



Université du Québec
à Rimouski

**Évaluation de l'efficacité des travaux de rechargement de plage
dans l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

PAR

© Marc-Olivier Goudreault

Octobre 2025

Composition du jury :

David Didier, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Pascal Bernatchez, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

**Dominique Bérubé, examinateur externe, ministère des Ressources naturelles et
Développement de l'Énergie du Nouveau-Brunswick**

Dépôt final le 1er octobre 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

[À toutes les personnes qui ont
su allumer les étoiles dans mes yeux,
merci]

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Pascal Bernatchez, de m'avoir permis de réaliser un projet de maîtrise de cette envergure. Mon parcours a pu être long et parfois difficile, mais les connaissances acquises au cours de ces quatre années sont d'une valeur inestimable. Je tiens aussi à souligner la confiance, la compréhension et la bienveillance que Pascal accorde à ses étudiant.e.s. Merci pour ce support qui a fait de cette maîtrise une expérience unique et enrichissante. Merci aussi à Dominique Bérubé et David Didier pour leurs commentaires qui ont grandement contribué à mon mémoire.

Merci également au Ministère de la Sécurité Publique du Québec pour le financement accordé de ce projet de recherche dans le « Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2020 du gouvernement du Québec » [CPS 17-18-02]. Ce soutien démontre une réelle volonté d'améliorer les connaissances des enjeux côtiers et de travailler sur des solutions concrètes. Un merci particulier à Jean-Denis Bouchard pour sa collaboration tout au long du projet.

Merci à Philippe Sauvé pour son support pendant ma maîtrise, de m'avoir niaisé quand j'arrivais trop tard au laboratoire (ça me motivait à arriver plus tôt le lendemain!) et de m'avoir demandé de sortir « toutes les références sur les recharges ». Ça m'est apparu comme une montagne, mais cette montagne a grandement contribué à mon travail.

Merci aussi à Ronan Autret qui est arrivé de France, à la rescousse, pour m'appuyer dans le traitement des données de ce projet. Merci aussi à Maude Corriveau, la professionnelle de recherche la plus dévouée auprès des étudiant.e.s. Cet accompagnement est indispensable à la réussite de tous les projets des étudiant.e.s du laboratoire. Merci à Steeve Dugas de m'avoir accueilli au laboratoire et m'avoir rassuré avant de déménager à Rimouski. Merci également à toute l'équipe du laboratoire qui a participé à mon projet et plus particulièrement à Catherine Bruyère, Ariane Jobin, Denys Dubuc, Nicholas Marion, Renaud McKinnon, Clara Pelletier-Boily et Benjamin Ferris.

Finalement, merci à mes parents de m'avoir soutenu tout au long de mes études, à Malika, Éliane et Didier, ma famille rimouskoise, de m'avoir accueilli et à Alexandra, mon amoureuse, de m'avoir encouragé et soutenu pour le dernier mile de cette maîtrise.

RÉSUMÉ

La recharge de plage est une méthode douce de protection côtière encore très récente au Québec. Cette méthode s'étant avérée efficace sur plusieurs côtes du monde, elle pourrait être considérée davantage sur les côtes québécoises. L'efficacité des recharges de plage impliquant de gros volumes sédimentaires n'a toutefois pas encore été évaