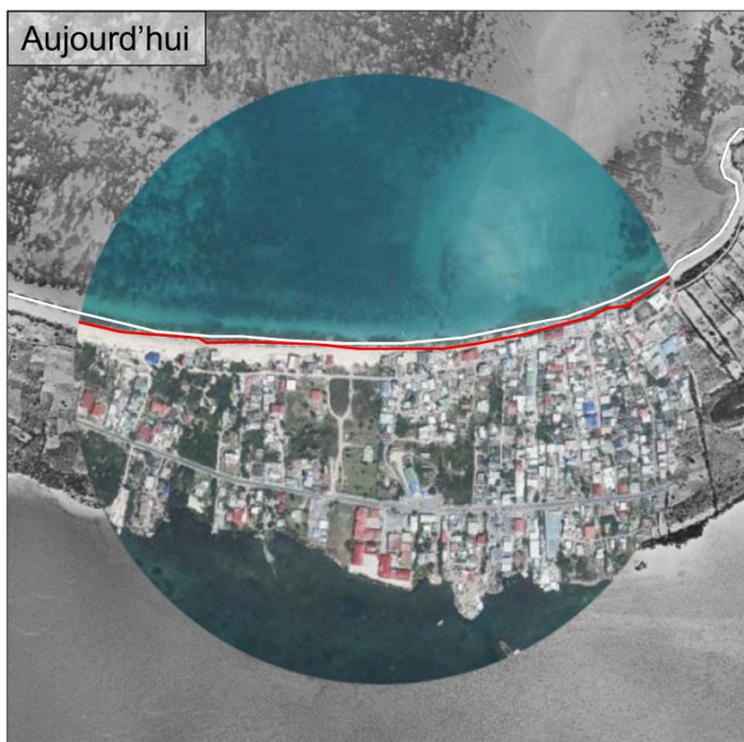


Figure 5.7 Photographie aérienne (IGN) actuelle de Sandy Ground. Trait de côte 1950-1965 (blanc) et trait de côte actuel (rouge).

Plage de Marigot

La comparaison des photographies aériennes de 1969 et 2010 sur le secteur de la Plage de Marigot montre un recul du trait de côte de l'ordre de 15 m.

La construction de la Marina Fort Louis a contribué à l'isolement sédimentologique des baies adjacentes de Marigot et de la Potence, et a probablement accentué le déficit sédimentaire de la Plage de Marigot, malgré la construction d'épis transversaux (Réf. /4/).



Figure 5.8 Photographie aérienne (IGN) de 2010 du secteur Plage de Marigot – Marina Fort Louis. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu).



Figure 5.9 Photographie aérienne (IGN) de 2010 du secteur Plage de Marigot – Marina Fort Louis. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu).

Plage de Galisbay

La comparaison des photographies aériennes de 1969 et 2010 sur le secteur de la Plage de Galisbay témoigne d'une perte de sable importante, avec recul du trait de côte de l'ordre de 30 m.



Figure 5.10 Photographie aérienne (IGN) de 1969 de la plage de Galisbay. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu).



Figure 5.11 Photographie aérienne (IGN) de février 2010 de la plage de Galisbay. Trait de côte 1969 (blanc) et trait de côte février 2010 (rouge et bleu).

5.2.3 Analyse sur 2015 – 2022 sur la Grand’Baie de Marigot (algorithme CoastSat)

Une analyse des traits de côte de la Grand’Baie de Marigot a été réalisée à l’aide de l’algorithme CoastSat. Cet algorithme repose sur la détection automatique du trait de côte à partir d’images satellites. Les images de la mission satellite Sentinel-2 de résolution 10 m, disponibles de 2015 à 2022, ont été exploitées ici, sur les linéaires de plage de Baie Nettlé – Sandy Ground et de Galisbay.

Il ressort de cette analyse que les positions des traits de côte des plages de Sandy Ground et Galisbay varient essentiellement entre +/- 10 m (Figure 5.15 et Figure 5.17), soit l’ordre de grandeur de la résolution des images satellite, et sans tendance marquée dans le temps. Entre 2015 et 2022, ces plages n’ont pas suffisamment évolué pour que cela soit mis en évidence par cette méthode.

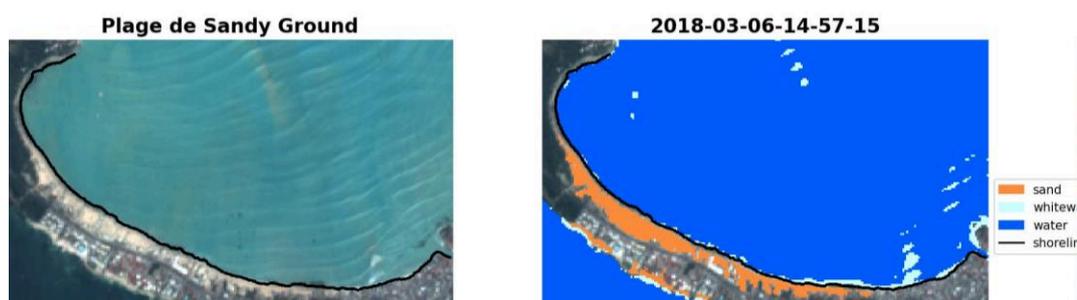


Figure 5.12 Exemple de la détection du trait de côte sur la Plage de Sandy Ground à partir d’une image satellite du 6 mars 2018.

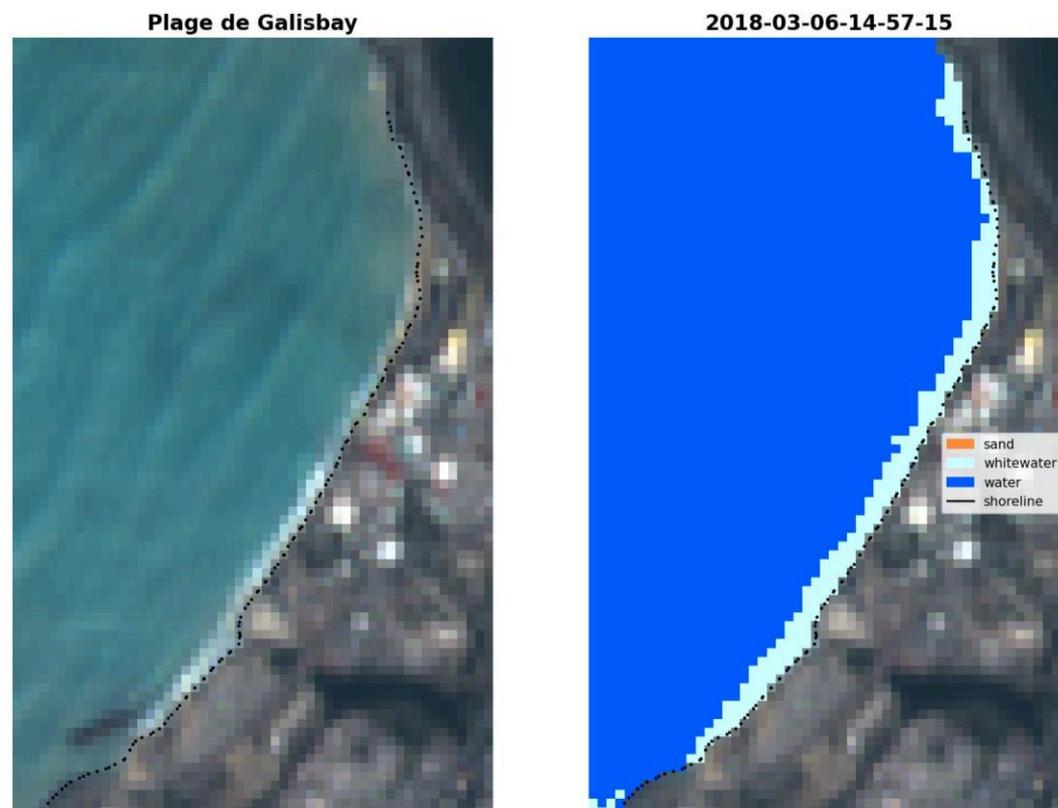


Figure 5.13 Exemple de la détection du trait de côte sur la Plage de Galisbay à partir d’une image satellite du 6 mars 2018.

Baie Nettlé - Sandy Ground

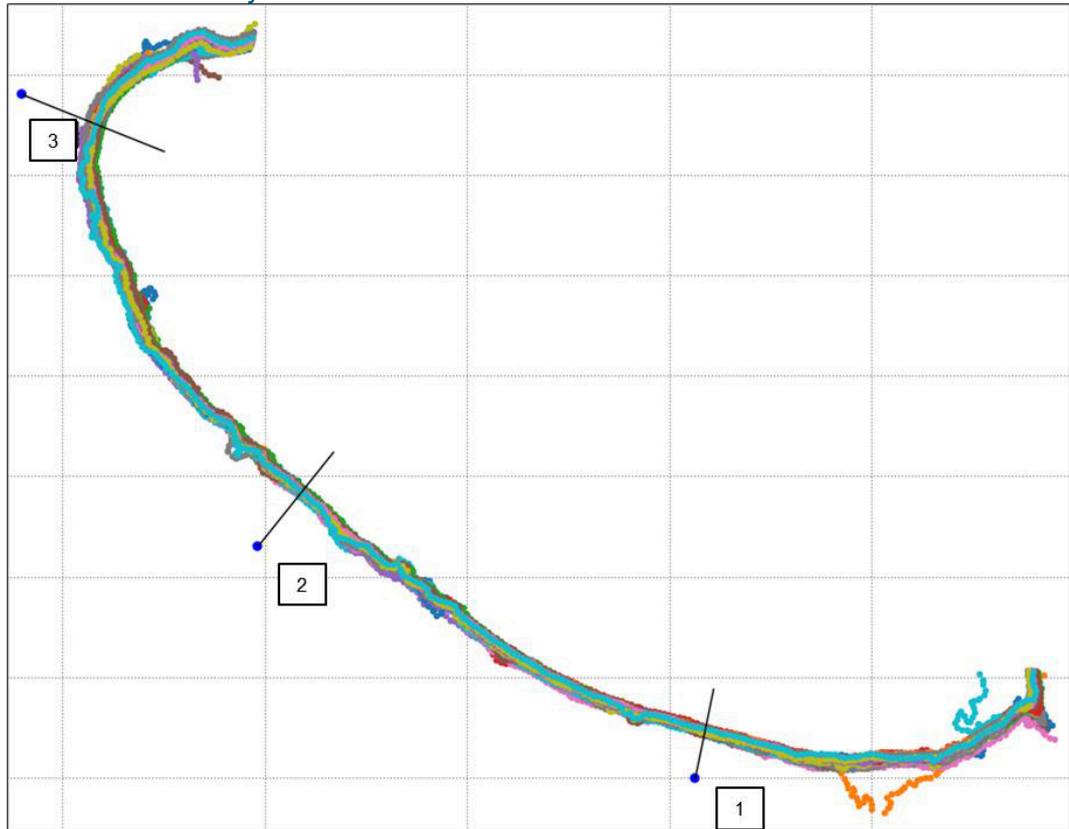


Figure 5.14 Positions du trait de côte de la Plage de Sandy Ground et des 3 profils de la Figure 5.15.

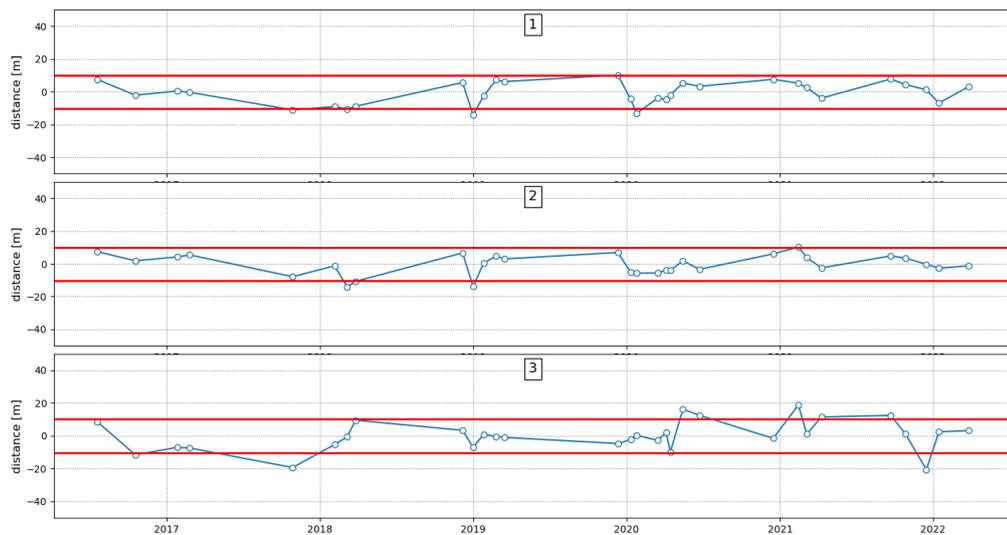


Figure 5.15 Evolution temporelle (de 2016 à 2022) de la position du trait de côte sur 3 profils de la Plage de Sandy Ground.

Plage de Galisbay

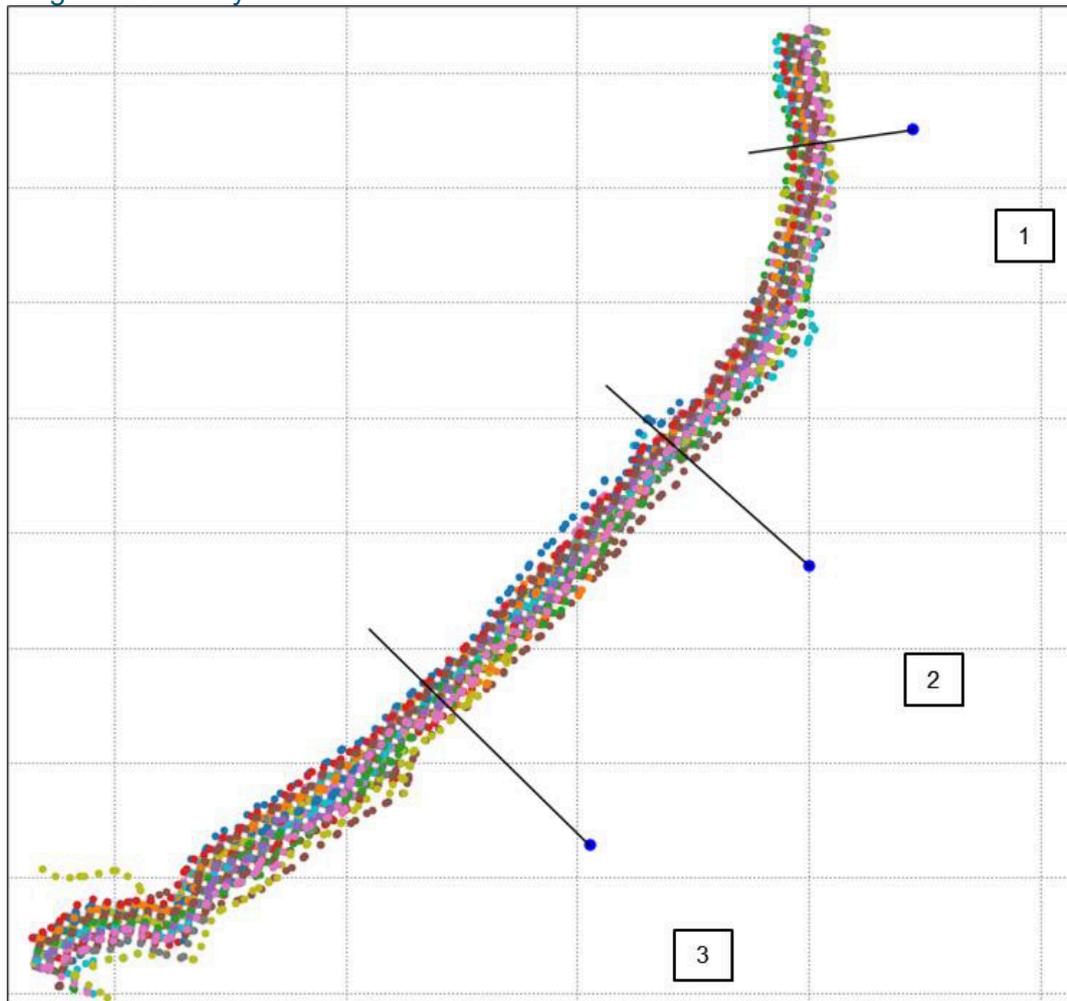


Figure 5.16 Positions du trait de côte de la Plage de Galisbay et des 3 profils de la Figure 5.17.

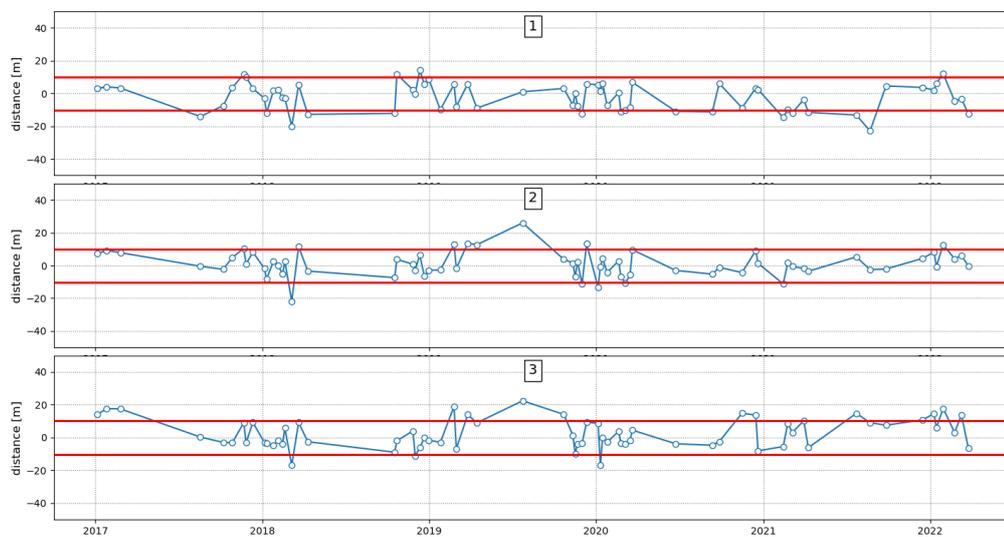


Figure 5.17 Evolution temporelle (de 2017 à 2022) de la position du trait de côte sur 3 profils de la Plage de Galisbay.

5.2.4 Analyse sur 2017 – 2019 sur la Grand’Baie de Marigot (données Cerema)

Dans le cadre du projet Relev, le Cerema a produit 5 traits de côte entre mars 2017 et octobre 2019 (Tableau 5.3) à partir d’images du satellite Pléiades, et d’une chaîne de traitement semi-automatique développée par le pôle satellite du Cerema. Ce trait de côte correspond à un trait de côte intermédiaire situé entre la limite haute et la limite basse du jet de rive (nappe d’eau qui monte sur le rivage sous l’impulsion que lui a donné la vague lors de son déferlement).

Tableau 5.3 Traits de côte produits par le Cerema.

Date	Nom
Mars 2017	Avant Irma
Décembre 2017	3 mois après Irma
Avril 2018	6 mois après Irma
Octobre 2018	1 an après Irma
Octobre 2019	2 ans après Irma

Cette méthode semi-automatique de détection du trait de côte induit des incertitudes. Cela est illustré notamment le long des linéaires artificialisés, où des écarts pouvant aller jusqu’à un ordre de 5 m peuvent être observés.

La présence de beach rocks au niveau du trait de côte, en particulier le long de la plage de Galisbay, rend difficilement exploitable les résultats de la méthode : un recul de plage de l’ordre de 15 m après Irma est mis en évidence par cette analyse, ce qui n’est pas confirmé par les observateurs sur place.

Une incertitude existe également quant au niveau marin lors de la prise des images du satellite Pléiades : le marnage en vive-eau est de l’ordre de 25 cm, le niveau moyen varie aussi de l’ordre de 25 cm entre mars et octobre, et les variations de pression atmosphérique hors cyclones peuvent également impacter le niveau marin de l’ordre de 20 cm (Section 3.4). La position du trait de côte peut donc varier d’une image à l’autre en fonction de ces éléments.

Ces traits de côte sont néanmoins présentés ci-après sur les secteurs de Baie Nettle/Sandy Ground (Figure 5.18) et de la plage de Galisbay (Figure 5.19).

Les cartographies suivantes sur l’ensemble du linéaire de la baie de Galisbay sont présentées en Annexe A :

- Avant et après Irma (mars et décembre 2017)
- Avant Irma et 2 ans après Irma (mars 2017 et octobre 2018)
- Tous les traits de côte de 2017 à 2019

Compte tenu des incertitudes évoquées précédemment, les évolutions du trait de côte mises en évidence par cette méthode ne présentent pas de signaux suffisamment nets pour pouvoir être interprétés comme une réelle tendance sur la période 2017 – 2019.

Baie Nettlé et Sandy Ground

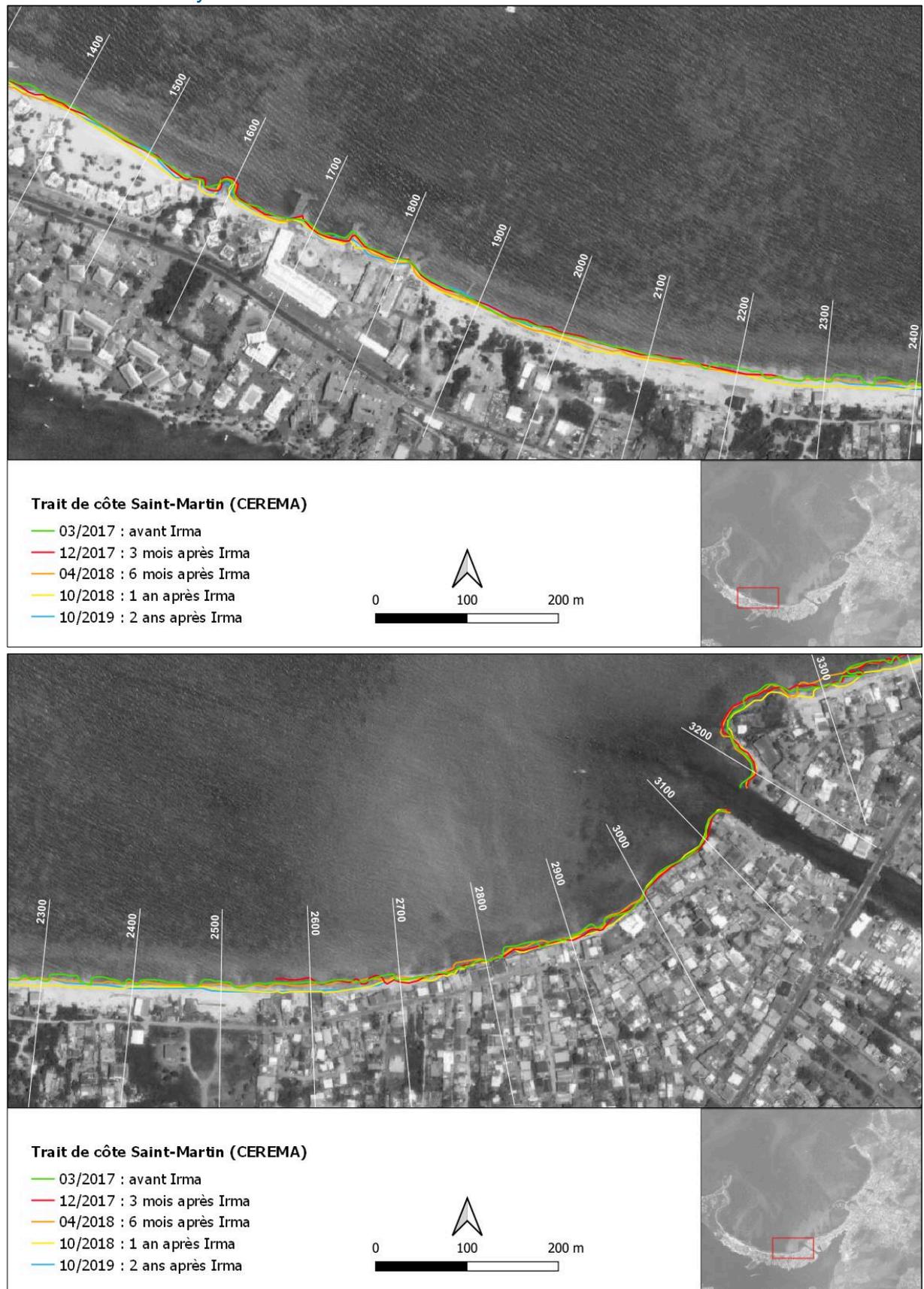


Figure 5.18 Traits de côte Cerema 2017-2019 Irma en Baie Nettlé et à Sandy Ground.

Plage de Galisbay

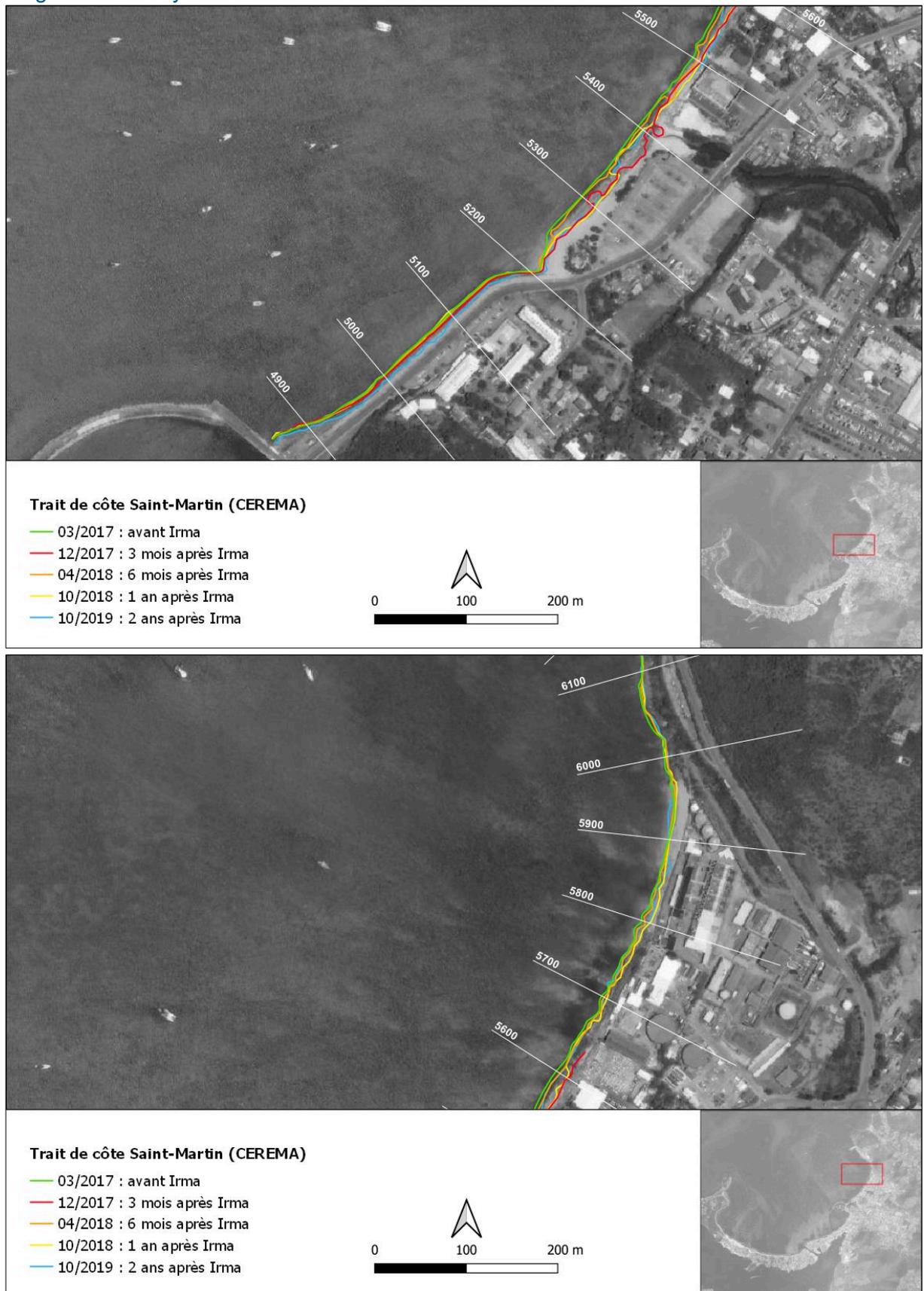


Figure 5.19 Traits de côte Cerema 2017-2019 sur la plage de Galisbay.

5.3 Impact des cyclones sur le trait de côte

Suite au passage de tempêtes, les côtes d'accumulation peuvent subir des reculs ponctuels pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres et/ou des abaissements métriques de l'estran. Les côtes d'accumulation disposent toutefois d'une capacité de régénération, ou résilience, si elles disposent d'un temps et d'un stock de sédiments suffisants pour se reconstruire après le passage de la tempête et si les aménagements de défense côtière ne perturbent pas la dynamique sédimentaire naturelle (blocage du transit et modification des courants (Réf. /6/).

De façon générale, les cyclones engendrent une très forte érosion des plages de Saint-Martin.

Cyclone Luis (5 septembre 1995)

L'île de Saint-Martin a été très fortement touchée lors de la saison cyclonique 1995. Le cyclone Luis (catégorie 4) a touché l'île de Saint-Martin le 5 septembre 1995. Il a provoqué une très forte érosion des plages de l'île, surtout sur celles situées à l'ouest, sud-ouest et sud, du fait de leur exposition aux houles cycloniques.

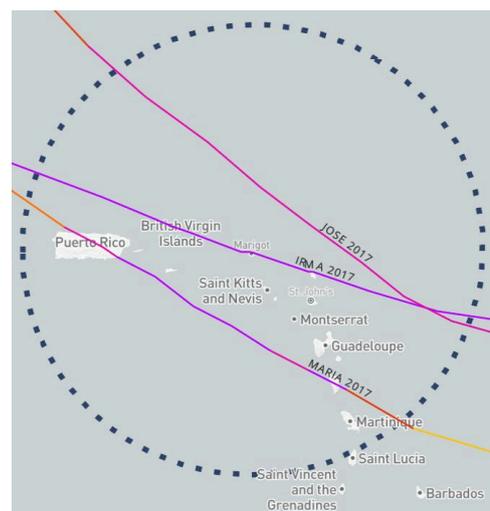
La perte de sable a été évaluée à 160 000 m³ pour l'ensemble de la baie de Marigot (Réf /6/).

Cyclone Irma (5 – 6 septembre 2017)

Le cyclone Irma, de catégorie 5, a touché l'île de Saint-Martin les 5 et 6 septembre 2017.

Le cyclone Jose, formé dans la traînée de l'ouragan Irma, a approché l'île de Saint-Martin le 9 septembre, suivi du cyclone Maria le 19 septembre.

Figure 5.20 Trajectoires des cyclones de 2017 autour de Saint-Martin
(Source : [Historical Hurricane Tracks \(noaa.gov\)](https://www.hurricane.noaa.gov/)).



Sur Saint-Martin, le cyclone Irma a été dévastateur (Réf. /6/) :

- L'érosion s'est manifestée par un recul du trait de côte pouvant dépasser les 10 m
- Différentes plages ont enregistré des pertes importantes de sable, avec des abaissements pouvant être supérieurs à 3 m
- Des submersions marines se sont produites sur les côtes exposées et ont provoquées le débordement des lagunes. Certains cordons sableux, entre mer et lagunes, ont été traversés.

Observations

Le Tableau 5.4 présente un inventaire des observations de terrains faites à Saint-Martin.

Le Tableau 5.5 présente les caractéristiques d'accroissement observées après le passage des cyclones tropicaux de septembre sur l'île de Saint-Martin, tandis que le Tableau 5.6 présente les caractéristiques des érosions observées (Réf. /6/)

Les secteurs concernés par la présente étude sont encadrés en rouge.

Tableau 5.4 Inventaire des impacts du cyclone Irma (5 et 6 septembre 2017) sur les côtes de Saint-Martin (Réf. /6/).

	Saint-Martin
Baie Longue	Érosion importante de la plage avec micro-falaise de 2 m. Beachrock démantelé en pied. Le nord de la plage semble moins érodé.
Baie aux Prunes	Micro-falaise en haut de plage d'environ 1,5 m. Murs et carbetts endommagés.
Baie Rouge	Côté est : grosse micro-falaise (2 m) avec remobilisation des blocs d'enrochement et chute du mur de protection. Côté ouest : l'érosion semble moins forte.
Baie aux Cayes	Tomboles et lagune ont été traversés par la mer (wash over).
Baie Nettlé, côté mer	Érosion surtout sur les constructions (entre les épis) avec affouillement des fondations. Avancée du sable dans les terres. (Figure 45)
Baie Nettlé, côté lagune	Peu ou pas de signe d'érosion, ensablement en arrière plage. Submersion par débordement dans la lagune jusqu'aux habitations de deuxième ligne.
Sandy Ground, côté mer	Importante perte d'épaisseur de sable avec mise à nu voire déstabilisation complète des bâtiments.
Marigot, partie lido côté mer	Pas de micro-falaise, perte de sable d'environ 1 m.
Marigot, partie lido côté lagune	Environ 1 m d'eau dans les bâtiments situés sur les quais.
Marigot, bourg	Pas de trace de submersion en dehors des bateaux échoués.
Anse des Pères	Pas de traces d'érosion.
Friar's bay	Forte pente et micro-falaise. Pas de trace visible de submersion.
Grand Case ouest	Perte de sable importante mettant à nu les fondations des habitations (- 1 à 2 m) (Figure 44).
Grand Case est	Pente forte et perte d'épaisseur de la plage. Submersion importante des maisons basses.
Anse Marcel	Fort recul de la végétation (> 10 m) de haut de plage avec micro-falaise (> 1 m) et déchaussement des aménagements de haut de plage.
Cul-de-Sac nord	Érosion marquée mais moins que la submersion qui a traversé les habitations basses.
Cul-de-Sac sud	Érosion peu importante au regard de la submersion qui a touché les habitations de deuxième ligne.
Baie Orientale nord	Micro-falaise de l'ordre de 50 cm en limite de végétation. Submersion de l'ensemble plage – arrière- plage.
Baie Orientale centre	Pas de pente forte ni de micro-falaise. Perte d'épaisseur de la plage et démantèlement des fondations de certains aménagements. Submersion très importante et transport important de sable en arrière des constructions de première ligne.
Baie Orientale sud	Érosion importante et perte d'épaisseur de sable. Submersion équivalente au reste de la baie.
Baie de l'Embouchure	Peu d'érosion manifeste. Cordon complètement submergé dans sa partie la moins large.
Quartier d'Orléans	L'inondation a pu atteindre 3 m (témoignages). Submersion par débordement (structures des maisons relativement intègres).
Mont Saline	Pas d'érosion constatée. Submersion importante.
Baie Lucas	Perte d'épaisseur de sable relativement importante avec mise à nu des fondations des maisons. Présence de galets sur la partie sud et micro-falaise entre 1 à 2 m au nord.
Oyster Pond (partie française)	Pas d'érosion visible. Submersion par débordement importante.

Tableau 5.5 Caractéristiques d'accroissement observées après le passage des cyclones tropicaux de septembre sur l'île de Saint-Martin (Réf. /6/)

	Plage					Haut de plage et dune bordière			Arrière dune			Lagon interne (pour plages à barrières coralliennes uniquement)		
	Formation de plage	Extension de la plage vers la mer	Élévation du profil de plage	Formation de dépôts de galets en forme de croissants	Formation d'une crête rectiligne d'âge en galets	Élévation du profil de plage par fixation de débris coralliens ou blocs de coraux sur la végétation ou les bâtiments	Élévation du profil de plage par fixation de sable sur la végétation ou les bâtiments	Formation d'une crête de haut de plage	Dépôts de sable	Galets et blocs de coraux fixés par la végétation	Projection de coraux ou fragments de beachrocks	Lobes de sédiments, faisant saillie dans le lagon en raison du croisement des vagues	Éventail de sédiments s'étendant dans l'axe des crênaux allant de la plage au lagon	non / oui (nord)
Petites Cayes Bay	non	oui	non	oui	non	oui	oui	non	oui	oui	oui	/	/	
Petites Cayes Beach	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	/	/	
Grandes Cayes Bay	non	oui	oui	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	oui	n.d.	oui	/	/	
Cul de Sac Bay	non	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	oui	n.d.	n.d.	/	/	
Orient Bay North	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	
Orient Bay South	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	
Embouchure Bay	non	oui	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	oui (nord)	
Lucas Bay	non	n.d.	oui	non	non	oui	non	non	oui	non	oui	/	/	
Dawn Beach	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	oui	/	/	
Gibb's Bay	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	oui	non	
Guana Bay	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	oui	/	/	
Great Bay	non	n.d.	n.d.	non	non	oui	non	non	oui	non	non	non	oui	
Little Bay	non	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	oui	n.d.	n.d.	non	non	
Cay Bay	non	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	/	/	
Cole Bay	non	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	oui	non	n.d.	/	/	
Simpson Bay	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	
Maho Bay	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	n.d.	n.d.	/	/	
Mullet Beach	non	n.d.	oui	non	non	oui	non	non	oui	non	non	non	non	
Longue Bay	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	oui	non	non	
Plum Bay	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	oui	non	non	
Red Bay	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	oui	oui	non	
Cayes Bay	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	oui	n.d.	n.d.	non	non	
Small Bay	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	oui	n.d.	n.d.	non	non	
Anse des Sables	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	oui	n.d.	n.d.	non	non	
Nettlé Bay	non	n.d.	non	non	non	oui (ouest)	non	non	oui	non	oui	non	non	
Marigot Bay	non	n.d.	n.d.	non	non	non	non	non	oui	non	n.d.	non	non	
La Potence Bay	non	n.d.	n.d.	non	non	non	non	non	oui	non	oui	/	/	
Anse des Pères	non	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	non	n.d.	
Friar's Bay	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	n.d.	non	oui	
Anse Heureuse	non	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	oui	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
Grand Case Bay	non	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	oui	n.d.	n.d.	non	oui (ouest)	
Bell Hill Beach	non	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	/	
Anse Marcel	non	n.d.	non	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	oui (ouest)	

Tableau 5.6 Caractéristiques des érosions observées après le passage des cyclones tropicaux de septembre 2017 sur l'île de Saint-Martin (Réf. /6/)

	Zone interdidaie		Plage			Haut de plage et dune bordière					Arrière dune		
	Mise à nu de dalles de beachrock	Casse ou destruction partielle de dalles de beachrock	Disparition de plage	Abaissement du profil de plage (mise à nu de racine, de fondations)	Recul de la base de la plage	Recul du trait de côte	Perte de sable de la dune	Coupure des chenaux entre le lagon et l'océan	Fosse d'écoulement	Erosion de surface	Coupure des chenaux entre le lagon et l'océan	Tranchées transversales s'étendant vers le sud	Erosion de surface
Petites Cayes Bay	oui	oui	non	oui	non	oui	/	/	oui	oui	/	non	non
Petites Cayes Beach	n.d.	n.d.	non	non	non	oui	/	/	non	non	/	non	non
Grandes Cayes Bay	n.d.	n.d.	non	n.d.	non	oui	/	/	n.d.	n.d.	/	n.d.	n.d.
Cul de Sac Bay	n.d.	n.d.	non	n.d.	/	oui	/	n.d.	n.d.	n.d.	/	n.d.	n.d.
Orient Bay North	n.d.	n.d.	non	oui	n.d.	oui	/	non	oui	oui	non	oui	oui
Orient Bay South	n.d.	n.d.	non	oui	n.d.	oui	/	non	oui	oui	non	non	oui
Embouchure Bay	n.d.	n.d.	non	oui	non	oui	/	oui (nord)	oui	oui	oui (nord)	oui	oui
Lucas Bay	n.d.	n.d.	non	non	n.d.	oui	/	non	oui	oui	non	non	oui
Dawn Beach	n.d.	n.d.	non	oui	n.d.	oui	/	/	oui	oui	non	non	oui
Gibb's Bay	n.d.	n.d.	non	oui	n.d.	oui	/	non	non	oui	non	non	non
Guana Bay	n.d.	n.d.	non	oui	n.d.	oui	/	non	oui	oui	non	non	oui
Great Bay	n.d.	n.d.	non	non	n.d.	non	/	non	non	non	non	non	oui
Little Bay	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	n.d.	/	non	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.
Cay Bay	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	n.d.	/	/	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.
Cole Bay	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	non	/	/	n.d.	n.d.	/	n.d.	n.d.
Simpson Bay	n.d.	n.d.	non	oui	n.d.	oui	/	non	non	non	non	non	non
Maho Bay	n.d.	n.d.	oui	/	/	non	/	/	/	/	/	/	/
Mullet Beach	n.d.	n.d.	non	non	n.d.	oui	/	non	non	non	non	non	non
Longue Bay	oui	oui	oui	oui	n.d.	non	oui	non	non	non	non	non	non
Plum Bay	oui	oui	oui	oui	n.d.	non	oui	non	oui	non	non	non	non
Red Bay	oui	oui	non	oui	n.d.	oui	oui	non***	oui	oui	non	oui	oui
Cayes Bay	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	oui	/	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Small Bay	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	oui	/	/	n.d.	n.d.	/	n.d.	n.d.
Anse des Sables	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	non	/	/	n.d.	n.d.	/	n.d.	n.d.
Nettlé Bay	oui	oui	non	oui	n.d.	oui	/	non	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Marigot Bay	n.d.	n.d.	non	oui	n.d.	non	/	non	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.
La Potence Bay	n.d.	oui	non	n.d.	n.d.	non	/	non	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.
Anse des Pères	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	oui	/	non	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.
29. Friar's Bay	n.d.	n.d.	non	oui	n.d.	oui	/	non	oui	oui	non	non	oui
Anse Heureuse	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	oui	/	non	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.
Grand Case Bay	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	/	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Bell Hill Beach	n.d.	n.d.	non	n.d.	n.d.	oui	/	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Anse Marcel	n.d.	n.d.	non	oui	n.d.	oui	/	non	oui	oui	non	oui	oui

Étude par photo-interprétation

En plus de ces observations, une étude par photo-interprétation a permis de mieux quantifier les impacts des trois cyclones (Irma, José et Maria) sur le littoral de l'île de Saint-Martin (Réf. /6/, Figure 5.21).

Cette étude a utilisé la ligne de stabilité comme indicateur. Cette ligne correspond à la limite de la végétation dans les zones non bâties et à la limite extérieure des constructions côtières (murs de propriété, ouvrages d'art...) dans les zones habitées. Bien que cet indicateur soit facilement détectable sur l'image de février 2017, il a été plus difficile à numériser sur les images post-cyclone en raison de la destruction massive de la végétation. Dans de nombreux cas, la première ligne de végétation a été effacée par les vagues cycloniques, qui n'ont laissé en place que des arbres et des buissons épars qui ont été exclus de la ligne de végétation.

Le changement du trait de côte a été calculé à l'aide du Digital Shoreline Analysis System (DSAS), à partir de la génération de transects à intervalle de 10 m de la ligne de base. Le Net Shoreline Movement (NSM), qui mesure la distance entre le rivage le plus ancien et le rivage le plus récent, a été généré automatiquement.

Les variations du NSM sur les différentes plages de la partie française de l'île sont présentées dans le Tableau 5.7.

Sur la Grand'Baie de Galisbay, ces résultats font ressortir que la Baie de La Potence et la Baie de Marigot présentent un recul limité (NSM moyen de -0,95 et -2,41 m) en comparaison avec la Baie Nettlé (NSM moyen de -21,60 m). Les Baies de Marigot et de la Potence ont montré une stabilité prédominante (détectée respectivement le long de 83,97 à 88,57 % des transects), tandis que la baie Nettlé a surtout montré un recul (détecté le long de 74,80 % des transects). La Baie de la Potence montre une variabilité limitée le long de son rivage tandis que la Baie Nettlé affiche une variabilité marquée, où la partie centrale de la baie présente un recul plus important marqué.

Il faut cependant noter qu'une bonne partie des linéaires côtiers des Baies de La Potence, de Marigot, ainsi que de la partie orientale de la Baie Nettlé (Sandy Ground), dont l'évolution du trait de côte est représentée en jaune ($-2 \text{ m} < x \leq + 2 \text{ m}$) sur la Figure 5.21, sont artificialisés et fixés par des enrochements, ou urbanisés (Sandy Ground), contrairement à la Baie Nettlé.

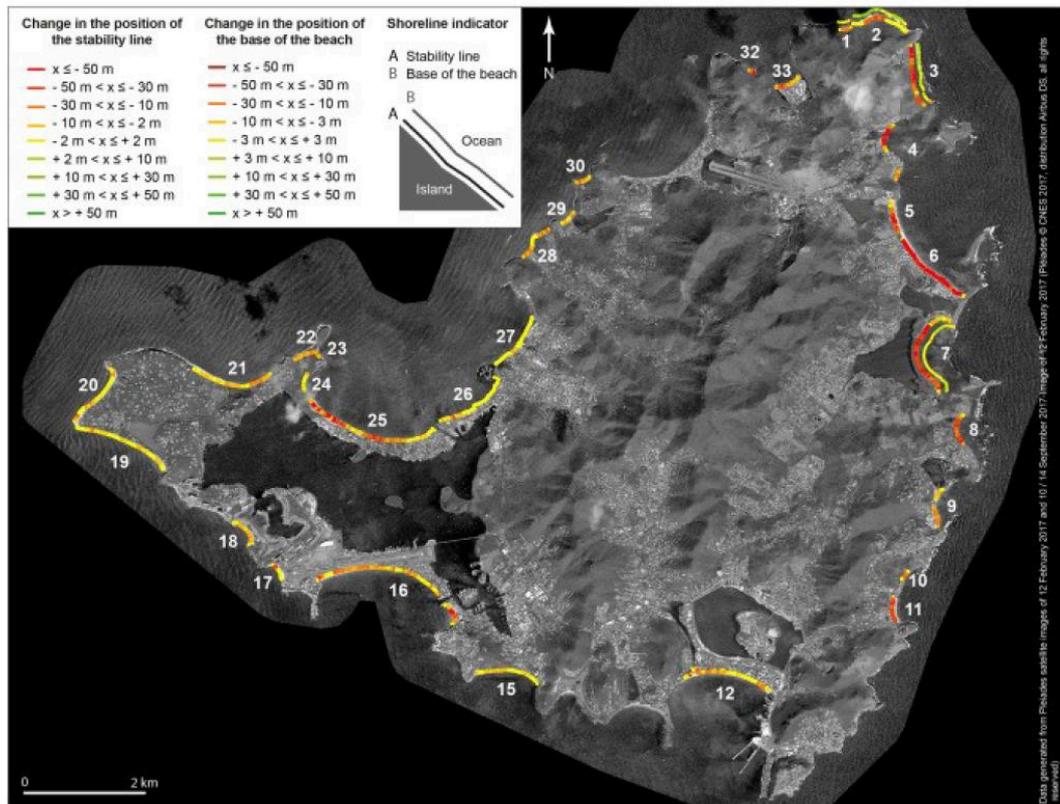


Figure 5.21 Impacts présumés des cyclones de septembre 2017 sur la position du trait de côte de l'île de Saint-Martin (Réf. /6/)

Tableau 5.7 Variation des Net Shoreline Movement (NSM) sur les plages de la partie française entre le 12 février 2017 et le 14 septembre 2017 (Réf. /6/)

Plage	Nombre de transects	NSM (m)			Transects stables		Transects en érosion	
		Moyenne	Min.	Max.	Nb	%	Nb	%
Baie Petites Cayes	17	-18,84	-28,95	-8,3	0	0	17	100
Plage de Petites Cayes	44	-26,52	-42,8	-10,86	0	0	44	100
Baie Rouge	142	-5,13	-15,65	0	41	28,87	101	71,13
Baie aux Cayes	35	-9,11	-27,24	-2,58	0	0	35	100
Petite Baie	11	-0,96	-22,12	-2,5	0	0	11	100
Anse des sables	28	-1,2	-4,46	0	20	71,43	8	28,57
Baie Nettlé	246	-21,6	-108,22		62	25,2	184	74,8
Baie de Marigot	131	-2,41	-41,6	0	110	83,97	21	16,03
Baie de la Potence	105	-0,95	-12,07	0	93	88,57	12	11,43
Anse des Pères	69	-8,95	-45,58	0	24	34,78	45	65,22
Friar's Bay	25	-7,3	-17,31	-0,67	4	16	21	84
Anse Heureuse	29	-9,83	-34,5	0	1	3,45	28	96,55
Baie de Grand-Case	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Plage de Bell Hill	11	-32,73	-67,53	-6,67	0	0	11	100
Anse Marcel	42	-14,37	-64,17	0	3	7,14	39	92,86
Grandes Cayes	103	-34,55	-70,04	-0,85	5	4,85	98	95,15
Cul de Sac	62	-51,64	-166,45	-0,65	1	1,61	61	98,39
Baie Orientale nord	51	-36,8	-102,82	0	3	5,88	48	94,12
Baie Orientale centre et sud	139	-68,28	-134,68	-5,13	0	0	139	100
Baie de l'Embouchure	163	-36,04	-87	0	13	7,97	150	92,03
Baie Lucas	54	-28,71	-65,74	0	5	9,26	49	90,74
Baie Longue	170	-1,94	-12,25	0	112	65,88	58	34,12
Plum Bay	120	-3,92	-30,18	0	71	59,17	49	40,83

Synthèse par secteur

Sur le secteur de l'**Anse des Sables**, sur les 28 transects caractérisant le secteur de l'Anse des sables, 71% sont stables, 29% sont en érosion. La variation des Net Shoreline Movement (NSM) est de -1,2 m en moyenne.

Des dépôts de sable ont été observés sur l'arrière-dune.

Sur le secteur de la **Baie Nettlé**, sur les 246 transects caractérisant le secteur de la Baie Nettlé, 25% sont stables, 75% sont en érosion. La variation des Net Shoreline Movement (NSM) est de -21,6 m en moyenne.

Le secteur de la Baie Nettlé côté mer a subi une érosion surtout sur les constructions (entre les épis), avec un affouillement des fondations, ainsi qu'une avancée du sable dans les terres (et même une élévation du profil de plage par fixation de sable sur la végétation ou les bâtiments dans la partie ouest de la baie), des dépôts de sable ont été observés sur l'arrière-dune, ainsi que des projections de fragments de beach rocks, dont des dalles ont été mises à nu et partiellement cassées ou détruites.



Figure 5.22 Impact du cyclone Irma sur les habitations de Baie Nettlé, mai 2018 (cliché © Louis Portier, Réf. /6/).

Le secteur de **Sandy Ground** a subi une importante perte d'épaisseur de sable avec une mise à nu voire une déstabilisation complète des bâtiments.

Sur le secteur de la **Baie de Marigot**, sur les 131 transects caractérisant le secteur de la Baie de Marigot, 84% sont stables, 16% sont en érosion. La variation des Net Shoreline Movement (NSM) est de -2,41 m en moyenne.

Le secteur de Marigot côté mer a subi une perte de sable d'environ 1 m. Des dépôts de sable ont été observés sur l'arrière-dune.



Figure 5.23 Marigot après Irma. La rue de Sandy Ground à l'entrée de Marigot a été submergée. La mer à droite est passée par-dessus la route et les constructions pour rejoindre le lagon sur la gauche (Réf. /10/).



Figure 5.24 Marigot après Irma. La mer a traversé de part en part le Beach Hotel situé sur la plage à Marigot (Réf. /10/).

Sur le secteur de la **Baie de la Potence**, sur les 105 transects caractérisant le secteur de la Baie de la Potence, 89% sont stables, 11% sont en érosion. La variation des Net Shoreline Movement (NSM) est de -0,95 m en moyenne.

Des dépôts de sable ont été observés sur l'arrière-dune, ainsi que des projections de fragments de beachrocks, dont des dalles ont été partiellement cassées ou détruites.

5.4 Dynamique sédimentaire de la Grand'Baie de Marigot

5.4.1 Transits sédimentaires

Cette section décrit l'état des lieux de la littérature sur les transits sédimentaires dans la Grand'Baie de Marigot (Réf. /4/). Les modélisations qui seront réalisées en Phase 2 permettront de vérifier, quantifier et préciser ces éléments.

Les mouvements sédimentaires sur le littoral de la Grand'Baie de Marigot sont essentiellement induits par les courants engendrés par les houles et les vents. Les houles dominantes sont générées par les alizés de secteur nord-est à sud-est qui soufflent près de 80% du temps.

Dans la Grand'Baie de Marigot, la dérive littorale est donc essentiellement orientée d'est en ouest. Les northers qui soufflent de secteur nord-ouest à nord pendant 10 à 15 % du temps peuvent inverser cette dérive dans la partie occidentale de la Grand'Baie de Marigot, essentiellement dans la Petite Baie et dans la Baie Nettlé.

Sous l'effet de la dérive dominante, les sédiments se déplacent vers l'ouest des plages et des cellules côtières. Ce phénomène induit, sur l'ensemble de la Grand'Baie de Marigot, une décroissance du diamètre médian des grains et une amélioration du tri granulométrique des grains d'est en ouest.

L'hiver, dans la partie occidentale de la Grand'Baie de Marigot, les sédiments sont ramenés vers l'est des plages et cellules côtières par les fortes houles dues aux Northers qui contribuent donc à reformer les parties est des plages fortement démaigrées en fin d'été. C'est ce mouvement alternatif qui a conduit à la création d'épis pour cloisonner les plages en cellules sédimentaires et maintenir ainsi le sable sur les plages devant les hôtels de Marigot.

Entre la plage de Marigot et le Morne Rond, il existe un faible transit littoral en direction du Morne Rond. Ce transit sédimentaire prédominant vers le sud-ouest est inversé à l'occasion des houles réfractées provenant du nord-ouest.

Au début des années 1980, la construction de l'appontement de 110 m de long qui atteint l'isobathe des 4 m CM au pied du Fort de Marigot a contribué à l'isolement sédimentologique des baies adjacentes de Marigot et de la Potence. Il a probablement accentué le déficit sédimentaire de la Petite Baie de Marigot, malgré la construction d'épis transversaux.

Les extractions de sable marin ont également contribué à l'érosion des plages et au démaigrissement du mince cordon littoral du Marigot. Les réajustements des profils transversaux ont entraîné l'érosion du littoral où affleurent désormais les bancs de beach-rock qui assurent une stabilisation temporaire de celui-ci.

Au nord de la Grand'Baie de Marigot, les transits sédimentaires s'organisent autour du Banc de la Médée qui constitue, avec les ravines qui se jettent dans la baie, la source principale d'approvisionnement en sédiments de la partie nord-est de la Grand'Baie de Marigot.

La Figure 5.25 représente les grandes lignes des transits sédimentaires tels qu'ils ont été appréhendés lors de l'étude de novembre 1990.

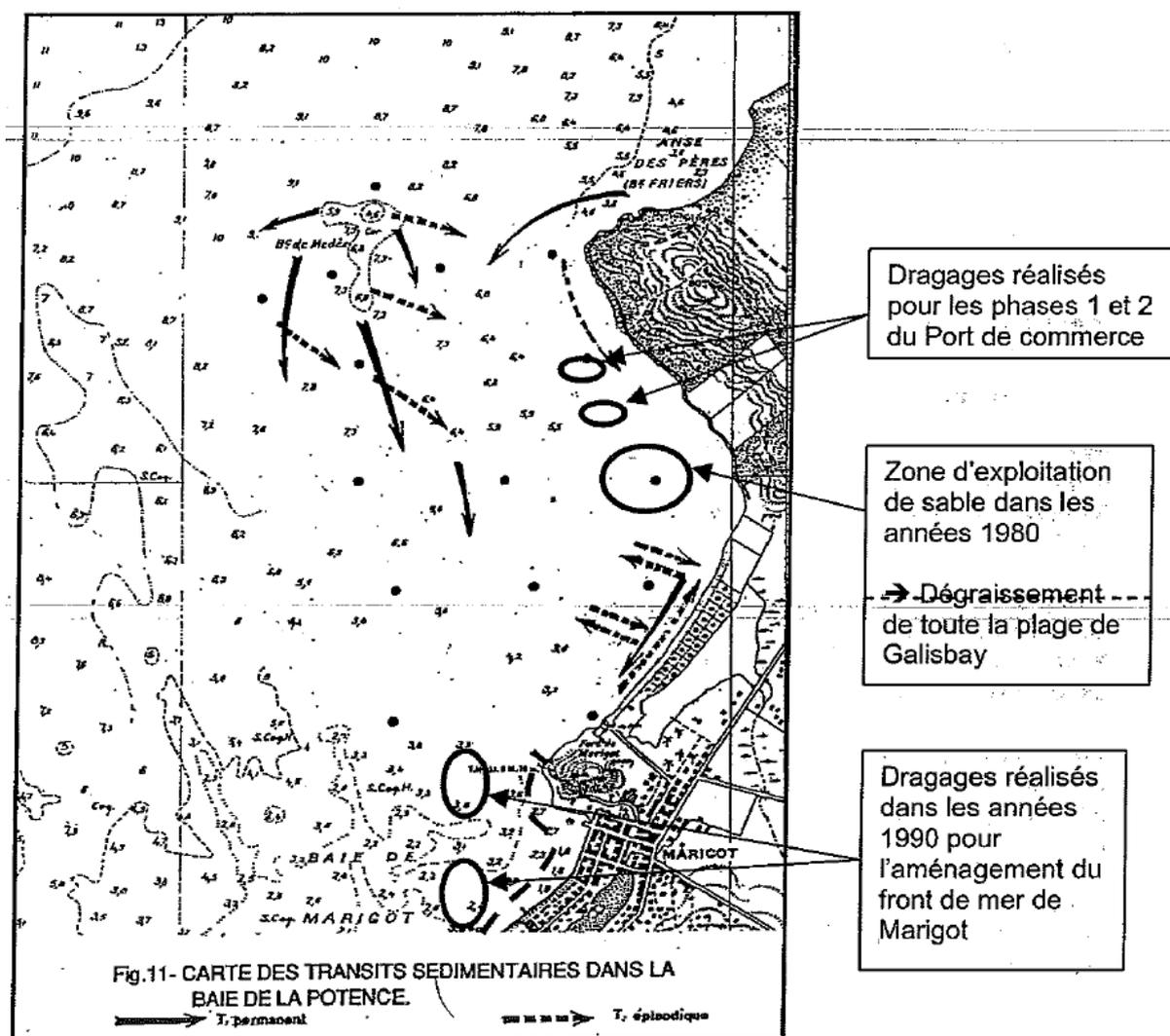


Figure 5.25 Carte des transits sédimentaires dans la Baie de la Potence.

5.4.2 Transport éolien

Compte tenu de la géographie du site et des vents dominants Alizés de secteur est-nord-est, le transit aérosédimentaire est négligeable.

5.4.3 Apports fluviaux

Les apports sédimentaires du bassin versant dans la Grand-Baie de Marigot sont manifestement faibles.

D'abord parce que la pluviométrie est faible à la périphérie de l'île de Saint-Martin, de l'ordre de 690 mm/an. Ensuite parce que seules la partie orientale de la Baie de Marigot et de la Baie de la Potence sont adossées au relief. Les ravines qui se jettent dans la baie constituent la source principale d'approvisionnement en sédiments (particules fines) de la partie nord-est de la Grand'Baie de Marigot.

La partie occidentale de la Grand'Baie est adossée au grand étang de Simsonbaai qui sert de réservoir tampon susceptible de décanter les eaux pluviales.

6 Interventions anthropiques

6.1 Historique des aménagements littoraux

L'urbanisation de l'île de Saint-Martin s'est faite de manière aléatoire et spontanée. L'essor de l'activité touristique dans les années 1980 a favorisé la construction d'infrastructures hôtelières, de résidences secondaires et des logements touristiques en grand nombre sur les terres les plus fragiles tels que les cordons littoraux (Réf. /6/).

Marigot a été en partie bâtie sur le cordon sableux de la baie de Marigot qui est aujourd'hui entièrement bétonné et protégé par des enrochements massifs. Les bâtiments construits sur ce cordon sableux sont tous vulnérables à la submersion marine, mais les ouvrages de protection du front de mer ont permis de stabiliser le littoral et d'inhiber les effets de la submersion marine lors du passage de l'ouragan Irma en 2017.

La Baie de Marigot était une belle plage de sable fin de plus d'un km de long qui s'étendait du Morne Rond à l'ouest au Fort Louis à l'est. Cette plage a été volontairement remplacée par un enrochement massif sur la majeure partie de la baie dans le cadre d'un projet d'aménagement urbain. Dans le quartier de Sandy Ground, le front de mer est occupé par une urbanisation dense qui a remplacé la plage d'origine. Le trait de côte n'est pas stabilisé par un enrochement massif comme à Marigot et le cordon sableux encore présent sous les constructions a tendance à s'affaisser dans les zones soumises au choc des vagues. L'ouest de la Baie Nettlé, moins densément construit, est dégradé par des épis faits d'enrochements massifs qui reportent l'érosion en aval de la dérive littorale (Réf. /6/).

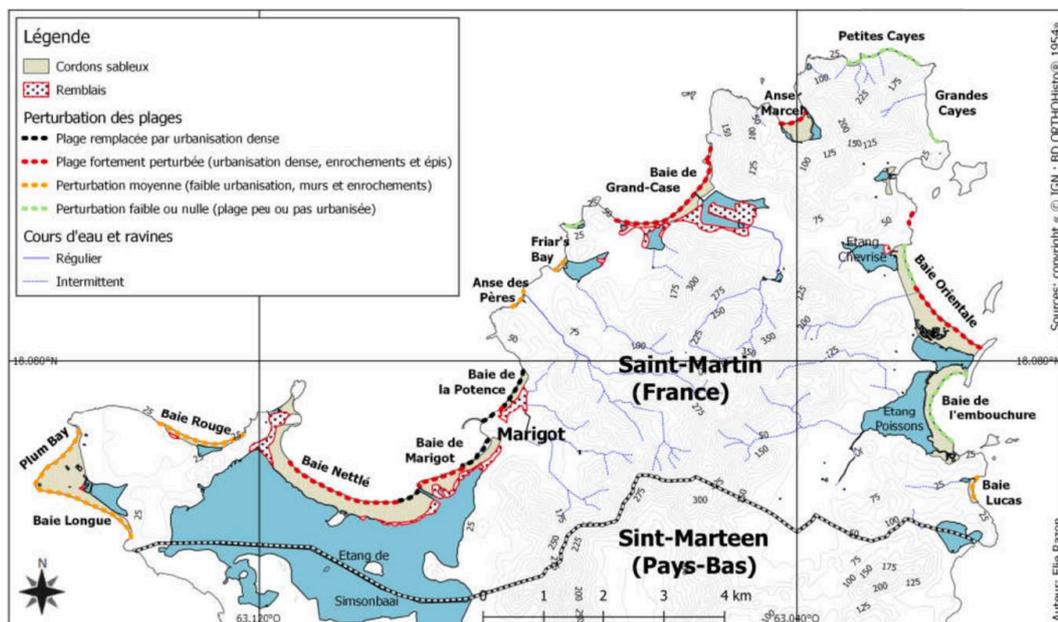


Figure 6.1 Perturbation des plages et des étangs de Saint-Martin (PPRN, 2018)

Les sections ci-après illustrent l'évolution du développement littoral secteur par secteur sur l'ensemble de la Grand-Baie de Marigot. Les photographies aériennes exploitées proviennent de la base de données de l'IGN : [Remonter le temps \(ign.fr\)](http://remonter.ign.fr).

6.1.1 Secteur Anse des Sables et Baie Nettlé ouest

Un aperçu global de l'évolution du secteur de l'Anse des Sables et de l'ouest de la Baie Nettlé est illustré en Figure 6.2.

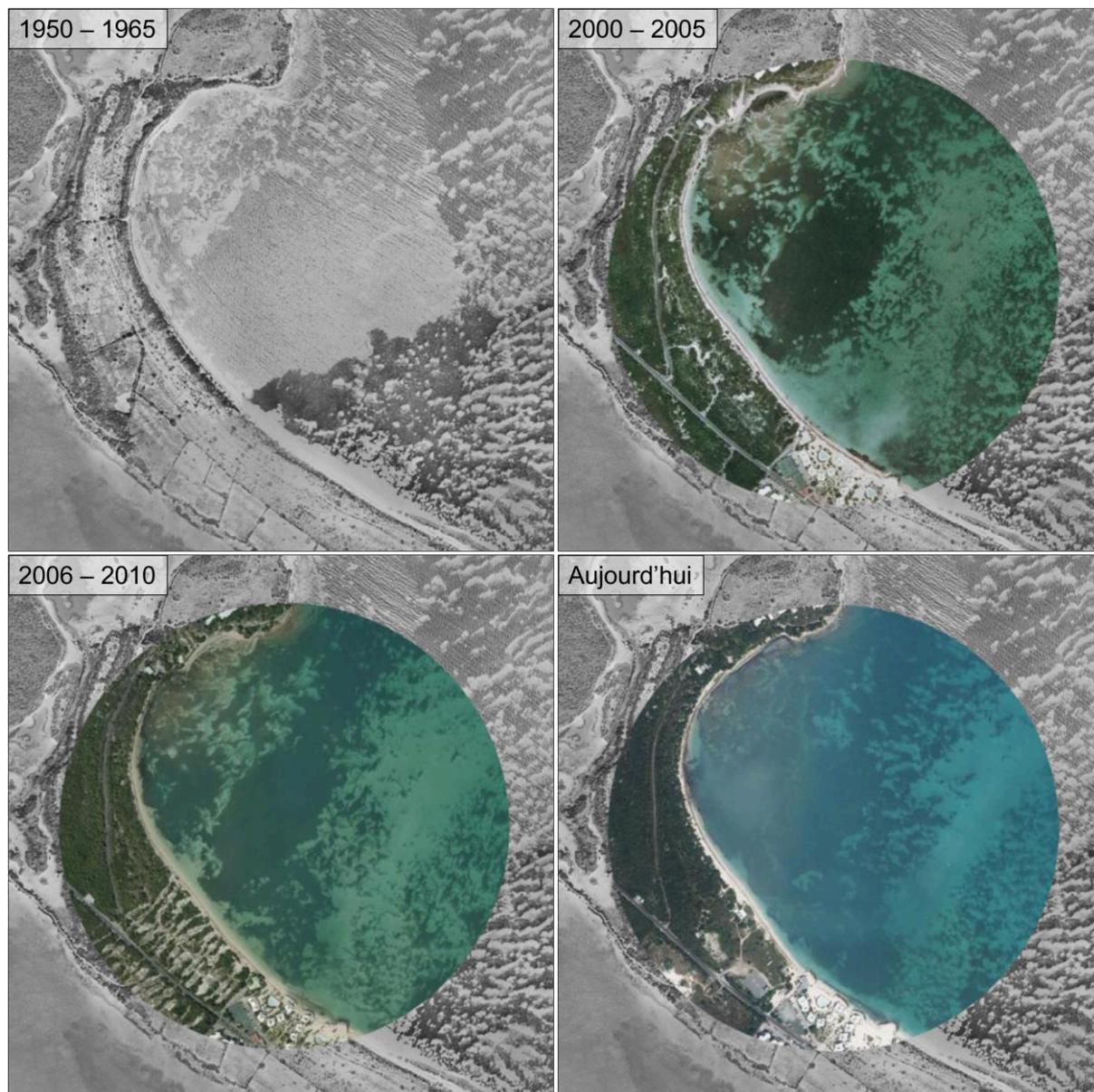


Figure 6.2 Photos aériennes de l'IGN, secteur Anse des Sables.

Résidences de la Baie Nettlé

A l'ouest de la Baie Nettlé se trouvent 5 groupes de résidences agencées chacune en demi-cercle autour d'une piscine, derrière 7 talus en enrochements.

Les 3 groupes résidentiels les plus à l'ouest ont été construits entre 1984 et 1989 (Figure 6.3). Les habitations les plus proches de la mer se trouvent quasiment au niveau de la micro-falaise observable sur la photo de 1989.

Les 2 derniers groupes résidentiels ont été construits entre 1989 et 1999. C'est également sur cette période qu'ont été installés les deux premiers enrochements, dont l'objectif premier était peut-être simplement d'augmenter la zone de plage.

Entre 2005 et 2010 ont été ajoutés deux nouveaux enrochements, dont l'objectif semble cette fois être de protéger les maisons les plus proches de la mer de l'érosion de la plage.



Figure 6.3 Photographies aériennes de 1989 (haut) et 1999 (bas) (IGN).

6.1.2 Secteur Baie Nettlé

Un aperçu global de l'évolution du secteur de la Baie Nettlé est illustré en Figure 6.2.

Trois épis en T ont été construits en 2010 au droit de l'hôtel Royal Beach.



Figure 6.4 Photos aériennes de l'IGN, secteur Baie Nettlé.

6.1.3 Secteur Sandy Ground

Un aperçu global de l'évolution du secteur de Sandy Ground est illustré en Figure 6.2.

Les premières constructions à Sandy Ground datent des années 80. Elles s'accompagnent rapidement d'une perte d'épaisseur de plage (Figure 6.6).



Figure 6.5 Photos aériennes de l'IGN, secteur Sandy Ground.



Figure 6.6 Photographies de 1969 (haut), 1984 (milieu), 1898 (bas).

6.1.4 Secteur passe de la lagune

Un aperçu global de l'évolution du secteur de la passe de la lagune est illustré en Figure 6.2.

La passe a été creusée entre 1954 et 1969, l'urbanisation a commencé entre 1969 et 1984. Sur cette même période ont été construits 5 ouvrages en dur perpendiculaires au trait de côte (de type épi).

C'est a priori le mouvement alternatif de la dérive globale vers l'ouest avec la dérive vers l'est associée aux fortes houles dues aux Northers en hiver qui a conduit à la création de ces épis pour maintenir le sable sur la plage (Réf. /4/).



Figure 6.7 Photos aériennes de l'IGN, secteur passe de la lagune.

6.1.5 Secteur Marina Fort Louis

Un aperçu global de l'évolution du secteur de la Marina Fort Louis est illustré en Figure 6.2.

Au début des années 1980, la construction de l'appontement de 110 m de long qui atteint l'isobathe des 4 m CM au pied du Fort de Marigot a contribué à l'isolement sédimentologique des baies adjacentes de Marigot et de la Potence. Il a probablement accentué le déficit sédimentaire de la Petite Baie de Marigot, malgré la construction d'épis transversaux (Réf. /4/).

Cet appontement a été prolongé dans les années 1996-1998, après l'ouragan Luis, par une digue en enrochements en arc de cercle. Le front de mer a été aménagé et protégé par des enrochements.

La marina a été livrée en 2000. Peu après, la digue en arc de cercle a elle-même été prolongée par un quai droit. Une protection en palplanche également en arc de cercle a été ajoutée au sud de la marina entre 2005 et 2009.

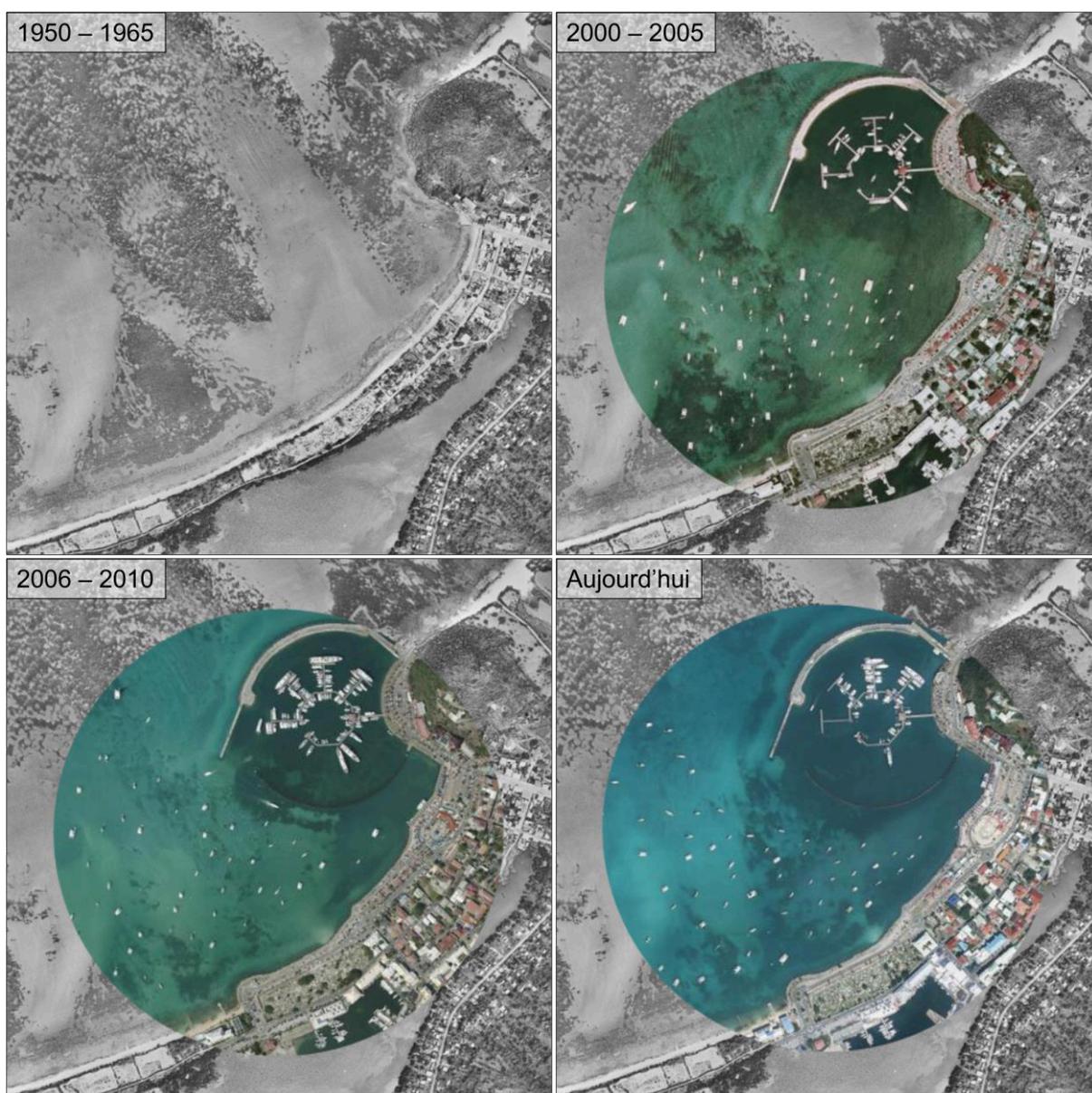


Figure 6.8 Photos aériennes de l'IGN, secteur Marina Fort Louis.

6.1.6 Secteur Plage de Galisbay

Un aperçu global de l'évolution du secteur de la passe de la lagune est illustré en Figure 6.2.

L'étang de Galisbay était un bassin de décantation et un filtre naturel, qui, lors de fortes pluies, retenait les sédiments et alluvions charriés par les ravines du bassin versant. Cette lagune a été peu à peu remblayée à partir des années 1990, diminuant ainsi son rôle de zone tampon et augmentant le débit à l'exutoire. L'étang est aujourd'hui réduit à un exutoire se déversant directement dans la mer.

La stabilité relative du trait de côte sur ce secteur s'explique par la présence de beach rocks (soubassement rocheux né de l'induration sur place des sables). Une importante diminution du stock de sable de la plage de Galisbay est constatée depuis 1950. Le sable disparaît sous l'effet conjugué des eaux de ruissellement (évacuation des eaux de l'étang de Galisbay), de la dérive littorale, de l'énergie des vagues lors des fortes mers et des ouragans, et des extractions de sable dans la Baie de la Potence (Réf. /6/, Section 6.2.2).

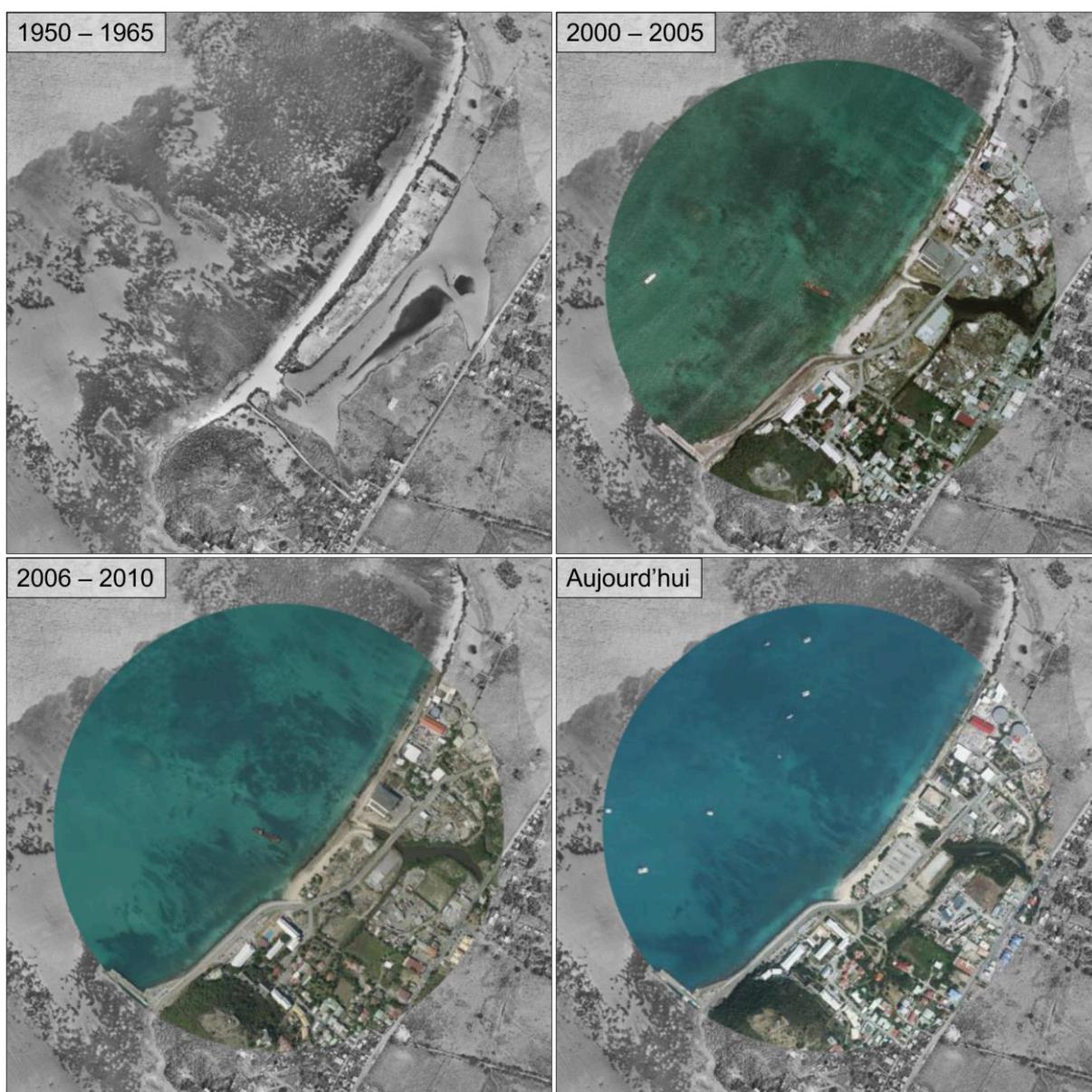


Figure 6.9 Photos aériennes de l'IGN, secteur Plage de Galisbay.

6.1.7 Secteur Port de Galisbay

Le port de Galisbay a été créé en 1995, après l'ouragan Luis.

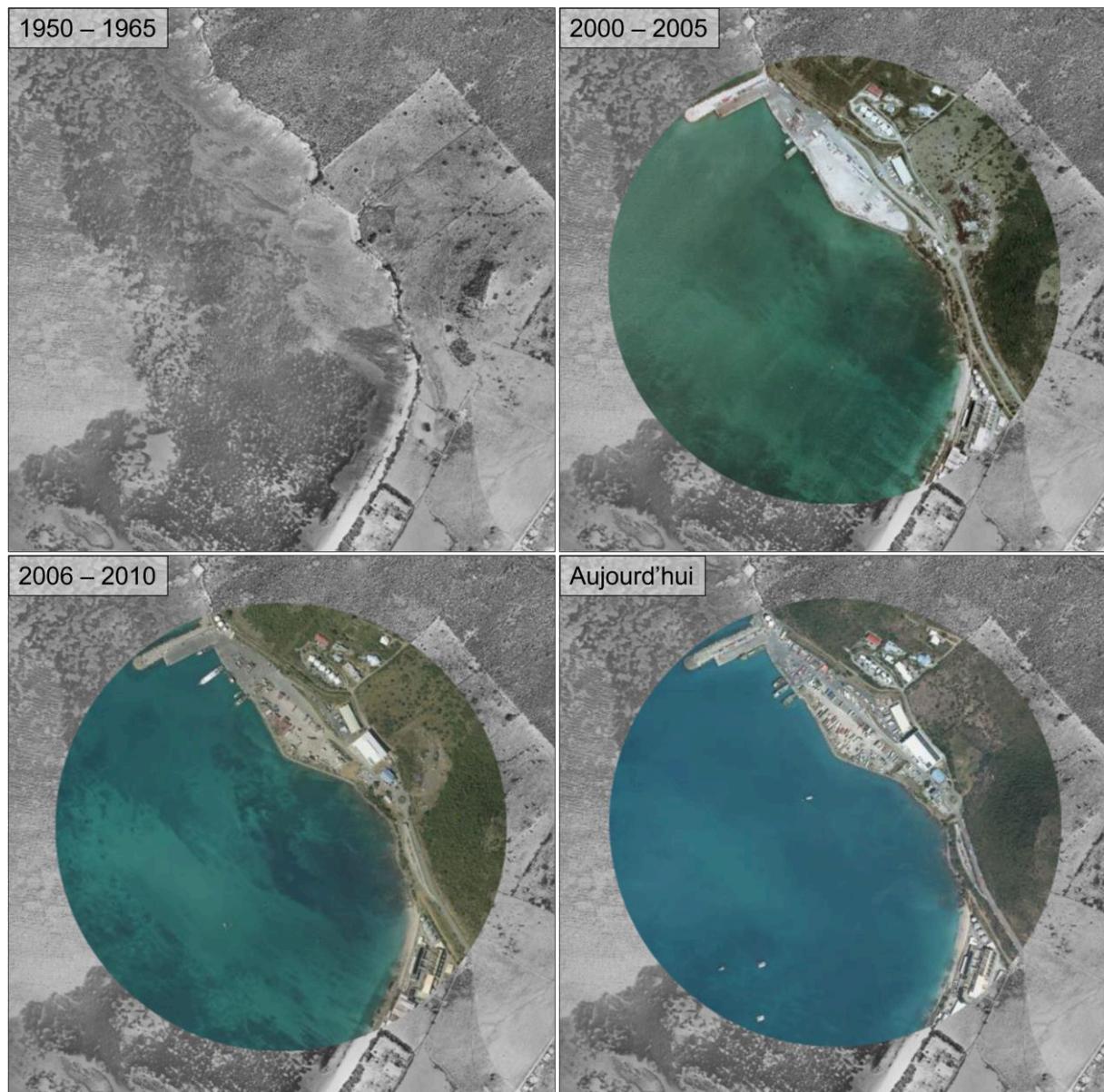


Figure 6.10 Photos aériennes de l'IGN, secteur Port de Galisbay.

6.2 Dragages et extractions de sable

6.2.1 Au large de la pointe Arago

Sur Saint-Martin, la SAGUA (SAblière GUAdeloupéenne) a exploité, dans la baie de la Potence au large de la pointe Arago (Figure 6.11), un gisement de sable sous-marin estimé en 1983 à plus de 2 Mm³. Les productions annuelles fournies par l'exploitant sont présentées dans le Tableau 6.1 (Réf. /6/, Réf. /22/, Réf. /20/).

Sur Saint-Martin, la plage de la baie de la Potence de 1947 à 1989, présente une relative stabilité de sa position avec néanmoins une diminution sensible du stock sableux laissant apparaître de plus en plus le soubassement rocheux (beach-rocks).

Cette évolution, antérieure à l'exploitation du gisement et en l'absence de tout aménagement sur le littoral est au départ naturel. Le prélèvement sauvage de sable pour la construction et le remblaiement de l'étang de Galisbay ne sont a priori pas étrangers à l'évolution constatée au cours des années précédentes.

L'évolution constatée de 1947 à 1989 n'a pas progressé jusqu'en 1992 au niveau de l'hôtel situé au sud de la baie. En revanche aux abords immédiats de l'exutoire, et entre 1989 et 1992, le sable a continué de disparaître sous l'effet conjugué des eaux de ruissellement et de l'énergie des vagues lors des fortes mers.

Dans la partie centrale, à l'emplacement de l'exutoire de l'étang de Galisbay, une extension des affleurements des formations rocheuses est observée. Dans la partie sud, autour de l'hôtel, aucune évolution n'a été enregistrée entre 1989 et 1992. Dans la zone où le cordon sableux existait encore, en 1992, des maisons ont été construites et l'érosion était visible.

Ces évolutions ne semblent pas être en rapport avec l'exploitation par la SAGUA du gisement (Réf. /20/).

Tableau 6.1 Récapitulatif des quantités de sable extrait par année au large de la pointe Arago (Réf. /6/).

Année	Quantité (m ³)
1985	0
1986	0
1987	82 000
1988	85 000
1989	80 000
1990	107 000
1991	0

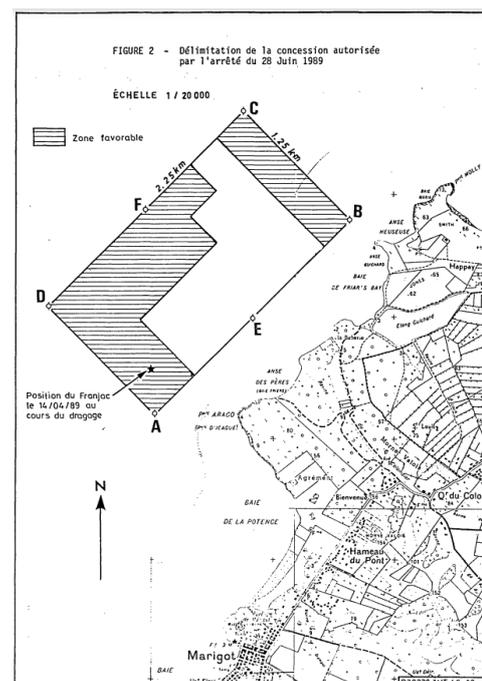


Figure 6.11 Zone d'extraction de sable au large de la Pointe Arago (Réf. /22/).

6.2.2 Dans la Baie de la Potence

Une carte des transits sédimentaires dans la Baie de la Potence et des extractions de sables dans les années 1980 et 1990 est présentée en Figure 6.12.

En plus des dragages réalisés dans le cadre de l'aménagement du Port de Galisbay et de la Marina Fort Louis, dans les années 1980, a priori entre 1985 et 1988, des extractions de sable ont eu lieu au droit de la centrale électrique, là où se trouve aujourd'hui une zone de dépression bathymétrique à environ 5 m de profondeur contre 4 m autour (cf. Figure 2.2). Ces extractions de sable ont a priori contribué au dégraissement significatif de toute la plage de Galisbay.

Des prélèvements sauvages de sable pour la construction et le remblaiement de l'étang de Galisbay, de volumes inconnus, ont également eu lieu dans ce secteur et ont certainement eux aussi joué un rôle dans le dégraissement de la plage.

A noter que depuis les années 1980, un unique dragage d'entretien a été réalisé dans le port de Galisbay en 2016, pour un volume de 2 000 m³ le long du quai principal.

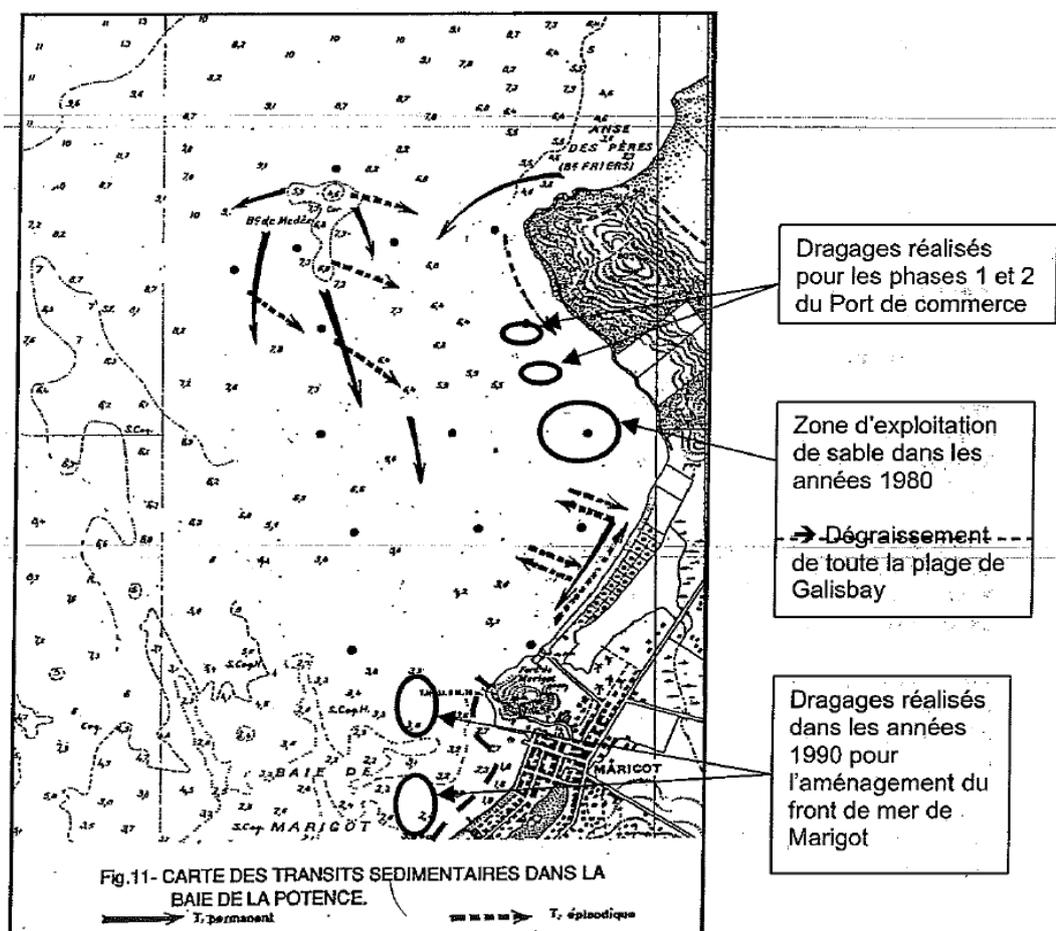


Figure 6.12 Carte des transits sédimentaires dans la Baie de la Potence (Réf. /4/).

6.3 Rechargements et clapages

A priori, aucun rechargement de plage n'a jamais été effectué sur le secteur.

6.4 Captages et rejets d'eau de mer

Deux usines sont situées en bordure de mer au fond de la Baie de la Potence :

- Une usine de dessalement d'eau de mer pour la production d'eau potable (UCDEM)
- Une usine de production électrique (EDF)

Usine de dessalement

L'usine de dessalement capte l'eau de mer à dessaler par 4 prises d'eau directes en mer dans la Baie de la Potence (Réf. /21/), à une profondeur d'environ 2,5 m.

Le rejet est situé juste au pied de l'enrochement en face du bâtiment de la filière de traitement (Figure 6.13). Il se trouve à une cinquantaine de mètres de la prise ouest. Le débit du rejet dépend de la quantité d'eau douce produite ; il est de 1 m³ de concentrât pour 2 m³ d'eau prélevés, soit un débit journalier moyen inférieur à 9000 m³ en 2012 (Réf. /21/).

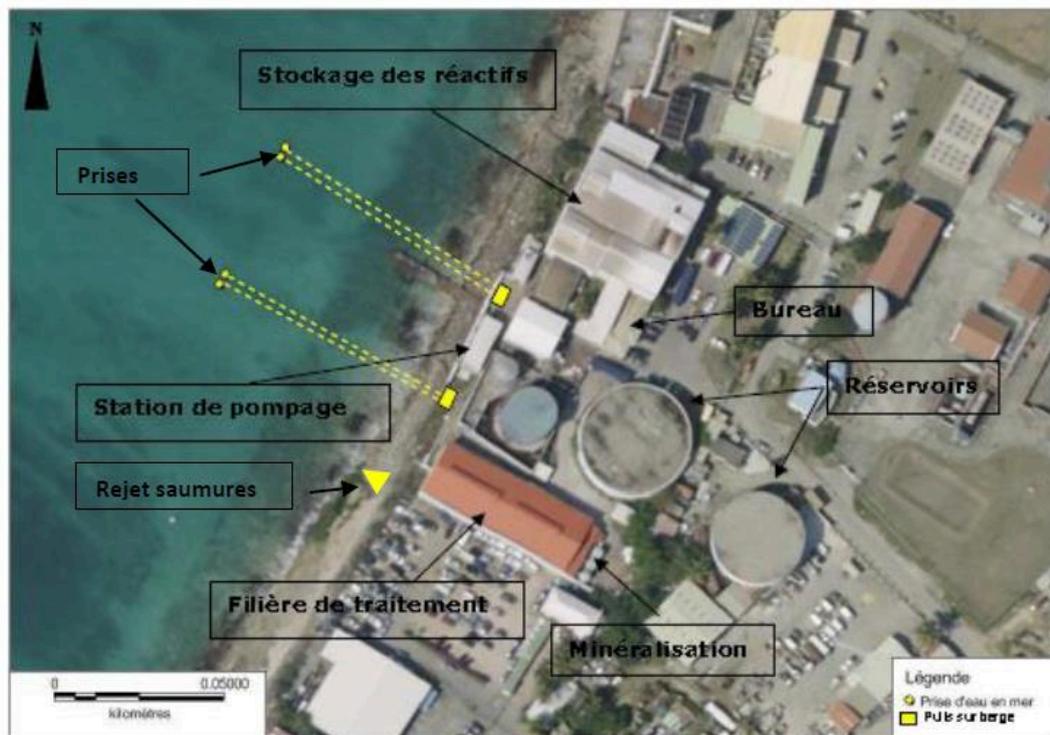


Figure 6.13 Schéma de l'usine de dessalement d'eau de mer de Galisbay (Réf. /21/)

Usine EDF

L'usine EDF possède un émissaire de rejets des eaux de refroidissement.

Autres

Il existe également une buse de rejet des eaux pluviales qui est située sur la plage, à l'angle est de l'usine EDF.

Un autre exutoire (déboché du bassin versant) se situe au port de Galisbay, près des bureaux de l'Établissement Portuaire de Saint-Martin, à l'extrémité sud du terre-plein du port.

7 Synthèse

L'objectif de ce rapport de Phase 1 est de réaliser un diagnostic hydrosédimentaire des plages de Sandy Ground et de Galisbay (contexte général du site et évolution au cours du temps).

Peu de données existent sur l'évolution du trait de côte de Saint-Martin à moyen et long terme. Il apparaît cependant que la majorité des cordons de l'île montrent des signes d'érosion.

Si à l'échelle du plateau d'Anguille, il existe un stock sédimentaire relativement abondant et facilement mobilisable sur les petits fonds (Réf. /6/), dans la Grand'Baie de Marigot, les stocks sédimentaires remobilisables sont relativement peu importants et essentiellement répartis le long du trait de côte. Les fonds marins sont en effet abondamment colonisés par des herbiers (Réf. /4/) qui limitent la mobilité des sédiments en place.

En baie de Marigot, les données historiques décrivent une courantologie faible avec une circulation d'est en ouest, caractérisée par un décalage vers la droite de 20° à 50° des courants de surface par rapport aux courants proches du fond. La dérive littorale s'effectue ainsi typiquement d'est en ouest, s'inverse ponctuellement lors des épisodes de Northers.

Le Banc de la Médée, au nord-est de la Grand'Baie de Marigot constitue, avec dans une moindre mesure les ravines qui se jettent dans la baie, la source principale d'approvisionnement en sédiments de la Grand'Baie de Marigot (Réf. /4/).

Depuis les années 1950, les plages de Galisbay et de Sandy Ground (dans sa partie est, essentiellement) se sont considérablement appauvries en sédiments, ce qui se traduit soit par un recul du trait de côte, soit par l'affleurement de plus en plus important de beach rocks. Plusieurs raisons peuvent l'expliquer :

- Erosion naturelle liée à la dérive littorale et surtout aux cyclones
- Artificialisation du littoral : blocage de la dérive littorale par des épis ou la Marina Fort Louis, constructions trop proches de la plage...
- Extractions de sédiments dans la Baie de la Potence (dragages devant la plage de Galisbay, prélèvements sauvages de sable...)

Il apparaît donc a priori judicieux de réaliser un rechargement de plage sur ces deux sites.

A priori, il n'existe pas de contraintes réglementaires particulières sur ces sites (limites de la réserve naturelle hors de la Grand'Baie de Galisbay, émissaires en amont des sites de rechargement...).

Pour confirmer l'intérêt de recharger ces plages, il reste à évaluer la stabilité dans le temps de ces rechargements.

Les modélisations numériques qui seront réalisées en Phase 2 et en Phase 3 de la présente étude permettront d'alimenter cette réflexion, en caractérisant de façon plus précise la dérive littorale (intensités, directions du transport littoral), en définissant les orientations d'équilibre de ces plages, ainsi que l'impact du futur chenal sur la dérive littorale.

Par ailleurs, des prélèvements granulométriques en 30 points le long du littoral de la Grand'Baie de Galisbay ont été réalisés pour caractériser la compatibilité granulométrique du sable des plages de Sandy Ground et Galisbay avec celui issu du dragage du projet.

Les analyses granulométriques montrent qu'il existe à l'endroit du site dragué des dépôts marins sableux, typiquement situés sur les 3 premiers mètres en surface.

La comparaison des courbes granulométriques des échantillons pris dans cette couche de 3 m au niveau du site du projet avec celles des échantillons pris sur les plages montre que les sédiments sont partiellement compatibles : les d_{50} et les hauts de courbes granulométriques sont généralement cohérents, mais la part des sédiments fins à très fins voire de limons est plus importante au niveau du site du projet que sur les plages.

Sur les plages, la part de limons $< 63 \mu\text{m}$ est en moyenne de 2% et celle des sables fins [$63 \mu\text{m} - 200 \mu\text{m}$] est de 3%, tandis que d'après les analyses d'Antilles GEOTECHNIQUE dans les 3,6 m de dépôts marins sableux potentiels au niveau du site du projet la part de limons est de l'ordre de 22% et celle des sables fins de 10%.

Ainsi, on trouve 5% de sédiments $< 200 \mu\text{m}$ sur les plages contre 32% sur le site du projet d'après les analyses d'Antilles GEOTECHNIQUE.

Il est attendu qu'un rechargement de plage réalisé à partir de sédiments en partie plus fins que les sédiments naturellement en place sur les plages voie cette partie plus fine que celle en place ne pas se maintenir dans le temps :

- Les limons vont entraîner une turbidité temporaire le long des plages, au moment du rechargement ainsi que lors de la mise en suspension par les vagues de ces limons, tant que ceux-ci n'auront pas été lessivés par les conditions hydrodynamiques.
- Les sables les plus fins seront entraînés au-delà du profil actif de la plage, contribuant ainsi à l'engraissement du bas de plage et des petits fonds.

D'après la comparaison des courbes granulométriques d'Antilles GEOTECHNIQUE sur le site dragué et celles des plages, on peut estimer qu'environ 50% du sédiment est compatible. Ainsi, pour un volume de sable disponible estimé de $154\,262 \text{ m}^3$ (Réf. /24/), environ 75 000 à 80 000 m^3 semblent compatibles.

Afin de minimiser la turbidité et de favoriser la stabilité d'un rechargement, nous recommandons de privilégier l'apport de sédiments de caractéristiques granulométriques les plus semblables à celles en place, ainsi que les sédiments un peu plus grossiers. Nous recommandons également d'envisager de mettre en œuvre des méthodes de pré-traitement avant rechargement telles que l'hydrocyclonage, permettant de séparer les particules les plus fines ($< 63 \mu\text{m}$) des sables fins.

A noter également que les sédiments présents sur le site du projet sont en partie des sables gris, soit du sédiment de couleur différente de celle présente naturellement sur les plages de la baie.

8 Références

- /1/ Antilles GEOTECHNIQUE, *Extension du port de Galisbay – Analyses chimiques des sols*, octobre 2016.
- /2/ Antilles GEOTECHNIQUE, *Quai de croisière du port de Galisbay – Analyse chimique des sols*, octobre 2020
- /3/ ASCONIT/PARETO, *Elaboration des profils de baignade de Saint-Martin*, Juillet 2015.
- /4/ BOUGIS, *Etude d'impacts de l'extension du port de commerce de Saint-Martin (3^{ème} phase) : Aspects courantologiques et sédimentologiques*, novembre 2003.
- /5/ CARAÎBES ENVIRONNEMENT, *Projet d'extension du port de commerce de Galisbay (3^{ème} tranche), Etude d'impact sur l'environnement*, mai 2004.
- /6/ Cerema, 2020. *Dynamique et évolution du littoral. Fascicule 12 : Synthèse des connaissances de Saint-Barthélémy et Saint-Martin*.
- /7/ CEREMA, *Recommandations pour la conception et la réalisation des aménagements de défense du littoral contre l'action de la mer*, avril 1998.
- /8/ DHI, 2021. *DAEU du dragage et de l'extension du port de commerce de Galisbay. Phase 2 – Définition de la zone d'immersion. Phase 2A : élaboration d'un modèle de courantologie générale*.
- /9/ DHI, *DAEU du dragage et de l'extension du port de commerce de Galisbay, Phase 2 : Définition de la zone d'immersion, Phase 2A : Elaboration d'un modèle de courantologie générale*, mai 2021.
- /10/ Discover (magazine), Hors-série IRMA
- /11/ EGIS, *Réalisation d'un chenal d'accès au port de commerce de Galisbay associé à la conception de terre-pleins, Rapport de PROJET, EP 140410 B*, juin 2017.
- /12/ GAIA, ImpactMer, DHI, Bird&Bird, *Chapitre 3 : Scénario de référence et évolution du scénario avec ou sans le projet d'extension du port de Galisbay*, 2022.
- /13/ HOCER, *Mesures de courants sur l'île de Saint-Martin*, juin 2013
http://dx.doi.org/10.17183/MNT_ANTN100m_HOMONIM_WGS84
- /14/ INGEO, *Réalisation de levés bathymétriques Baie Nettlé – Sandy Ground*, mars 2016.
- /15/ I-Sea, *Cartographie par satellite des habitats marins dans les baies de Marigot, Grand-Case et Cul de Sac sur l'île de Saint-Martin*, décembre 2021
- /16/ Jouanno, J., Sheinbauma, J., Barnier, B., Molines, J-M., Debreuc, L., and Lemariéc, L., *The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part I: Simulations and characteristics with an embedded model*, avril 2008
- /17/ K. VOS et al., *CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery*, décembre 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
- /18/ NOAA, *National Hurricane Center Tropical Cyclone Report – Hurricane Irma*, septembre 2021. [Microsoft Word - AL112017_Irma_Update_Part3 \(noaa.gov\)](https://www.noaa.gov/media/releases/2021/AL112017_Irma_Update_Part3)

- /19/ PARETO, *Prélèvement et analyse des sédiments de surface dans la zone d'influence du projet du Port de Galisbay*, août 2013.
- /20/ PAULIN C., *Exploitation de sable en mer dans la baie de la Potence (Marigot-Saint-Martin. Évolution du cordon littoral depuis 1989, 1992.*
- /21/ Paulin, C., *Avis hydrogéologique pour la définition des mesures de protection des prises d'eau en mer et de l'unité de production d'eau potable de Galisbay (Saint-Martin)*, avril 2015
- /22/ PAULIN, C., Rapport BRGM/RR-30239-FR : *Evaluation des impacts de l'exploitation de sable en mer au large de la pointe Arago – Marigot (Saint-Martin Guadeloupe). Rapport final. Pointes Arago-Marigot.* BRGM, 1989.
- /23/ SEMSAMAR, *Prolongement de la digue du front de mer par un appontement en palplanches, Dossier de consultation d'entreprises*, 2004.
- /24/ SETEC, *Mission de Maitrise d'œuvre relative à la conception de niveau AVP d'un quai - croisière au port de Galisbay – Etudes relatives à la conception des opérations de dragage*, juillet 2022.
- /25/ SHOM, 2018. *MNT bathymétrique de façade de Saint-Martin et Saint-Barthélémy (Projet Homonim).*
- /26/ SHOM, 2020. *Références Altimétriques Maritimes. Ports de France métropolitaine et d'outre-mer.*

ANNEXES

ANNEXE A – Analyse du trait de côte sur 2017 – 2019 (donnée Cerema)

A Analyse du trait de côte sur 2017 – 2019 (donnée Cerema)

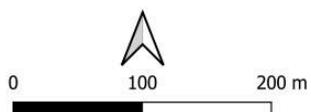
A.1 Avant et après Irma (mars et décembre 2017)





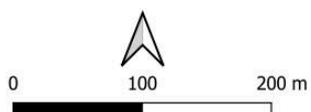
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

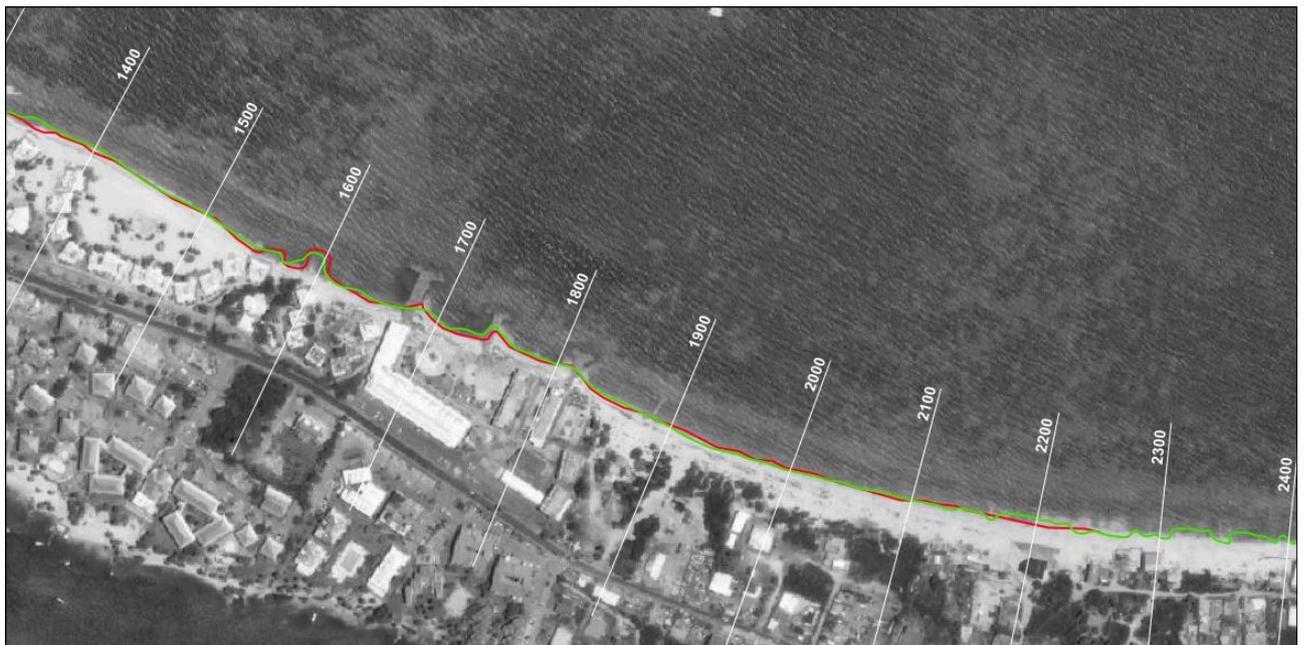
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

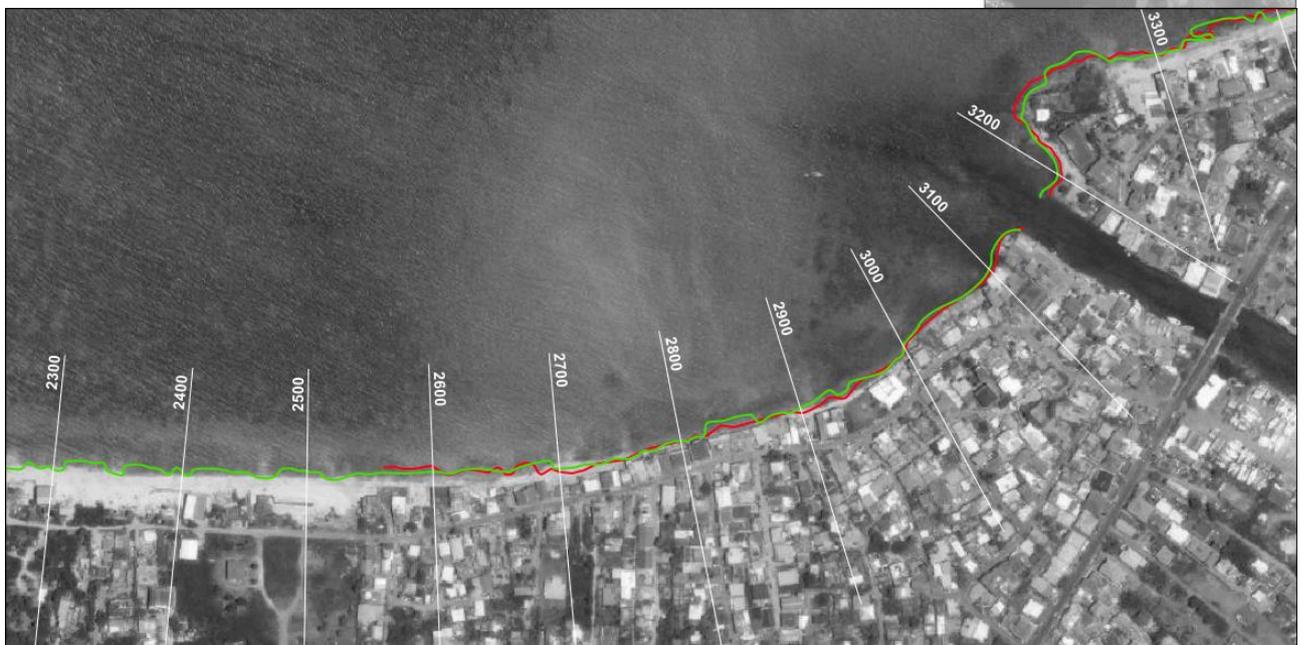
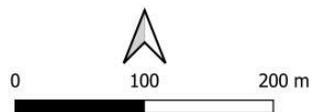
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma





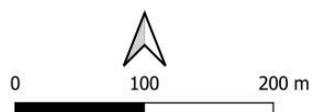
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

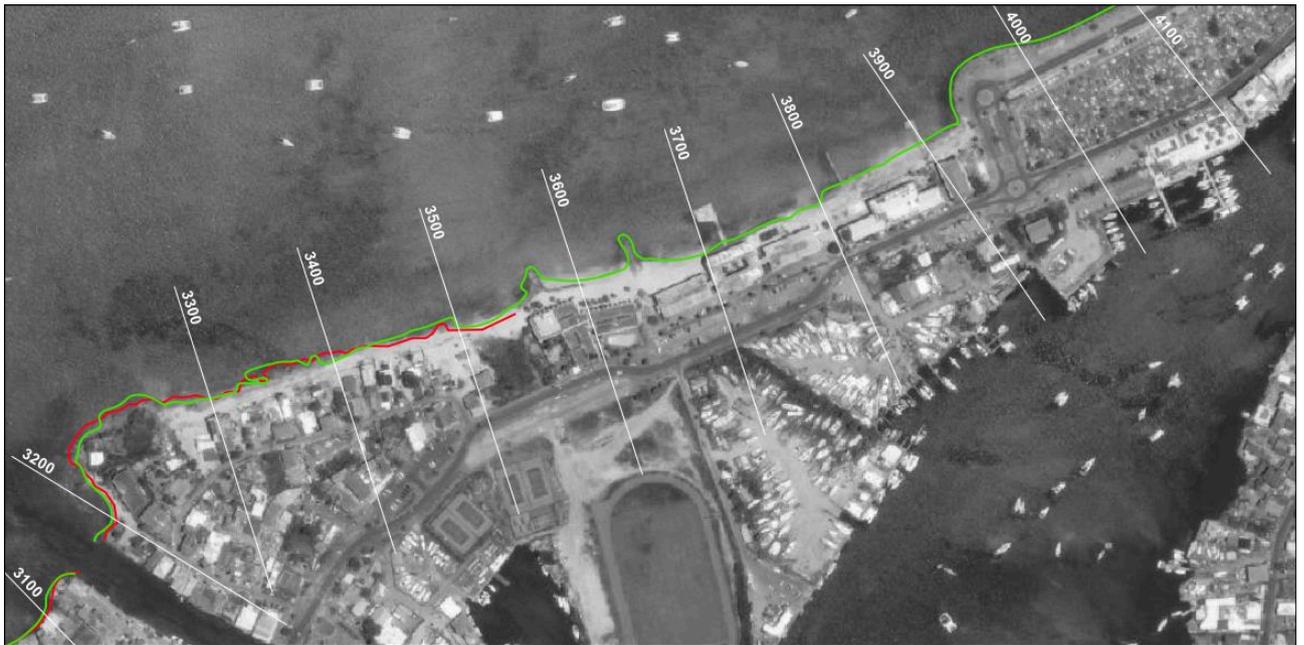
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

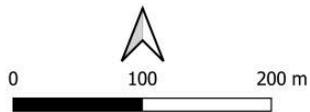
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma





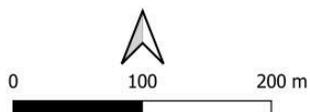
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

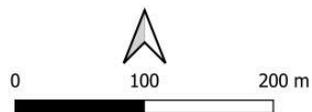
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma





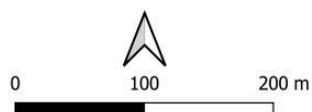
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

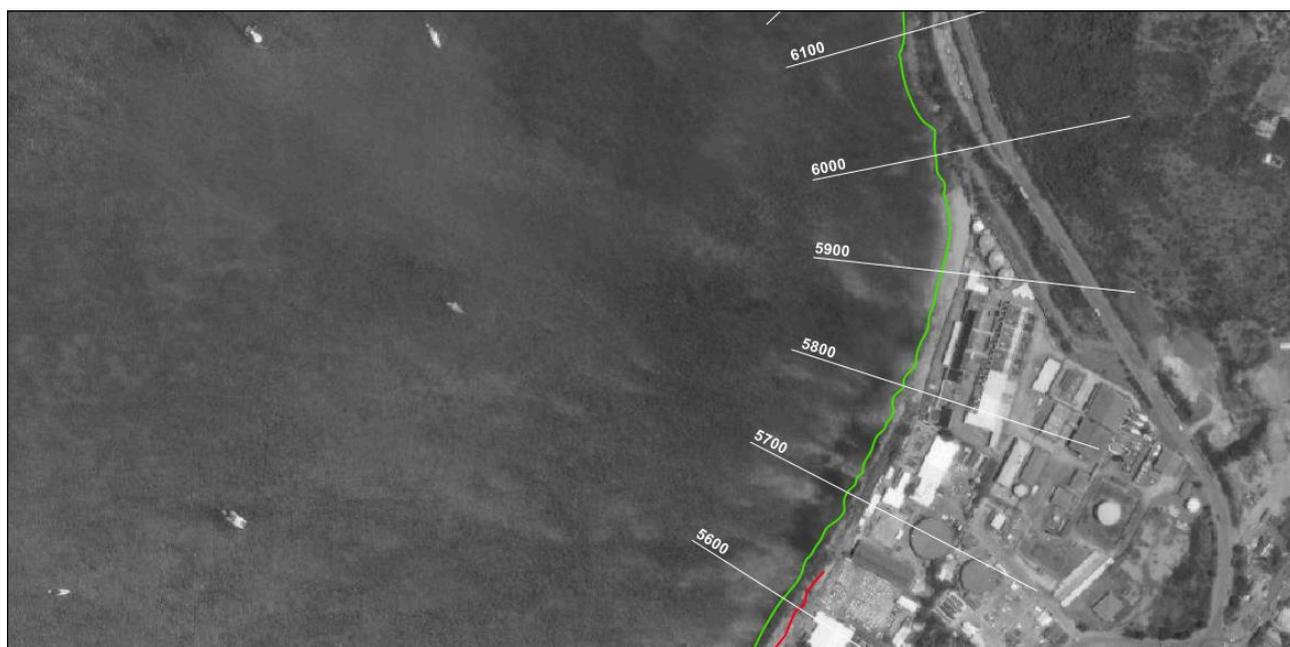
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

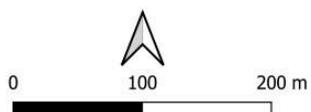
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma





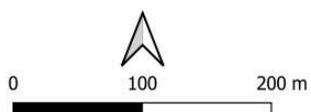
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma

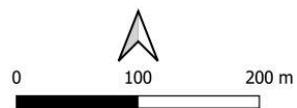


A.2 Avant Irma et 2 ans après Irma (mars 2017 et octobre 2018)



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

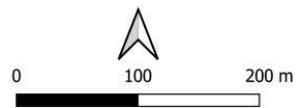
- 03/2017 : avant Irma
- 10/2018 : 2 ans après Irma





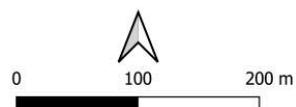
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

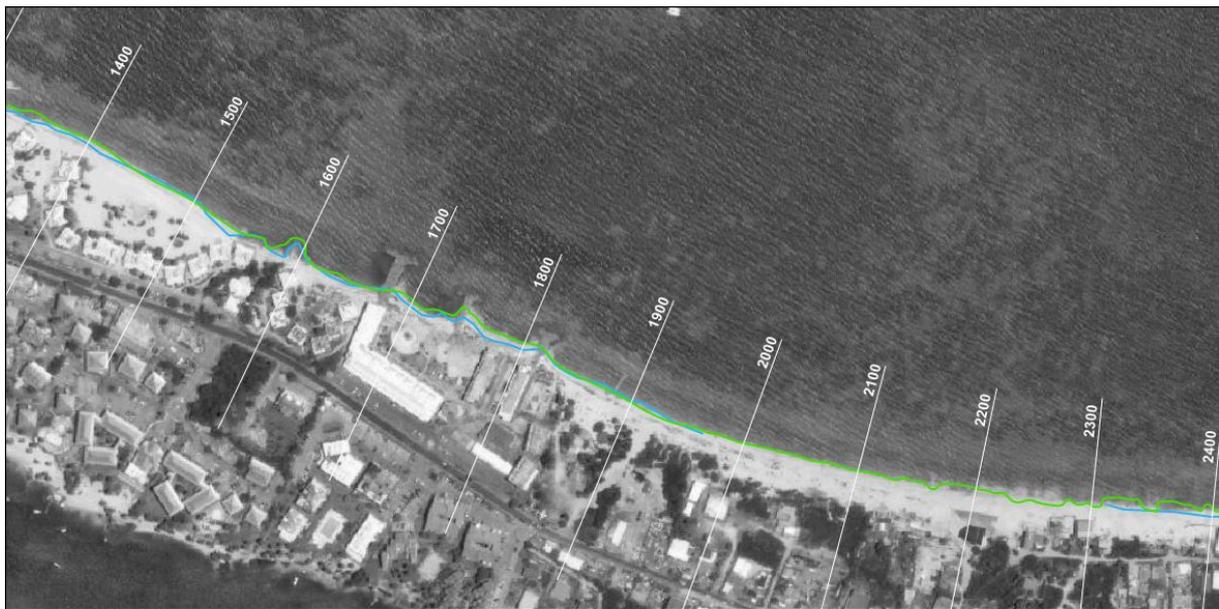
- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

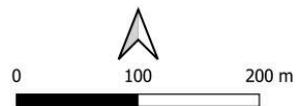
- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma





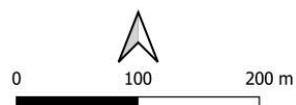
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

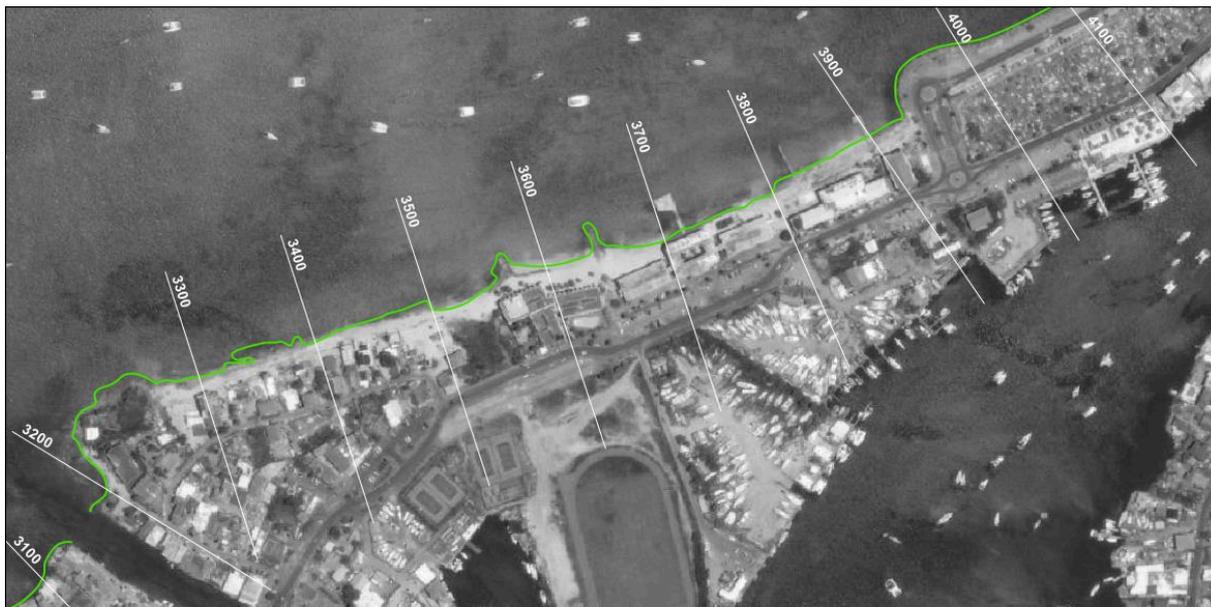
- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

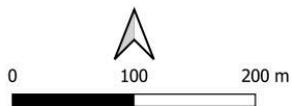
- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma





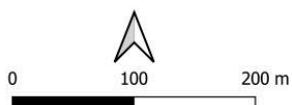
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

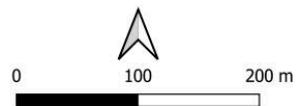
- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma





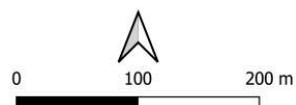
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

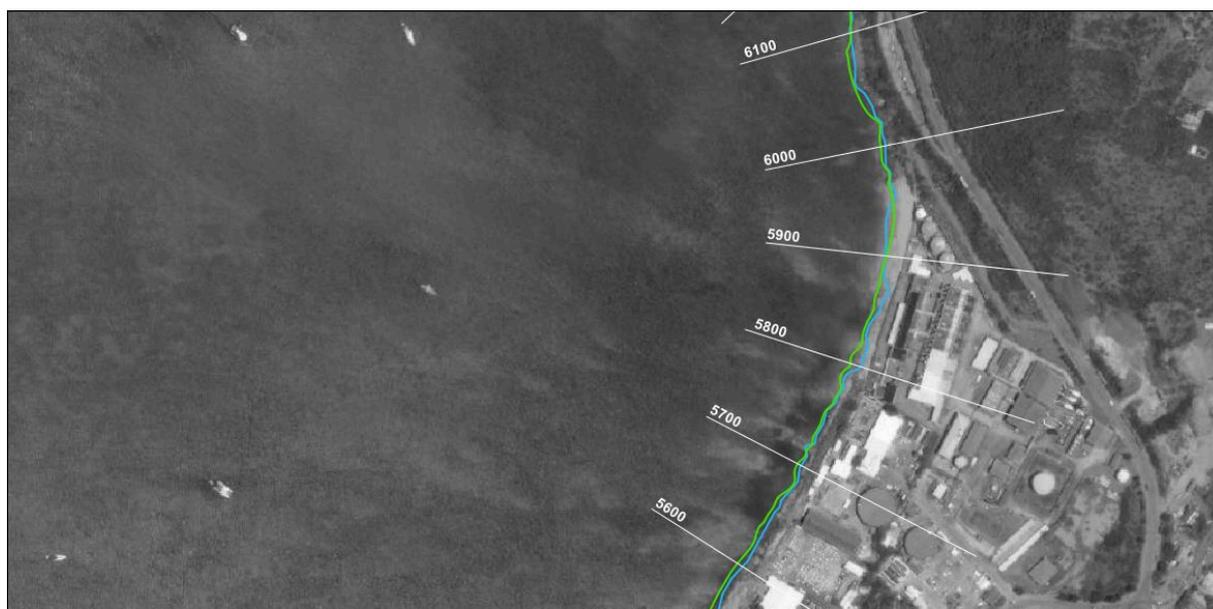
- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

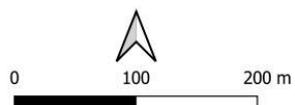
- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma





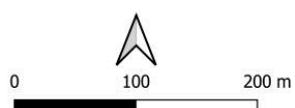
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma

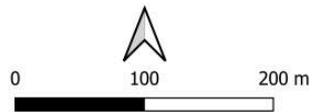


A.3 Tous les traits de côte de 2017 à 2019



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

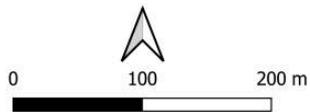
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma





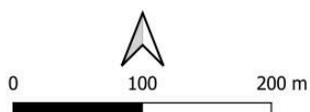
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

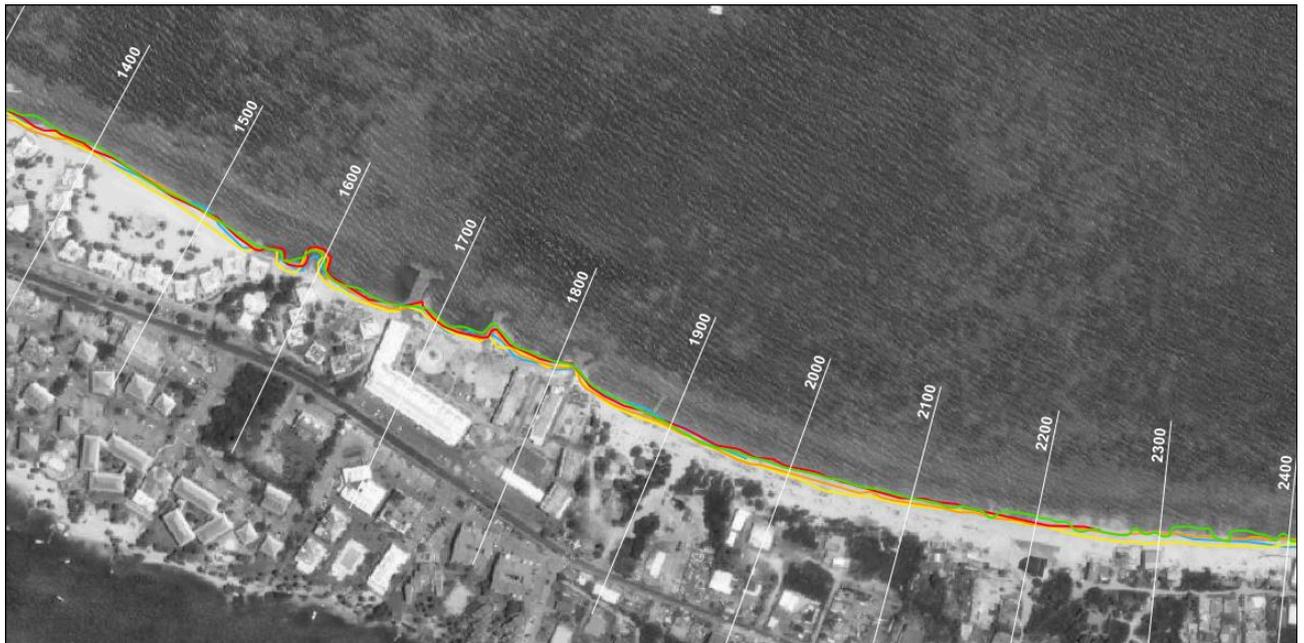
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

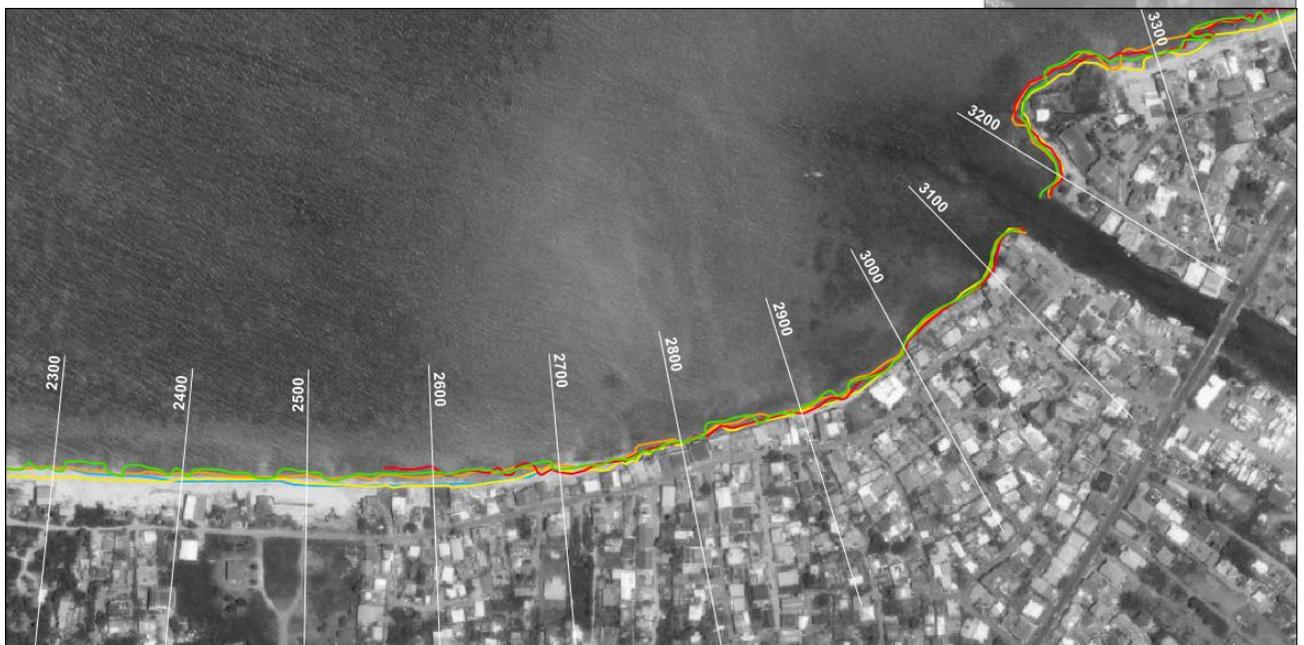
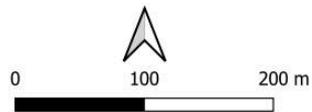
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma





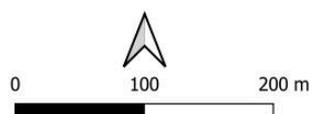
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

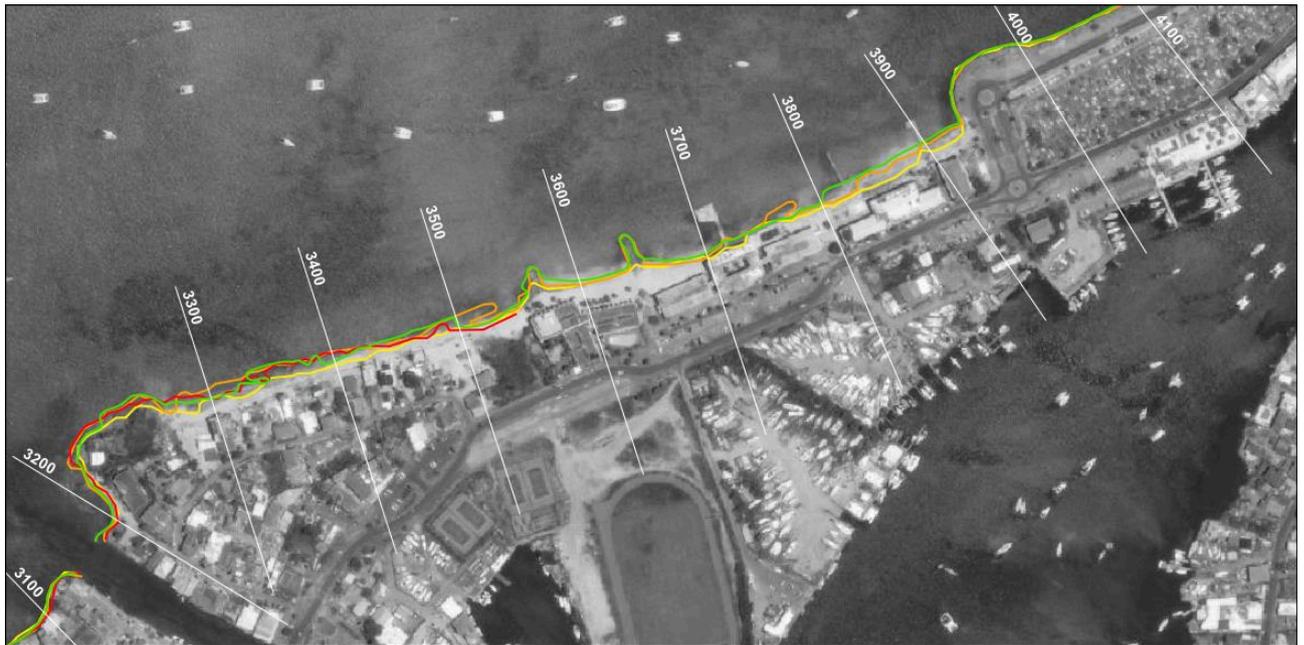
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

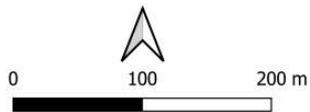
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma





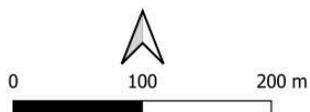
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma

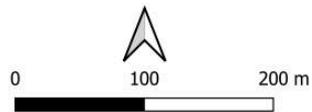


7



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

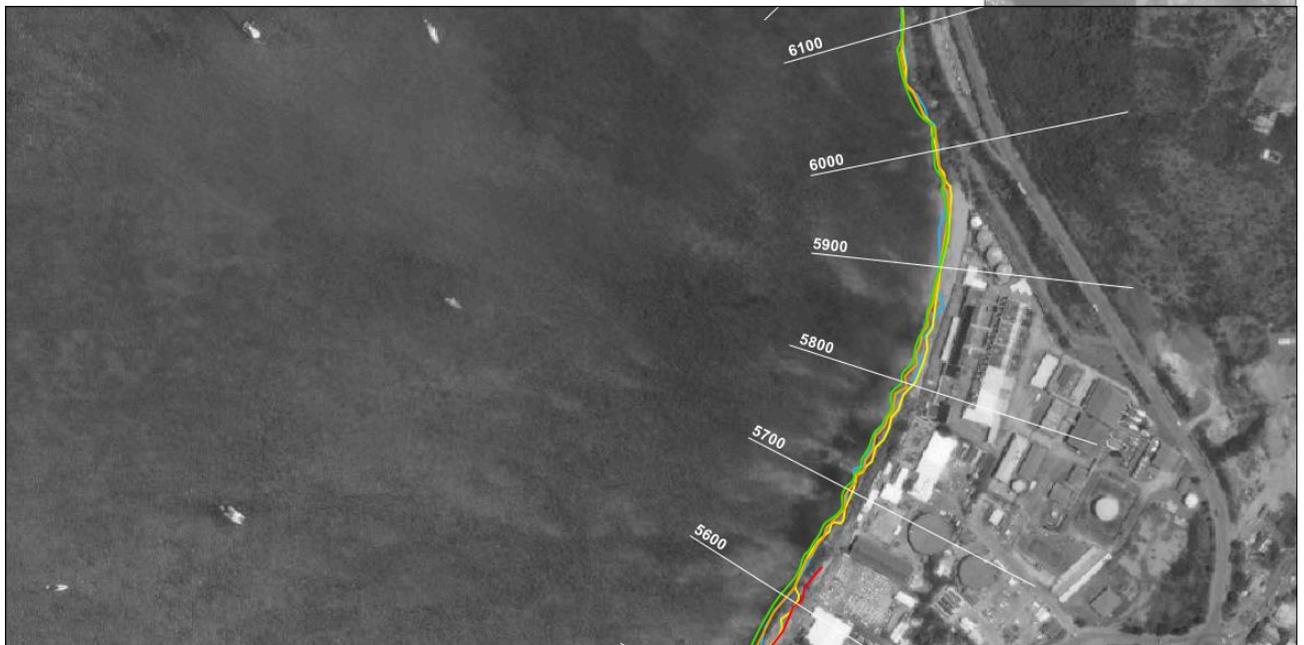
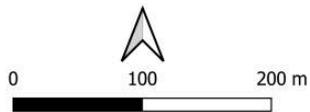
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma





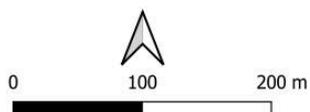
Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma



Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

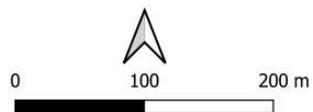
- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma





Trait de côte Saint-Martin (CEREMA)

- 03/2017 : avant Irma
- 12/2017 : 3 mois après Irma
- 04/2018 : 6 mois après Irma
- 10/2018 : 1 an après Irma
- 10/2019 : 2 ans après Irma

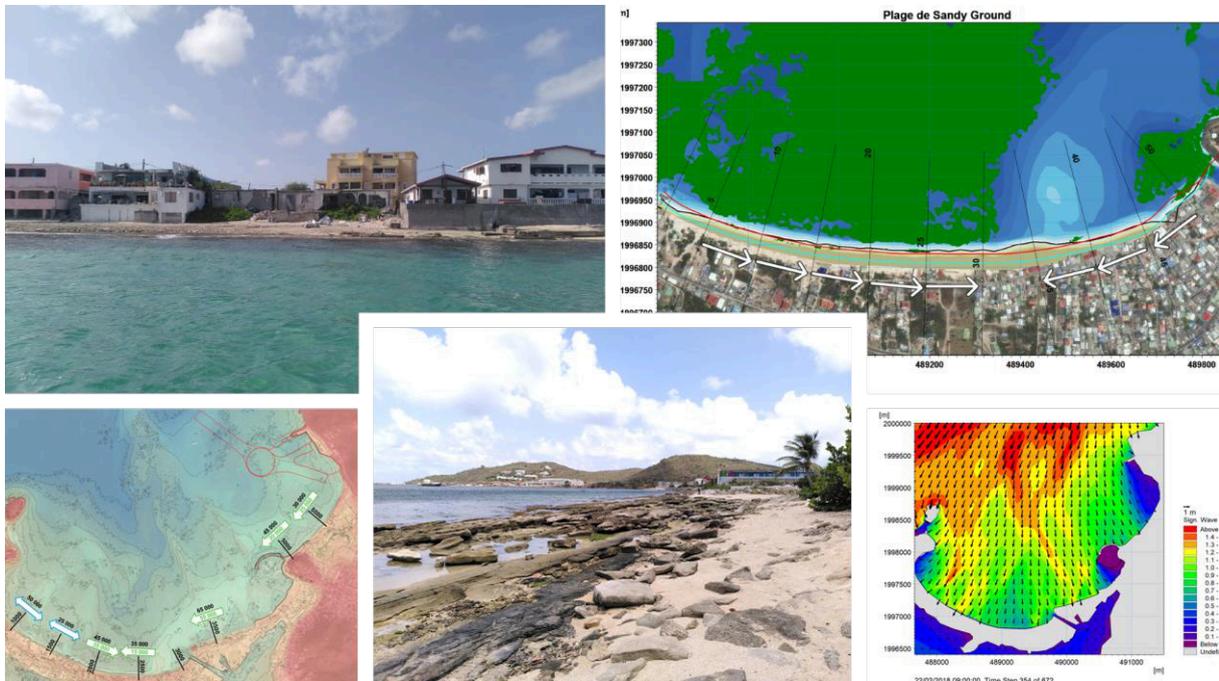




Projet de rechargement des plages de Sandy Ground et de Galisbay

Etude de modélisation hydrosédimentaire

Phases 2 & 3 : Modélisation hydrosédimentaire du site
Cas actuel & projet (rechargement des plages de Sandy Ground et Galisbay)



Ce rapport a été préparé conformément au système qualité de DHI certifié ISO 9001 par Bureau Veritas.

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Projet de rechargement des plages de Sandy Ground et de Galisbay

Etude de modélisation hydrosédimentaire

Phases 2 & 3 : Modélisation hydrosédimentaire du site
Cas actuel & projet (rechargement des plages de Sandy Ground et Galisbay)

Préparé pour Etablissement Portuaire de Saint-Martin
Représenté par M. Albéric Ellis, Directeur du port



*Diagnostic et modélisation hydrosédimentaire des
plages de Sandy Ground et Galisbay (DHI, 2022)*

Chef de Projet	Caroline TESSIER
Numéro de projet	21804505
Date de validation	16 décembre 2022
Révision	Final 2.0 (Correction de certaines analyses granulométriques)
Catégorie	Restreint

SOMMAIRE

1	Introduction	6
2	Principe de modélisation	7
2.1	Description de la suite logicielle MIKE 21	7
2.1.1	Le modèle de propagation de houles MIKE 21 SW	8
2.1.2	Le modèle hydrodynamique MIKE 21 HD	9
2.1.3	Le module de transport des sédiments sableux MIKE 21 ST	9
2.1.4	Le modèle de morphodynamique littorale 2D MIKE 21 SM	10
2.1.5	Le modèle de dérive littorale 1D LITDRIFT	13
2.2	Chaîne de modélisation mise en œuvre	14
3	Modélisation de la propagation des vagues à l'échelle régionale	16
4	Modélisation de la propagation des vagues dans le Canal d'Anguilla	19
4.1	Emprise et maillage du modèle de vagues du Canal d'Anguilla	19
4.2	Les forçages du modèle de vagues	20
4.2.1	Le forçage météorologique	20
4.2.2	Les niveaux marins	21
4.2.3	Les conditions de vagues aux limites du modèles	21
4.3	Paramétrisation du modèle de vagues	23
4.4	Validation du modèle de vagues	24
4.4.1	Validation du modèle du Canal d'Anguilla exploité dans le cadre de cette étude ..	24
4.4.2	Comparaisons modèle-mesures sans décalage des directions des vagues de secteur est	27
4.5	Résultats de modélisation	30
4.5.1	Climat de vagues dans la baie	30
4.5.2	Impact du projet sur la propagation des vagues dans la baie	33
5	Modélisation de la dérive littorale dans la baie de Galisbay	37
5.1	Le modèle 1D de dérive littorale LITDRIFT	37
5.1.1	Hypothèses et incertitudes	37
5.1.2	Données d'entrée du modèle	38
5.2	Résultats de modélisation	39
5.2.1	Variabilité interannuelle	39
5.2.2	Variabilité saisonnière	40
5.2.3	Distribution du transport dans le profil	41
5.2.4	Orientations d'équilibre	42
5.2.5	Schéma bilan	44
5.2.6	Impact du projet sur la dérive littorale	45
6	Modélisation hydrosédimentaire de la baie de Galisbay	46
6.1	Emprise et maillage du modèle hydrosédimentaire	46
6.2	Les forçages du modèle	46
6.2.1	Le forçage météorologique	46
6.2.2	Les conditions de vagues	46
6.2.3	Les niveaux marins	46
6.3	Paramétrisation du modèle	48
6.4	Résultats de modélisation	49

7	Modélisation de la morphodynamique littorale des plages de Sandy Ground et Galisbay	54
7.1	Le modèle de morphodynamique littorale MIKE 21 SM	54
7.2	Emprise et maillage du modèle de morphodynamique littorale	55
7.3	Forçages du modèle	55
7.3.1	Les conditions de vagues	55
7.3.2	Le forçage météorologique	56
7.3.3	Les niveaux marins	57
7.3.4	Impacts de la résolution du maillage et de la schématisation du forçage sur la modélisation 2D de la dérive littorale	57
7.4	Paramétrisation du modèle	59
7.4.1	Ligne de référence, trait de côte et carte maille/section	59
7.4.2	Profils représentatifs des plages	60
7.4.3	Hauteur active	60
7.4.4	Nature du fond	60
7.4.5	Facteur d'accélération morphodynamique	61
7.5	Résultats de modélisation	62
7.5.1	Evolution à 1 an en état actuel	62
7.5.2	Evolution à 1 an et 5 ans avec rechargement de plage	67
8	Synthèse	72
8.1	Compatibilité granulométrique	72
8.2	Evolution d'un rechargement de plage	73
8.3	Impact du projet sur la dynamique sédimentaire	73
9	Références	74

ANNEXES

ANNEXE A – Résultats de modélisation de la dérive littorale dans la baie de Galisbay

FIGURES

Figure 1.1	Localisation des projets (source : CCTP).	6
Figure 2.1	Cycle de fonctionnement du modèle hybride	11
Figure 2.2	Illustration du principe de l'actualisation du maillage 2D dans l'approche hybride.	11
Figure 2.3	Illustration du principe de mise à jour de la position du profil côtier.	12
Figure 2.4	Chaîne de modélisation mise en œuvre : modèle régional (haut), modèle du Canal d'Anguilla (milieu), modèle de la baie de Galisbay (bas)	15
Figure 3.1	Emprise et maillage du modèle régional de vagues de Saint-Martin.	16
Figure 3.2	Bathymétrie interpolée du modèle régional de vagues de Saint-Martin	17
Figure 3.3	Roses des vagues modélisées au point P3-NE sur 2010-2020.	17
Figure 3.4	Champs de vagues se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : Alizés de nord-est le 20/02/2018 (haut) et Northers le 03/03/2018 (bas).	18
Figure 4.1	Emprise, bathymétrie interpolée et maillage du modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay. Détails des plages de Sandy Ground et Galisbay.	19
Figure 4.2	Rose des vents CFS 2010-2020 à Saint-Martin.	20
Figure 4.3	Niveaux d'eau (en m par rapport au niveau moyen) modélisés (en bleu) et mesurés au marégraphe de Saint-Martin (en gris) en été 2019 (Réf. /1/)	21

Figure 4.4	Roses des vagues mesurées (en grisé) et modélisées (en couleur) en B2 (ALIZE) et BRGM (Réf. /2/).	22
Figure 4.5	Position des stations de mesures A1 et A2 de la campagne Nortekmed d'avril à septembre 2022.	24
Figure 4.6	Comparaisons modèle-mesures en A1 : séries temporelles des hauteurs significatives (1) et des directions moyennes d'incidence (2) mesurées (en gris) et modélisées (en bleu), diagramme de dispersion des hauteurs significatives (3) mesurées versus modélisées, et roses des vagues (4) mesurées (en gris) et modélisées (en couleur)	25
Figure 4.7	Comparaisons modèle-mesures en A2 : séries temporelles des hauteurs significatives (1) et des directions moyennes d'incidence (2) mesurées (en gris) et modélisées (en bleu), diagramme de dispersion des hauteurs significatives (3) mesurées versus modélisées, et roses des vagues (4) mesurées (en gris) et modélisées (en couleur)	26
Figure 4.8	Comparaisons modèle-mesures en A1 <u>sans décalage des directions de 14,7°</u> : séries temporelles des hauteurs significatives (1) et des directions moyennes d'incidence (2) mesurées (en gris) et modélisées (en bleu), diagramme de dispersion des hauteurs significatives (3) mesurées versus modélisées, et roses des vagues (4) mesurées (en gris) et modélisées (en couleur).	28
Figure 4.9	Comparaisons modèle-mesures en A2 <u>sans décalage des directions de 14,7°</u> : séries temporelles des hauteurs significatives (1) et des directions moyennes d'incidence (2) mesurées (en gris) et modélisées (en bleu), diagramme de dispersion des hauteurs significatives (3) mesurées versus modélisées, et roses des vagues (4) mesurées (en gris) et modélisées (en couleur).	29
Figure 4.10	Série temporelle des hauteurs de vagues 2011 – 2021 à l'entrée de la baie.	30
Figure 4.11	Rose des vagues 2011 – 2021 à l'entrée de la baie de Galisbay.	30
Figure 4.12	Champ de propagation des vagues le 22/02/2018 02h UTC (Alizé).	31
Figure 4.13	Champ de propagation des vagues le 05/03/2018 10h UTC (Northers).	31
Figure 4.14	Champ de propagation des vagues le 06/09/2017 09h UTC (Irma)	32
Figure 4.15	Configuration actuelle de la baie (haut) et configuration projet (bas)	34
Figure 4.16	Champ des hauteurs de vagues moyennes sur la période 2011 – 2021, en configuration actuelle de la baie (haut), configuration projet (milieu), et différence relative en pourcentage (bas).	35
Figure 4.17	Champ de propagation des vagues le 06/09/2017 à 9h UTC pendant la tempête Irma en configuration actuelle de la baie (haut), configuration projet (milieu), et différence relative en pourcentage (bas).	36
Figure 5.1	Emplacement des profils extraits pour la modélisation 1D du transport sédimentaire	38
Figure 5.2	Variabilité interannuelle du transport sédimentaire net (en bleu, dirigé vers l'ouest lorsqu'il est négatif) et brut (en gris) sur la période 2011-2020 au profil 5500. Les lignes pointillées bleues et grises illustrent respectivement les transports net et brut moyens	39
Figure 5.3	Variabilité interannuelle du transport sédimentaire net (en bleu, dirigé vers l'ouest lorsqu'il est négatif) et brut (en gris) sur la période 2011-2020 au profil 5500.	40
Figure 5.4	Distribution du transport sédimentaire dans le profil 5500 pour une orientation du trait de côte de 343 : transport vers l'est (vert), transport vers l'ouest (rouge), transport net (bleu)	41
Figure 5.5	Transport net et brut annuel à travers le profil 5500 en fonction de l'orientation du trait de côte.	42
Figure 5.6	Profils perpendiculaires au trait de côte actuel (noir) et au trait de côte en équilibre (rouge) d'après les simulations LITDRIFT.	43
Figure 5.7	Schéma bilan du transport littoral brut le long du littoral de la baie de Galisbay. Les flèches indiquent le sens et l'intensité de la capacité de transport net annuel. Au-dessus des flèches est indiquée la capacité de transport brut annuel.	44
Figure 5.8	Schéma bilan du transport littoral brut le long du littoral de la baie de Galisbay <u>en situation projet</u> . Les flèches indiquent le sens et l'intensité de la capacité de	

	transport net annuel. Au-dessus des flèches est indiquée la capacité de transport brut annuel.	45
Figure 6.1	Emprise, bathymétrie interpolée et maillage du modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay. Détails des plages de Sandy Ground et Galisbay.	47
Figure 6.2	Champs de propagation des vagues (haut), des courants (milieu) et du transport sédimentaire (bas) le 22/02/2018 09h UTC lors d'un événement d'Alizés	50
Figure 6.3	Champs de propagation des vagues (haut), des courants (milieu) et du transport sédimentaire (bas) le 05/03/2018 10h UTC lors d'un événement de Northers.	51
Figure 6.4	Champs de propagation des vagues (haut), des courants (milieu) et du transport sédimentaire (bas) le 06/09/2017 9h UTC lors de l'ouragan Irma	52
Figure 6.5	Détails des champs de courants au droit de Sandy Ground pour les événements d'Alizés (haut) des Northers (milieu) et Irma (bas) présentés précédemment.	53
Figure 7.1	Schéma d'une section du trait de côte et définition des différents paramètres.	54
Figure 7.2	Position du « point de contrôle » et champ de propagation des vagues le 22/02/2018 02h UTC (Alizé).	56
Figure 7.3	Roses des vagues au « point de contrôle » sur l'ensemble de la période 2011 – 2020 (gauche) et sur l'année 2012 schématisée (droite).	56
Figure 7.4	Transport brut cumulé à travers le profil 3500 pour une résolution de 0,25 m (bleu) et une résolution de 2 m (rouge) en pourcentage du transport brut total calculé pour la résolution la plus fine (0,25 m) et temps cumulé en pourcentage du temps total (jaune), en fonction de la hauteur de vague en pied de profil	58
Figure 7.5	La carte maille/section relie le régime d'érosion/dépôt des éléments 2D aux sections du modèle côtier. Les mailles qui ne sont pas reliées au modèle côtier ne sont pas présentées. La ligne de référence (en cyan) et le trait de côte initial de 2019 (en noir) sont également présentés.	59
Figure 7.6	Profils de plage représentatif par baie de la Grand'Baie de Marigot	60
Figure 7.7	Carte de disponibilité du sable dans le modèle. Sédiments en jaune, roches ou herbiers en vert foncé.	61
Figure 7.8	Evolution du trait de côte (haut) et dérive littorale (bas) sur la plage de Sandy Ground en 1 an d'évolution morphodynamique, état actuel.	63
Figure 7.9	Evolution du trait de côte (haut) et dérive littorale (bas) sur la plage de Galisbay en 1 an d'évolution morphodynamique, état actuel.	64
Figure 7.10	Plage de Sandy Ground à T0 (topo-bathymétrie Litto3D 2019) et après 1 an d'évolution morphodynamique	65
Figure 7.11	Plage de Galisbay à T0 (topo-bathymétrie Litto3D 2019) et après 1 an d'évolution morphodynamique	66
Figure 7.12	Localisation des secteurs rechargés en sable	67
Figure 7.13	Evolution du trait de côte annuelle cumulée (haut) et dérive littorale annuelle (bas) sur la plage de Sandy Ground en 5 ans d'évolution morphodynamique après rechargement	68
Figure 7.14	Évolution du rechargement de la plage de Sandy Ground : T0 (haut), après 1 an (milieu) et après 5 ans (bas).	69
Figure 7.15	Evolution du trait de côte annuelle cumulée (haut) et dérive littorale annuelle (bas) sur la plage de Galisbay en 5 ans d'évolution morphodynamique après rechargement	70
Figure 7.16	Évolution du rechargement de la plage de Galisbay : T0 (haut), après 1 an (milieu) et après 5 ans (bas).	71

TABLEAUX

Tableau 4.1	Paramétrisation du modèle de vagues MIKE 21 SW du Canal d'Anguilla.	23
Tableau 6.1	Paramétrisation du modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay	48

1 Introduction

Dans le cadre du projet d'extension du port de Galisbay, une opération de dragage est prévue permettant l'extraction d'une quantité importante de sables, dont un volume de l'ordre de 150 000 m³ pourrait être exploité pour recharger les plages du littoral voisin. Les plages de Sandy Ground et de Galisbay sont envisagées pour cela.



Figure 1.1 Localisation des projets (source : CCTP).

La présente étude a pour objectifs de :

- Consolider la connaissance du risque d'érosion sur ces plages
- Analyser les mécanismes hydro-sédimentaires en jeu
- Identifier les besoins en rechargement et définir les opérations nécessaires
- En option : évaluer l'impact potentiel des panaches turbides générés lors du rechargement, et après rechargement par remobilisation des fonds

Pour cela, l'étude est décomposée en 4 phases :

- Phase 1 : diagnostic de la dynamique hydrosédimentaire des plages de Sandy Ground et de Galisbay
- Phase 2 : Modélisation hydrosédimentaire du site – cas actuel
- Phase 3 : Définition des scénarios de rechargements
- Phase 4 (en option) : Modélisation de la dispersion des panaches turbides

Le présent rapport constitue le rapport de Phase 2 : modélisation hydrosédimentaire du site dans son état actuel & de Phase 3 : Définition des scénarios de rechargement.

2 Principe de modélisation

2.1 Description de la suite logicielle MIKE 21

Afin d'évaluer le fonctionnement hydrosédimentaire de la baie de Marigot, plusieurs modèles numériques sont mis en œuvre. Le but est de modéliser les principaux forçages conduisant aux mouvements annuels du sable dans la zone littorale, comme la houle, les courants dus à la houle et les courants de marée.

Le transport de sédiments non-cohésifs (sables) dépend des mouvements d'eau générés soit par les courants, soit par les vitesses orbitales liées à la houle, soit le plus souvent par une combinaison de ces deux phénomènes. La suite du logiciel MIKE 21, développé par DHI, permet de modéliser numériquement le transport sédimentaire intégrant l'ensemble des paramètres entrant en jeu dans cette problématique en prenant en compte un couplage dynamique entre la propagation de la houle, la courantologie et le transport sédimentaire

MIKE 21, développé, utilisé et commercialisé par DHI depuis plus de 20 ans, est une suite logicielle professionnelle de modélisation numérique 2D des écoulements à surface libre. MIKE 21 permet la simulation de l'hydraulique et des phénomènes associés dans les lacs, les baies, les zones côtières et les océans. MIKE 21 est ainsi particulièrement adapté pour traiter des problèmes relevant des quatre principaux domaines d'application suivants :

- hydraulique côtière et océanographie ;
- hydraulique environnementale ;
- processus sédimentaires ;
- propagation de la houle.

Dans cette optique, la suite logicielle MIKE 21 est composée de différents modules répondant à une problématique précise. Pour l'étude de la morphodynamique de la baie de Marigot, la propagation de la houle et la courantologie seront modélisées avec le module de houles spectrales MIKE 21 SW et le module hydrodynamique MIKE 21 HD, et les transports sédimentaires seront étudiés avec le module ST (dynamique sédimentaire sableuse). Une brève description de ces modules nécessaires à la bonne réalisation de l'étude est donnée ci-dessous.

2.1.1 Le modèle de propagation de houles MIKE 21 SW

MIKE 21 Modèle de houles spectrale FM (MIKE 21 SW) est un modèle développé et entièrement géré par DHI. De même que les autres modules à maillage flexible de MIKE by DHI, ce modèle de houles est basé sur une méthode de volumes finis centrée sur chaque cellule et utilise un maillage non-structuré dans l'espace géographique. Cette approche, développée par DHI il y a plus de dix ans et donc pleinement aboutie, accorde un degré maximum de flexibilité et permet de modifier et d'optimiser la résolution du modèle selon les exigences des différentes parties du domaine modélisé. De plus amples informations sur le logiciel de modélisation peuvent être communiquées sur demande. Cette étude est basée sur la version 2014 de MIKE 21 SW.

MIKE 21 SW fait partie de la troisième génération de modèles vent-vague spectraux, la pointe de la technologie de DHI. Ce modèle permet de simuler la croissance, la décroissance et la transformation des vagues et de la houle générées par le vent dans les zones côtières et offshore. Sa technique unique de maillage flexible non-structuré fait de MIKE 21 SW un outil particulièrement adapté à la modélisation simultanée de la houle, c'est-à-dire sur un seul domaine modélisé, à l'échelle régionale et locale. Une résolution spatiale moins précise est utilisée pour la partie régionale du maillage tandis qu'une haute résolution est appliquée pour les eaux moins profondes des zones côtières, pour les zones à proximité des ouvrages, etc.

MIKE 21 SW prend en charge les phénomènes physiques suivants :

- Génération de vague sous l'action du vent ;
- Interaction vague-vague non-linéaire (interactions quadruplet et triplet) ;
- Dissipation par moutonnement ;
- Dissipation par frottement sur le fond ;
- Dissipation par déferlement des vagues induites par la profondeur ;
- Réfraction et shoaling dus aux variations de profondeur et aux courants ;
- Interaction vagues-courant ;
- Effet de la variabilité temporelle de la profondeur d'eau et des courants ;
- Effet de la couverture de glace sur le champ de vagues ;
- Diffraction de la houle ;
- Réflexion des ondes ;
- Influence des ouvrages (tels que les jetées, les fondations des éoliennes, les convertisseurs d'énergie éolienne (WEC), les convertisseurs d'énergie des marées (TEC)).

Les principales caractéristiques de calcul de MIKE 21 sont :

- Modélisation des effets basée sur des formulations de troisième génération ;
- Formulation spectrale complète et formulation paramétrée découplée directionnellement ;
- Modes instationnaire et quasi-stationnaire ;
- Degré optimal de flexibilité pour décrire la bathymétrie et conditions d'écoulement avec maillage non structuré adaptable à la profondeur et adapté aux frontières ;
- Couplage avec un modèle d'écoulement hydrodynamique pour la modélisation de l'interaction entre vagues et courants et de la variabilité temporelle de la profondeur d'eau ;
- Inondations et sécheresses liées à la variabilité temporelle de la profondeur ;
- Module d'interaction entre la houle et les ouvrages ;
- Parallélisation à l'aide des techniques OpenMP et MPI.

Enfin, nous pouvons souligner également que DHI a développé une « **Cyclone Toolbox** » qui permet de générer les champs de vent et pression atmosphérique à partir des données « Best Tracks » des cyclones, pour pouvoir simuler ensuite ces conditions extrêmes avec le modèle MIKE 21 SW.

2.1.2 Le modèle hydrodynamique MIKE 21 HD

MIKE 21 HD est le module courantologique qui constitue le cœur de la suite logicielle en fournissant les paramètres hydrodynamiques nécessaires aux autres modules. MIKE 21 HD est un modèle bidimensionnel pour les calculs hydrodynamiques qui permet de simuler les variations du niveau de la surface libre et des courants, moyennés sur la colonne d'eau, en fonction des paramètres de forçage des zones côtières et du large (marée, fleuves etc.). Le modèle hydrodynamique de MIKE 21 est utilisé pour simuler de nombreux phénomènes hydrauliques dont la marée, les courants induits par le vent et la houle ainsi que les surcotes.

Le modèle est basé sur la résolution des équations de Reynolds tridimensionnelles moyennées ou équations de Navier Stokes, avec les hypothèses de Boussinesq et de pression hydrostatique. Le modèle résout donc les équations de continuité, de moment, de température, de salinité et de densité. La masse volumique ne dépend pas de la pression mais seulement de la température et de la salinité (équation de l'UNESCO). La résolution numérique se fait en volumes finis, avec un schéma centré.

Les processus suivants peuvent également être pris en compte (selon le besoin) :

- frottement sur le fond ;
- cisaillement induit par le vent à la surface ;
- gradient de pression barométrique ;
- force de Coriolis ;
- potentiel générateur de marée ;
- dispersion de la quantité de moment ;
- courants induits par la houle ;
- termes sources et puits (rejets et prises d'eau) ;
- évaporation et précipitation ;
- découverture et recouvrement des estrans ;
- couverture de glace.

2.1.3 Le module de transport des sédiments sableux MIKE 21 ST

Le module de transport sédimentaire (ST) du modèle MIKE 21 est le module de calcul de la capacité de transport sur le fond et en suspension de sédiments non-cohésifs (sable) sous l'effet combiné des courants et de la houle. Dans la zone de déferlement, les courants de retour sont inclus. Les taux initiaux associés à l'évolution des fonds sont calculés sur base de l'équation de conservation de la masse sédimentaire. Le modèle est déterministe et demande un minimum de calibration. Le modèle est utilisé pour déterminer la répartition du transport sédimentaire (ou des changements dans cette répartition) et les taux de sédimentation/érosion suite à des impacts d'aménagements (épis, brise-lame, digue, chenal, remblaiements, dragage etc.).

MIKE 21 ST calcule les taux de transport de sable sur un maillage flexible couvrant le domaine étudié sur la base des données hydrodynamiques obtenues après simulation avec le module hydrodynamique (module HD), les données de champ de vagues (module SW) et des informations sur le matériau du lit (taille des particules de sable). Pour réaliser un modèle morphologique complet, dans le cas de courants combinés aux vagues, le module de houle SW est utilisé en mode dynamiquement couplé. Ce mode permet de constamment réactualiser la bathymétrie pour les calculs des champs de vague et des champs de courant.

La détermination des taux de transport est basée sur une approche quasi-3D où sont considérés les conditions locales de vagues, le profil des courants et les caractéristiques du grain de sable. Le « quasi-3D » se réfère à l'approche de la modélisation : l'équation de

diffusion des sédiments sur la verticale est résolue à une échelle très inférieure à la période de vague qui permet une description détaillée du transport des sédiments non cohésifs pour des vagues déferlantes/non-déferlantes et les courants. La donnée d'entrée du modèle de transport est une vitesse horizontale moyenne, typiquement les courants intégrés sur la profondeur. Cependant le transport sédimentaire a lieu essentiellement dans la couche limite turbulente relativement fine dans le cas des vagues et couvre toute la colonne d'eau pour des courants stationnaires établis : il faut donc une description verticale de l'écoulement. Cette description est obtenue à partir d'un modèle local « modèle point » incluant un nombre suffisant de points le long de la colonne d'eau pour résoudre la couche limite de vague et la distribution des sédiments en suspension. La répartition verticale des transports sédimentaires ainsi obtenue est finalement intégrée sur la colonne d'eau pour fournir des taux de transport 2D.

2.1.4 Le modèle de morphodynamique littorale 2D MIKE 21 SM

Dans le cas de modélisation d'évolution du trait de côte, il existe classiquement deux types de modèles :

- **les modèles bidimensionnels dans le plan horizontal (2DH)** qui décrivent l'évolution de la morphologie sur une zone particulière
- **les modèles d'évolution du trait de côte 1D** où la position du trait de côte est modélisée à travers une interaction entre la position et l'orientation du trait de côte et les gradients de la dérive littorale.

Les modèles 2DH de morphologie côtière sont basés sur des modèles de courantologie et de transport sédimentaire sur une bathymétrie d'une zone particulière, qui sont ensuite utilisés pour déterminer les changements morphologiques en chaque point de calcul du maillage de cette zone. Ces modèles servent à simuler des morphologies relativement détaillées comme le développement de barres, l'évolution de bancs de sable sous l'impact des courants d'arrachement, l'évolution des fonds marins autour d'un brise-lames etc.

Ce type de modèle détaillé pourrait en principe être utilisé pour de nombreux phénomènes morphologiques à grande échelle (>100 m) tel que l'évolution d'un trait de côte. Toutefois, il s'avère que ces modèles ne sont pour le moment pas propices à la modélisation à long terme (>1 an), en partie à cause de la longue durée nécessaire pour faire tourner ces modèles, et en partie car plus la période simulée est longue, plus la précision des résultats décroît, à moins de recourir à une forme de recalage ou à une normalisation du profil de plage en cours de simulation.

Les modèles d'évolution du trait de côte à long terme sont plus primitifs dans leur description des processus physiques impliqués que les modèles 2DH. Les modèles d'évolution du trait de côte rassemblent une grande partie de l'information détaillée dans des formulations plus simples. Une approche classique est l'introduction d'une paramétrisation de la morphologie côtière, par exemple dans l'approche des modèles « one-line » où un profil de plage de forme constante est translaté perpendiculairement au trait de côte en fonction du gradient de la dérive littorale parallèle au trait de côte ; à noter que les calculs de dérive littorale dans ce cas résultent d'un module de transport sédimentaire séparé et généralement plutôt simple.

Pour la présente étude de modélisation morphodynamique nous avons mis en œuvre le modèle d'état de l'art de modélisation morphodynamique côtière MIKE 21 Shoreline Morphology FM de DHI, qui résulte de la combinaison de l'approche des modèles 2DH avec celle des modèles « one-line » d'évolution du trait de côte.

Le concept du modèle est d'essayer de combler le fossé entre les modèles bidimensionnels détaillés et les modèles unidimensionnels de trait de côte, modèles « one-line », qui sont

bien adaptés à la simulation à long terme. L'idée principale est d'utiliser un modèle bidimensionnel détaillé pour représenter les conditions hydrodynamiques et le transport sédimentaire. Des restrictions sont imposées sur les degrés de liberté de l'évolution morphologique en prescrivant la forme du profil côtier. L'évolution morphologique est par conséquent déterminée sur la base du transport sédimentaire intégré et est menée à bien en mettant à jour la position du trait de côte plutôt que la profondeur en chaque élément du maillage.

Le modèle 2D de DHI est utilisé pour déterminer un champ bidimensionnel de transport et l'évolution morphologique est effectuée en réalisant l'intégration le long du trait de côte puis en mettant à jour les paramètres côtiers et en écrivant la nouvelle topographie dans un nouveau maillage. La boucle constituant le processus morphologique est fermée en faisant tourner le modèle bidimensionnel à nouveau. Le cycle de fonctionnement et le principe de l'actualisation du maillage 2D dans l'approche hybride sont illustrés sur la Figure 2.1 et la Figure 2.2, respectivement.

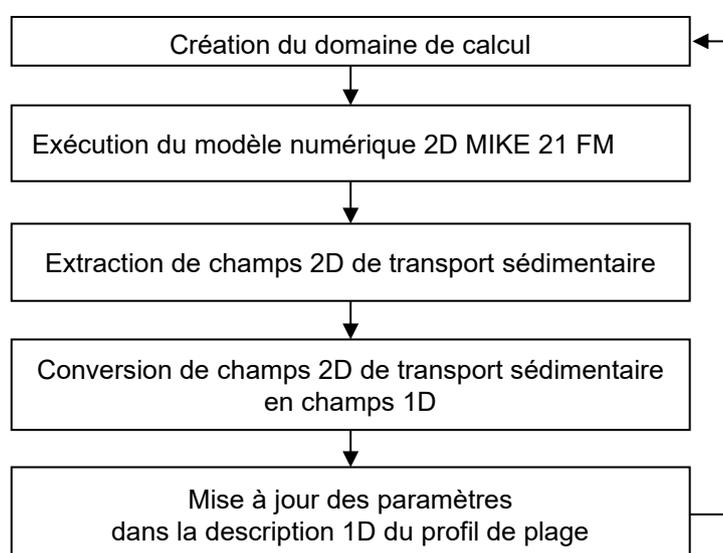


Figure 2.1 Cycle de fonctionnement du modèle hybride.

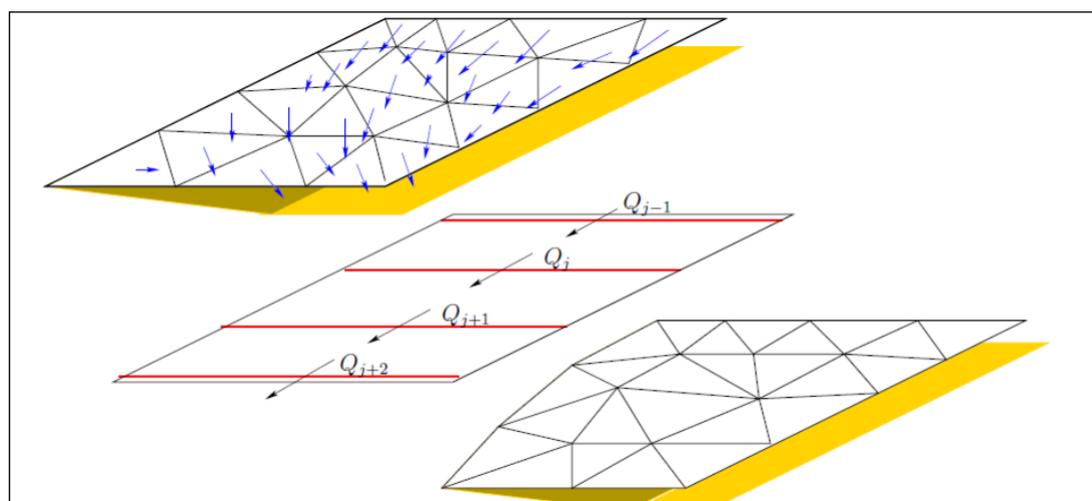


Figure 2.2 Illustration du principe de l'actualisation du maillage 2D dans l'approche hybride.

L'évolution morphologique est décrite par une translation du profil perpendiculairement au trait de côte. La position du trait de côte est déterminée à travers la balance de masse sédimentaire pour la morphologie schématisée :

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{1}{h_a(1-n)} \frac{\partial Q_s}{\partial x}$$

Où h_a est la hauteur de la zone active du littoral, n la porosité du sable, Y la localisation du trait de côte par rapport à un système de coordonnées prédéfini et Q_s la dérive littorale intégrée sur le profil de plage (cf. Figure 2.3).

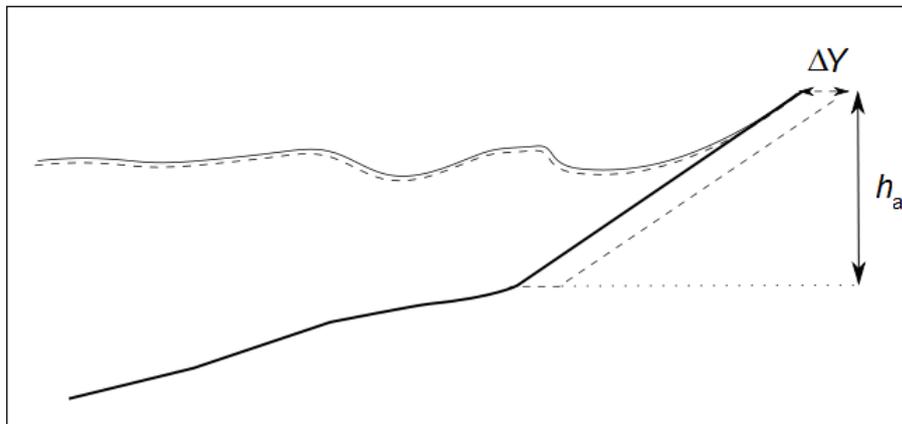


Figure 2.3 Illustration du principe de mise à jour de la position du profil côtier.

A chaque pas de temps morphologique, le climat de houle au large est transformé de la frontière jusqu'au rivage, où le déferlement des vagues induit des courants et où la combinaison de la houle et du courant génère du transport sédimentaire. Le champ bidimensionnel de transport sédimentaire est alors intégré sur le profil côtier à un grand nombre d'emplacements le long de la côte. Le résultat est la distribution du transport parallèlement au trait de côte, par la suite utilisé pour calculer l'évolution dans la topographie du rivage idéalisée.

Cette approche hybride permet notamment de prendre en compte, d'un point de vue morphodynamique :

- Les variations de hauteurs d'eau liées à la marée et les courants associés ;
- La propagation de la houle et du vent dans l'unité hydrosédimentaire concernée ;
- Le transport des sables dû au courant et à la houle ;
- La dynamique des dépôts ou des érosions de sables et leurs variations (répartition des dépôts et calcul des volumes et altimétries en jeu).

2.1.5 Le modèle de dérive littorale 1D LITDRIFT

Le modèle LITDRIFT fait partie du module Littoral Processes FM, qui est un système de modélisation intégrée permettant de simuler le transport de sédiment non-cohésif en des points donnés ou à travers des profils de plage. Ce module constitue un outil de modélisation puissant pour l'établissement de budgets sédimentaires, dont l'importance est capitale dans les études de morphodynamique côtière.

Le modèle LITDRIFT calcule le transport longshore à travers un ou plusieurs profils cross-shore. Il permet de calculer l'évolution des paramètres de vagues lors de leur propagation le long du profil, de calculer l'élévation locale du niveau marin liée au déferlement, tout en prenant en compte la variabilité spatiale des caractéristiques sédimentaires le long du profil. Ce modèle repose sur l'hypothèse que chaque profil cross-shore est représentatif d'un trait de côte uniforme.

Le modèle LITDRIFT consiste en deux parties : un modèle hydrodynamique qui calcule la propagation des vagues jusqu'à la côte ainsi que les courants liés aux vagues, et un modèle de transport sédimentaire qui calcule le transport longshore à partir des informations hydrodynamiques détaillées le long du profil.

Le modèle hydrodynamique comprend une description de la propagation, du shoaling et du déferlement des vagues, le calcul des forces motrices dues aux gradients des tensions de radiation, l'équilibre des quantités de mouvement pour les directions cross-shore et longshore, donnant le wave setup (élévation du niveau marin lié au déferlement) et les vitesses du courant longshore. Le modèle peut être appliqué à des profils côtiers complexes avec des barres littorales.

Le transport sédimentaire longshore est obtenu par l'intégration du transport sédimentaire calculé en chaque point définissant le profil de plage, chacun étant caractérisé par les conditions hydrodynamiques et sédimentologiques locales calculées. Le transport sédimentaire total est généralement dominé par les contributions au transport provenant des zones où se produit le déferlement des vagues.

En prenant en compte la variation du climat hydrodynamique (variabilité des vagues, des marées, des ondes de tempête, du profil de plage), il est possible de déterminer le transport littoral net et brut annuel à travers un profil de plage donné.

Les principaux résultats du modèle sont les conditions hydrodynamiques et le transport de sédiments à travers le profil, ainsi que les taux de transport net et brut intégrés.

2.2 Chaîne de modélisation mise en œuvre

La modélisation du transport sédimentaire littoral implique la modélisation de phénomènes complexes comme le déferlement de la houle, principal moteur de la mise en suspension du sédiment et générateur des courants le long du rivage donnant naissance au transit littoral. Pour modéliser la physique du comportement des houles en petite profondeur, des calculs avec une résolution très fine, inférieure à une dizaine de mètres, sont mis en œuvre.

Ces modèles de petite échelle, nécessitant d'importants moyens informatiques et étant très demandeurs en temps de calcul, ne peuvent raisonnablement pas être mis en œuvre à des échelles spatiales ou temporelles trop importantes.

Dans le même temps, dans le cadre de cette étude, il est important de représenter le plus fidèlement possible les conditions usuelles de houles représentatives sur une dizaine d'années. La houle doit être propagée des grandes profondeurs où elle reste homogène jusqu'aux petits fonds où elle réfracte et se déforme, ce qui implique de travailler sur une échelle de temps importante (série temporelle de l'ordre de 10 ans de houles au pas horaire) et également spatiale à l'échelle régionale. De plus, le degré de résolution de la maille requis pour une modélisation morphodynamique est bien supérieur à celui requis pour la propagation de la houle du large vers la côte ou même pour la reproduction du régime hydrodynamique au large de Saint-Martin.

Ces différentes échelles spatio-temporelles, nécessaires afin de résoudre les processus physiques importants à chacun son échelle, nous obligent donc à envisager de travailler selon le principe de modèles emboîtés, de l'échelle régionale à l'échelle locale. Les modèles à l'échelle régionale ont une résolution spatiale plus relaxée (de l'ordre de >1 000 à 100 m) afin de permettre une étendue temporelle à long terme (au pas horaire de l'ordre décennal), tandis que les modèles à l'échelle locale ont une résolution spatiale affinée (jusqu'à < 5 m) permettant uniquement une étendue temporelle à court terme (au pas horaire de l'ordre mensuel voire annuel).

Ainsi, le principe général de la modélisation à mettre en œuvre pour la présente étude afin d'étudier les mouvements sédimentaires sur l'ensemble de la Baie de Marigot est indiqué dans la Figure 2.4. La présente étude repose essentiellement sur trois modèles : un premier modèle à l'échelle régionale (cf. Section 33), un modèle de Canal d'Anguilla (cf. Section 44) et enfin un modèle local de la baie de Galisbay (cf. Section 5). Le maillage du modèle local sera sensiblement plus resserré que les modèles régionaux. Avec son maillage de résolution très réduite par rapport aux modèles régionaux, le modèle local est particulièrement adapté à la complexité du trait de côte et des conditions bathymétriques présentes dans le secteur d'étude.

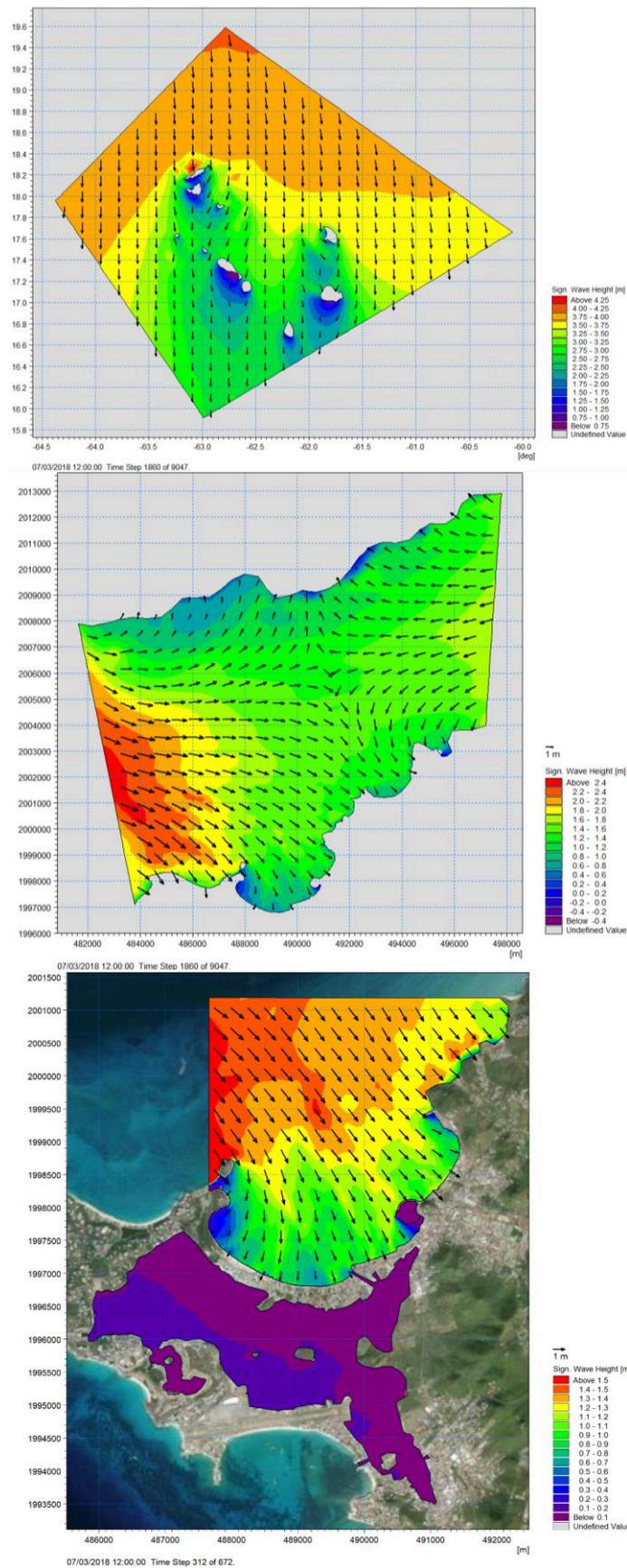


Figure 2.4 Chaîne de modélisation mise en œuvre : modèle régional (haut), modèle du Canal d'Anguilla (milieu), modèle de la baie de Galisbay (bas).

3 Modélisation de la propagation des vagues à l'échelle régionale

Le modèle régional de propagation des vagues autour de Saint-Martin a été construit avec le logiciel MIKE 21 SW (Spectral Waves) décrit en Section 2.1.1. Une période de 11 années, de janvier 2010 à décembre 2020, a été simulée. Les sorties du modèle (les paramètres de vagues) sont sauveés à un pas de temps horaire sur l'ensemble du domaine.

La construction, la paramétrisation et la validation de ce modèle sont décrits dans les rapports suivants, réalisés dans le cadre du Dossier d'Autorisation Environnementale Unique du dragage et de l'extension du port de commerce de Galisbay.

- « Phase 2A : Elaboration d'un modèle de courantologie générale » (Réf. /1/)
- « Phase 5A : Validation des modèles hydrodynamiques avec les mesures de 2022 » (Réf. /2/)

Pour rappel, l'emprise, la bathymétrie interpolée et le maillage du modèle régional de propagation des vagues de Saint-Martin sont présentés en Figure 3.1 et Figure 3.2. La résolution horizontale du maillage varie d'environ 4 km au large à environ 250 m autour d'Anguilla et de Saint-Martin, et donc dans le Canal d'Anguilla.

La rose des vagues 2010 – 2020 extraite au nord-est de Saint-Martin est rappelée en Figure 3.3, ainsi que deux champs de vagues (Figure 3.4) associés à des événements typiques du secteur, d'Alizés (vagues d'est à nord-est) et de Northers (vagues du nord).

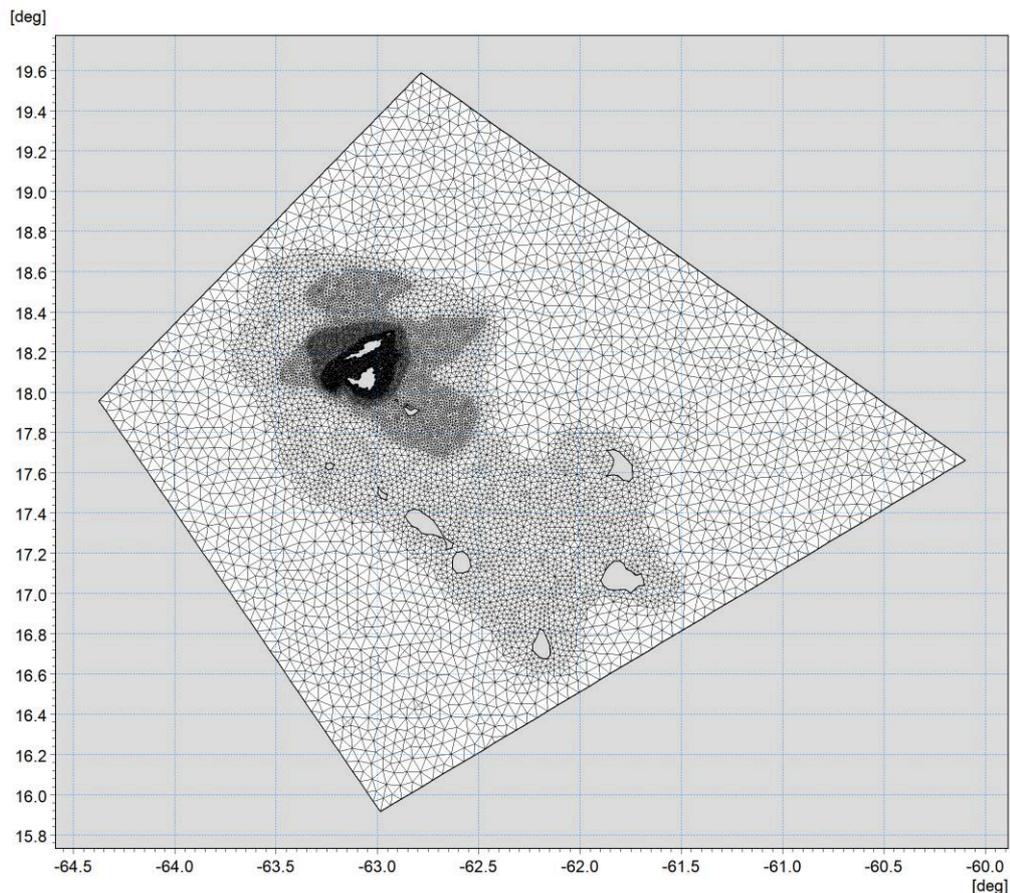


Figure 3.1 Emprise et maillage du modèle régional de vagues de Saint-Martin.

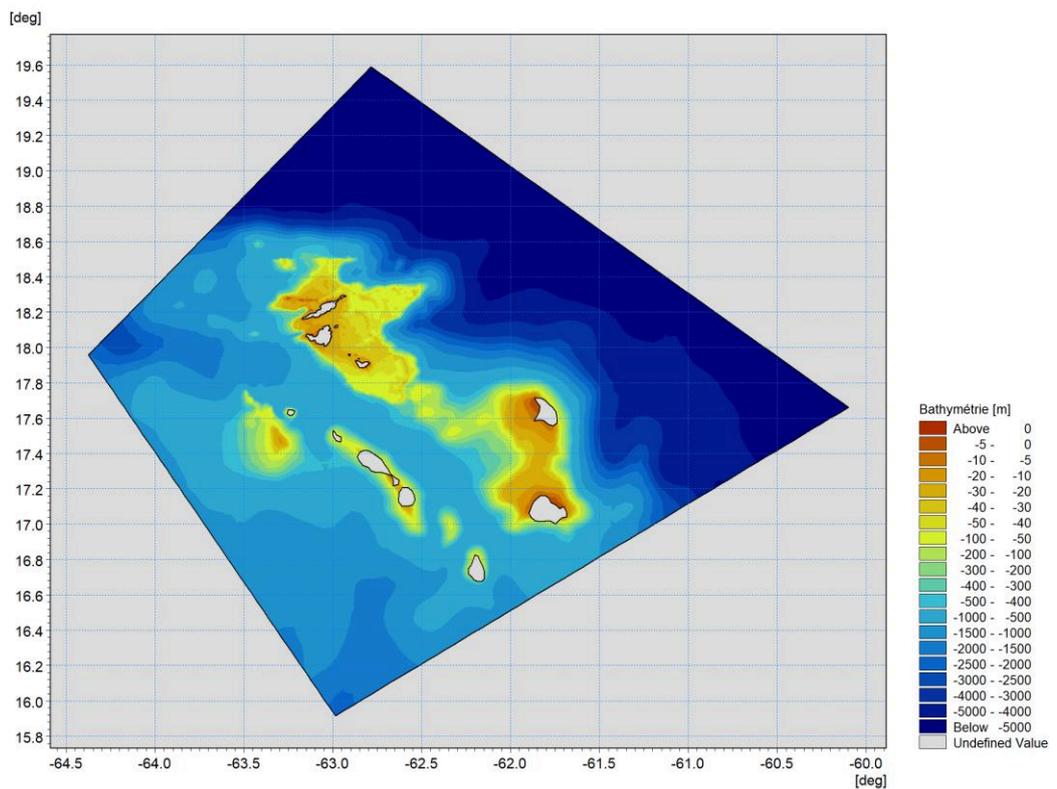


Figure 3.2 Bathymétrie interpolée du modèle régional de vagues de Saint-Martin.

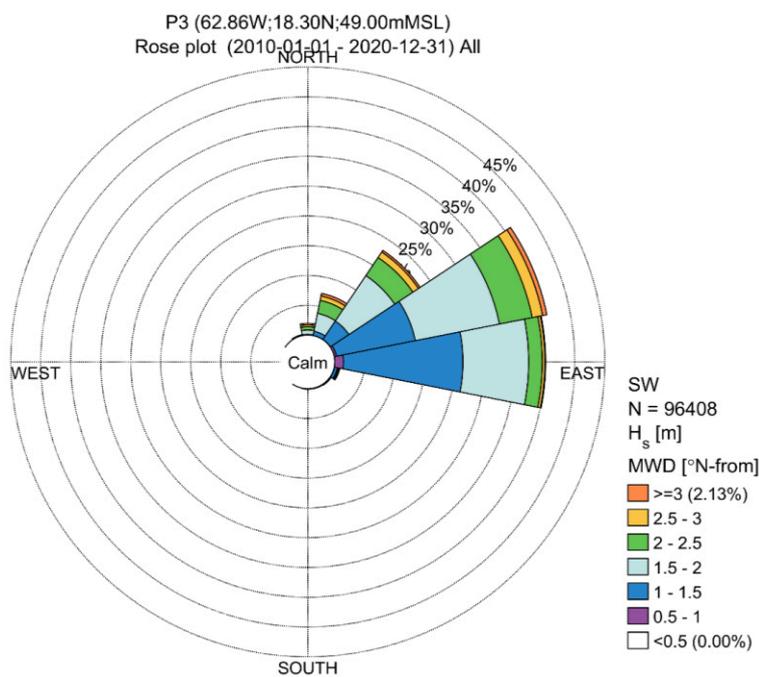


Figure 3.3 Roses des vagues modélisées au point P3-NE sur 2010-2020.

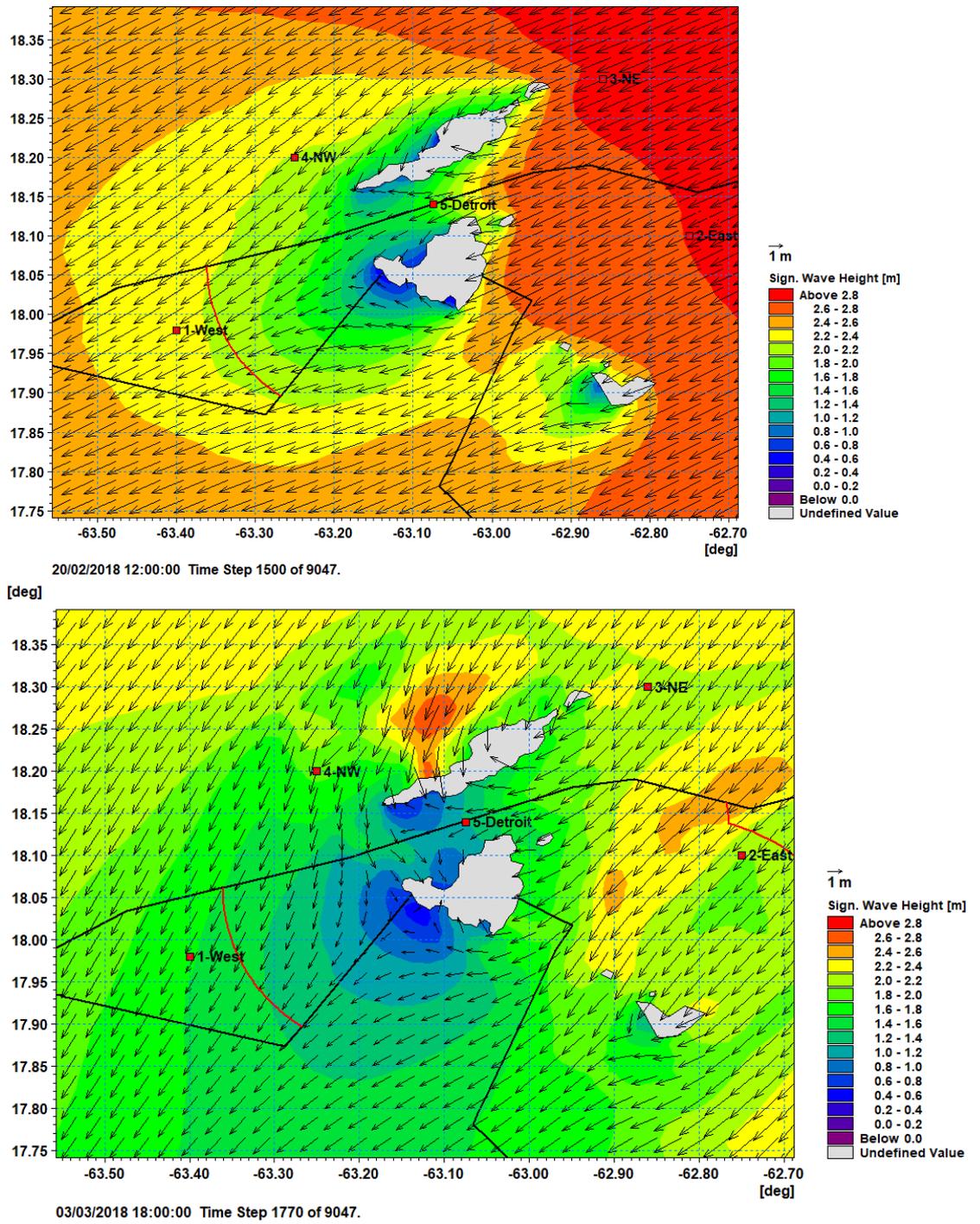


Figure 3.4 Champs de vagues se réfractant autour de Saint-Martin et Anguilla : Alizés de nord-est le 20/02/2018 (haut) et Northers le 03/03/2018 (bas).

4 Modélisation de la propagation des vagues dans le Canal d'Anguilla

4.1 Emprise et maillage du modèle de vagues du Canal d'Anguilla

L'emprise, la bathymétrie interpolée et le maillage du modèle de propagation des vagues du canal d'Anguilla sont présentés en Figure 4.1.

La résolution horizontale du maillage varie d'environ 200 m au large à environ 40 m dans la baie et 20 m dans la zone du projet.

Les données bathymétriques utilisées pour décrire la bathymétrie de la baie sont les suivantes :

- Le MNT bathymétrique de façade de Saint-Martin et Saint-Barthélémy (SHOM, 2018)
- Le Litto3D de Saint-Martin (SHOM, 2019).

Ces données ont été décrites en Réf. /3/.

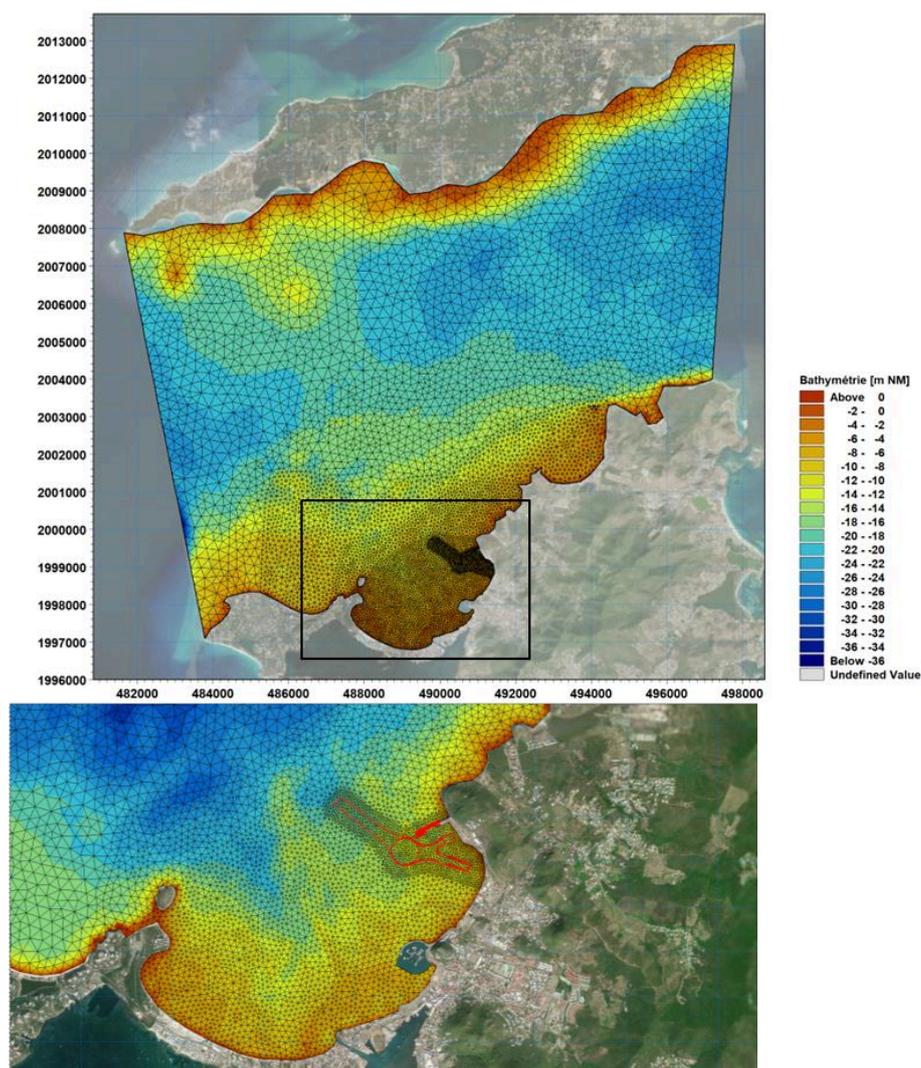


Figure 4.1 Emprise, bathymétrie interpolée et maillage du modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay. Détails des plages de Sandy Ground et Galisbay.

4.2 Les forçages du modèle de vagues

4.2.1 Le forçage météorologique

Le modèle de propagation des vagues du Canal d'Anguilla est forcé par le vent de la base de données opérationnelle du Climate Forecast System CFS¹, produit et mis à disposition par le National Centre for Environmental Prediction (NCEP). CFS est un système global haute résolution couplé « atmosphère-océan-terre-glace de mer ». Le modèle atmosphérique utilisé dans ce système complexe est le modèle GFS.

Les données de vitesse et de direction du vent à 10 m utilisées ici sont disponibles à la résolution de 0,2° (~22 km).

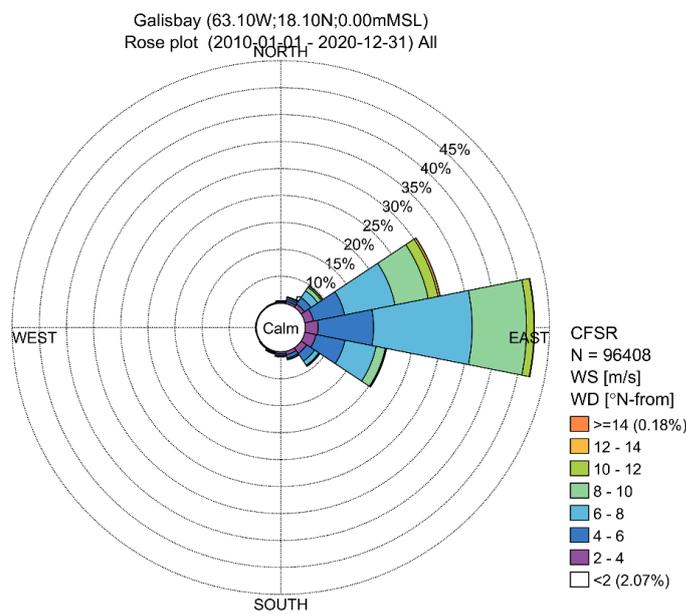


Figure 4.2 Rose des vents CFS 2010-2020 à Saint-Martin.

¹ Saha, S.; Moorthi, S. & Pan, H.L. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, American Meteorological Society, 1015-1057.

4.2.2 Les niveaux marins

La variabilité spatiale et temporelle des niveaux marins au sein du domaine modélisé a été prise en compte dans le modèle de propagation des vagues du Canal d'Anguilla, à partir des résultats de modélisation du modèle hydrodynamique régional 3D de Saint-Martin construit dans le cadre de l'étude Réf. /1/ (Figure 4.3).

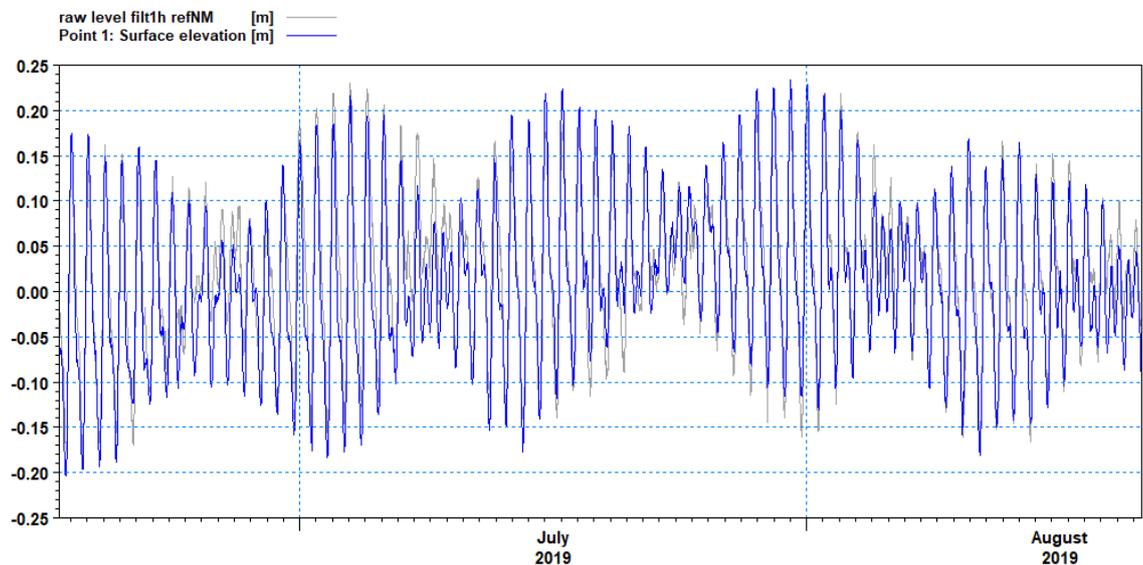


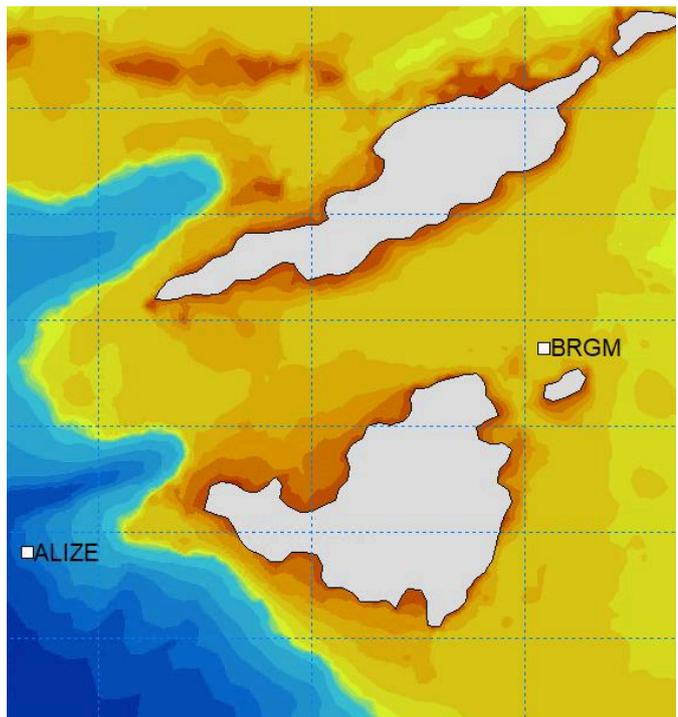
Figure 4.3 Niveaux d'eau (en m par rapport au niveau moyen) modélisés (en bleu) et mesurés au marégraphe de Saint-Martin (en gris) en été 2019 (Réf. /1/).

4.2.3 Les conditions de vagues aux limites du modèles

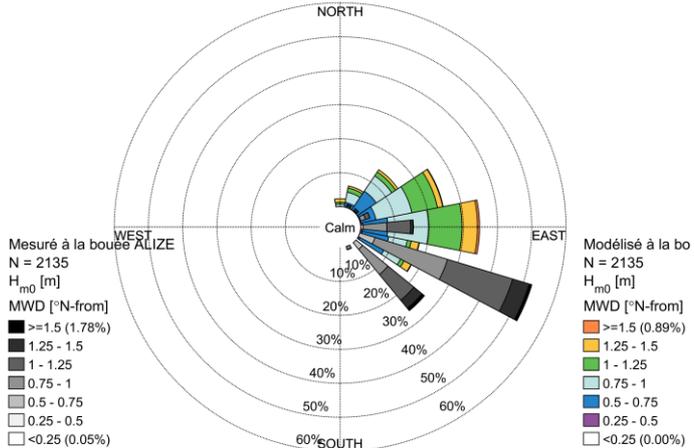
Les caractéristiques des vagues (hauteur significative, période pic, direction moyenne, étalement directionnel) aux frontières du modèle du Canal d'Anguilla ont été extraites du modèle régional de propagation des vagues de Saint-Martin (Section 3).

A noter que, au moment de la construction du modèle de propagation des vagues du Canal d'Anguilla, les comparaisons entre les caractéristiques des vagues mesurées aux stations ALIZE/B2 et BRGM (respectivement situées à l'ouest et à l'est de Saint-Martin) disponibles en temps réel et modélisées par le modèle régional de propagation des vagues, avaient mis en évidence un décalage dans les directions des vagues provenant du secteur est ($[0^{\circ}\text{N} - 180^{\circ}\text{N}]$) de $14,7^{\circ}$ en moyenne, le modèle ayant tendance à modéliser des vagues davantage orientées nord-nord-est que les mesures (davantage orientées est-sud-est). Ces comparaisons sont détaillées en Réf. /2/.

Les différents tests de sensibilité réalisés (forçage vent, résolution du maillage, ...) n'ayant pas permis d'apporter d'améliorations significatives sur les directions modélisées, **il a été décidé de « corriger » ce biais sur les directions en décalant de $14,7^{\circ}$ vers le sud les directions de vagues provenant du secteur est ($[0^{\circ}\text{N} - 180^{\circ}\text{N}]$) aux frontières du modèle d'Anguilla.**



ALIZE (63.23W;18.04N;630.00mMSL)
Dual rose plot (2022-04-28 - 2022-07-29; 1h)



BRGM (62.99W;18.14N;35.00mMSL)
Dual rose plot (2022-04-15 - 2022-07-29; 1h)

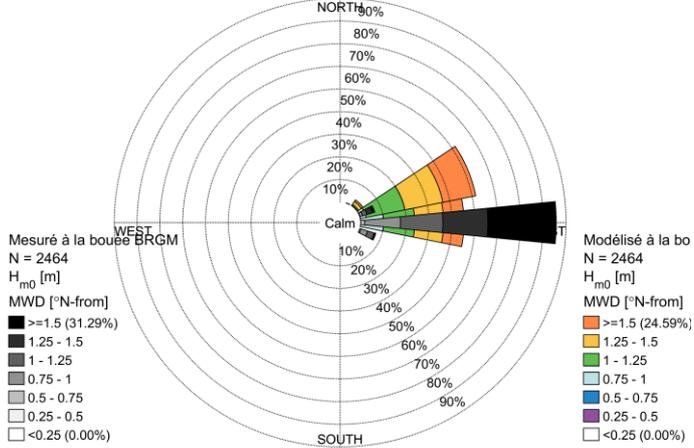


Figure 4.4 Roses des vagues mesurées (en grisé) et modélisées (en couleur) en B2 (ALIZE) et BRGM (Réf. /2/).

4.3 Paramétrisation du modèle de vagues

Le Tableau 4.1 résume les caractéristiques de la configuration et la paramétrisation du modèle de propagation des vagues du Canal d'Anguilla.

Tableau 4.1 Paramétrisation du modèle de vagues MIKE 21 SW du Canal d'Anguilla.

Paramètre	Paramétrisation
Résolution du maillage	Maillage flexible de résolution variable, de 200 m au large jusqu'à 20 m sur la zone du projet
Période simulée	01/01/2011 – 01/01/2021 (10 ans)
Équations	Formulation spectrale complète, formulation temporelle quasi-stationnaire
Discretisations fréquentielle et spectrale	25 fréquences avec un facteur d'incrément logarithmique de 1,15 et une fréquence minimale de 0,04 Hz (i. e. périodes de 1 à 25 s) 36 directions (résolution 10°)
Niveaux marins	Extraits du modèle hydrodynamique 3D régional de Saint-Martin
Conditions de courant	Non incluses
Transferts d'énergie	Quadruplet-wave interaction incluses Triad-wave interaction non-incluses
Forçage en vent	Base de données CFSR Interaction air-mer : formulation couplée Cap : 0.06 Paramètre de Charnock : 0.01
Déferlement	Inclus. $\gamma = 0.8$, $\alpha = 0.1$.
Frottement au fond	Constante de Nikuradse, $k_n = 0.01$ m.
Moutonnement	Formulation (Bidlot, Janssen, & Abdalla, 2007) : $C_{dis} = 2.1$, $\Delta C_{dis} = 0.6$
Conditions aux limites	Paramètres de vagues intégrés variables dans le temps et dans l'espace extraits du modèle de propagation des vagues régional de Saint-Martin, Directions des vagues de secteur est décalées de +14,7°.

4.4 Validation du modèle de vagues

4.4.1 Validation du modèle du Canal d'Anguilla exploité dans le cadre de cette étude

Le modèle de propagation des vagues du Canal d'Anguilla n'a pu être validé qu'a posteriori de son exploitation pour la présente étude, en raison des contraintes de planning du projet.

Les mesures de vagues de la campagne de Nortekmed réalisée d'avril à septembre 2022 en A1 et A2 (Figure 4.5) ont permis de vérifier la qualité du modèle.

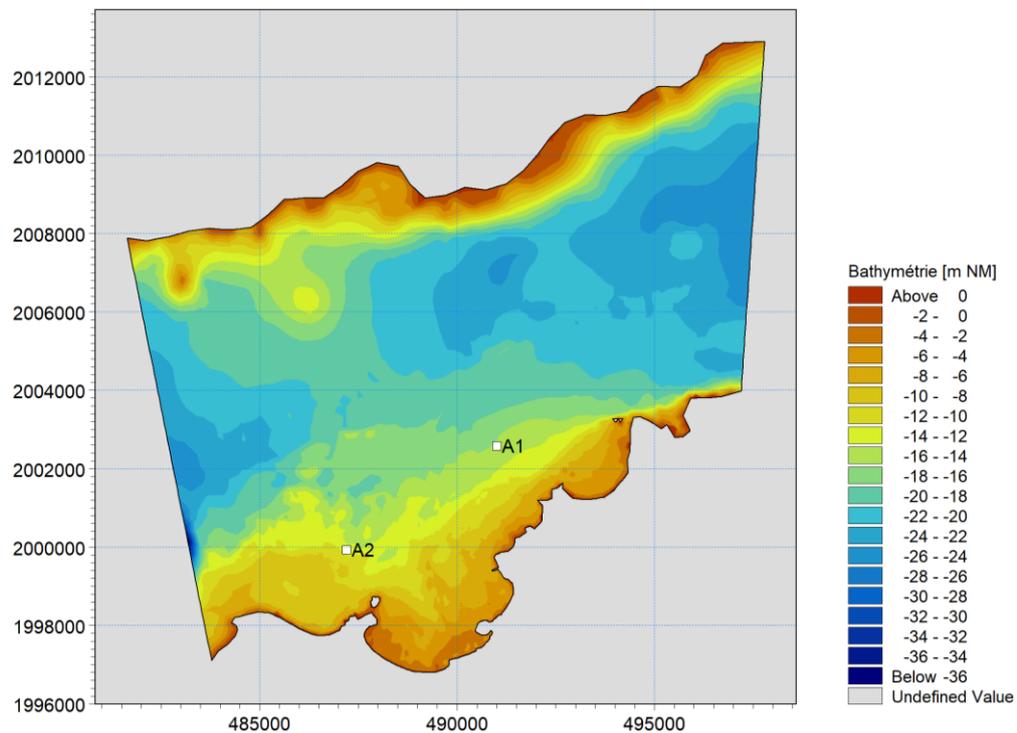


Figure 4.5 Position des stations de mesures A1 et A2 de la campagne Nortekmed d'avril à septembre 2022.

La Figure 4.6 et la Figure 4.7 illustrent cette comparaison modèle-mesures en A1 et A2 respectivement.

Ces figures mettent en évidence la bonne reproduction de la succession des événements par le modèle : chaque période d'intensification des hauteurs de vagues dans les mesures correspond également à une période de hauteurs de vagues plus élevées dans le modèle. Elles mettent également en évidence une légère tendance à la sous-estimation des hauteurs significatives par le modèle pouvant atteindre 20%, bien que leurs ordres de grandeur restent généralement corrects. Un écart entre les directions mesurées et modélisées est à nouveau constaté (de 13° en A1 et 11° en A2 en moyenne), le modèle présentant des directions moyennes de provenance légèrement plus nord-est que les mesures (davantage est-nord-est). Ce biais est introduit par la correction des conditions au large issues du modèle régional (+14.7°), les résultats dans le canal sont en effet meilleurs sans cette correction (voir section 4.4.2).

Des tests de sensibilité ont montré qu'un décalage de 15° dans les directions à l'extérieur de la baie n'a presque pas d'impact sur les directions en pied de plage en fond de baie (<1°) car les effets de réfraction des vagues sur les petits fonds sont prépondérants. La

sous-estimation des hauteurs de vagues aura pour conséquence une légère sous-estimation des capacités de transport et donc de la vitesse des changements morphodynamiques, a priori peu significative au regard des incertitudes par ailleurs inhérentes à la modélisation du transport sédimentaire.

Le modèle de propagation des vagues du Canal d'Anguilla paraît donc tout à fait adapté comme condition de forçage d'un modèle morphodynamique local de la baie.

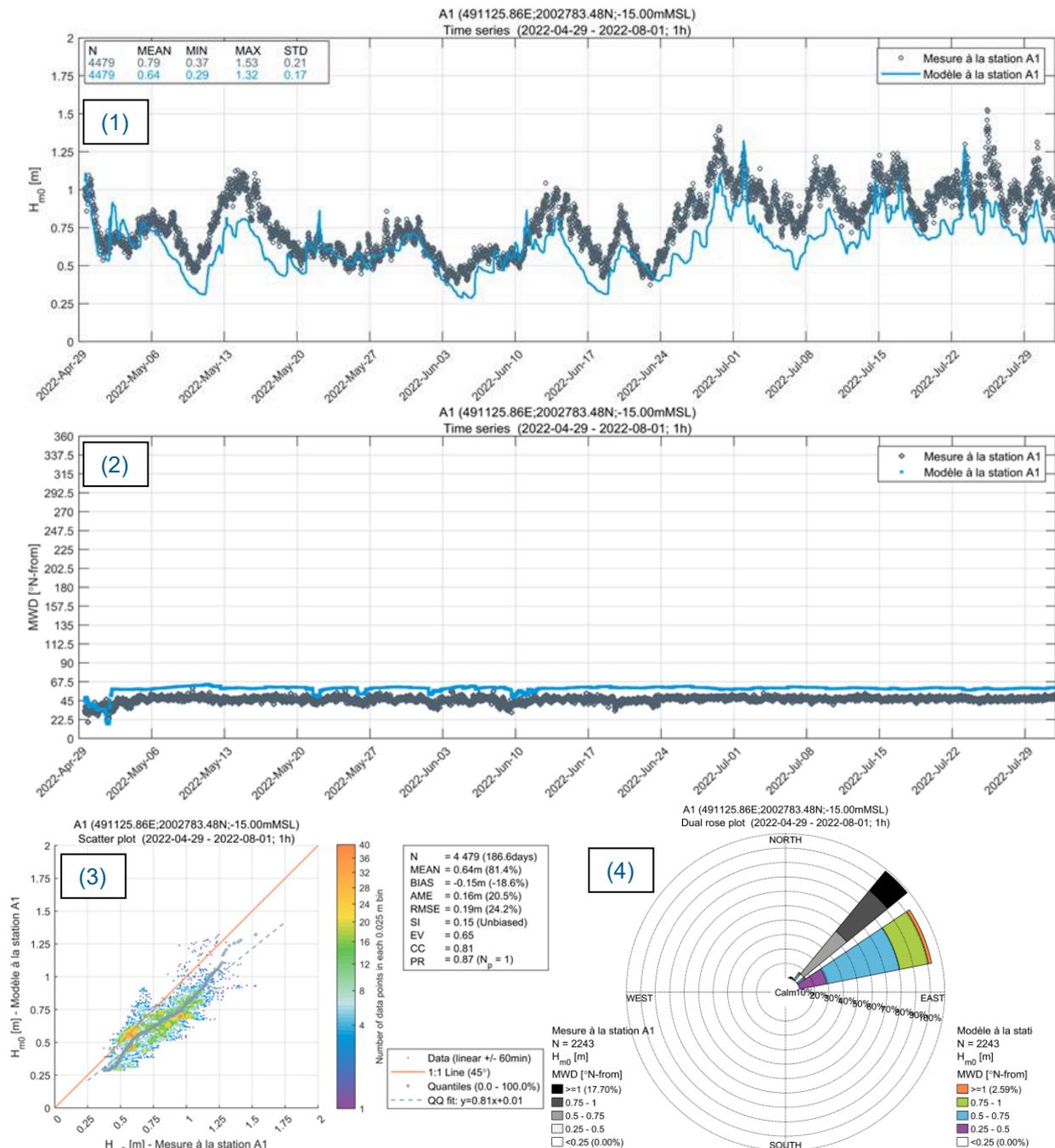


Figure 4.6 Comparisons modèle-mesures en A1 : séries temporelles des hauteurs significatives (1) et des directions moyennes d'incidence (2) mesurées (en gris) et modélisées (en bleu), diagramme de dispersion des hauteurs significatives (3) mesurées versus modélisées, et roses des vagues (4) mesurées (en gris) et modélisées (en couleur).

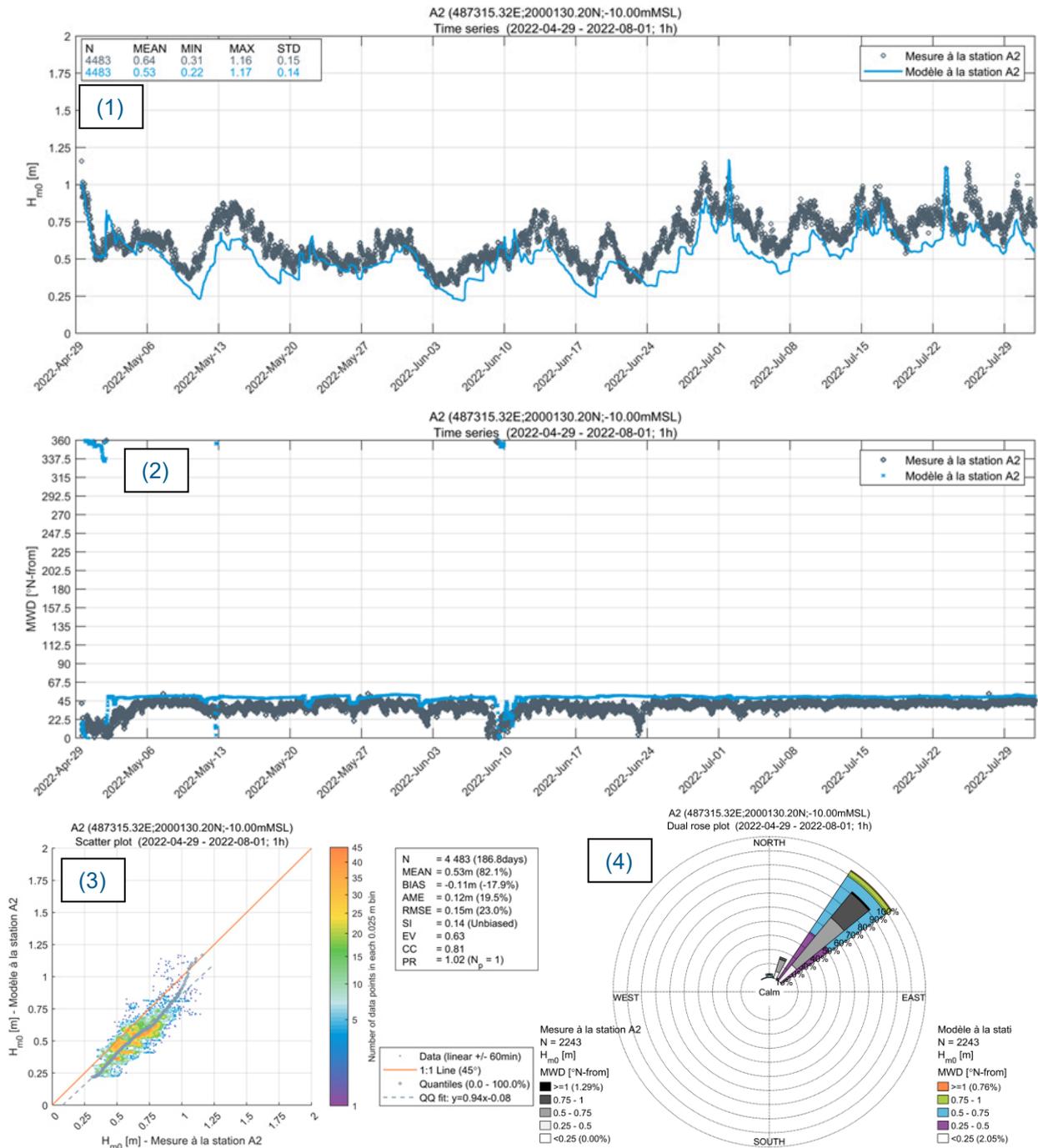


Figure 4.7 Comparisons modèle-mesures en A2 : séries temporelles des hauteurs significatives (1) et des directions moyennes d'incidence (2) mesurées (en gris) et modélisées (en bleu), diagramme de dispersion des hauteurs significatives (3) mesurées versus modélisées, et roses des vagues (4) mesurées (en gris) et modélisées (en couleur).

4.4.2 Comparaisons modèle-mesures sans décalage des directions des vagues de secteur est

Comme indiqué en Section 4.2.3, les comparaisons entre les caractéristiques des vagues mesurées aux stations ALIZE/B2 et BRGM et modélisées par le modèle régional de propagation des vagues de Saint-Martin avaient mis en évidence un décalage dans les directions des vagues provenant du secteur est ($[0^{\circ}\text{N} - 180^{\circ}\text{N}]$) de $14,7^{\circ}$ en moyenne. En l'absence de mesures en A1 et A2 au moment de la construction du modèle du Canal d'Anguilla il avait donc été décidé de « corriger » ce biais sur les directions en décalant de $14,7^{\circ}$ vers le sud les directions de vagues provenant du secteur est ($[0^{\circ}\text{N} - 180^{\circ}\text{N}]$) aux frontières du modèle du Canal d'Anguilla.

Lorsque les mesures en A1 et A2 ont été disponibles, le modèle du Canal d'Anguilla a également été testé sans ce décalage des directions des vagues aux frontières (extraction brute des caractéristiques des vagues extraites du modèle régional).

A titre indicatif, les comparaisons modèle-mesures en A1 et A2 pour cette configuration du modèle sont présentés ci-après en Figure 4.8 et en Figure 4.9.

Cette configuration du modèle présente de meilleurs résultats, essentiellement en termes de reproduction des hauteurs significatives, mais également en ce qui concerne les directions des vagues. Un décalage entre les directions modélisées et mesurées persiste néanmoins, de l'ordre de 10° en A1 et 9° en A2.

On rappelle que le modèle de propagation des vagues du Canal d'Anguilla n'a pu être validé qu'a posteriori de son exploitation pour la présente étude, en raison des contraintes de planning du projet. C'est donc le modèle présenté en Section 4.4.1 qui a été exploité dans le cadre de la présente étude.

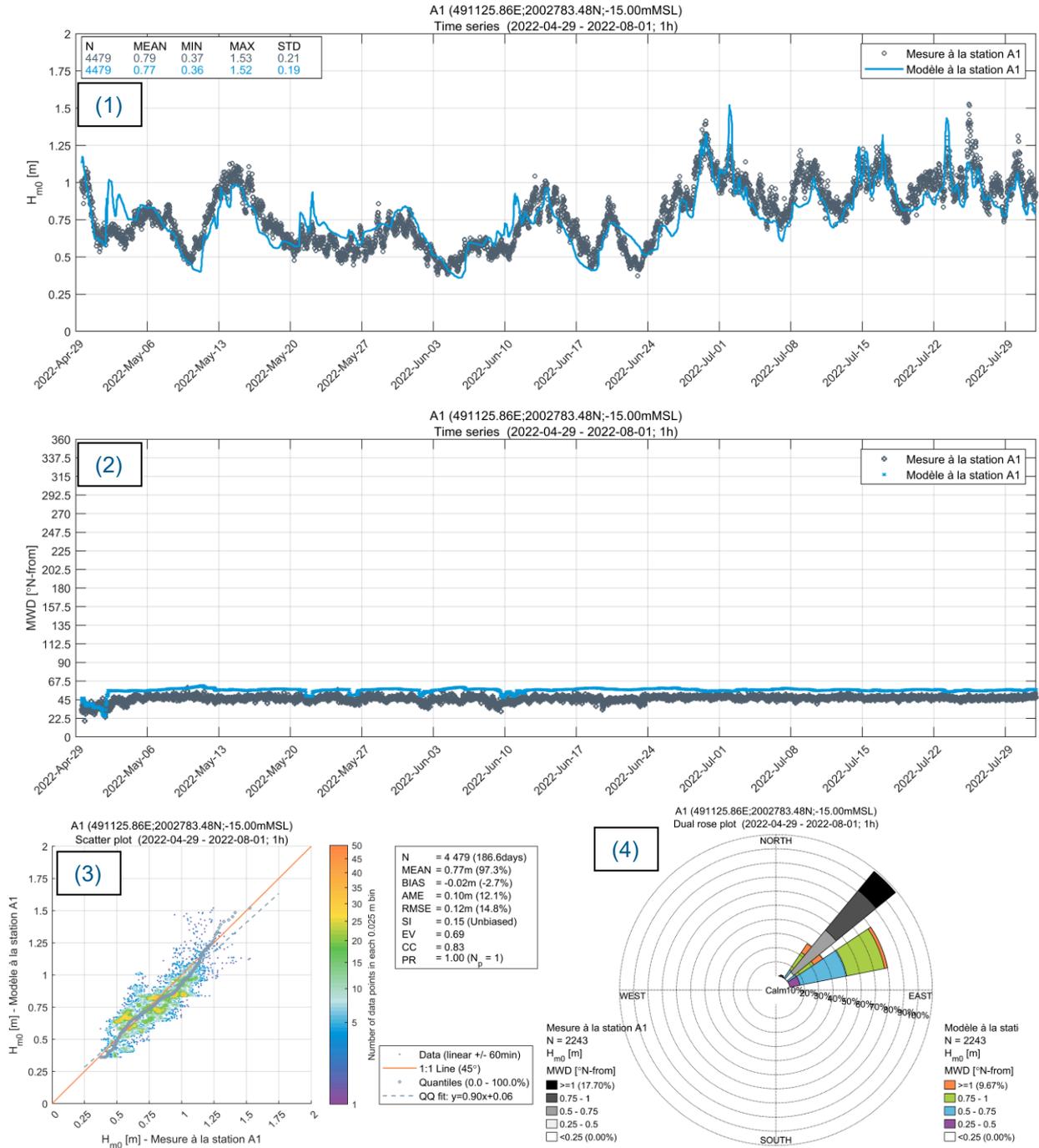


Figure 4.8 Comparisons modèle-mesures en A1 sans décalage des directions de 14,7 : séries temporelles des hauteurs significatives (1) et des directions moyennes d'incidence (2) mesurées (en gris) et modélisées (en bleu), diagramme de dispersion des hauteurs significatives (3) mesurées versus modélisées, et roses des vagues (4) mesurées (en gris) et modélisées (en couleur).

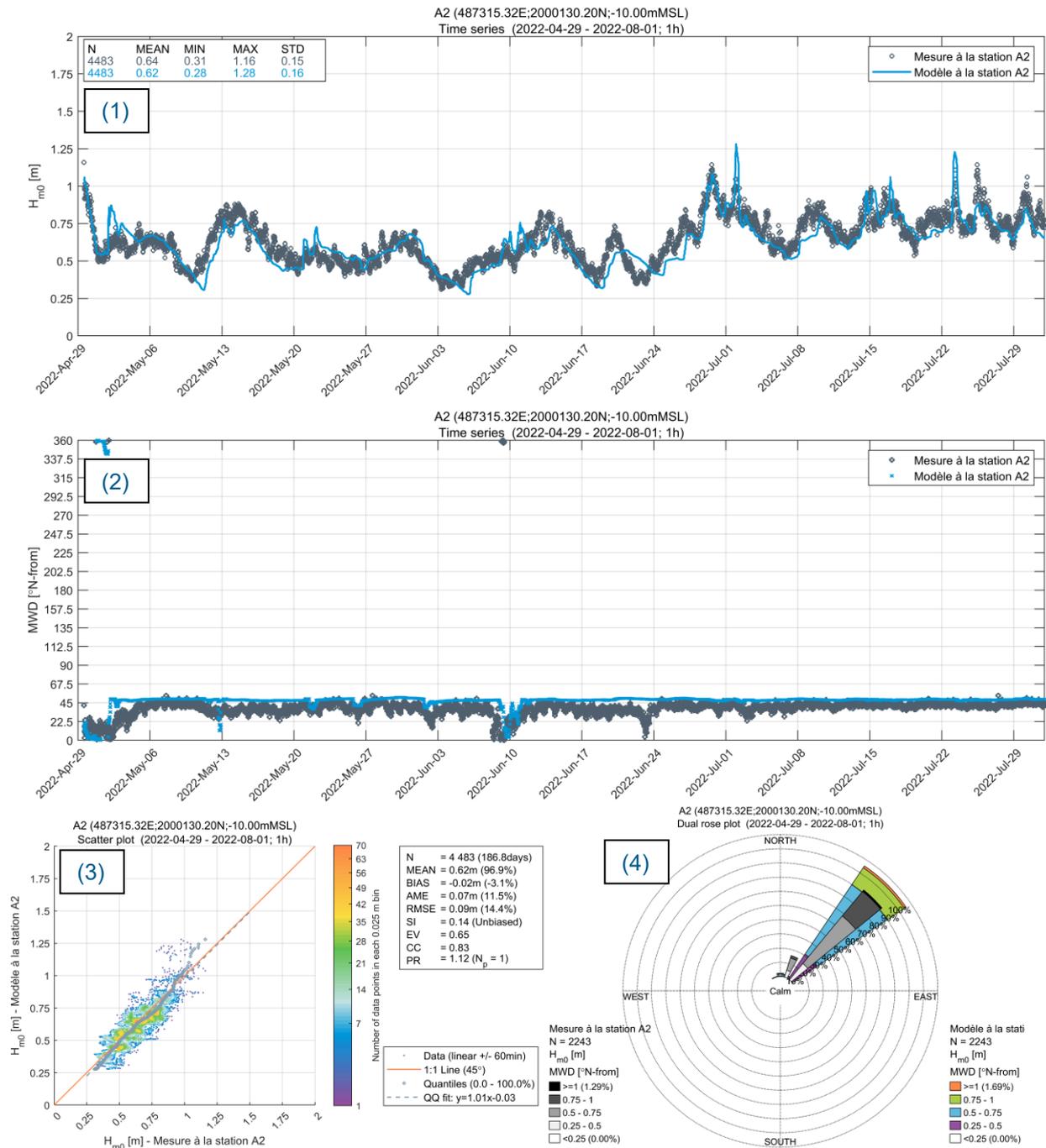


Figure 4.9 Comparaisons modèle-mesures en A2 sans décalage des directions de 14,7° : séries temporelles des hauteurs significatives (1) et des directions moyennes d'incidence (2) mesurées (en gris) et modélisées (en bleu), diagramme de dispersion des hauteurs significatives (3) mesurées versus modélisées, et roses des vagues (4) mesurées (en gris) et modélisées (en couleur).

4.5 Résultats de modélisation

4.5.1 Climat de vagues dans la baie

La constitution d'une base de données des caractéristiques des vagues sur 10 ans (2011 – 2021) à l'aide du modèle du Canal d'Anguilla permet de caractériser le climat de vagues dans la baie de Galisbay.

Une série temporelle des hauteurs significatives des vagues ainsi qu'une rose des vagues extraites en un point situé à l'entrée de la baie de Galisbay sont présentées en Figure 4.10 et Figure 4.11. Le point d'extraction, de coordonnées UTM20N (489500, 2000000) est localisé sur les champs de vagues illustrant des conditions de Northers, Alizé et Irma de la Figure 4.13 à la Figure 4.14.

Il faut toutefois noter que la résolution de la donnée de forçage atmosphérique CFSR n'est pas suffisante pour permettre de représenter parfaitement l'intensité réelle de l'ouragan Irma : cet événement est lissé par le modèle.

Sur la période 2011 – 2021, 50% des vagues sont inférieures à 50 cm à l'entrée de la baie.

De plus, 50% des vagues proviennent du nord-est. Les événements provenant du nord au nord-ouest sont plus rares, mais les hauteurs de vagues les plus élevées proviennent régulièrement de ce secteur, comme l'illustrent les caractéristiques des 7 événements associés aux plus grandes hauteurs de vagues au cours de cette période :

- 06/09/2017 (Irma) : $H_{m0} = 3,8$ m MWD = 350°N
- 05/03/2018 : $H_{m0} = 2,2$ m MWD = 300°N
- 5 événements : $H_{m0} = 1,7$ m MWD = 295°N, 330°N, 32°N, 33°N, 36°N

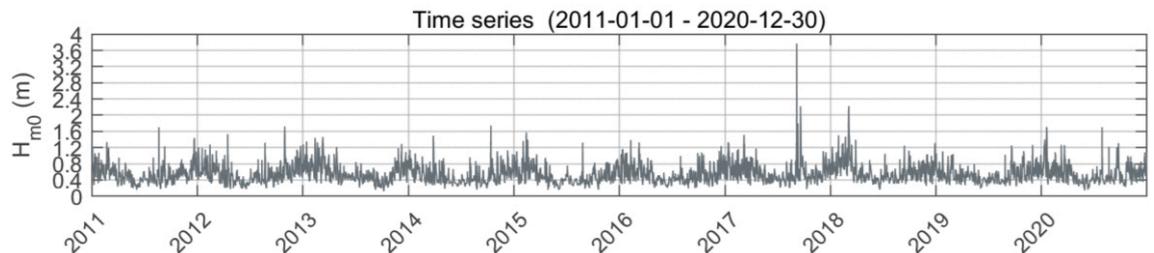


Figure 4.10 Série temporelle des hauteurs de vagues 2011 – 2021 à l'entrée de la baie.

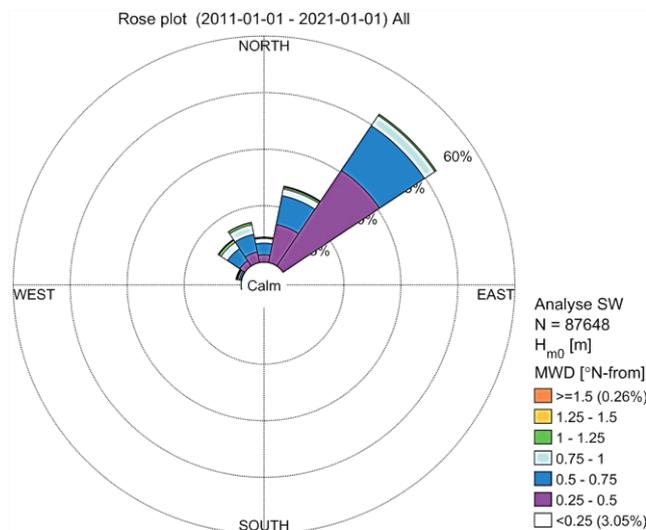


Figure 4.11 Rose des vagues 2011 – 2021 à l'entrée de la baie de Galisbay.

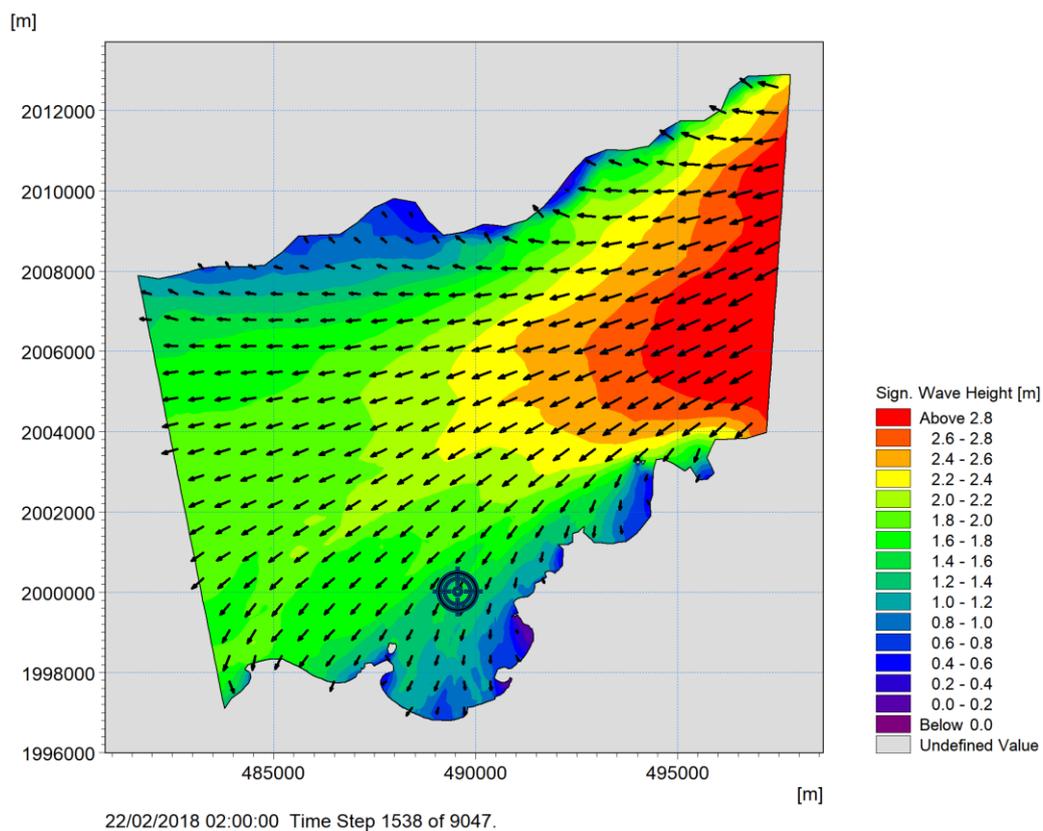


Figure 4.12 Champ de propagation des vagues le 22/02/2018 02h UTC (Alizé).

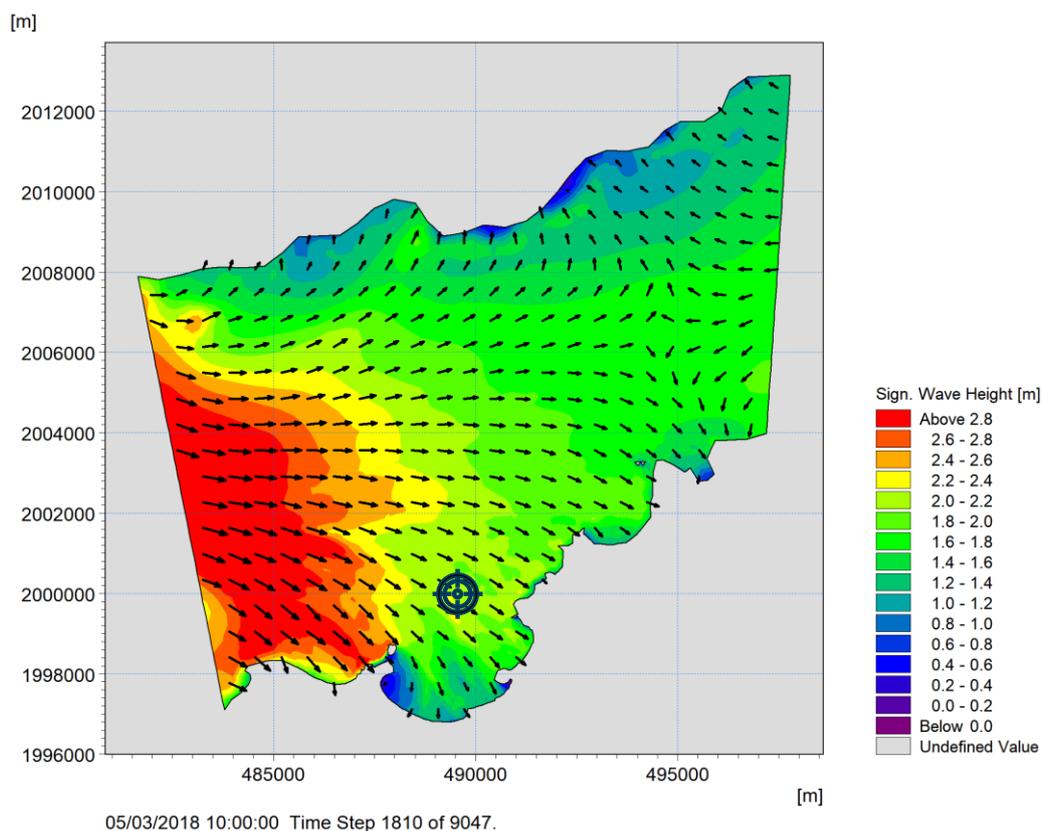


Figure 4.13 Champ de propagation des vagues le 05/03/2018 10h UTC (Northers).

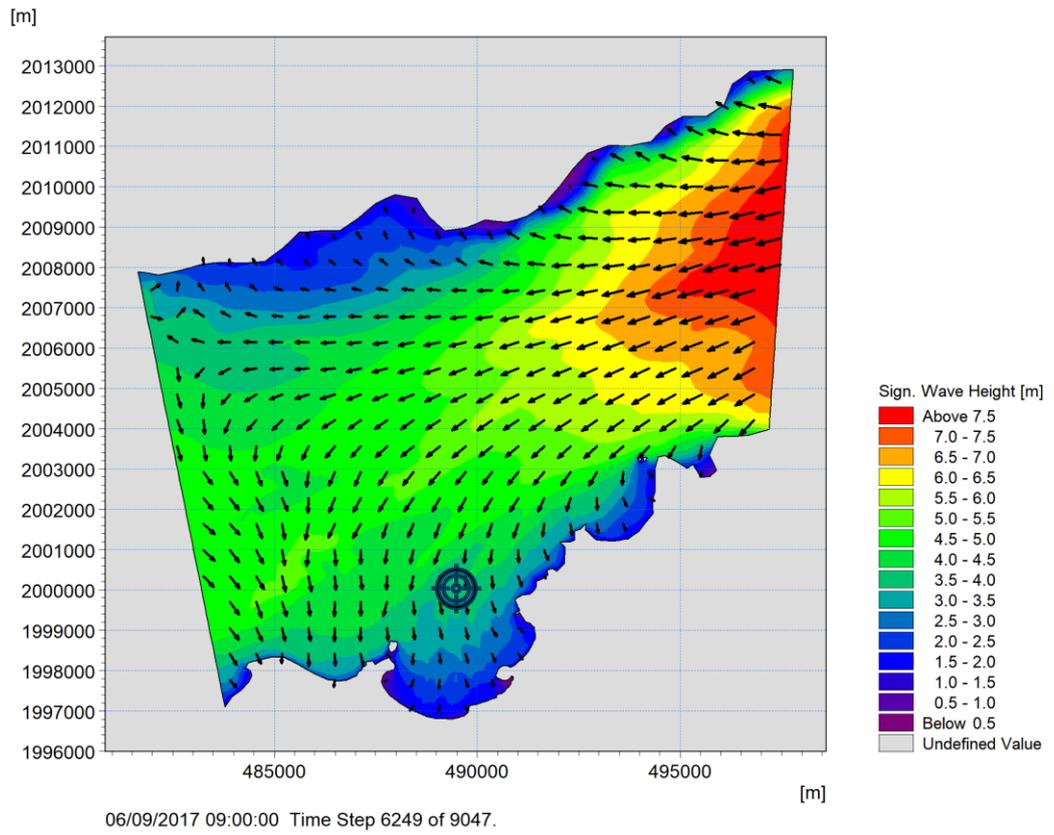


Figure 4.14 Champ de propagation des vagues le 06/09/2017 09h UTC (Irma).

4.5.2 Impact du projet sur la propagation des vagues dans la baie

L'impact du projet sur la propagation des vagues dans la baie a été évalué en réalisant les simulations 2011 – 2021 à l'aide du même modèle de propagation des vagues, intégrant cette fois la bathymétrie draguée ainsi que le plan masse du projet (Figure 4.15).

L'impact du projet sur la propagation des vagues dans la baie a ensuite été déterminé de façon statistique, en calculant la hauteur de vagues moyenne en tout point de la baie sur la période 2011 – 2021 en configuration actuelle et en configuration projet, et la différence relative (en pourcentage) entre les deux (Figure 4.16).

Cette analyse met en évidence que le projet va réduire significativement les hauteurs de vagues dans la Baie de la Potence, jusqu'à 60% sur la plage située la plus à l'est, et entre 10% et 20% sur la plage de Galisbay où un rechargement est envisagé. La réfraction des vagues sur les gradients bathymétriques induits par le dragage du chenal d'accès au port induit une focalisation de l'énergie de la houle sur la partie est de la plage de Sandy Ground, mais l'augmentation des hauteurs de vagues moyennes de 2% est très peu significative.

Cette même analyse a été réalisée pour un événement donné, en comparant un champ de vagues instantané au cours de l'ouragan Irma (Figure 4.17). Pour un événement extrême de ce type, le projet tend à augmenter les hauteurs de vagues jusqu'à 5% sur la partie sud de la plage de Galisbay ainsi que sur la digue de la Marina Fort Louis. Les hauteurs de vagues sont toujours réduites jusqu'à 60% à l'est de la Baie de la Potence.

L'impact du projet sur la dérive littorale est étudié en Section 5.2.6.

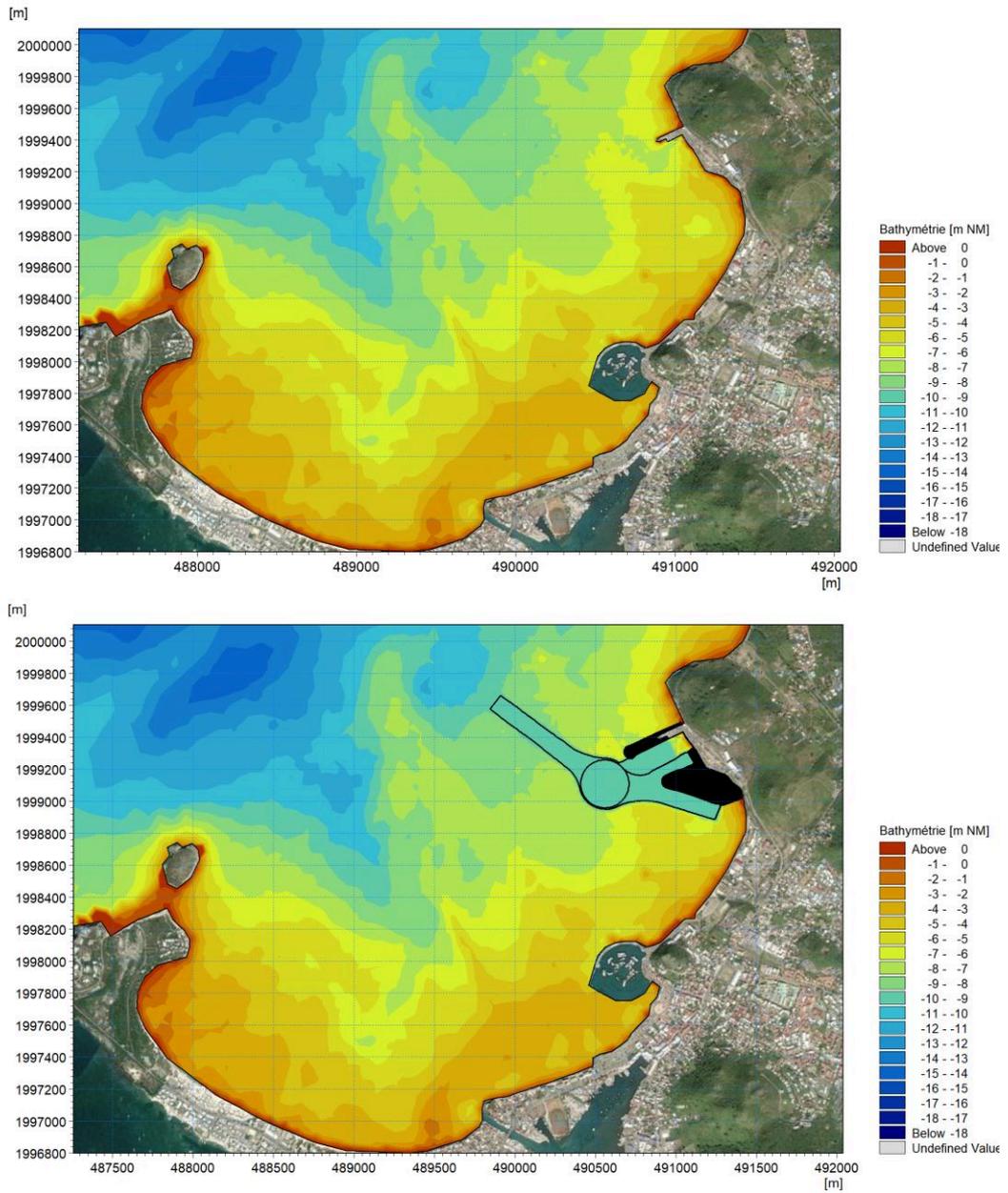


Figure 4.15 Configuration actuelle de la baie (haut) et configuration projet (bas).

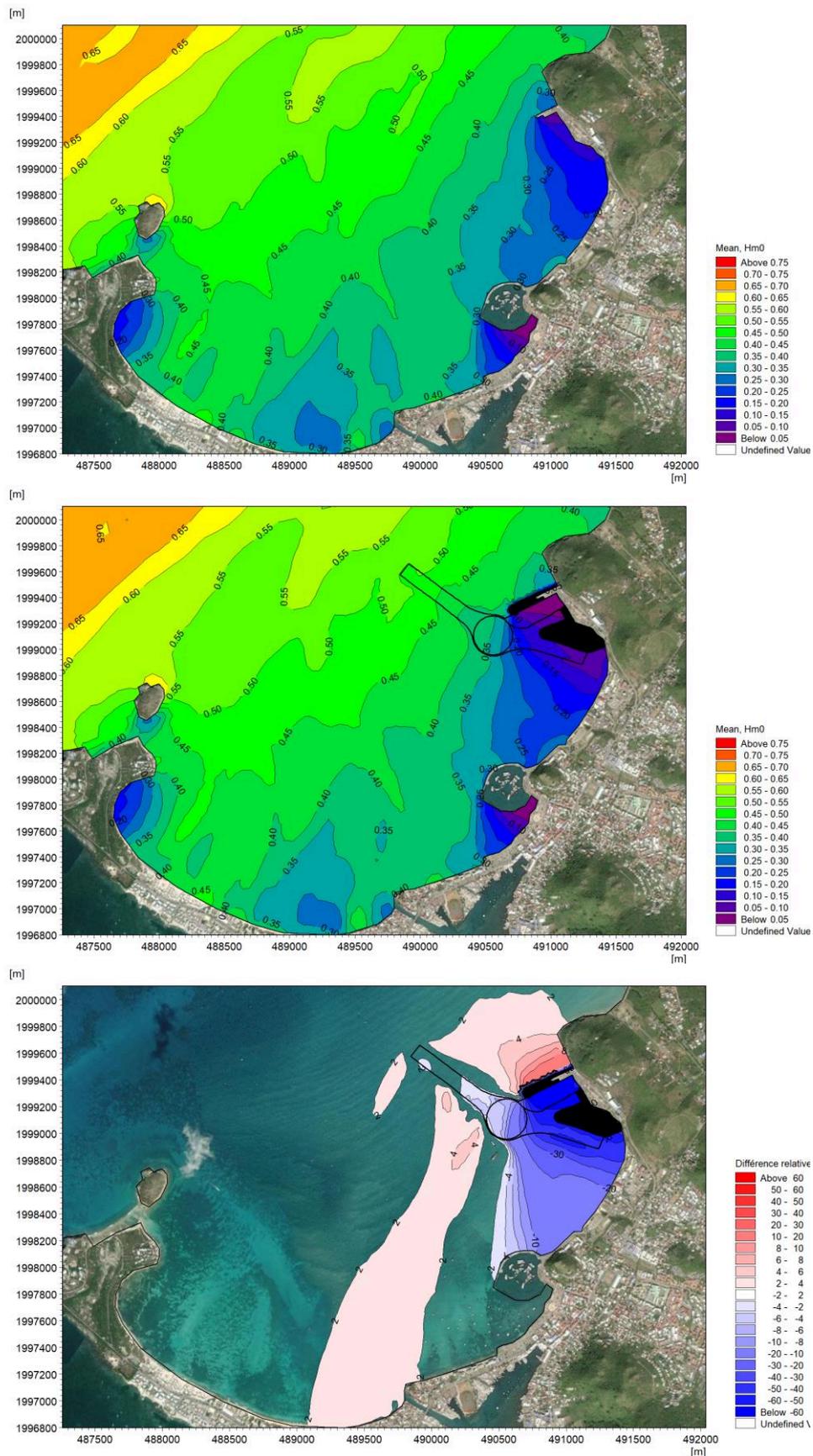


Figure 4.16 Champ des hauteurs de vagues moyennes sur la période 2011 – 2021, en configuration actuelle de la baie (haut), configuration projet (milieu), et différence relative en pourcentage (bas).

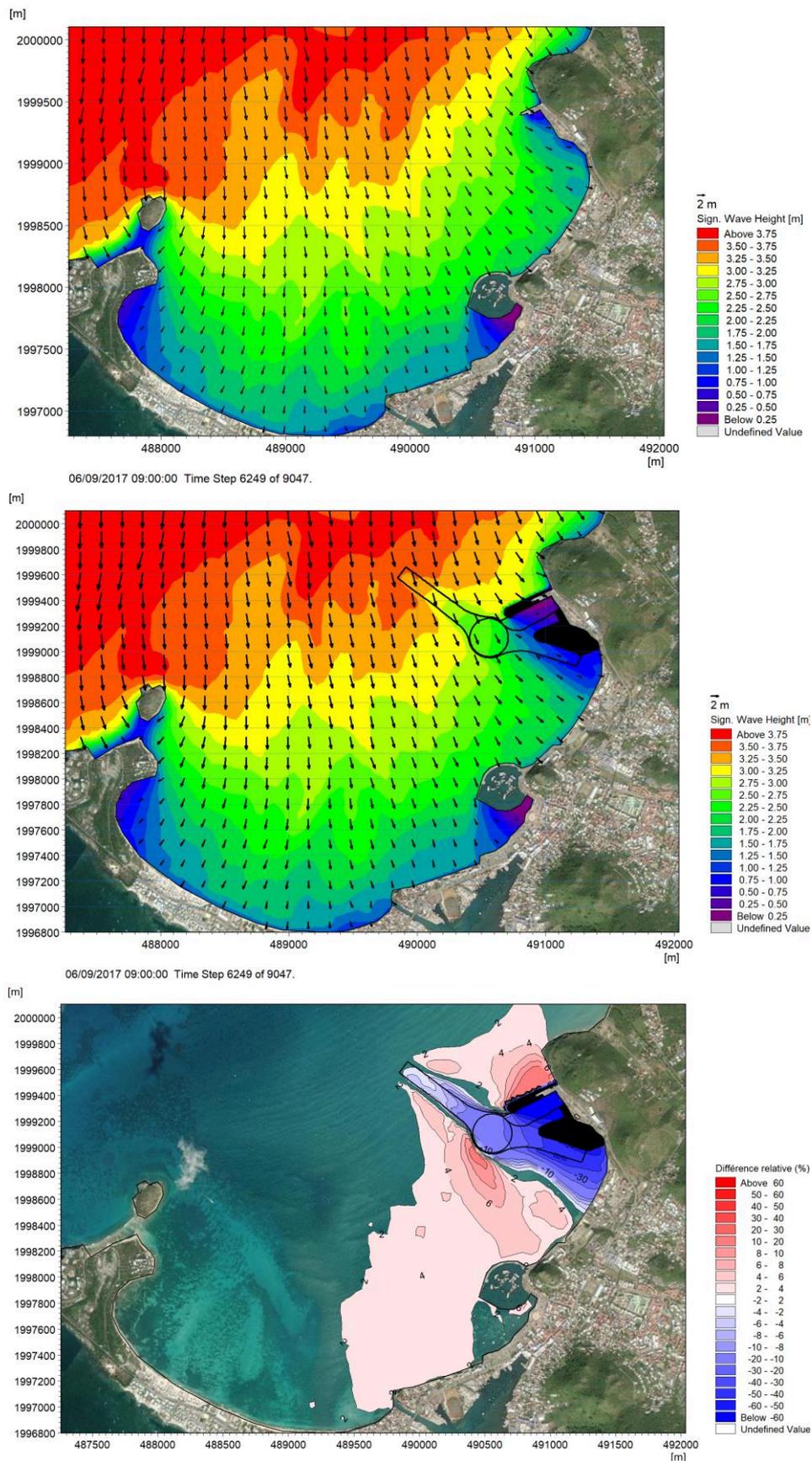


Figure 4.17 Champ de propagation des vagues le 06/09/2017 à 9h UTC pendant la tempête Irma en configuration actuelle de la baie (haut), configuration projet (milieu), et différence relative en pourcentage (bas).

5 Modélisation de la dérive littorale dans la baie de Galisbay

Cette étude est réalisée à partir d'un modèle 1D de dérive littorale, afin d'analyser le fonctionnement de la dynamique actuelle de la baie de Marigot puis d'estimer l'impact du projet d'extension du port sur la dérive littorale (en section 5.2.6).

5.1 Le modèle 1D de dérive littorale LITDRIFT

5.1.1 Hypothèses et incertitudes

Le module employé pour la détermination du transport sédimentaire est le module unidimensionnel LITDRIFT du modèle mathématique LITPACK développé par DHI. Le module LITDRIFT permet de calculer, le long d'un profil de plage donné, la transformation de la houle depuis le pied de profil jusqu'à la zone de déferlement, le courant de houle et le transport littoral associé.

Ce modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- La plage est considérée uniforme. Ainsi, les résultats de ce modèle ne sont pas valables sur les secteurs où la réfraction des vagues sur la bathymétrie du profil ne suffit pas à décrire des processus plus complexes qui nécessiteraient une approche bidimensionnelle pour être correctement représentés, par exemple à l'ouest immédiat de la passe de la lagune de Simpson Bay (effet d'abri du Morne Rond)
- Les apports de sédiments sont considérés infinis. Le modèle calcule ainsi une capacité de transport, qui est bien supérieure au transport effectif sur des linéaires pauvres en sédiments comme la plage de Galisbay ou l'est de Sandy Ground, essentiellement rocheuses.

Par ailleurs, les résultats doivent être analysés au regard des incertitudes suivantes :

- L'intensité du transport augmente avec la pente de la plage. Or, sur les plages Galisbay et Sandy Ground où se trouvent des beach rocks, la pente est gouvernée par les roches et non par le sable, et est plus raide que si la plage était sableuse, la capacité de transport à travers ces profils est donc surestimée.
- L'intensité du transport dépend également de l'orientation du profil par rapport à la direction incidente des vagues. Les profils sont extraits perpendiculairement au trait de côte, avec une incertitude de l'ordre de 5° à 10°, ce qui peut changer significativement l'intensité, voire la direction du transport (voir Section 5.2.4).
- La modélisation du transport sédimentaire en général reste associée à des incertitudes significatives. En fonction de la paramétrisation du modèle de transport sédimentaire, les capacités de transport peuvent varier d'un facteur 3 d'après les tests de sensibilité réalisés (approche empirique ou déterministe, avec ou sans rides de sable).

Les résultats de modélisation présentés dans cette section doivent donc être considérés comme des éléments suffisants pour mettre en évidence des tendances générales concernant la dérive littorale, et non comme une quantification précise de celle-ci.

5.1.2 Données d'entrée du modèle

Les données d'entrée du modèle sont : les profils de plage, les paramètres intégrés des vagues au pied de ces profils, les niveaux marins, et la granulométrie.

- Les profils de plage ont été extraits le long du littoral de la baie à partir du Litto3D de Saint-Martin (SHOM, 2019). Leur position est indiquée sur la Figure 5.1. Les profils sont extraits avec une résolution spatiale de 0,25 m.
- Les caractéristiques des vagues au pied de ces profils proviennent du modèle hindcast de la propagation des vagues dans le Canal d'Anguilla (Section 4).
- Les niveaux marins proviennent du modèle hindcast régional de la courantologie 3D développé dans le cadre de la Phase 2 de la présente étude (Réf. /1/).
- Les caractéristiques granulométriques retenues pour la paramétrisation du modèle LITDRIFT reposent sur les analyses granulométriques des sédiments des plages (Réf. /3/) : le diamètre médian (d_{50}) retenu est de 0,9 mm, et le coefficient de classement (grading coefficient, σ_g^2) est de 1,9.

Les résultats de modélisation de la dérive littorale sont présentés ci-après pour le profil 5500 (plage de Galisbay). L'ensemble des résultats pour chaque profil est présenté en Annexe A.

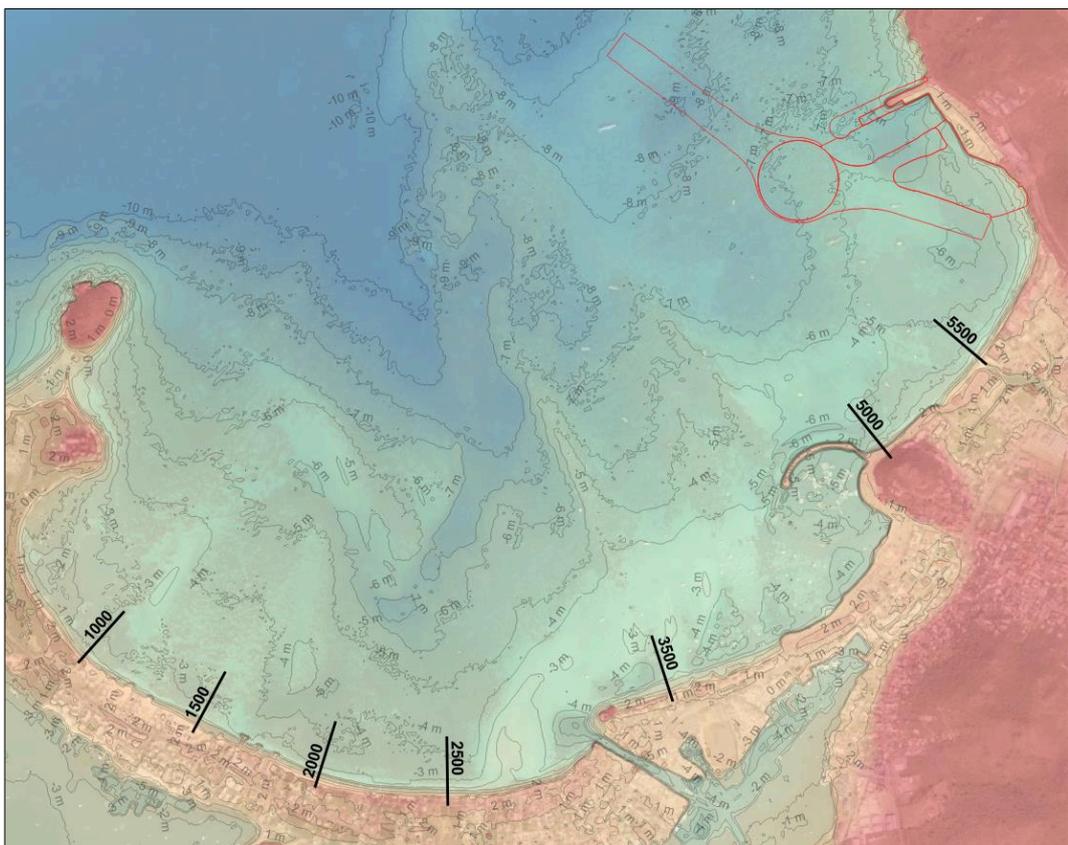


Figure 5.1 Emplacement des profils extraits pour la modélisation 1D du transport sédimentaire

² Le coefficient de classement caractérise l'étalement granulométrique et est défini de la manière suivante : $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$

5.2 Résultats de modélisation

5.2.1 Variabilité interannuelle

La Figure 5.2 présente la variabilité du transport littoral net et brut annuel sur la période 2011-2020 au niveau du profil 5500 (plage de Galisbay).

Par convention, un transport net négatif traduit un transport net dirigé vers la gauche en regardant vers la mer depuis la plage. Ainsi, en ce profil, le transport net est dirigé vers l'ouest et son intensité varie de 12 000 à 31 000 m³/an avec une moyenne d'environ 19 000 m³/an. Le transport brut varie de 15 000 à 33 000 m³/an avec une moyenne de l'ordre de 22 000 m³/an. L'intensité du transport net est quasiment égale à celle du transport brut : la quasi-totalité de la dérive littorale annuelle à travers ce profil de plage se fait vers l'ouest.

On rappelle que ces capacités de transport sont à interpréter au regard des hypothèses et incertitudes détaillées en Section 5.1.1. En particulier, la Section 5.2.4 sur les orientations d'équilibre des plages montre que ce profil de plage est très proche de sa position d'équilibre (moins de 5°, soit l'ordre de grandeur de l'incertitude sur l'orientation du profil estimée), pour laquelle le transport net est nul.

Cette analyse de la variabilité annuelle de la dérive littorale permet cependant de conclure que, de façon générale sur la majorité des profils étudiés, l'année 2012 présente les transports net et brut les plus proches des transports net et brut annuels moyens, on peut donc la considérer comme étant représentative du transport littoral annuel moyen. Cependant, il est important de remarquer que les résultats de taux de transport sédimentaire peuvent varier de l'ordre de $\pm 50\%$ d'une année à l'autre.

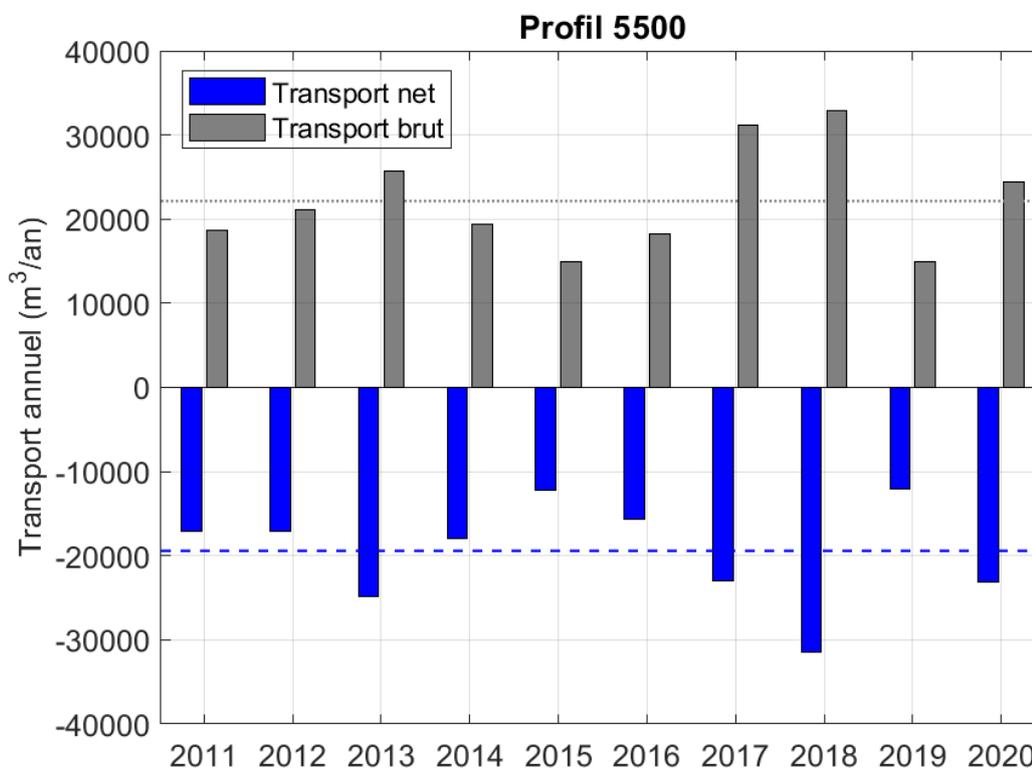


Figure 5.2 Variabilité interannuelle du transport sédimentaire net (en bleu, dirigé vers l'ouest lorsqu'il est négatif) et brut (en gris) sur la période 2011-2020 au profil 5500. Les lignes pointillées bleues et grises illustrent respectivement les transports net et brut moyens.

5.2.2 Variabilité saisonnière

La Figure 5.3 montre l'existence d'une variabilité saisonnière importante du climat de houle en termes de transport sédimentaire net et brut.

En moyenne sur l'ensemble des profils modélisés le long de la baie :

- Les mois présentant le plus de transport littoral sont décembre, janvier, février et mars
- Les mois présentant le moins de transport littoral sont mai, juin, juillet et août, avec un transport en moyenne 4 fois plus faible que lors des mois d'hiver.

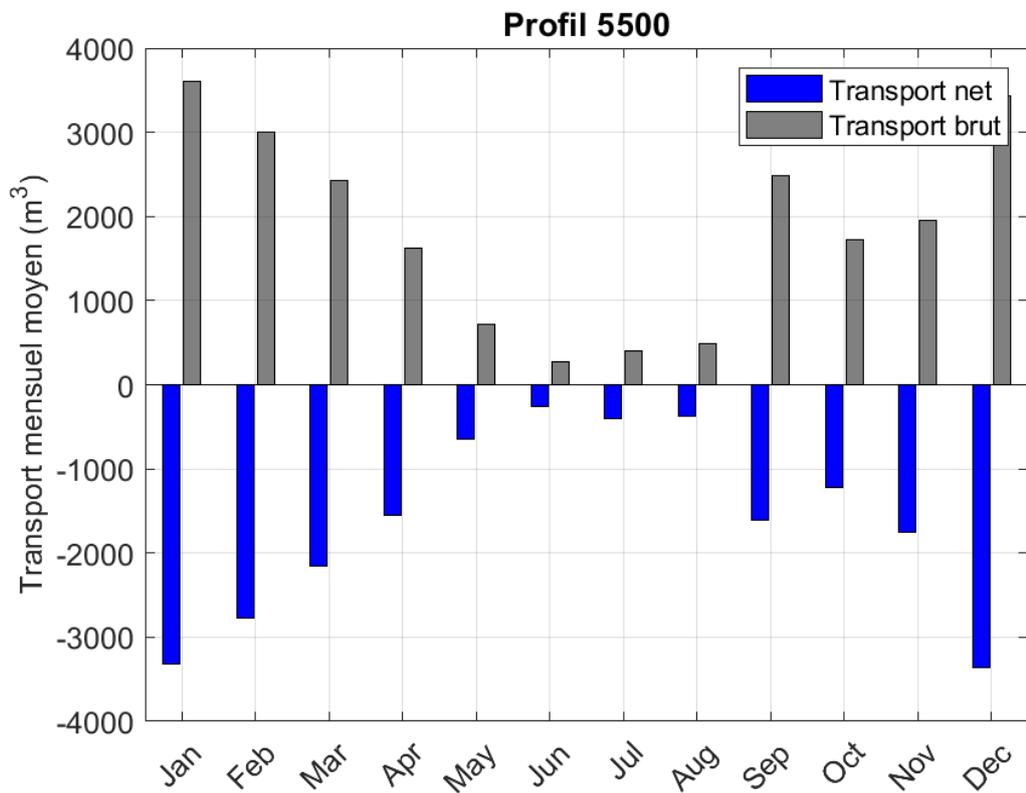


Figure 5.3 Variabilité interannuelle du transport sédimentaire net (en bleu, dirigé vers l'ouest lorsqu'il est négatif) et brut (en gris) sur la période 2011-2020 au profil 5500.

5.2.3 Distribution du transport dans le profil

La distribution du transport sédimentaire dans le profil (généralisé par l'action de la houle uniquement) est illustrée sur la Figure 5.4. Ces répartitions sont calculées pour une orientation du trait de côte de 311°N correspondant approximativement à l'orientation moyenne du trait de côte actuel.

De façon générale sur l'ensemble des profils de plage étudiés, les mouvements sédimentaires dus aux houles sont très faibles voire nuls au-delà de -2 m NM (pas à plus de 1 % du transport sédimentaire). La largeur de la zone littorale est typiquement de l'ordre de 50 à 75 m à partir du rivage.

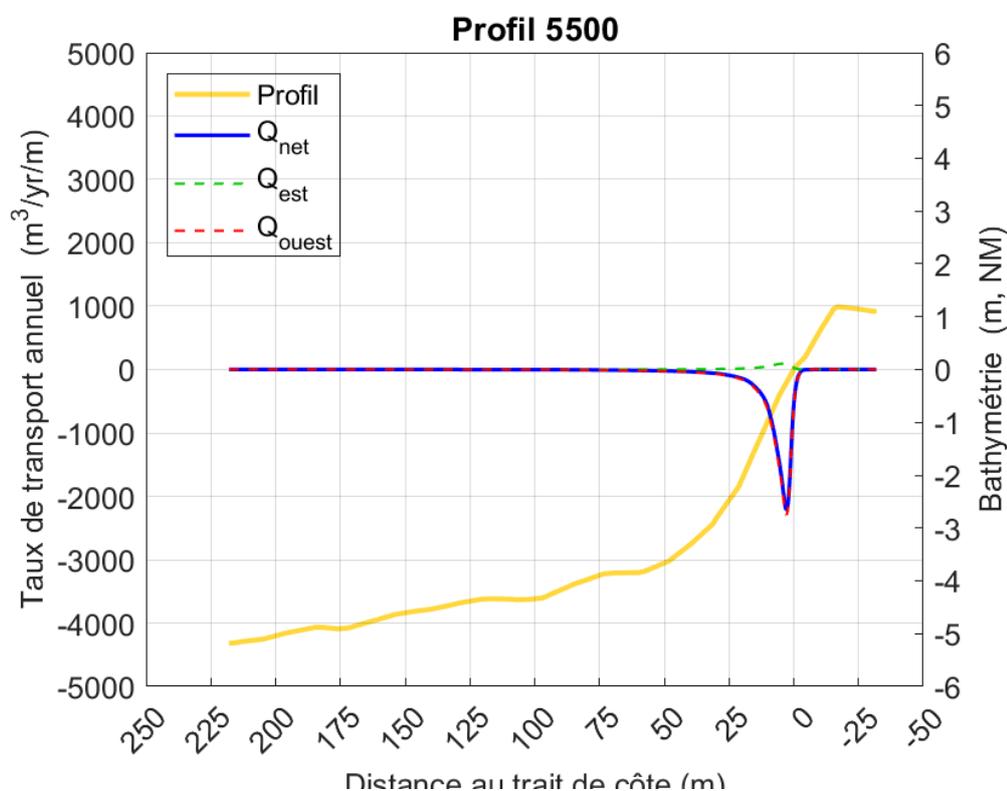


Figure 5.4 Distribution du transport sédimentaire dans le profil 5500 pour une orientation du trait de côte de 343 : transport vers l'est (vert), transport vers l'ouest (rouge), transport net (bleu).

5.2.4 Orientations d'équilibre

Les capacités de transport à travers les différents profils de plage étudiés ont été calculées pour plusieurs orientations de ces profils, afin de déterminer leur orientation d'équilibre.

Le résultat de cette analyse est présenté ci-dessous pour le profil 5500. L'orientation approximative du trait de côte actuel, de $310^{\circ}\text{N} \pm 5^{\circ}$ (équivalent à $-50^{\circ}\text{N} \pm 5^{\circ}$), est grisée sur la figure ci-dessous. L'orientation d'équilibre de la plage est celle pour laquelle le transport net est nul (environ -45° ici). En position d'équilibre, le transport brut annuel est de l'ordre de $25\ 000\ \text{m}^3/\text{an}$.

Les résultats obtenus pour l'ensemble des profils sont similaires : l'orientation actuelle de la plage est proche de l'orientation d'équilibre estimée par le modèle.

La Figure 5.6 synthétise ces résultats en illustrant les profils perpendiculaires au trait de côte actuel en noir et les profils perpendiculaires au trait de côte en équilibre en rouge.

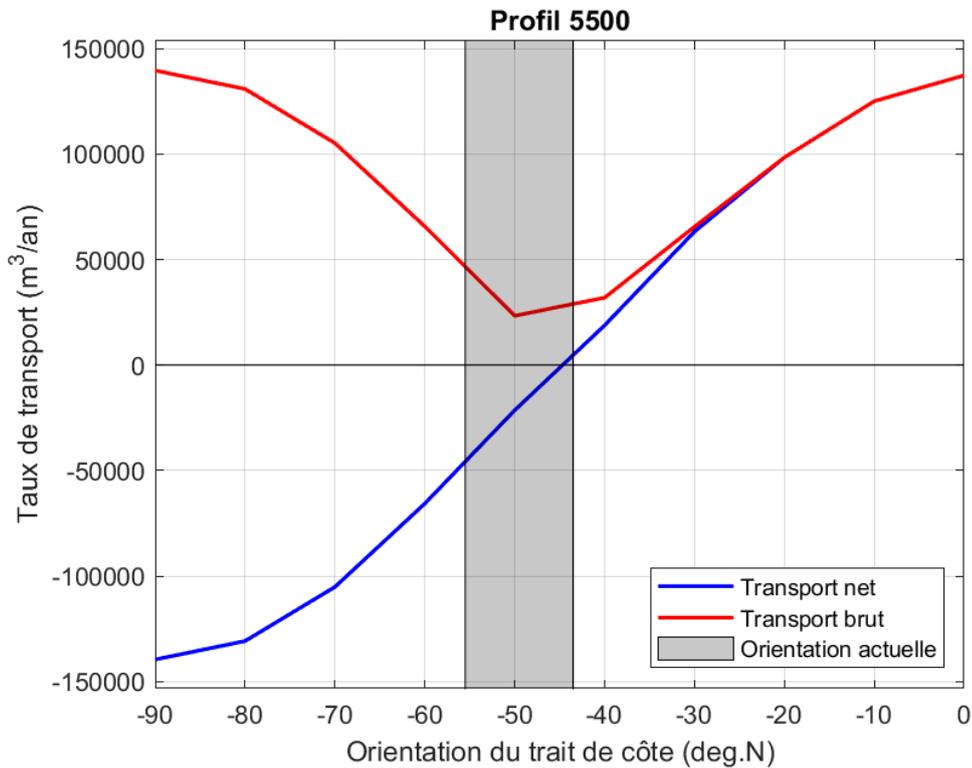


Figure 5.5 Transport net et brut annuel à travers le profil 5500 en fonction de l'orientation du trait de côte.

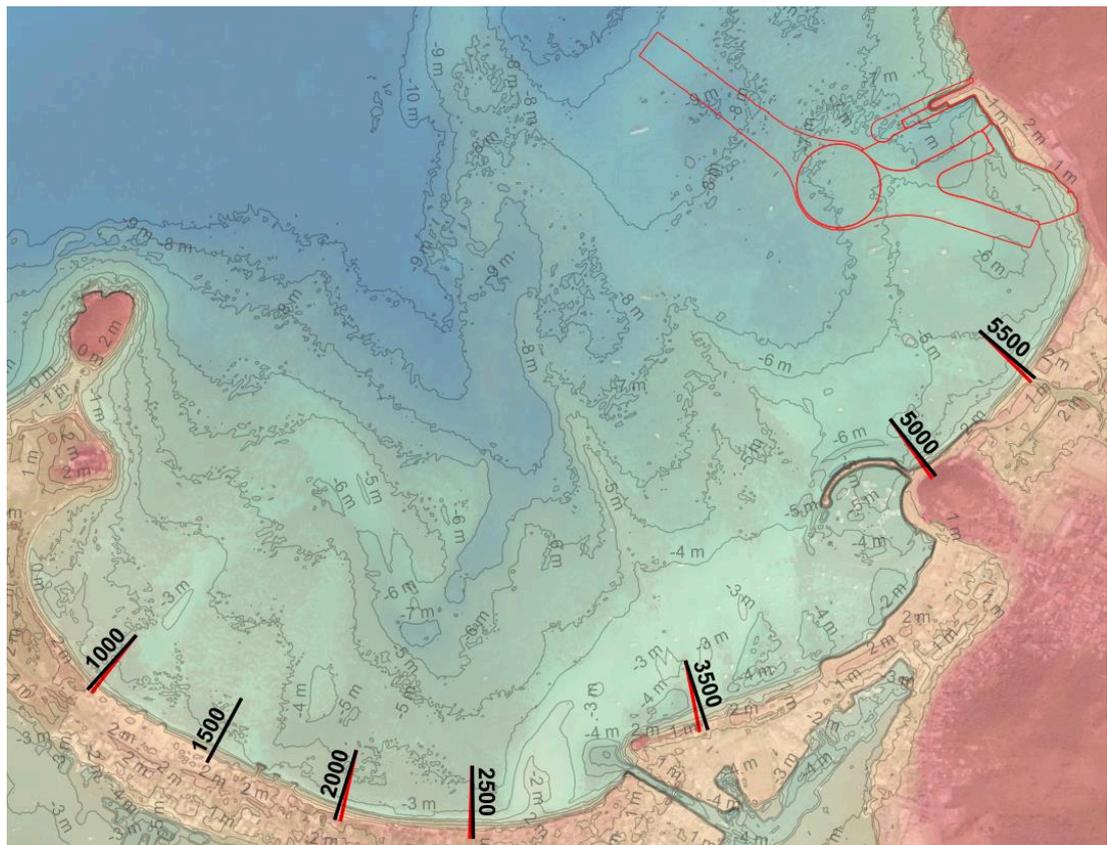


Figure 5.6 Profils perpendiculaires au trait de côte actuel (noir) et au trait de côte en équilibre (rouge) d'après les simulations LITDRIFT.

5.2.5 Schéma bilan

Les simulations de la dérive littorale (due à l'action des houles dans la zone de déferlement et responsable de la majeure partie du transport sédimentaire) à travers les profils de plage de la baie de Galisbay, analysées au regard des hypothèses et incertitudes inhérentes à ce type de modélisation, ont permis de dresser un schéma bilan du fonctionnement du littoral (Figure 5.7).

La dérive littorale dans la baie est orientée d'ouest en est dans la Baie de la Potence (le sable est effectivement localisé dans la partie sud-ouest de la plage de Galisbay tandis que le linéaire nord-est est presque uniquement rocheux) ainsi que sur le linéaire situé entre la passe de la lagune et la marina Fort-Louis (où les plages, fixées par des épis, s'adosent sur l'épi occidental), ainsi qu'à l'est de la plage de Sandy Ground (fortement érodée, comme la partie est de Galisbay).

Les modélisations illustrent en revanche une tendance au transport vers l'est en Baie Nettlé, à l'est des épis en T, en direction du centre de la baie.

Aucune tendance significative n'est mise en évidence à l'ouest de la Baie Nettlé.

On rappelle que ces capacités de transport sont à interpréter au regard des hypothèses et incertitudes détaillées en Section 5.1.1. En particulier, la quantité de sable disponible est considérée infinie, et les orientations actuelles des plages sont très proches de leur position d'équilibre (orientation pour laquelle le transport net est nul).

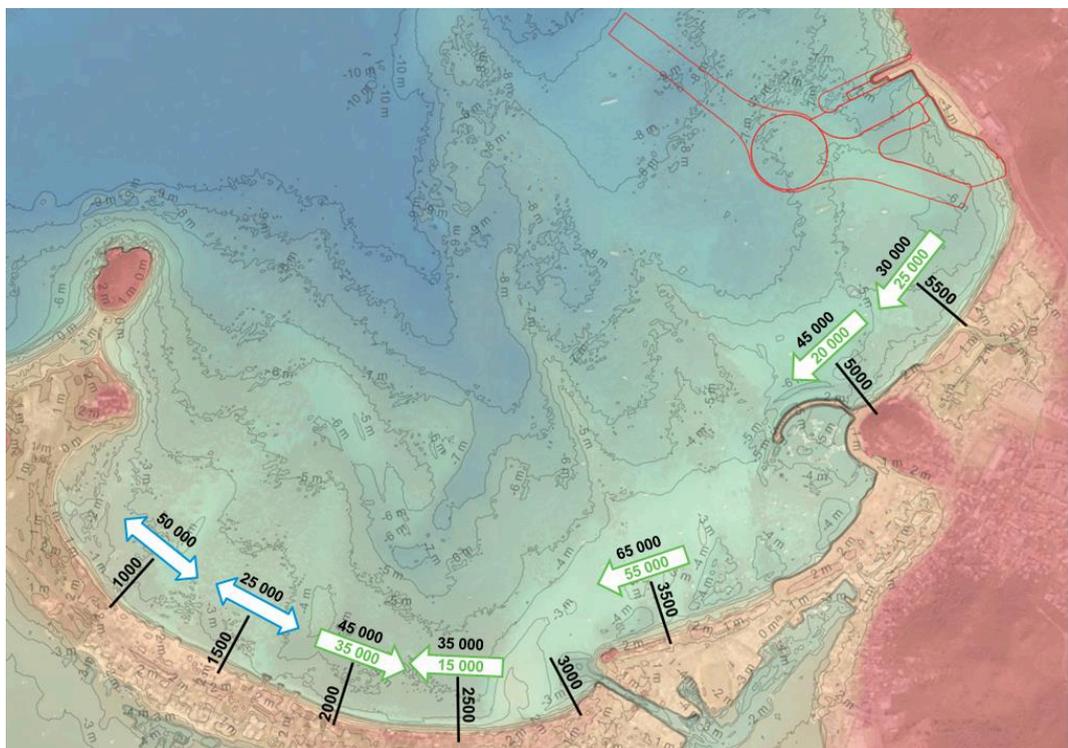


Figure 5.7 Schéma bilan du transport littoral brut le long du littoral de la baie de Galisbay. Les flèches indiquent le sens et l'intensité de la capacité de transport net annuel. Au-dessus des flèches est indiquée la capacité de transport brut annuel.

5.2.6 Impact du projet sur la dérive littorale

Les simulations de la dérive littorale ont également été réalisées en situation projet, en tenant compte de la bathymétrie draguée du futur port de Galisbay et des nouveaux aménagements. Ces simulations prennent en compte en pied de plage les caractéristiques des vagues modélisées en situation projet.

Comme décrit en Section 4.5.2, il est attendu que la configuration projet ait pour effet de réduire les hauteurs de vagues en Baie de la Potence (de 60% en moyenne sur la plage située la plus à l'est, et entre 10% et 20% sur la plage de Galisbay). Cela a naturellement pour effet de réduire les taux de transport littoral sur ces secteurs. Côté Sandy Ground, où une légère augmentation des hauteurs de vagues était mise en évidence (+2% en moyenne), la hausse est trop peu sensible pour se traduire par un impact notable sur la dérive littorale.

Ainsi, le schéma bilan en situation projet présenté en Figure 5.8 est identique à celui de la situation actuelle sur le linéaire Baie Nettlé – Sandy Ground et sur les plages à l'ouest de la Marina Fort-Louis, mais les taux de transport nets et bruts sont considérablement réduits en Baie de la Potence et notamment sur la plage de Galisbay. Sur la plage de Galisbay, la dérive littorale nette tend vers le sud en situation actuelle, cela devrait être moins marqué en situation projet étant donné la réduction des taux de transport.

Ces résultats illustrent que le projet ne devrait pas avoir d'impact négatif sur l'érosion des plages de la Baie de Galisbay. L'impact attendu côté Baie Nettlé et Sandy Ground est négligeable. L'impact attendu côté Baie de la Potence est à la réduction du transport sédimentaire.

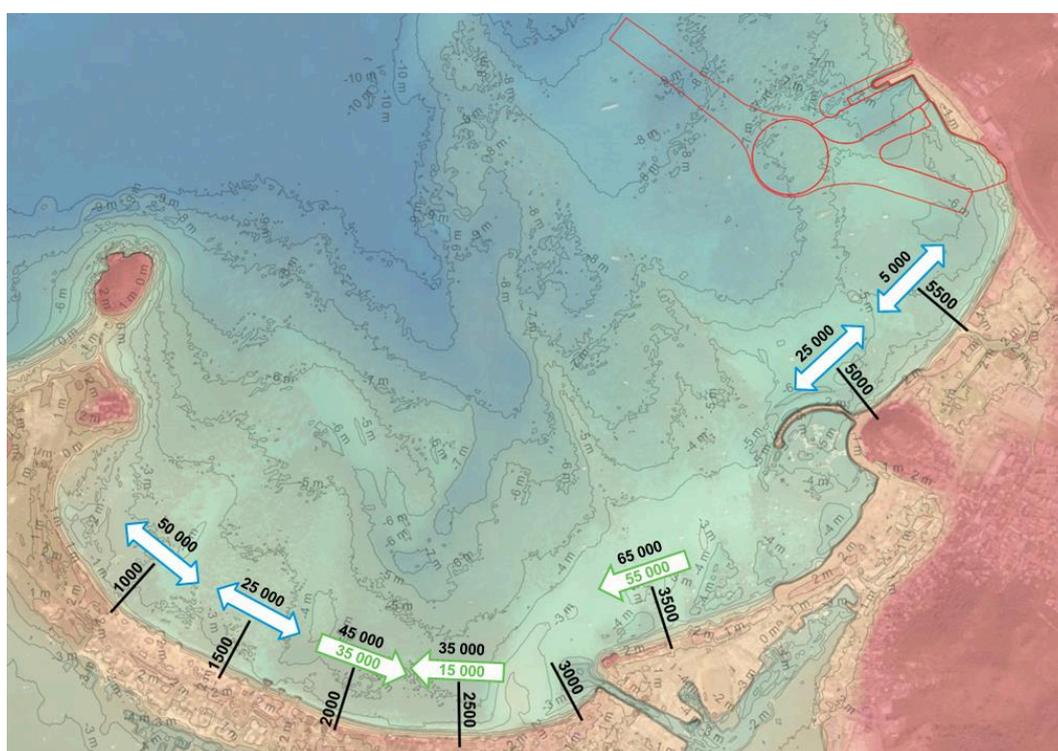


Figure 5.8 Schéma bilan du transport littoral brut le long du littoral de la baie de Galisbay en situation projet. Les flèches indiquent le sens et l'intensité de la capacité de transport net annuel. Au-dessus des flèches est indiquée la capacité de transport brut annuel.

6 Modélisation hydrosédimentaire de la baie de Galisbay

Le modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay consiste en un couplage dynamique des trois modules SW (propagation des vagues), HD (hydrodynamique) puis ST (transport sédimentaire) de la suite MIKE 21. Ce couplage dynamique permet de prendre en compte, dans le calcul de la capacité de transport sédimentaire, à la fois l'effet des vagues, des courants et en particulier des courants de déferlement liés aux vagues, et les variations de niveau marin (marée) sur la propagation des vagues.

6.1 Emprise et maillage du modèle hydrosédimentaire

L'emprise, la bathymétrie interpolée et le maillage du modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay sont présentés en Figure 6.1.

Les données bathymétriques utilisées proviennent du Litto3D de Saint-Martin (SHOM, 2019).

La résolution horizontale du maillage varie d'environ 50 m au large à environ 2 m sur le littoral, dans la zone de déferlement des vagues.

Il est à noter que le domaine modélisé s'étend également sur la lagune intérieure de Saint-Martin, pour prendre en compte l'interaction hydrodynamique entre la baie et la lagune.

6.2 Les forçages du modèle

6.2.1 Le forçage météorologique

Le modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay est forcé par le vent de la base de données opérationnelle du Climate Forecast System CFS déjà décrit en Section 4.2.1.

6.2.2 Les conditions de vagues

Les conditions de vagues appliquées aux limites du modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay sont issues des résultats du modèle hindcast de propagation des vagues du Canal d'Anguilla décrit en Section 4.

6.2.3 Les niveaux marins

Les niveaux marins appliqués au modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay proviennent du modèle régional de courantologie 3D, comme décrit en Section 4.2.2.

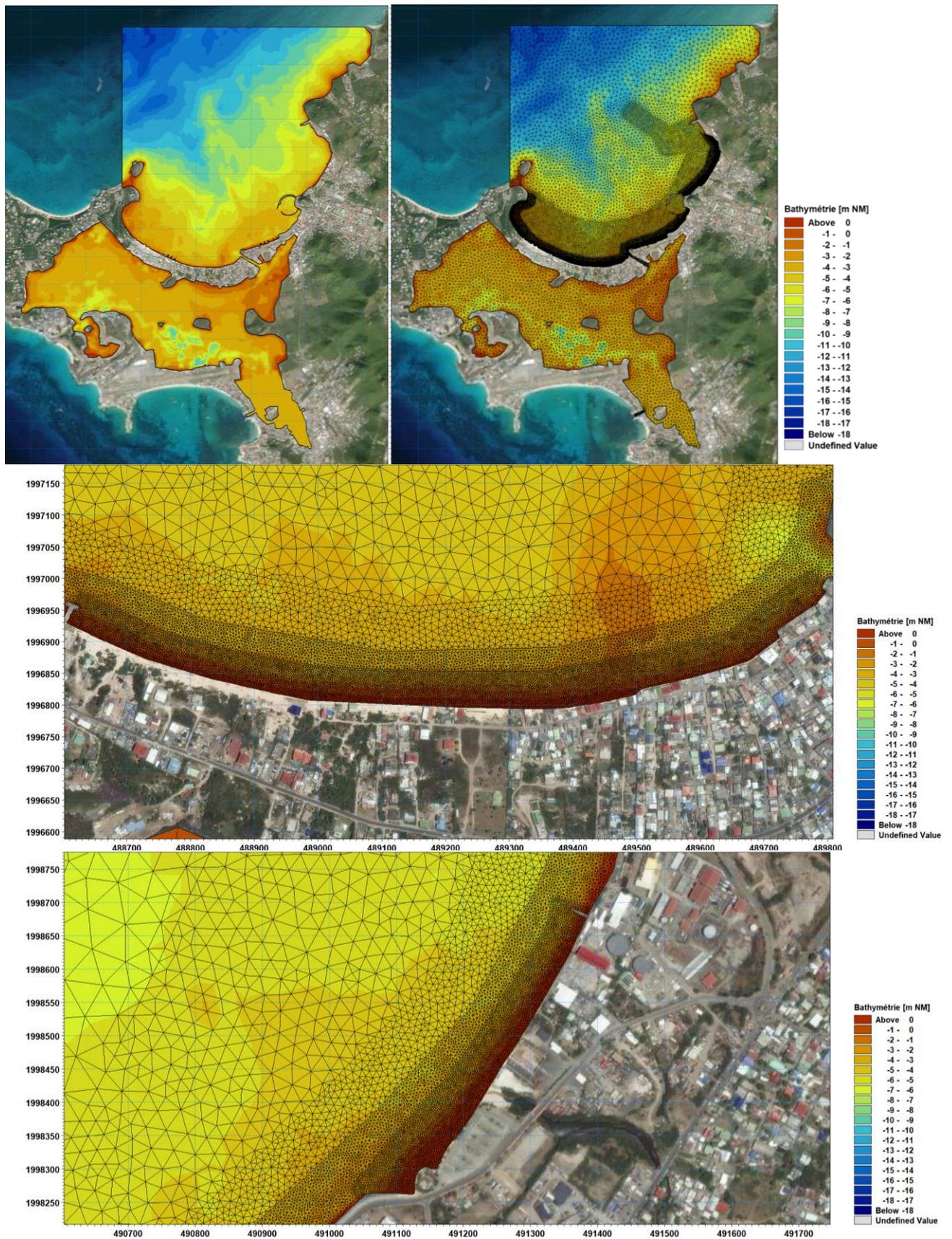


Figure 6.1 Emprise, bathymétrie interpolée et maillage du modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay. Détails des plages de Sandy Ground et Galisbay.

6.3 Paramétrisation du modèle

Le Tableau 4.1 résume les caractéristiques de la configuration et la paramétrisation du modèle régional de vagues de Saint-Martin.

Tableau 6.1 Paramétrisation du modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay

	Paramètre	Paramétrisation
Hydrodynamique	Résolution du maillage	50 m au large, 2 m dans la zone de déferlement
	Tensions de radiation	Couplage avec le modèle de propagation des vagues
	Frottement sur le fond	Nikuradse constant, $k_n = 0.04$ m.
	Conditions limites	Niveaux d'eau issus du modèle régional de courantologie 3D
Propagation des vagues	Paramètre	Paramétrisation
	Résolution du maillage	50 m au large, 2 m dans la zone de déferlement
	Équations	Formulation spectrale découplée paramétrique, formulation temporelle quasi-stationnaire
	Discrétisation spectrale	36 directions (10°)
	Niveau d'eau	Couplage avec le modèle hydrodynamique
	Vent	CFSR
	Déferlement	Inclus, $\gamma = 0.8$, $\alpha = 0.1$.
	Frottement sur le fond	Nikuradse constant, $k_n = 0.04$ m.
Conditions limites	Paramètres de vagues issus du modèle du Canal d'Anguilla	
Transport sédimentaire	Paramètre	Paramétrisation
	Granulométrie	$D_{50} = 0,9$ mm, $\sigma_g = 1,9$

6.4 Résultats de modélisation

La Figure 6.2, la Figure 6.3 et la Figure 6.4 ci-dessous illustrent les champs instantanés de propagation des vagues, des courants, ainsi que du transport sédimentaire associé, pour trois événements météocéaniques caractéristiques : une condition d'Alizés, une condition de Northers et l'ouragan Irma, respectivement. Des détails des champs de courants pour ces trois conditions au droit de Sandy Ground sont illustrés en Figure 6.5.

On rappelle toutefois que la résolution de la donnée de forçage atmosphérique CFSR n'est pas suffisante pour permettre de représenter l'intensité réelle de l'ouragan Irma, cet événement est lissé par le modèle.

Lors de l'événement d'Alizés (situation la plus fréquente en baie de Galisbay) illustré ci-dessous, les vagues entrent dans la baie avec une hauteur significative de 1,4 m et une direction d'incidence nord-est, puis réfractent dans la baie. Les courants à l'extérieur de la baie portent vers l'ouest et atteignent 0,30 m/s. Une partie de ce courant entre dans la baie au bout de la digue du port de commerce de Galisbay (0,10 à 0,20 m/s), atteint la côte à proximité de la passe de la lagune où il est accentué par les courants de déferlement, puis repart vers le large en baie Nettlé avec une intensité de 0,20 m/s. Les courants de déferlement atteignent 1 m/s localement. Ils portent vers le sud sur la plage de Galisbay, et vers le centre de la baie en Baie Nettlé (vers l'ouest à Sandy Ground et vers l'est près des épis en T).

Lors de l'événement de Northers illustré ci-après, les vagues entrent dans la baie avec une hauteur significative de 2,2 m (à noter qu'il s'agit du deuxième événement en termes de hauteur de vague sur la période 2010 – 2020 modélisée) et une direction d'incidence nord-ouest, puis réfractent en Baie Nettlé. Les courants à l'extérieur de la baie sont faibles (< 0,10 m/s) et portent vers l'est. Une partie de ce courant entre dans la baie du côté de La Belle Créole en s'accroissant (jusqu'à 0,20 m/s) mais en ressort au nord de la Baie Nettlé. Plus près de la côte, les courants atteignent typiquement 0,20 m/s, plusieurs boucles de circulation se forment. Les courants de déferlement dépassent 1 m/s localement. Ils portent vers le sud sur la plage de Galisbay, et vers le centre de la baie en Baie Nettlé (vers l'ouest à Sandy Ground et vers l'est près des épis en T).

A l'instant de l'ouragan Irma illustré ci-après, les vagues entrent dans la baie avec une hauteur significative de 3,8 m et une direction d'incidence nord-nord-ouest, puis réfractent dans la Baie. Les courants à l'extérieur de la baie portent vers l'ouest et atteignent 0,60 m/s. Une partie de ce courant entre dans la baie au bout de la digue du port de commerce de Galisbay (0,50 m/s), atteint la côte à proximité de la passe de la lagune où il est accentué par les courants de déferlement, puis repart vers le large en baie Nettlé avec une intensité de 0,50 m/s. Les courants de déferlement dépassent 1 m/s localement. Ils portent vers le sud sur la plage de Galisbay, et vers le centre de la baie en Baie Nettlé (vers l'ouest à Sandy Ground et vers l'est près des épis en T).

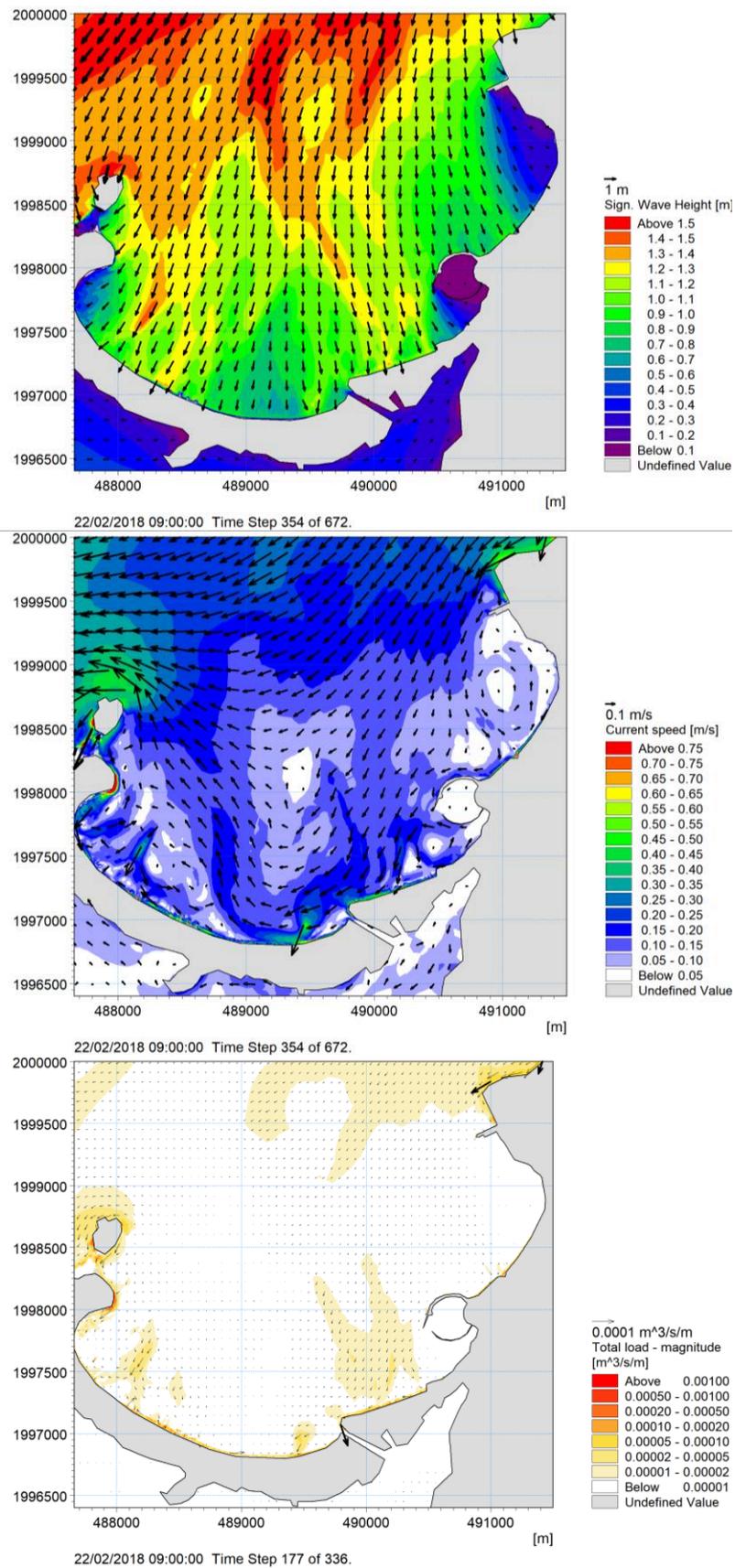


Figure 6.2 Champs de propagation des vagues (haut), des courants (milieu) et du transport sédimentaire (bas) le 22/02/2018 09h UTC lors d'un événement d'Alizés.

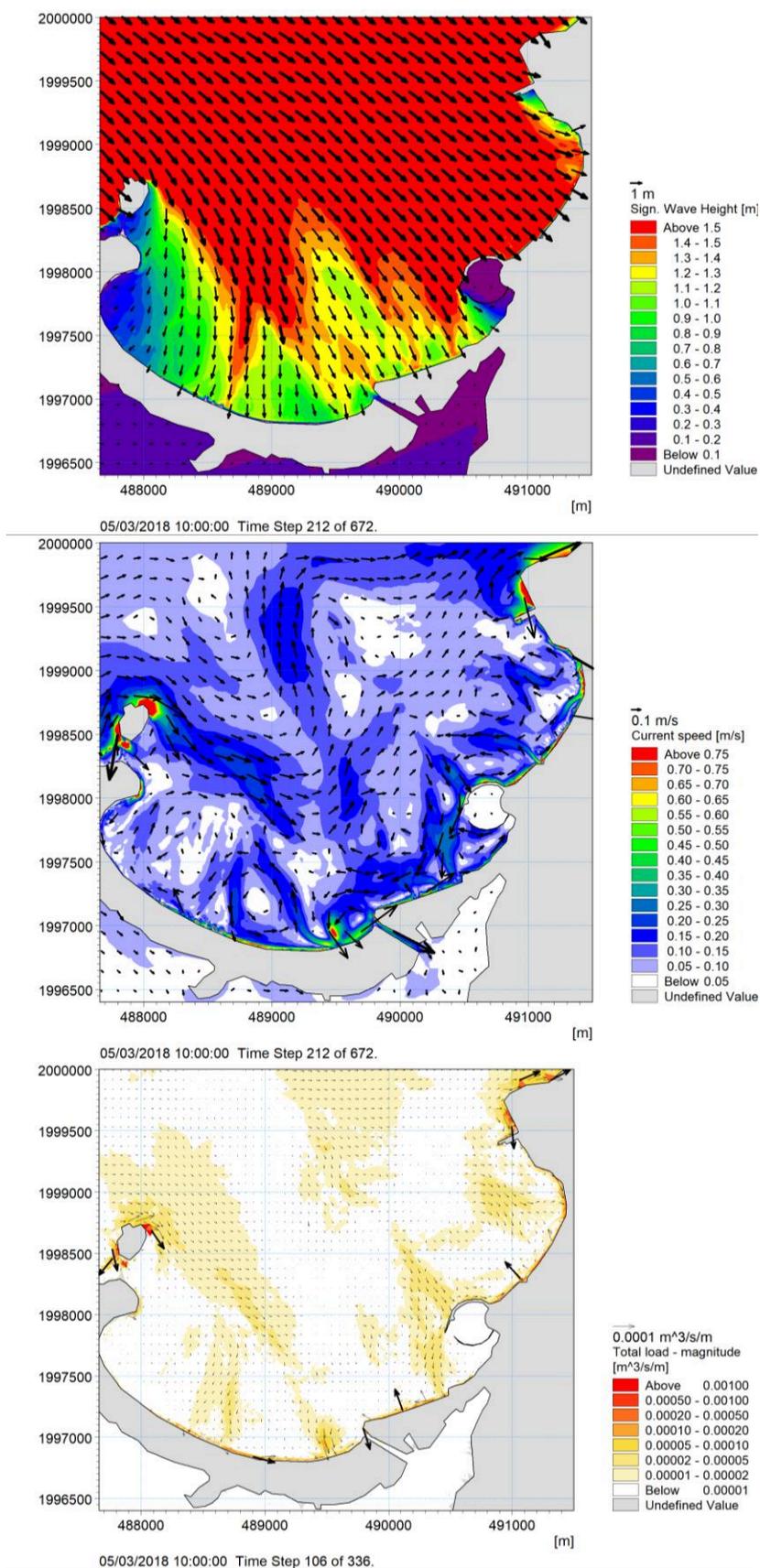


Figure 6.3 Champs de propagation des vagues (haut), des courants (milieu) et du transport sédimentaire (bas) le 05/03/2018 10h UTC lors d'un événement de Northers.

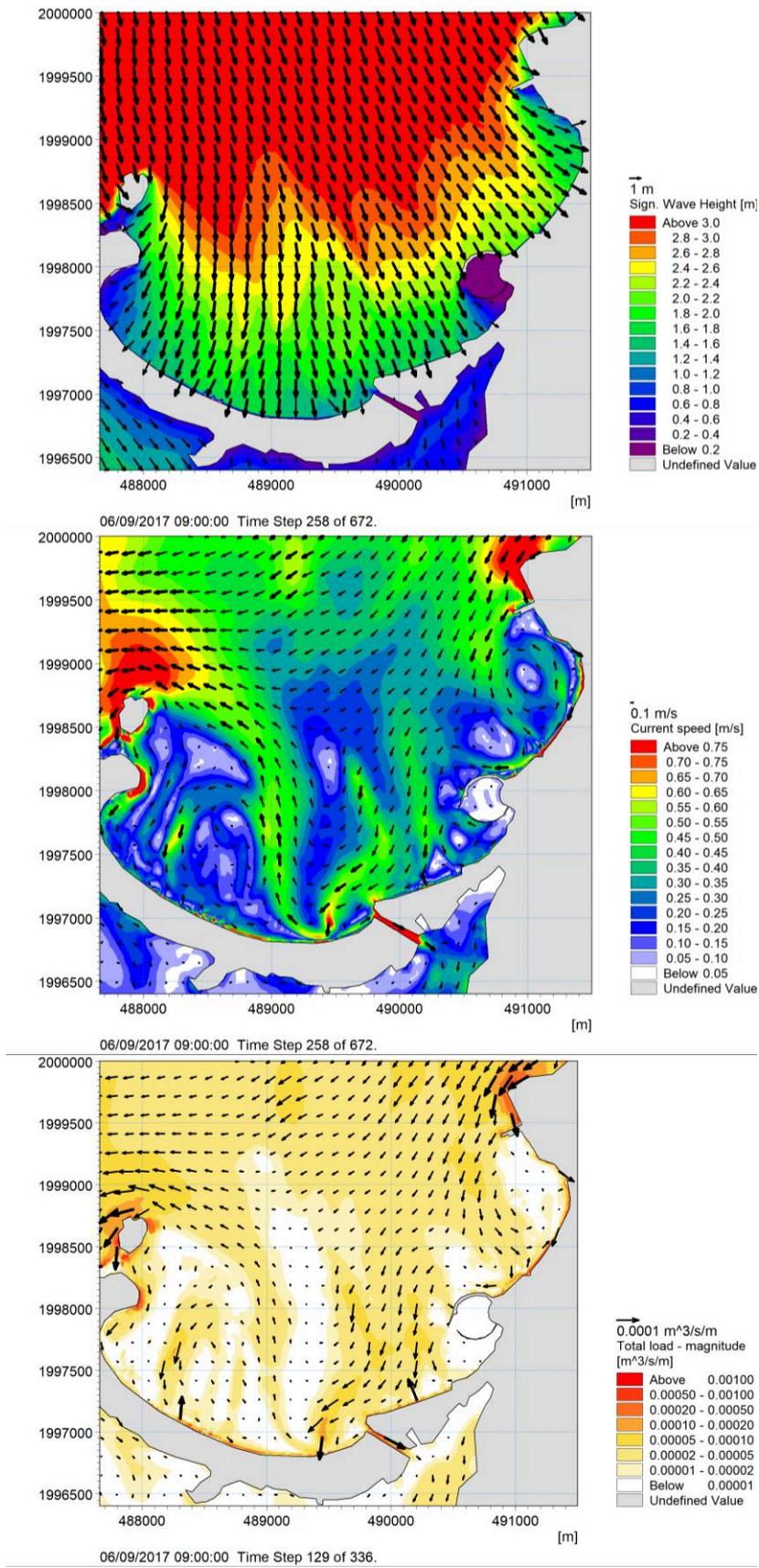


Figure 6.4 Champs de propagation des vagues (haut), des courants (milieu) et du transport sédimentaire (bas) le 06/09/2017 9h UTC lors de l'ouragan Irma.

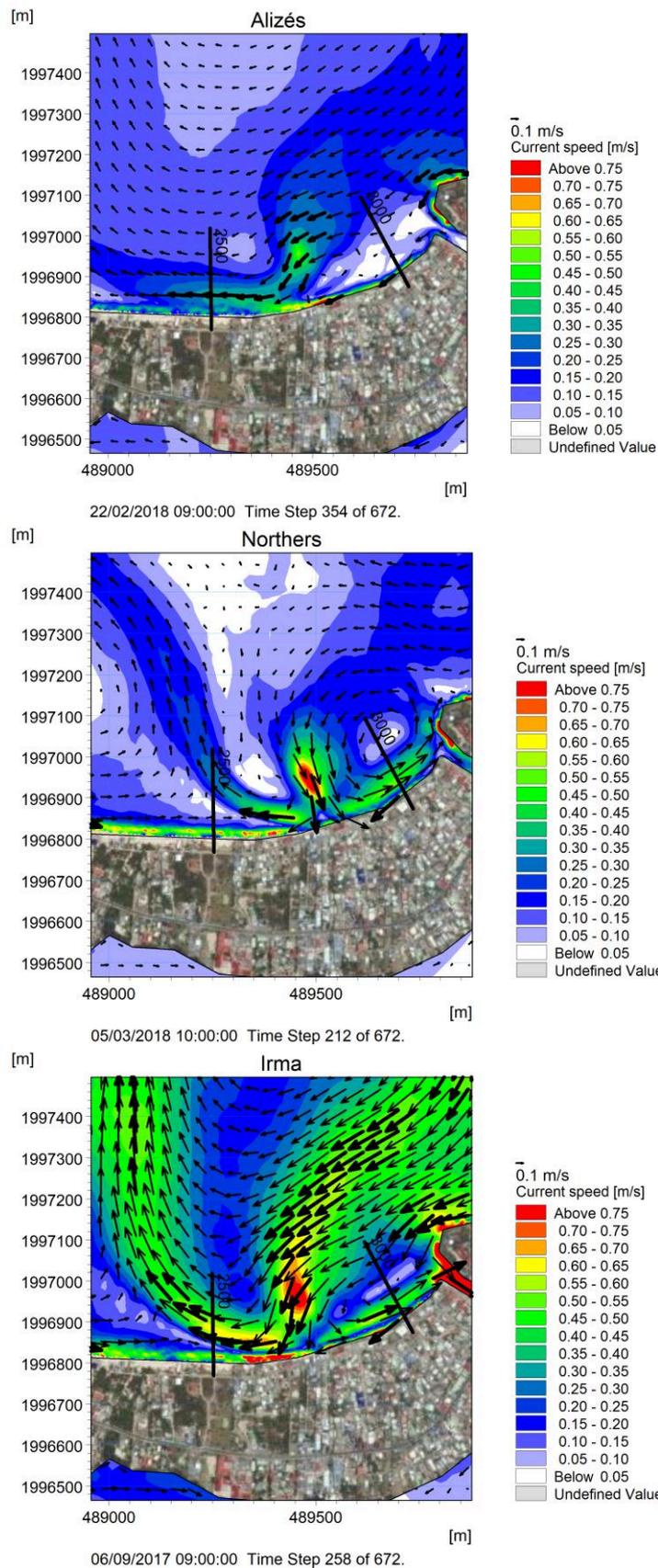


Figure 6.5 Détails des champs de courants au droit de Sandy Ground pour les événements d'Alizés (haut) des Northers (milieu) et Irma (bas) présentés précédemment.

7 Modélisation de la morphodynamique littorale des plages de Sandy Ground et Galisbay

7.1 Le modèle de morphodynamique littorale MIKE 21 SM

De la même façon que le modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay, le modèle de la morphodynamique littorale des plages de Sandy Ground et Galisbay consiste en un couplage dynamique des trois modules SW (propagation des vagues), HD (hydrodynamique) puis ST (transport sédimentaire) de la suite MIKE 21. Un dernier module vient s'ajouter à cette chaîne de modélisation : MIKE 21 Shoreline Morphology (SM), décrit en Section 2.1.4.

Comme introduit en Section 2.1.4, le modèle de morphodynamique littorale utilise une approche 1D pour l'évolution morphodynamique basée sur des champs de transport sédimentaire 2D. Le modèle résout la transformation des houles, les courants de houle et le transport sédimentaire à partir de l'action combinée des houles et du courant sur la maille de calcul 2D présentée sur la Figure 4.1. La bathymétrie est mise à jour à chaque pas de temps morphologique en décalant le profil côtier vers la côte ou vers la mer en fonction du régime d'accrétion/érosion dans le profil. Le mouvement du trait de côte est ainsi déterminé par la résolution de l'équation : $\frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{vol}{dA_z}$

Où Δn est la distance dont le profil est décalé perpendiculairement à l'orientation locale d'une ligne de référence, Δt est le pas de temps, vol est le volume de sédiments déposé sur la section du littoral et dA_z est la surface de la projection de la bande du littoral devant la section étudiée sur un plan vertical. Si le trait de côte est courbe, l'utilisation de l'équation ci-dessus implique des problèmes de conservation des sédiments ; ces derniers sont résolus en appliquant une méthode itérative.

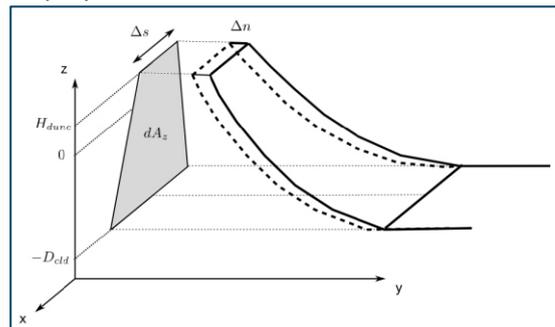


Figure 7.1 Schéma d'une section du trait de côte et définition des différents paramètres.

Ainsi, pour utiliser le modèle de morphologie côtière, un certain nombre de données additionnelles doivent être définies :

- La ligne de référence qui définit l'orientation locale de la normale au trait de côte et de la discrétisation du modèle morphologique ;
- Le trait de côte qui définit la position des sections sur une maille étalée sur la ligne de référence ;
- La carte de correspondance maille/section qui relie les mailles de calcul 2D aux sections du trait de côte ;
- La forme des profils côtiers.

L'objectif de ce modèle sera d'évaluer l'évolution morphodynamique :

- à l'échelle de 1 an en configuration actuelle
- à l'échelle de 5 ans en configuration rechargement de plage

7.2 Emprise et maillage du modèle de morphodynamique littorale

La modélisation de la morphodynamique littorale est réalisée sur la même grille de calcul que le modèle hydrosédimentaire de la baie de Galisbay (Section 6).

7.3 Forçages du modèle

La haute résolution du modèle morphodynamique (mailles jusqu'à 2 m sur toute la bande littorale soumise au déferlement) ne permet pas la modélisation complète de 1 an d'états de mer (ni a fortiori de 5 ans d'états de mer) sans recourir à une schématisation des conditions de forçage hydrodynamique. L'objectif est de limiter le nombre de conditions à simuler par la définition d'un nombre limité de conditions représentatives de la climatologie entière.

La schématisation réalisée dans le cadre de la présente étude a déjà été mise en œuvre avec succès sur plusieurs sites d'étude.

En premier lieu, l'année 2012 ayant été identifiée comme étant une année représentative de la dérive littorale moyenne dans la baie (cf. Section 5.2.1), elle a été retenue comme l'année de modélisation de la morphodynamique littorale et les traitements décrits ci-après ont été appliqués aux conditions de vagues de l'année 2012.

7.3.1 Les conditions de vagues

Afin de réaliser des simulations morphodynamiques en un temps raisonnable, les paramètres de vagues aux conditions limites du modèle ont fait l'objet d'un pré-traitement pour que ne soient modélisés que les événements les plus énergétiques, responsables de l'essentiel de la dérive littorale.

Le pré-traitement est réalisé en identifiant les périodes « calmes » au cours desquelles les hauteurs de vagues en un « point de contrôle » sont en-dessous d'un certain seuil. Le point de contrôle défini dans la présente étude est le point de coordonnées UTM20N (489500, 2000000) situé à l'entrée de la baie de Galisbay (Figure 7.2), auquel sont présentées des statistiques de vagues en Section 4.5.1 (rose des vagues en Figure 4.11).

Les périodes de calme ainsi identifiées sont retirées des conditions aux limites.

La valeur seuil utilisée pour définir les périodes de calme est de $H_{m0} = 0,7$ m, ce qui correspond à 80% de périodes calmes retirées des conditions limites.

En retirant 80% d'événements « calmes », la série temporelle de l'ensemble de l'année 2012 devient une série temporelle de 3,5 mois des événements les plus énergétiques de l'année.

La Figure 7.3 illustre les roses des vagues en ce point de contrôle pour la série temporelle complète modélisée (2011 – 2020) et pour la série temporelle équivalente des 20% d'événements les plus énergétiques. La rose de la série temporelle schématisée présente les mêmes directions d'incidence principales que la rose de la série temporelle complète : les vagues du nord-est sont largement prédominantes, mais des vagues énergétiques du nord-ouest sont aussi représentées.

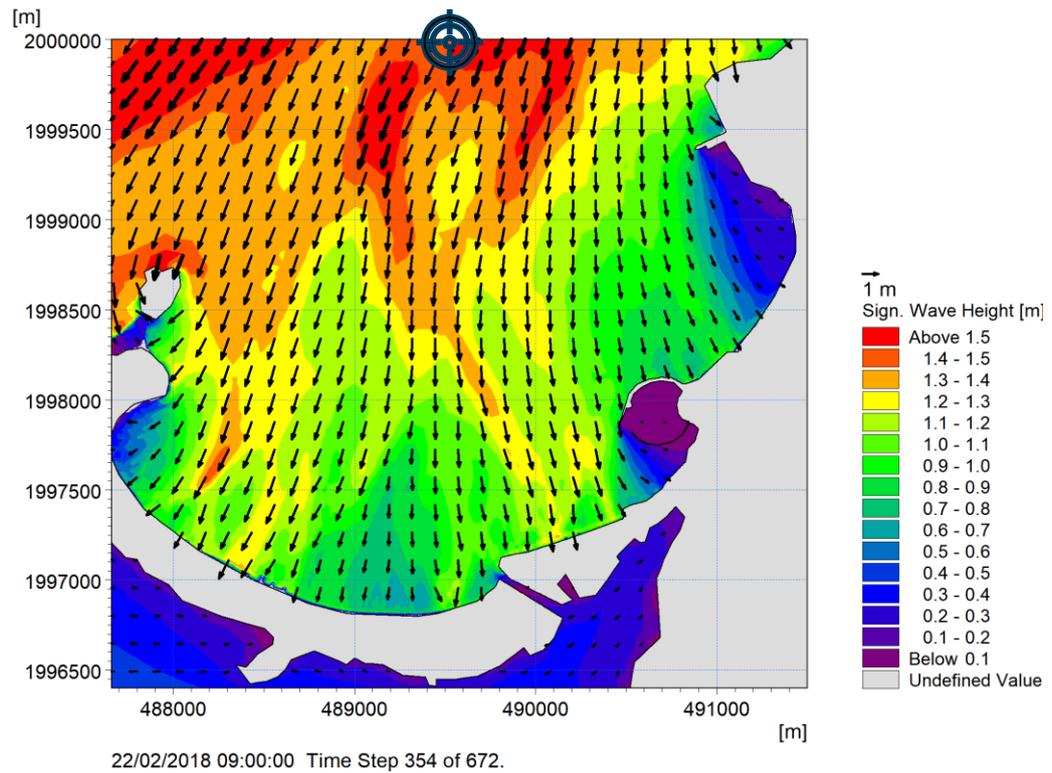


Figure 7.2 Position du « point de contrôle » et champ de propagation des vagues le 22/02/2018 02h UTC (Alizé).

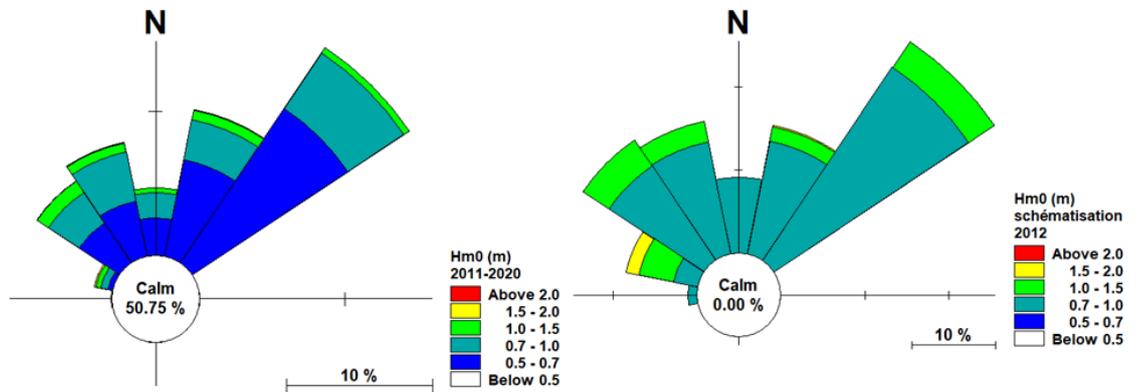


Figure 7.3 Roses des vagues au « point de contrôle » sur l'ensemble de la période 2011 – 2020 (gauche) et sur l'année 2012 schématisée (droite).

7.3.2 Le forçage météorologique

Afin d'assurer une cohérence entre les champs de vagues et les champs de vents associés, le forçage météorologique appliqué au modèle de morphodynamique littorale est le forçage météorologique correspondant aux événements de vagues conservés dans la modélisation. Ainsi, il s'agit des données de vent et de pression atmosphérique de 2012 correspondant aux périodes au cours desquelles la hauteur de vagues au « point de contrôle » était de $H_{m0} > 0.7$ m.

7.3.3 Les niveaux marins

Afin d'assurer une variabilité réaliste des niveaux marins, les niveaux marins n'ont pas fait l'objet d'une schématisation. Les niveaux marins appliqués au modèle sont les niveaux marins réels des 3,5 premiers mois de l'année 2012.

7.3.4 Impacts de la résolution du maillage et de la schématisation du forçage sur la modélisation 2D de la dérive littorale

Deux aspects principaux de la construction du modèle morphodynamique 2D des plages de Sandy Ground et Galisbay sont susceptibles d'entraîner une sous-estimation de la dérive littorale :

- La résolution du maillage : il est attendu que la résolution de 2 m, bien que fine, lisse les courants de déferlement (et une résolution plus fine demanderait de très importants moyens informatiques) ;
- La schématisation du forçage vagues : il est attendu que l'élimination de 80% des événements, même « calmes », entraîne une sous-estimation de la dérive littorale.

L'impact de ces deux aspects a été étudié en comparant le transport brut calculé avec LITDRIFT pour la série temporelle complète et pour la série temporelle schématisée sur les 7 profils étudiés en Section 5 (Figure 5.1).

Il ressort de cette analyse qu'en moyenne sur les 7 profils :

- La résolution du maillage de 2 m du modèle 2D par rapport aux 0,25 m du modèle 1D entraîne une réduction du transport de l'ordre de 40%
- La schématisation du forçage vague entraîne quant à elle une réduction du transport de l'ordre de 20%

Soit une sous-estimation du transport total de l'ordre de 60%.

Cela est illustré en Figure 7.4 pour le profil 3500. A ce profil, une résolution de 2 m du profil de plage induit une sous-estimation du transport total de l'ordre de 45%. De plus, retirer 80% des événements les plus calmes induit une sous-estimation du transport de 20%, pour une résolution de 2 m. Au total, la sous-estimation du transport en ce profil du fait de la schématisation et du maillage est de l'ordre de 65%.

Cette sous-estimation est compensée par l'utilisation d'un facteur d'accélération morphodynamique de 2,5 dans les simulations morphodynamiques (Section 7.4.5).

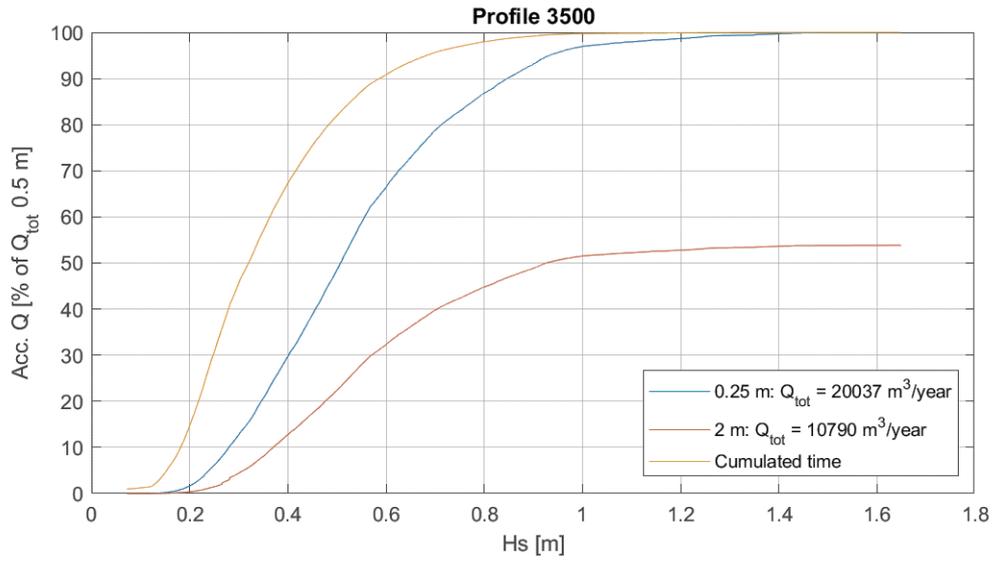


Figure 7.4 Transport brut cumulé à travers le profil 3500 pour une résolution de 0,25 m (bleu) et une résolution de 2 m (rouge) en pourcentage du transport brut total calculé pour la résolution la plus fine (0,25 m) et temps cumulé en pourcentage du temps total (jaune), en fonction de la hauteur de vague en pied de profil.

7.4 Paramétrisation du modèle

7.4.1 Ligne de référence, trait de côte et carte maille/section

La carte maille/section pour cette étude est présentée sur la Figure 7.5 pour les plages de Sandy Ground et Galisbay. La distance entre les points de la ligne de référence dans la présente étude a été choisie de 25 m. La frontière offshore de la carte suit l'isobathe -2 m NM. Le trait de côte initial correspond à l'isobathe 0 m NM du Litto3D de 2019 du SHOM.

Les sections du modèle de morphodynamique littorale sont numérotées de 1 à 51 sur la plage de Sandy Ground, et de 125 à 145 sur la plage de Galisbay.



Figure 7.5 La carte maille/section relie le régime d'érosion/dépôt des éléments 2D aux sections du modèle côtier. Les mailles qui ne sont pas reliées au modèle côtier ne sont pas présentées. La ligne de référence (en cyan) et le trait de côte initial de 2019 (en noir) sont également présentés.

7.4.2 Profils représentatifs des plages

Le modèle côtier n'étudie pas les changements dynamiques apportés par le transport dans la forme du profil côtier. La forme du profil côtier est par conséquent fixe dans le temps.

Deux profils représentatifs des plages de Sandy Ground et de Galisbay ont été retenus dans la modélisation. Ces profils représentatifs s'appuient sur l'analyse des profils de plage extraits du Litto3D 2019 du SHOM présentée en Réf. /3/.

Le profil de plage moyen de chacune des plages principales de la baie de Galisbay est rappelé sur la Figure 7.6.

Le profil orange « Baie Nettlé, Sandy Ground » a été retenu pour la plage Sandy Ground, tandis que le profil violet « Baie de la Potence » a été retenu pour la plage de Galisbay.

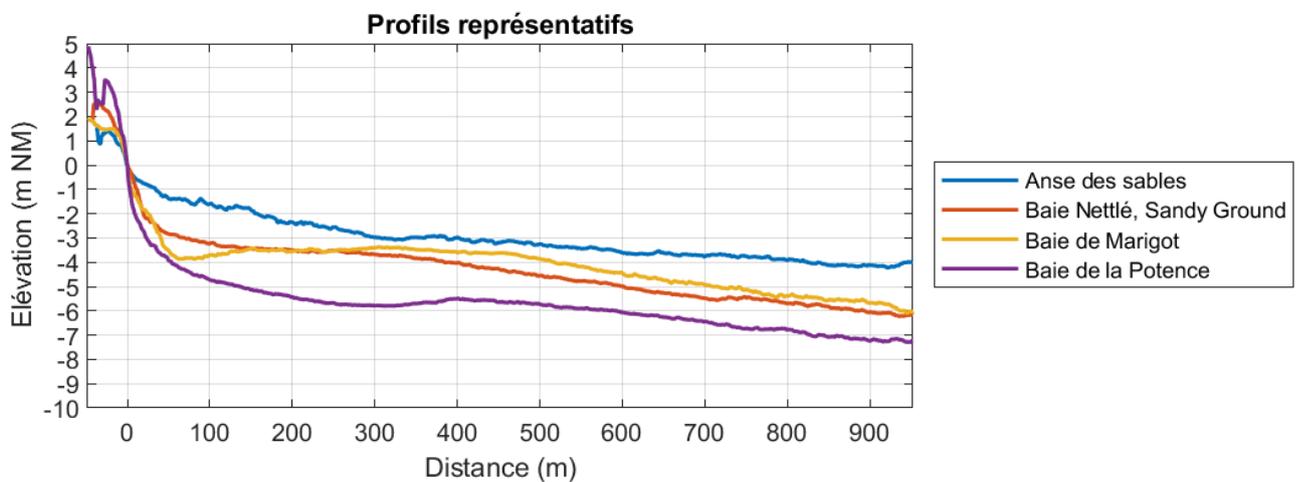


Figure 7.6 Profils de plage représentatif par baie de la Grand'Baie de Marigot.

7.4.3 Hauteur active

Le modèle côtier impose des changements appliqués au profil côtier sur la partie située entre la hauteur de la dune (H_{dune}) et la profondeur de fermeture (D_{cld}). La hauteur de dune le long du littoral a été définie à +2 m NM à partir des données Litto3D. La profondeur de fermeture a été définie à -2 m NM d'après les résultats des simulations de dérive littorale 1D (cf. Section 5.2.3)

7.4.4 Nature du fond

La disponibilité du sédiment a été prise en compte dans le modèle à partir de la carte de nature des fonds réalisée par I-Sea, complétée sur les plages par l'observation visuelle d'images satellite (Figure 7.7).

Une épaisseur de sédiment arbitraire de 2 m a été paramétrée dans les plaines sédimentaires. L'épaisseur de sédiment est de 0 m sur les secteurs identifiés comme rocheux, ainsi que sur les herbiers, bien que ces herbiers soient partiellement ensablés.

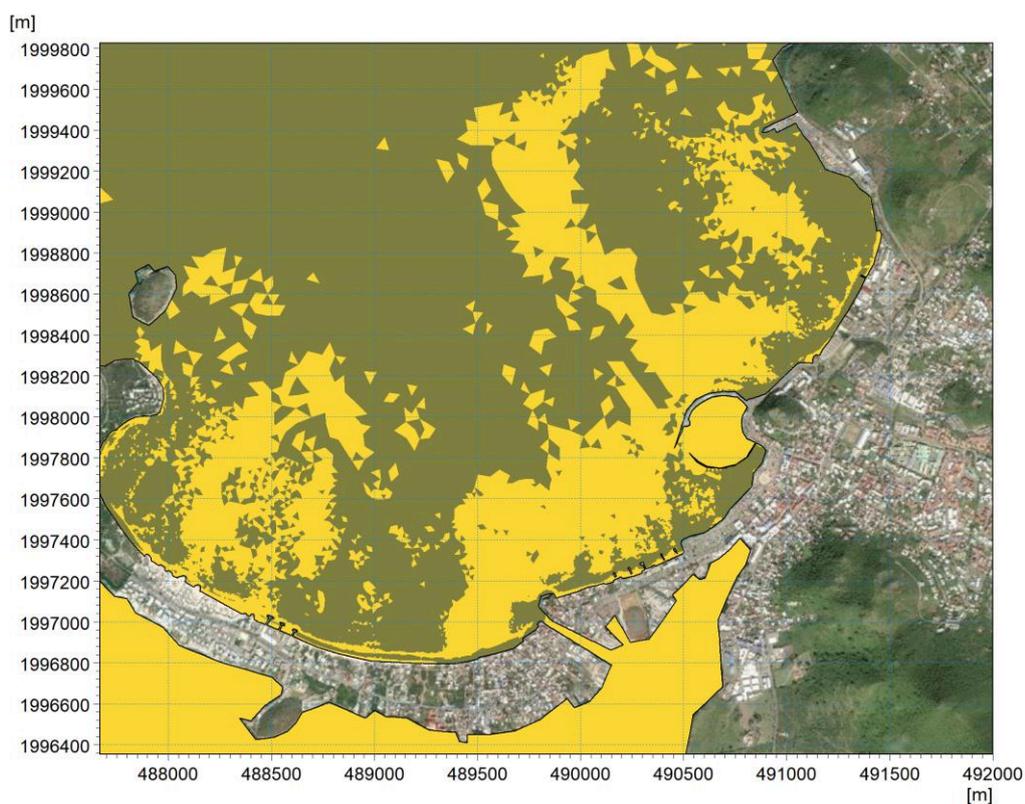


Figure 7.7 Carte de disponibilité du sable dans le modèle. Sédiments en jaune, roches ou herbiers en vert foncé.

7.4.5 Facteur d'accélération morphodynamique

Pour compenser la sous-estimation de 60% du transport littoral due à la résolution du maillage ainsi qu'à la schématisation des conditions de forçage (Section 7.3.4), un facteur d'accélération morphodynamique de 2,5 a été appliqué aux simulations.

7.5 Résultats de modélisation

7.5.1 Evolution à 1 an en état actuel

En état actuel (évolution morphodynamique sur 1 an à partir de la topo-bathymétrie du Litto3D 2019 du SHOM), on observe relativement peu d'évolution des plages (Figure 7.10, Figure 7.11).

Les principales évolutions sur 1 an sont les suivantes :

- Des pics de recul du trait de côte à Sandy Ground (Figure 7.8), a priori peu significatifs et davantage dus à une forte réaction du modèle aux faibles variations de taux de transport sur des plages pauvres en sédiment.
- Un réalignement de la plage de Galisbay en fonction des vagues incidentes (Figure 7.11). Ce réalignement se traduit en Figure 7.9 par une accrétion jusqu'à la section 126 et une érosion entre 127 et 128, qui témoignent en réalité d'un ajustement de l'orientation de la plage.

On observe que sur la plage de Sandy Ground la dérive littorale nette est positive (c'est-à-dire, vers l'est) jusqu'à la section 18, autour de 0 entre les sections 18 et 30, et plutôt négative (c'est-à-dire, vers l'ouest) des sections 30 à 51 : cela traduit un transport littoral global vers le centre de la baie.

Les transports sédimentaires et les évolutions morphodynamiques sur 1 an en état actuel sont globalement limités dans ce contexte de plages pauvres en sédiment (plages érodées, beach rocks...).

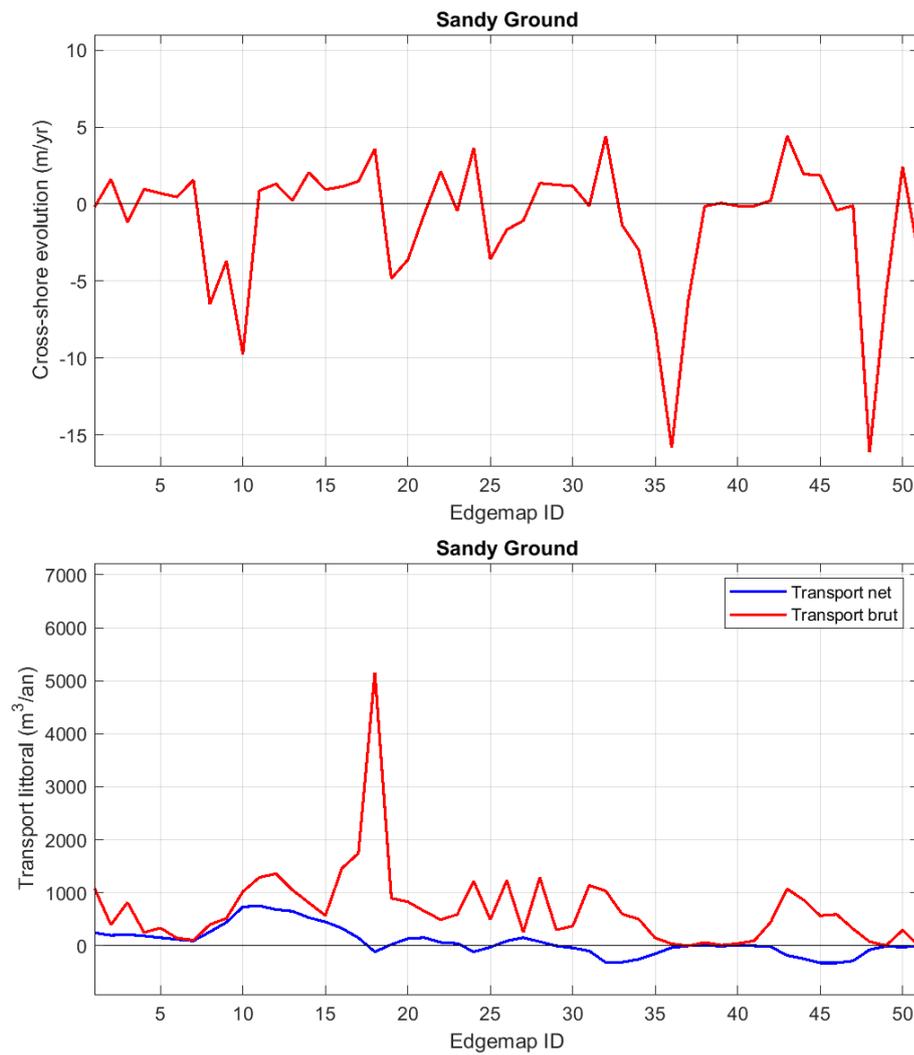


Figure 7.8 Evolution du trait de côte (haut) et dérive littorale (bas) sur la plage de Sandy Ground en 1 an d'évolution morphodynamique, état actuel.

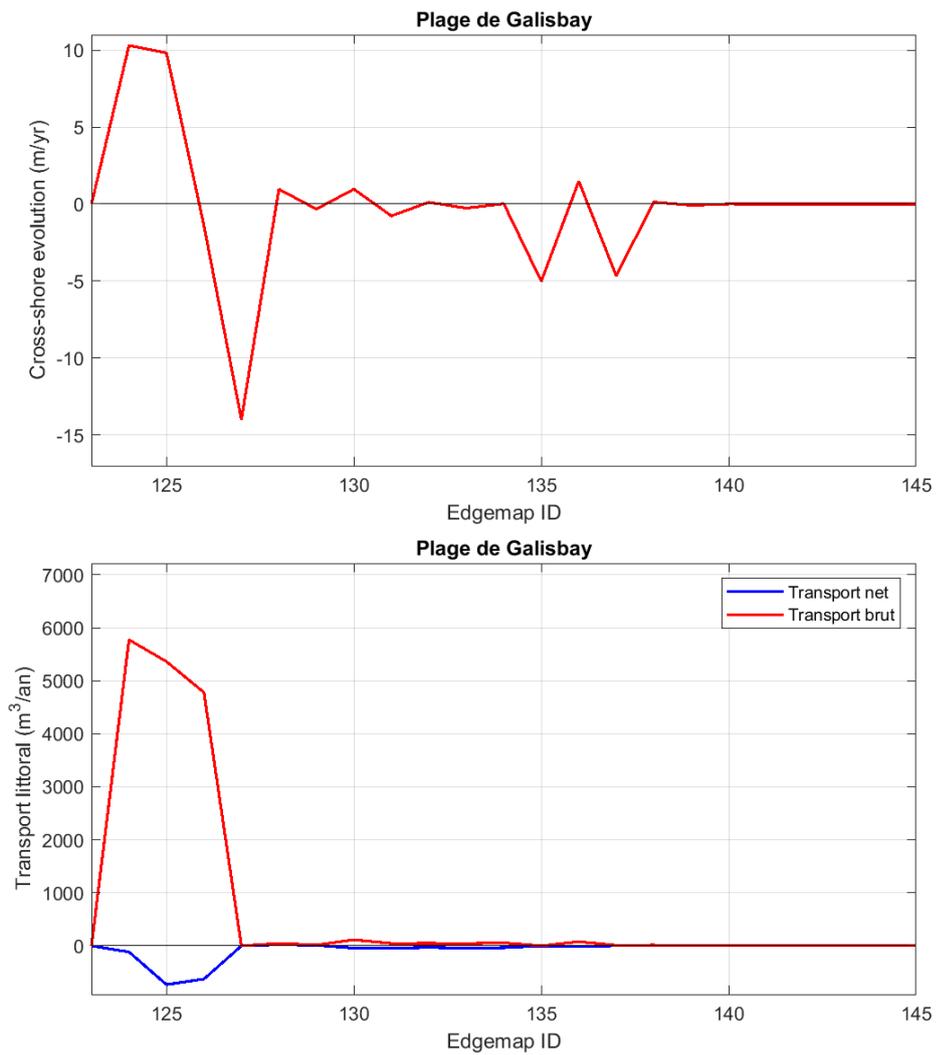


Figure 7.9 Evolution du trait de côte (haut) et dérive littorale (bas) sur la plage de Galisbay en 1 an d'évolution morphodynamique, état actuel.

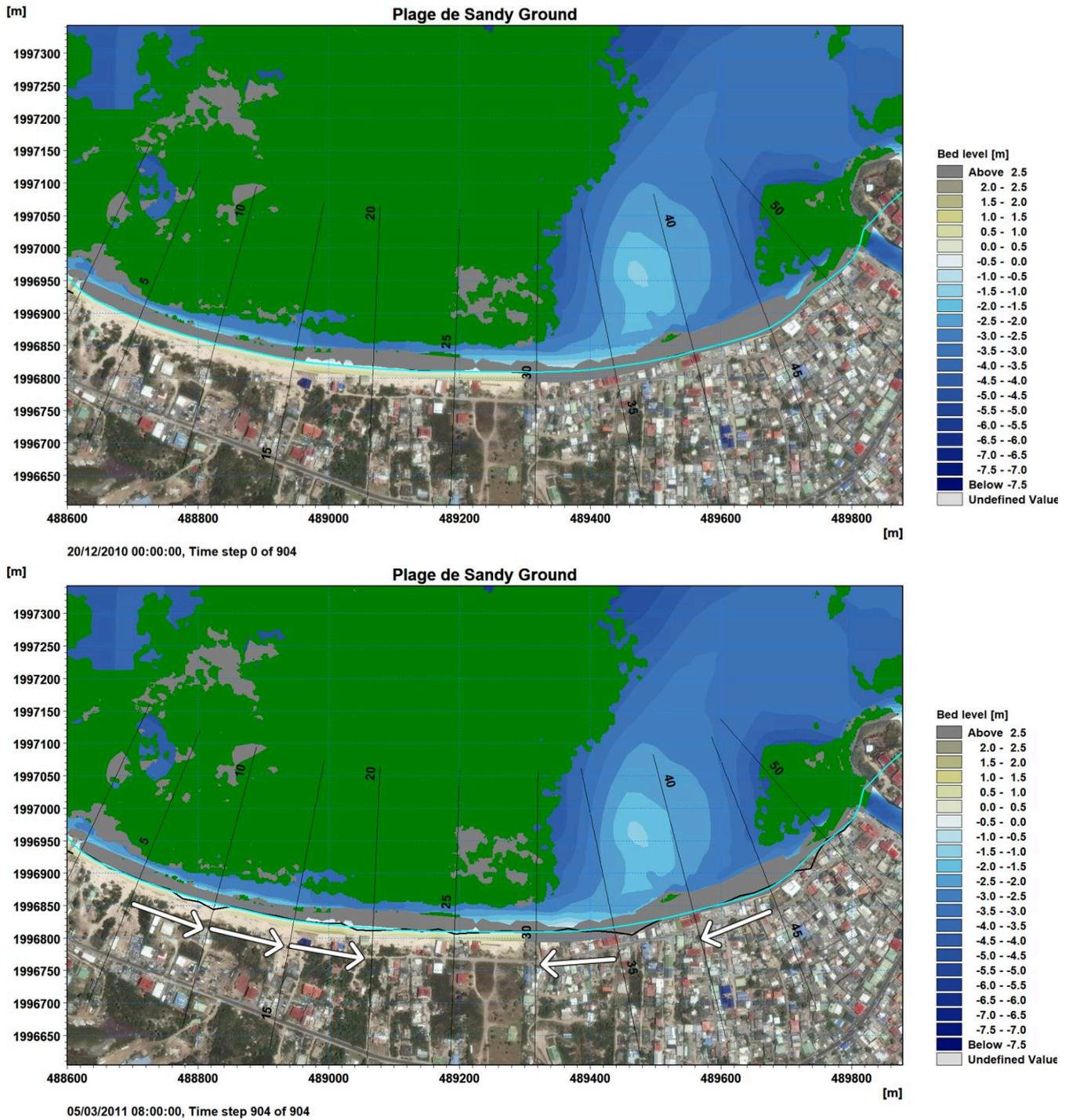


Figure 7.10 Plage de Sandy Ground à T0 (topo-bathymétrie Litto3D 2019) et après 1 an d'évolution morphodynamique

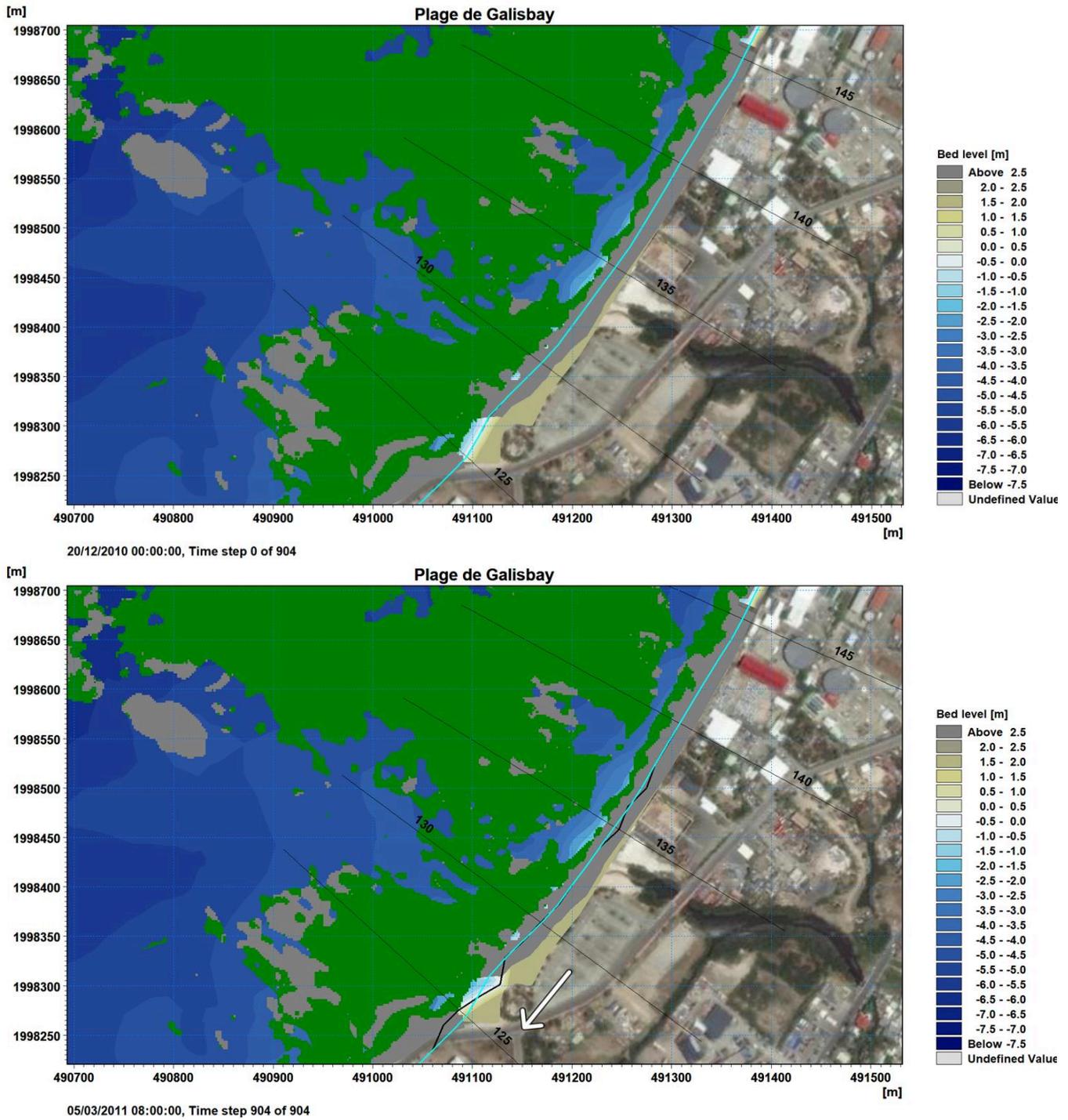


Figure 7.11 Plage de Galisbay à T0 (topo-bathymétrie Litto3D 2019) et après 1 an d'évolution morphodynamique

7.5.2 Evolution à 1 an et 5 ans avec rechargement de plage

L'évolution morphodynamique d'un rechargement des plages de Sandy Ground a été modélisée sur une durée 5 ans.

Ce rechargement de plage consiste en une avancée du trait de côte de 20 m sur 1 300 m sur la plage de Sandy Ground (des épis en T jusqu'à la passe de la lagune) et sur 200 m sur la plage de Galisbay (de l'enrochement jusqu'à la ravine).



Figure 7.12 Localisation des secteurs rechargés en sable.

Les résultats de modélisation sont présentés dans les sections suivantes.

Côté Sandy Ground, la dérive littorale se fait toujours vers le centre de la baie (Figure 7.13 bas : la dérive littorale est positive (vers l'ouest) jusqu'à la section 28, puis négative (vers l'est). Elle diminue d'année en année, le rechargement évoluant au fil du temps vers une position d'équilibre. En conséquence, les extrémités de la plage (près des épis en T à l'ouest et à l'ouest immédiat de la passe de la lagune à l'est) s'érodent et viennent alimenter le centre de la baie, à l'abri du haut fond bathymétrique situé entre les sections 35 et 40 (Figure 7.14). Cette érosion se fait rapidement à l'extrémité est, où le trait de côte rejoint quasiment le trait de côte avant rechargement en 1 an seulement. Après 5 ans, le trait de côte est revenu proche de sa position pré-rechargement sur 50 m à l'ouest (près des épis en T) et sur 150m à l'est (près de la passe de la lagune). Ainsi après 5 ans, 85% du linéaire de Sandy Ground initialement rechargé est toujours rechargé.

Côté Galisbay, au cours des 5 ans modélisés, le rechargement évolue de façon à s'ajuster vers une position d'équilibre vis-à-vis des vagues incidentes. La dérive littorale se fait vers l'ouest jusqu'à la section 128, et vers l'est ensuite (Figure 7.15). Là aussi, elle diminue d'année en année tout en se rapprochant d'une position d'équilibre. Après 5 ans, le trait de côte est toujours plus avancé qu'en situation pré-rechargement. En dehors de ces ajustements d'orientation, le rechargement paraît donc stable.

A noter que les modélisations réalisées n'intègrent pas l'effet d'un cyclone intense, dont l'effet attendu est de projeter une partie significative du sable des plages dans les terres du fait de la surcote importante qui caractérise ce genre d'événements.

De façon générale, les modélisations n'ont montré que des échanges sédimentaires limités entre les plages et la baie. Les échanges sédimentaires entre le haut fond des sections 35 à 40 et la plage restent incertains. Une étude plus avancée sur la base de différentiels bathymétriques précis et réguliers de ce secteur serait nécessaire pour mieux comprendre son fonctionnement.

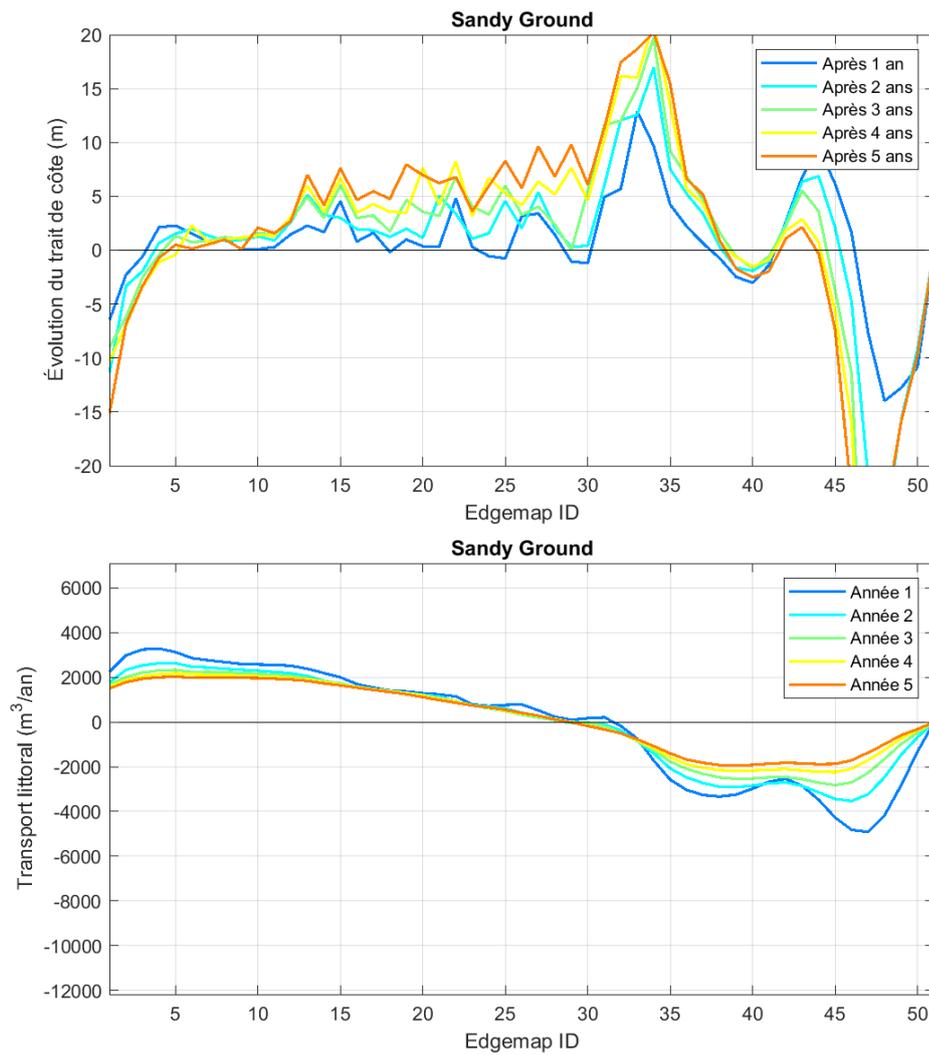


Figure 7.13 Evolution du trait de côte annuelle cumulée (haut) et dérive littorale annuelle (bas) sur la plage de Sandy Ground en 5 ans d'évolution morphodynamique après rechargement.

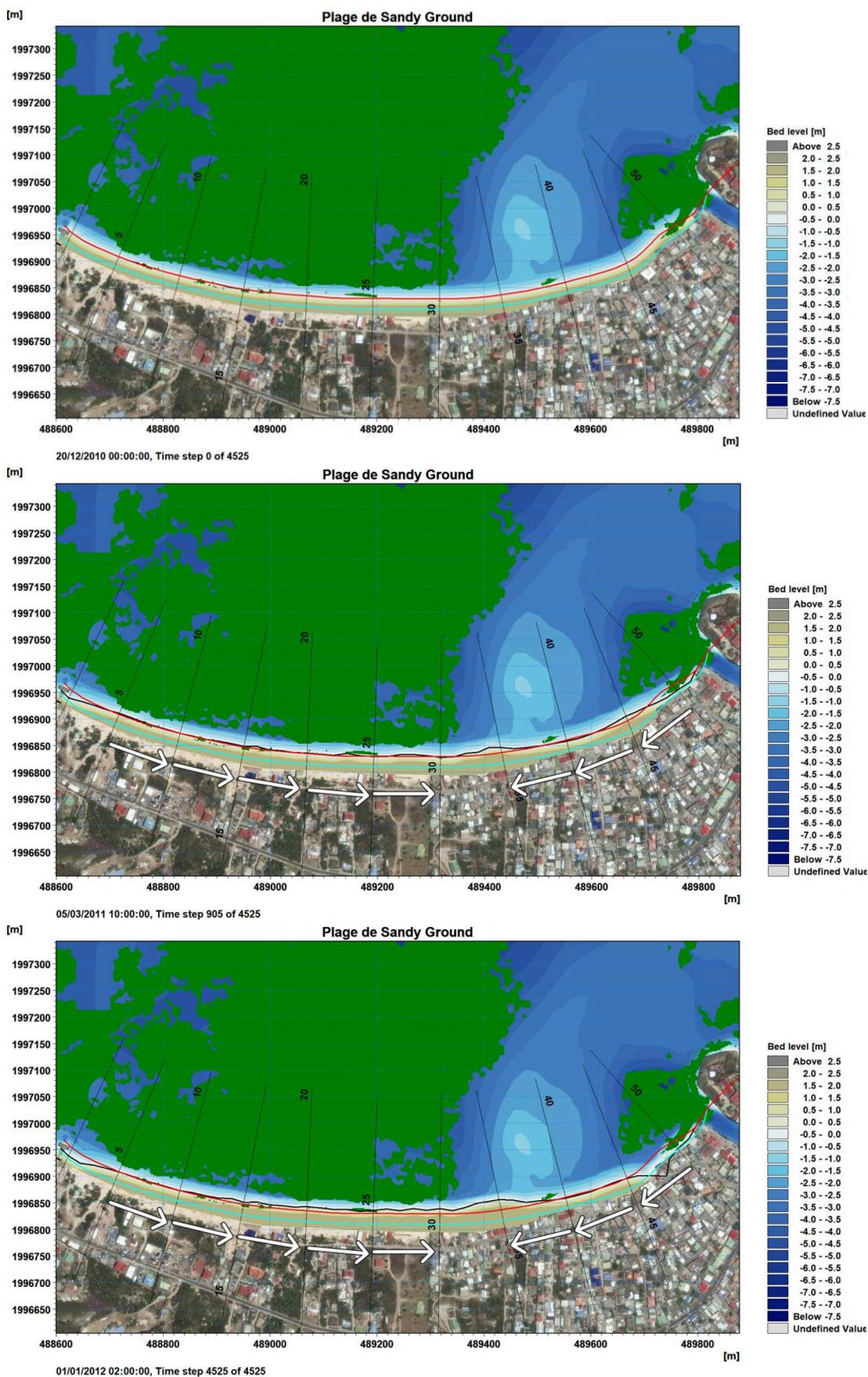


Figure 7.14 Évolution du rechargement de la plage de Sandy Ground : T0 (haut), après 1 an (milieu) et après 5 ans (bas).

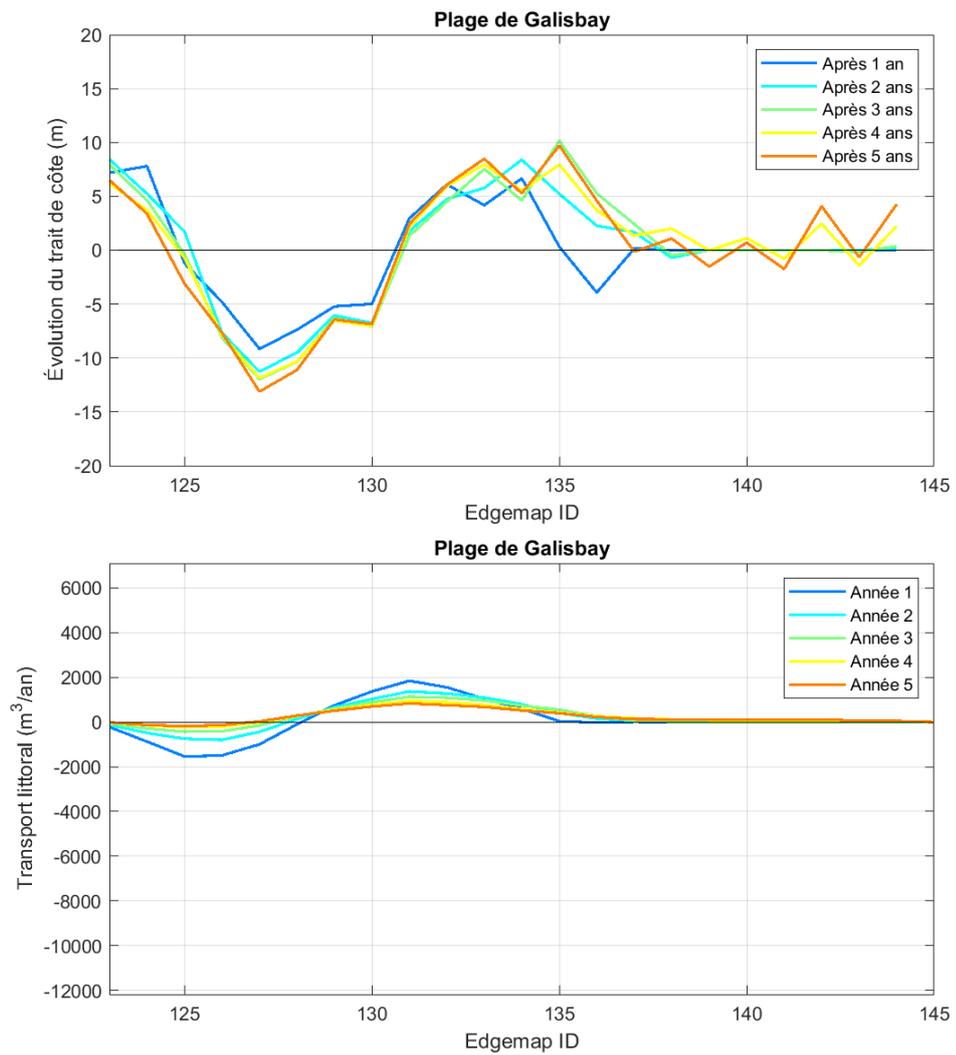


Figure 7.15 Evolution du trait de côte annuelle cumulée (haut) et dérive littorale annuelle (bas) sur la plage de Galisbay en 5 ans d'évolution morphodynamique après rechargement.

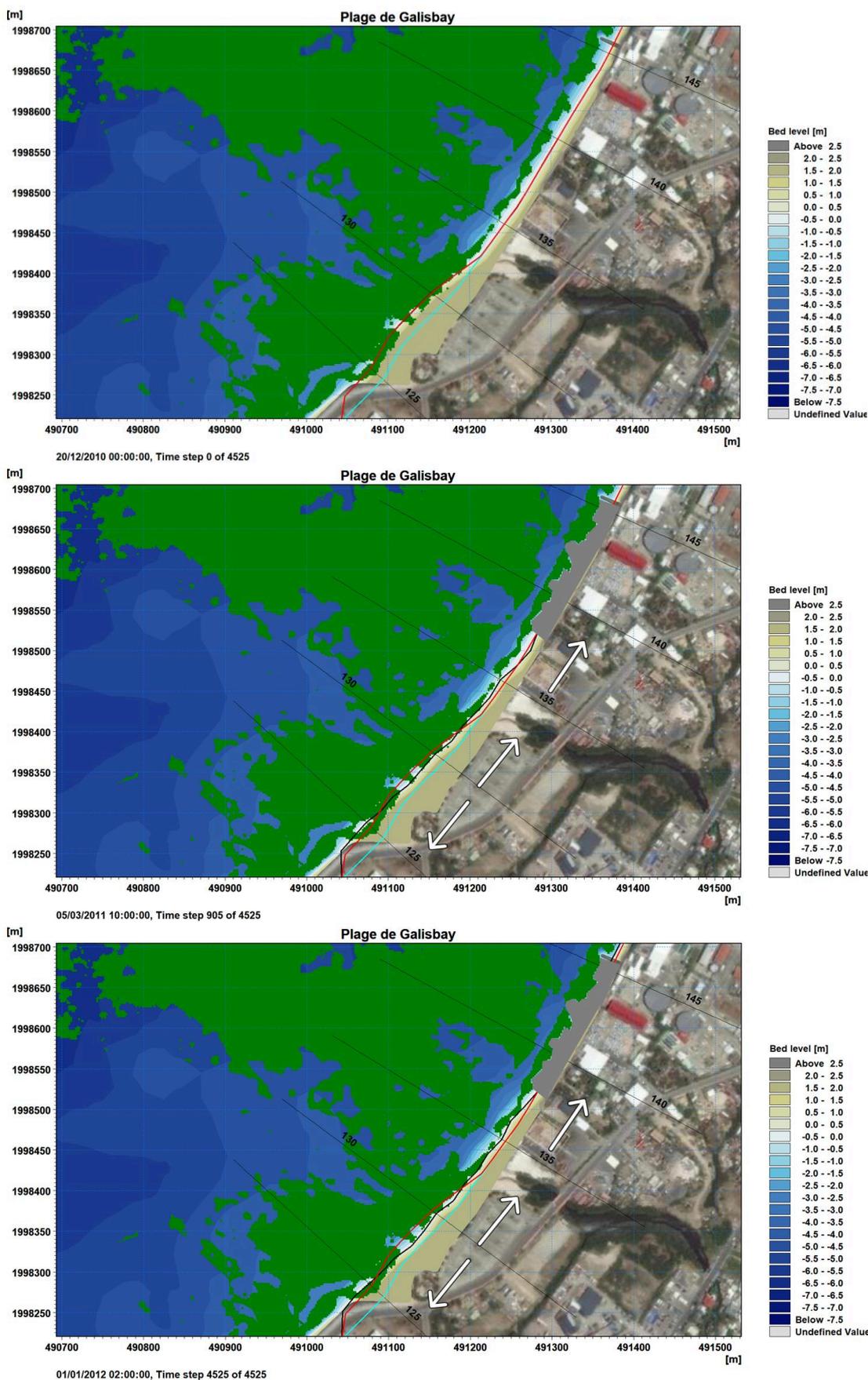


Figure 7.16 Évolution du rechargement de la plage de Galisbay : T0 (haut), après 1 an (milieu) et après 5 ans (bas).

8 Synthèse

L'objectif de la présente étude est de juger de la pertinence du projet de rechargement des plages de Galisbay et Sandy Ground à partir des matériaux sableux à draguer dans le cadre du projet d'extension du port de commerce de Galisbay (environ 150 000 m³).

Le diagnostic hydrosédimentaire réalisé en Phase 1 (Réf. /3/) a effectivement mis en évidence que ces linéaires, qui étaient autrefois des plages sableuses (avant l'artificialisation du littoral dans les années 80) sont actuellement fortement érodés localement.

La pertinence d'un tel rechargement dépend de deux principales conditions : la compatibilité des matériaux de rechargement avec les matériaux in-situ, et la durabilité du rechargement. Ces deux aspects ont été étudiés au cours de cette étude et les principales conclusions tirées sont rapportées ci-dessous.

8.1 Compatibilité granulométrique

Les courbes granulométriques d'échantillons pris sur le site du projet d'extension du port (ANTILLES GEOTECHNIQUE 2016 & 2020) et pris sur les plages (DHI, 2022) ont été comparées pour vérifier la compatibilité de ces sédiments.

Sur les plages, la part de limons < 63 µm est en moyenne de 2% et celle des sables fins [63 µm – 200 µm] est de 3%, tandis que d'après les analyses d'Antilles GEOTECHNIQUE dans les 3,6 m de dépôts marins sableux potentiels au niveau du site du projet la part de limons est de l'ordre de 22% et celle des sables fins de 10%.

Ainsi, on trouve 5% de sédiment < 200 µm sur les plages contre 32% sur le site du projet d'après les analyses d'Antilles GEOTECHNIQUE.

Les conséquences attendues d'un tel rechargement sont les suivantes :

- Les limons vont entraîner une forte turbidité le long des plages, d'abord au moment du rechargement puis lors de la mise en suspension par les vagues de ces limons lors des coups de mer, tant que ceux-ci n'auront pas été lessivés par les conditions hydrodynamiques.
- Les sables les plus fins seront entraînés au-delà du profil actif de la plage, entraînant un risque de sédimentation sur les herbiers de la baie.
- D'après la comparaison des courbes granulométriques, on peut estimer qu'environ 50% du sédiment est compatible. Ainsi, pour un volume de sable disponible estimé de 150 000 m³, environ 75 000 m³ seraient compatibles.

L'impact en termes de turbidité en particulier apparaît critique pour un rechargement de plage qui serait réalisé sans traitement ou tri préalable des sédiments (hydrocyclonage, ...), au regard des enjeux dans la baie et notamment des activités touristiques. Ces techniques étant a priori coûteuses et délicates à mettre en place dans le cadre de ce projet, **il n'est pas recommandé de réaliser le rechargement projeté avec un tel sédiment non trié.**

D'autres pistes peuvent être envisagées pour exploiter le sédiment dragué, comme la restauration du terre-plein de l'anse de Cul-de-Sac où le trait de côte a reculé de plusieurs mètres ces dernières années en raison des opérations de ramassage des sargasses.

8.2 Evolution d'un rechargement de plage

L'évolution sur 5 ans d'un rechargement de plage consistant en une avancée du trait de côte de 20 m sur un linéaire de 1 300 m sur la plage de Sandy Ground et sur un linéaire de 200 m sur la plage de Galisbay a été évaluée par la mise en œuvre d'un modèle de morphodynamique littorale, en faisant l'hypothèse que le sédiment apporté est compatible avec le sédiment en place.

Ces modélisations ont montré une stabilité à échéance 5 ans d'un tel rechargement sur la plage de Galisbay, où la principale évolution consiste en un ajustement de l'orientation du trait de côte au fil des années.

Côté Sandy Ground, la dérive littorale orientée vers le centre de la baie induit une érosion du rechargement aux extrémités de la plage et une accumulation en arrière du haut fond bathymétrique situé à l'ouest de la passe de la lagune. Après 5 ans, le trait de côte a quasiment atteint sa position (actuelle) pré-rechargement sur 50 m à l'ouest (près des épis en T) et sur 150 m à l'est (près de la passe de la lagune). Sur ce dernier linéaire, où le sable est absent aujourd'hui, un rechargement en sable ne peut pas être stable sans l'accompagner d'un ouvrage littoral de type épi. Cependant, après 5 ans, 85% du linéaire initialement rechargé présente toujours un solde sédimentaire positif par rapport à la situation actuelle (pré-rechargement).

Ainsi, un rechargement en sable sur les plages de Sandy Ground et Galisbay serait globalement stable sur 5 ans (hors conditions de cyclones extrêmes) à condition d'être réalisé avec un sédiment compatible.

Pour réaliser un tel rechargement, il faudrait soit trier le sédiment issu du dragage du port de Galisbay, soit trouver une autre source de sédiment, compatible.

8.3 Impact du projet sur la dynamique sédimentaire

Les modélisations numériques réalisées dans le cadre de cette étude ont permis de préciser l'impact du projet (extension du port, dragage du chenal, aménagements tels que la digue et le terre-plein) sur le régime hydrosédimentaire de la baie de Galisbay.

En premier lieu, il est attendu que les hauteurs de vagues soient significativement réduites dans la Baie de la Potence, jusqu'à 60% en moyenne sur la plage située la plus à l'est, et entre 10% et 20% sur la plage de Galisbay. La réfraction des vagues sur les gradients bathymétriques induits par le dragage du chenal d'accès au port induit une focalisation de l'énergie de la houle sur la partie est de la plage de Sandy Ground, mais l'augmentation des hauteurs de vagues moyennes de 2% est peu significative.

L'impact du projet sur la dérive littorale de la baie a également été évalué. Cette analyse n'a pas mis en évidence de changement notable côté Baie Nettlé et Sandy Ground, ce qui confirme le faible impact de la légère hausse des hauteurs de vagues moyennes sur Sandy Ground. L'impact attendu côté Baie de la Potence est à la réduction du transport sédimentaire, du fait de la réduction des hauteurs de vagues.

Ces résultats illustrent que le projet ne devrait pas avoir d'impact négatif en termes d'érosion des plages de la Baie de Galisbay.

9 Références

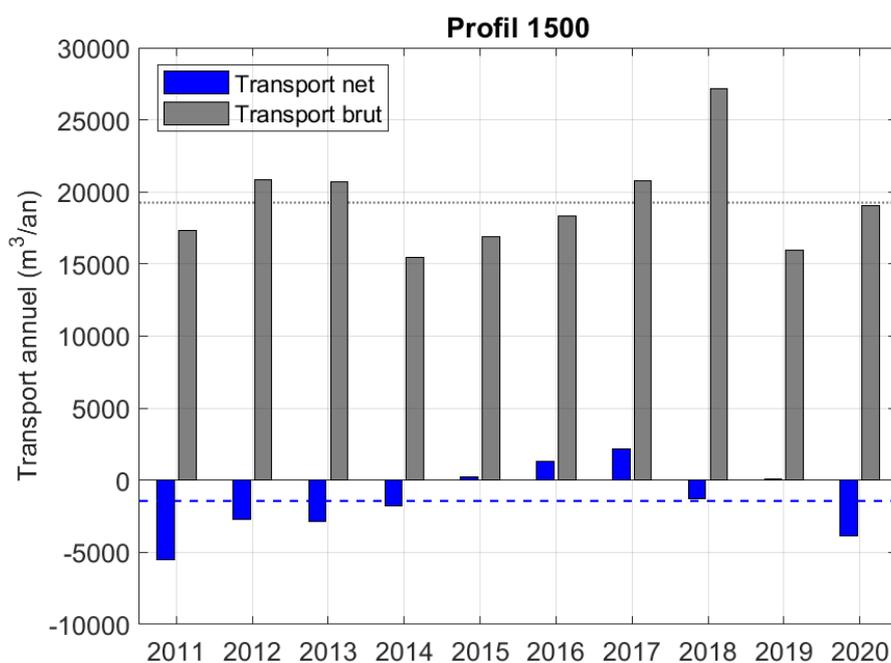
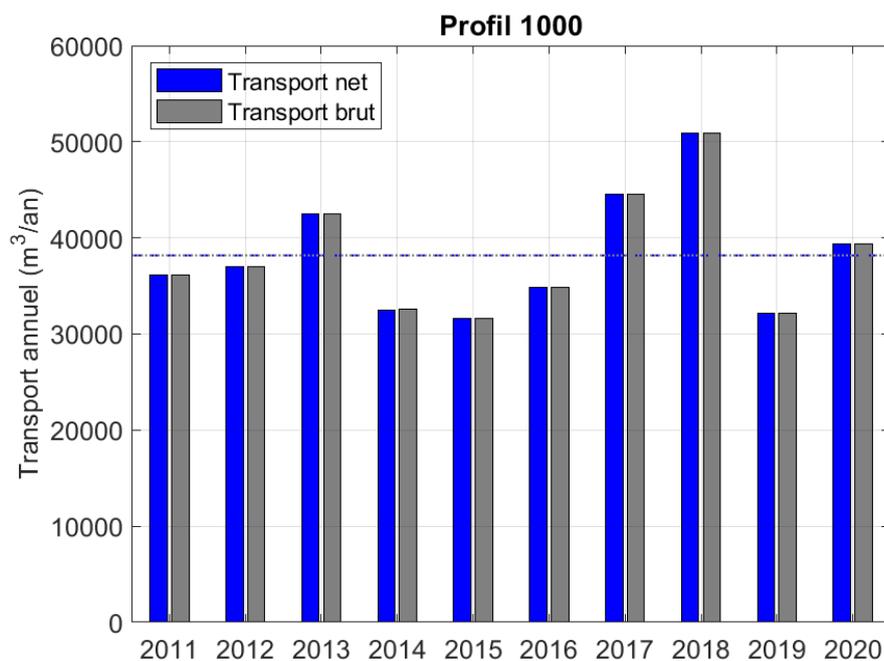
- /1/ DHI, *DAEU du dragage et de l'extension du port de commerce de Galisbay, Phase 2 – Définition de la zone d'immersion – Phase 2A : Elaboration d'un modèle de courantologie générale*, mai 2021.
- /2/ DHI, *DAEU du dragage et de l'extension du port de commerce de Galisbay, Phase 5 – Etudes de modélisation des opérations sur les sites de Galisbay-Marigot et la zone d'immersion – Phase 5A : Validation des modèles hydrodynamiques avec les mesures de 2022*, décembre 2022.
- /3/ DHI, *Projet de rechargement des plages de Sandy Ground et de Galisbay – Étude de modélisation hydrosédimentaire – Phase 1 : Diagnostic de la dynamique hydrosédimentaire des plages de Sandy Ground et Galisbay*, octobre 2022.

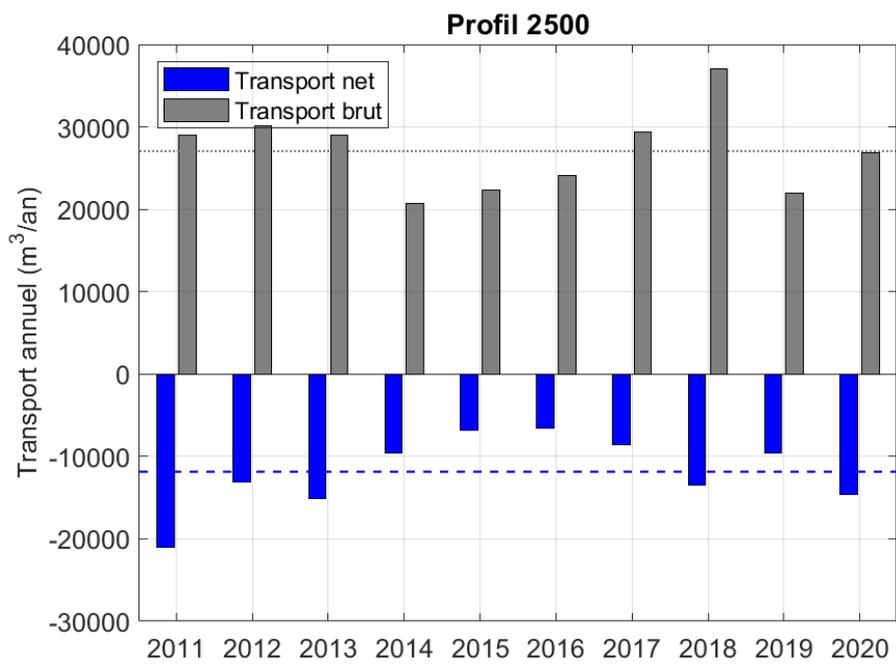
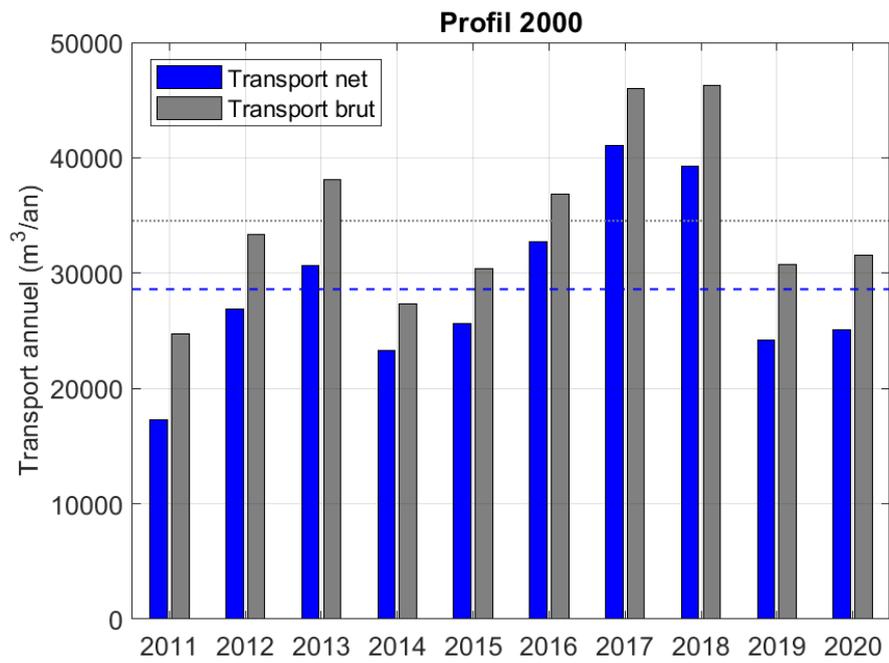
ANNEXES

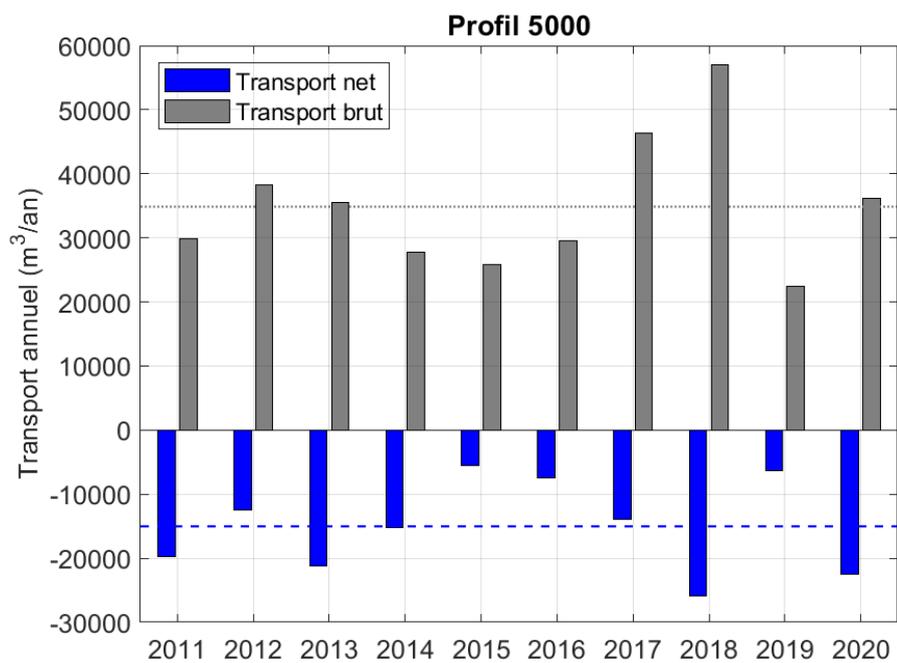
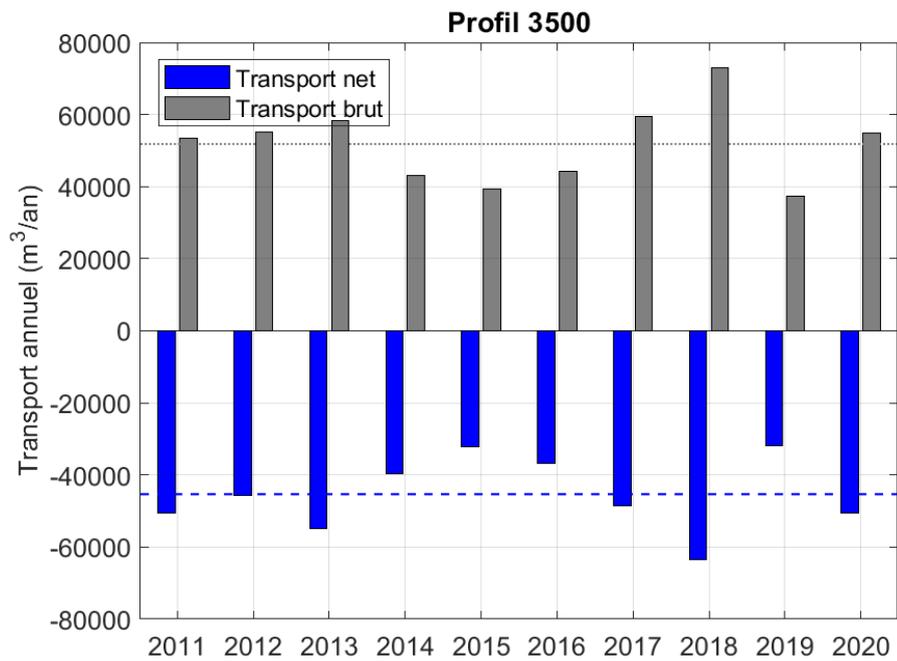
ANNEXE A – Résultats de modélisation de la dérive littorale dans la baie de Galisbay

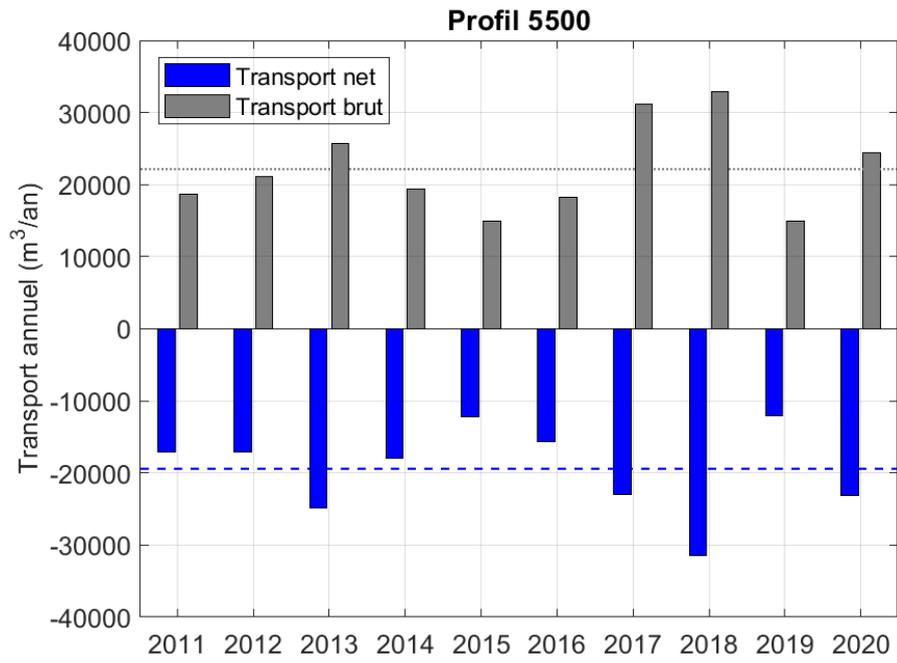
A Résultats de modélisation de la dérive littorale dans la baie de Galisbay

A.1. Variabilité interannuelle

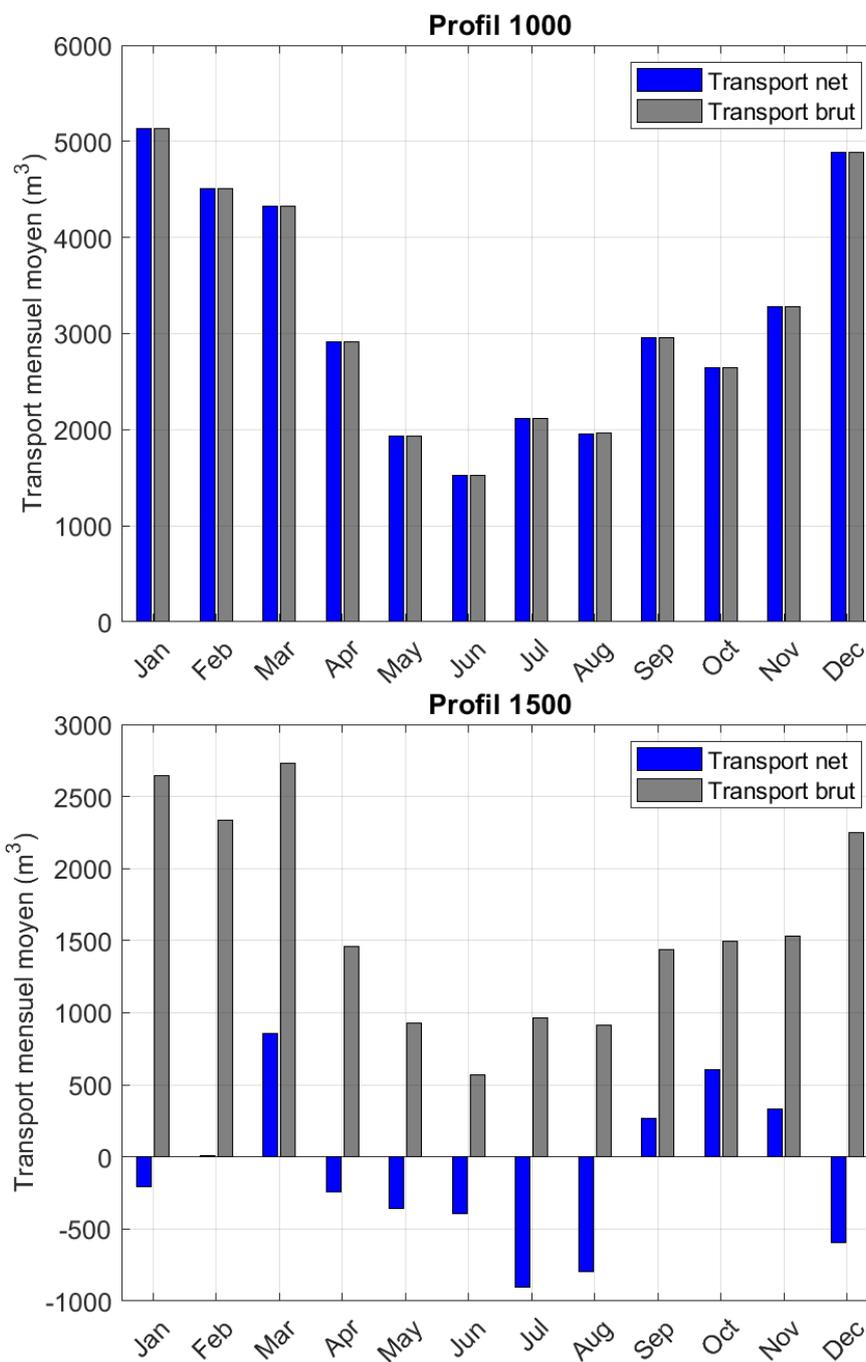


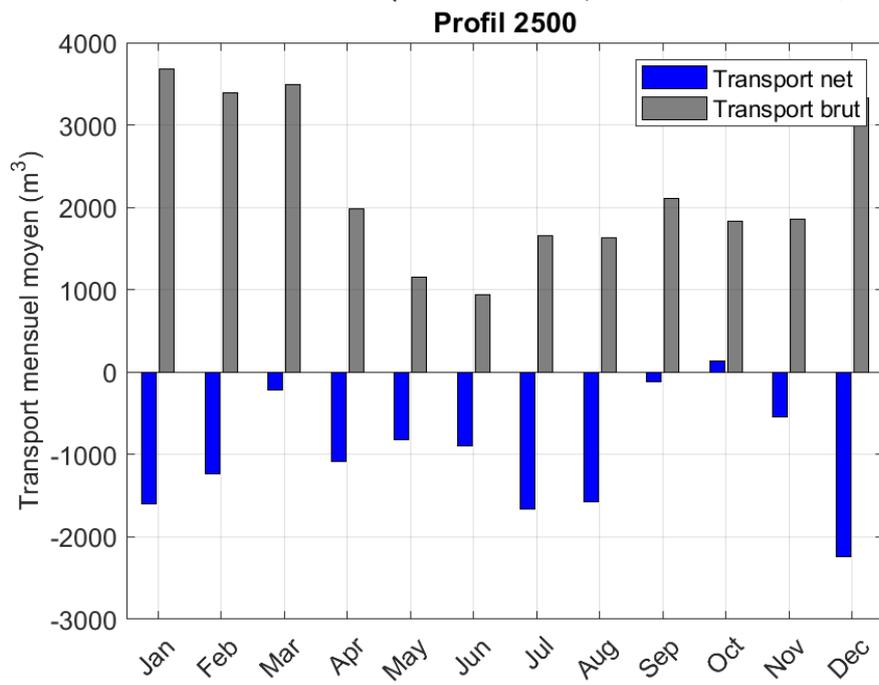
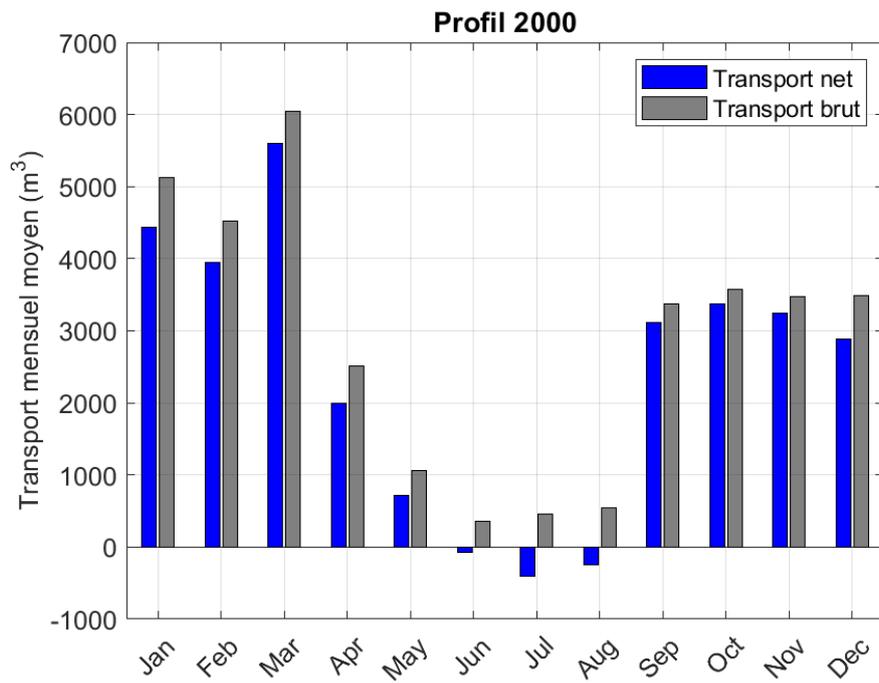


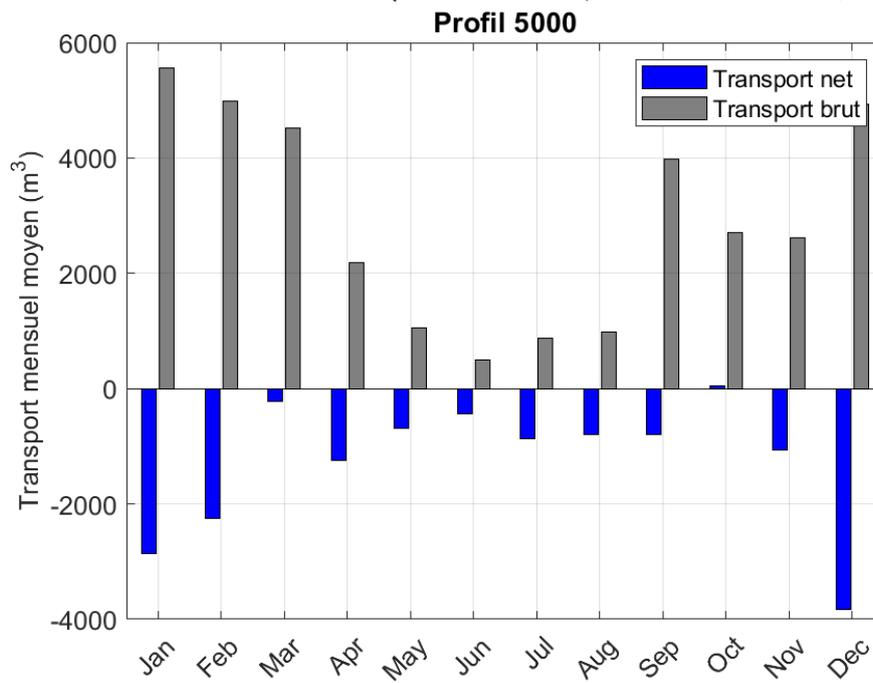
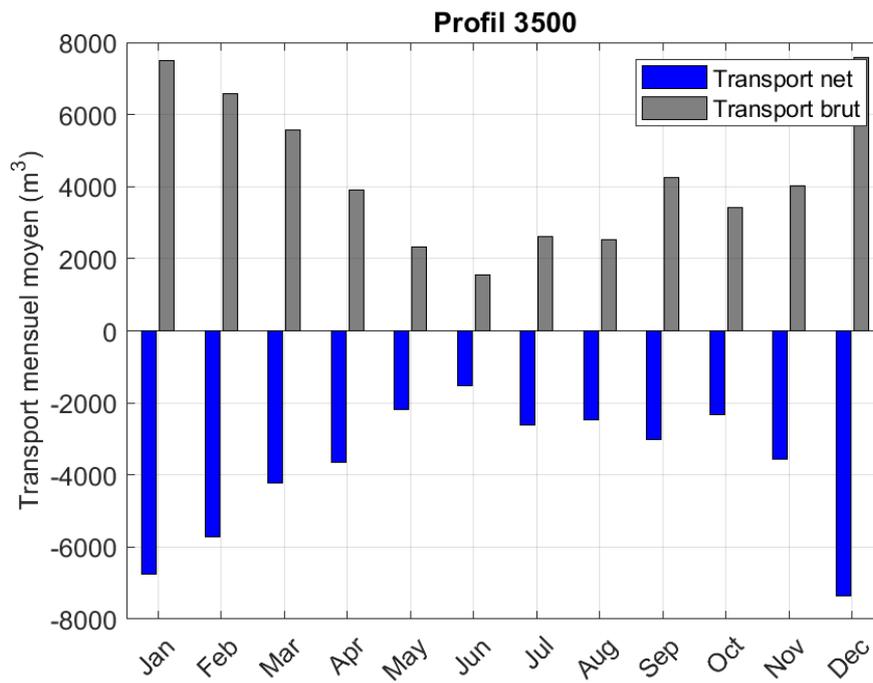


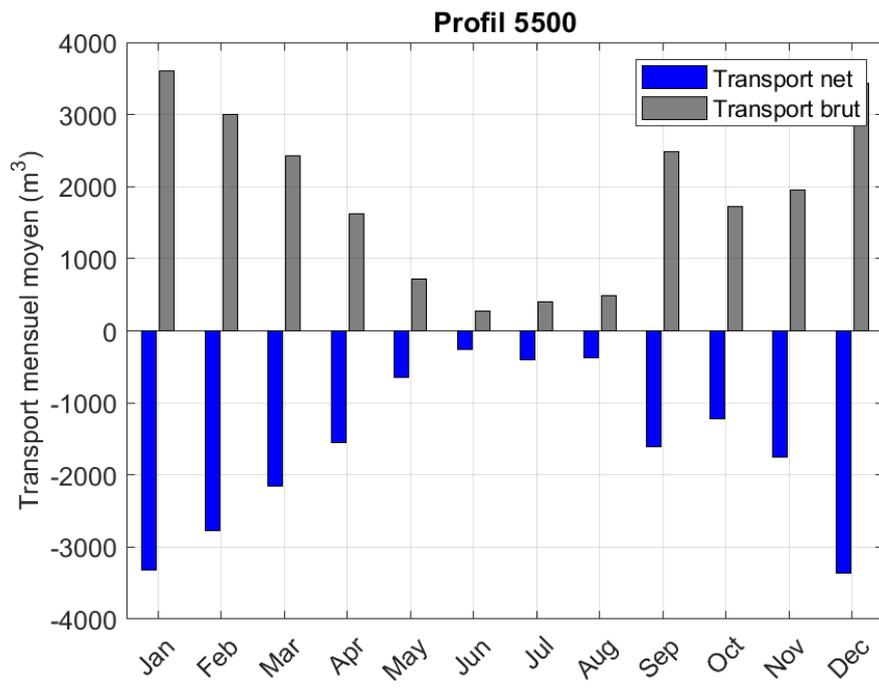


A.2. Variabilité saisonnière

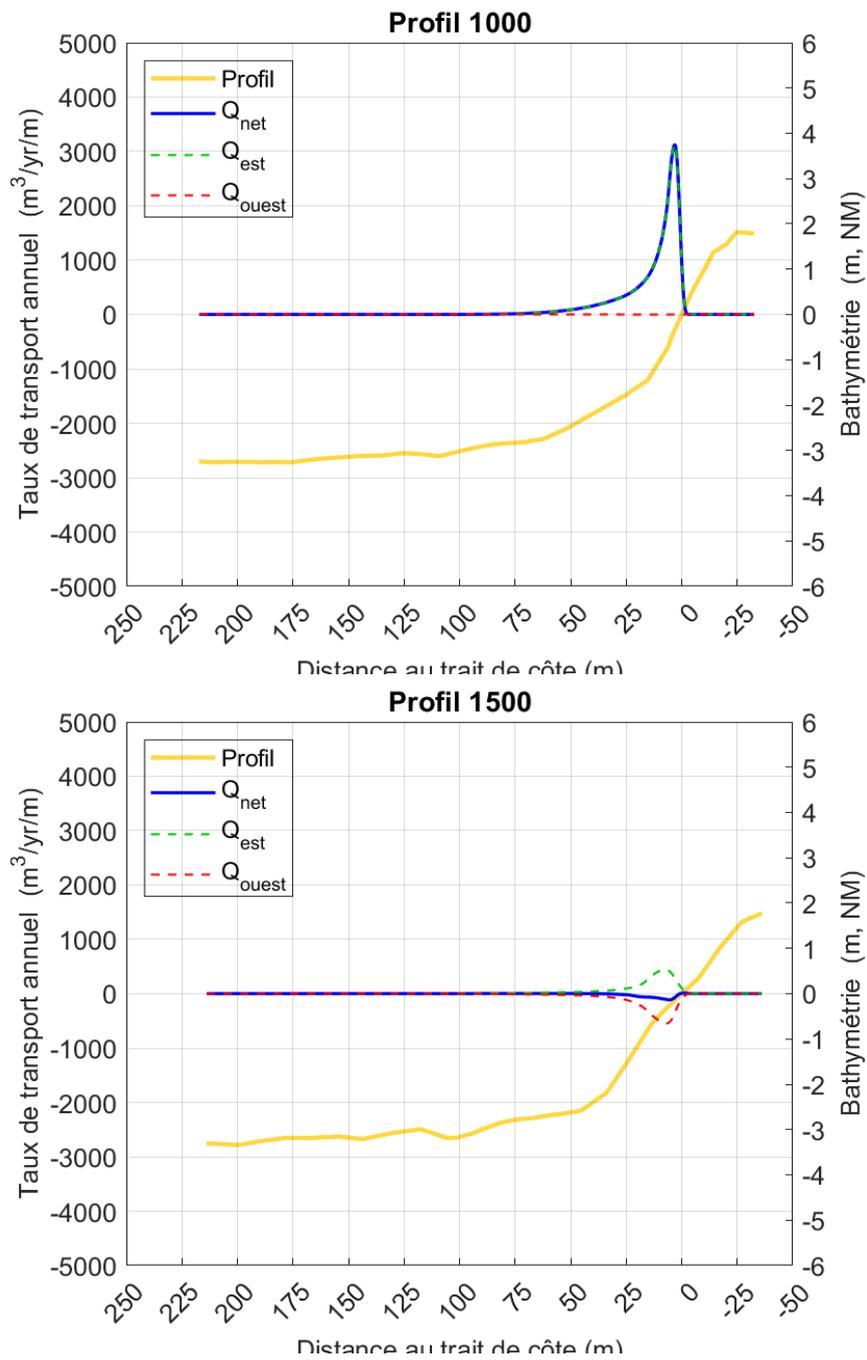


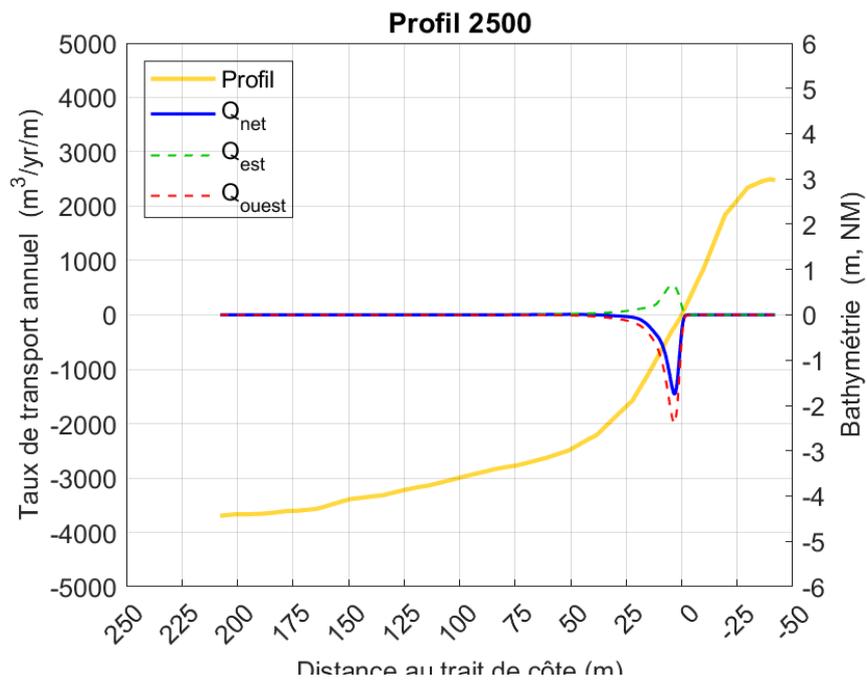
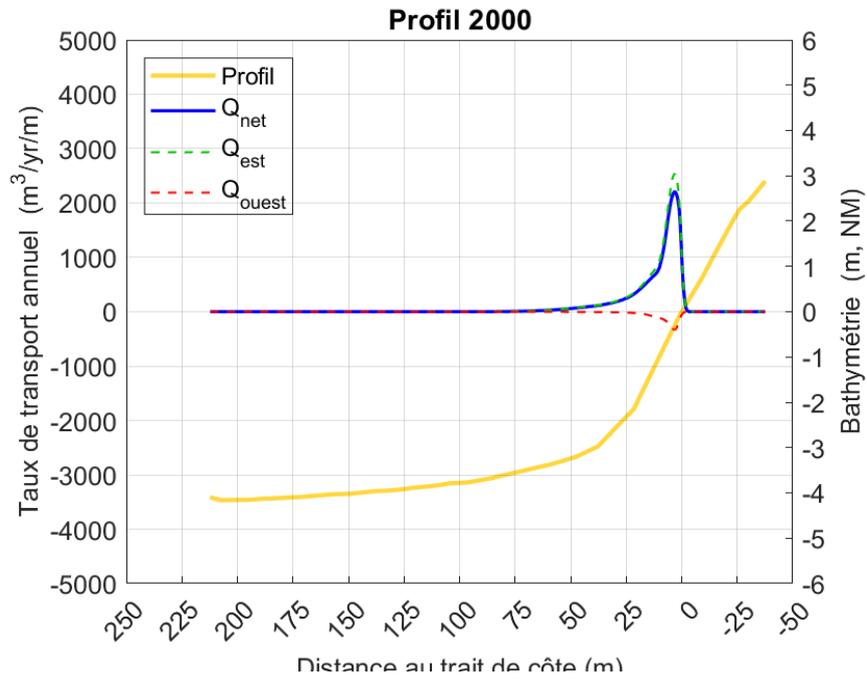


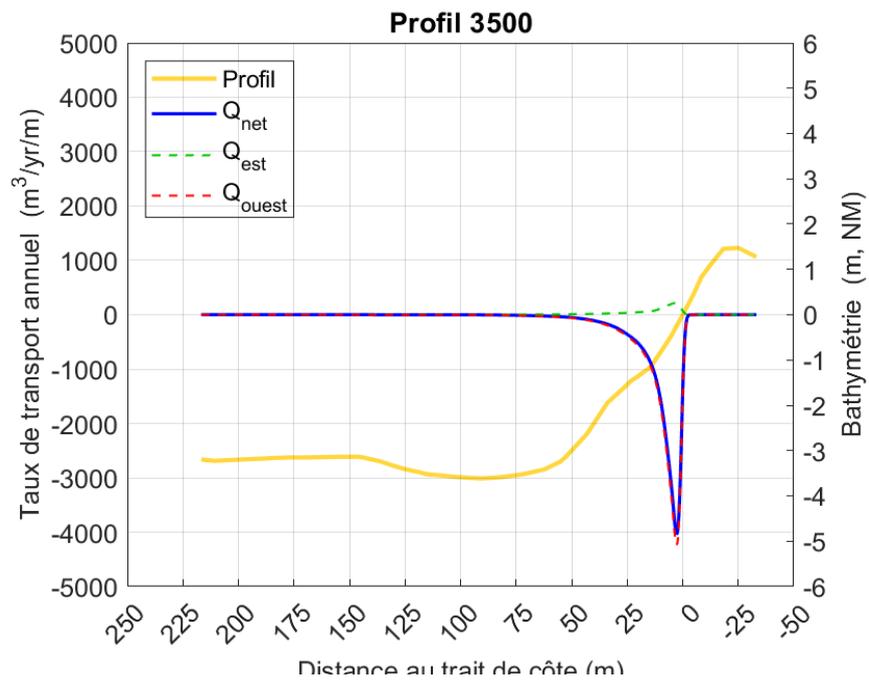


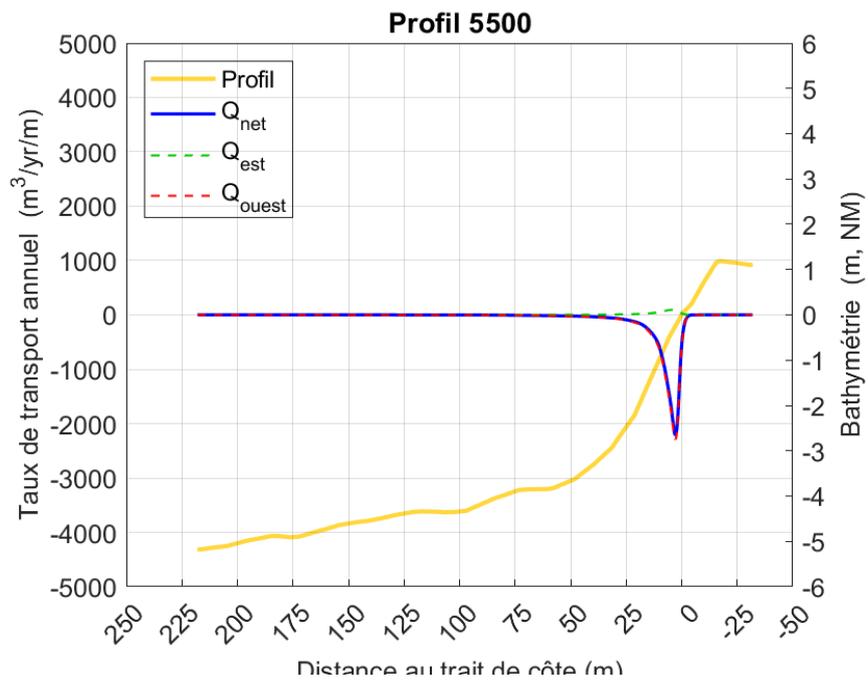
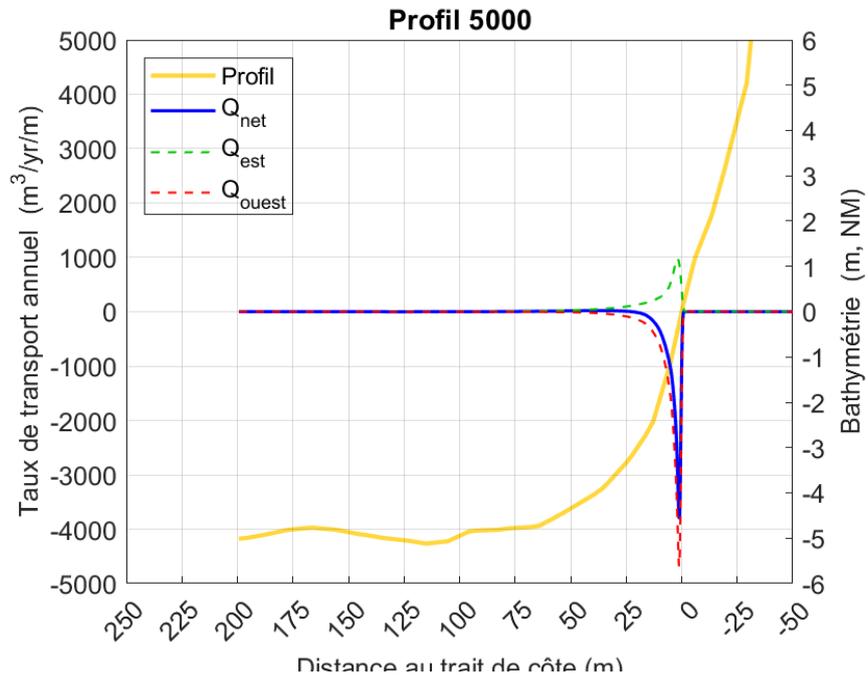


A.3. Distribution du transport dans le profil









A.4. Orientation d'équilibre

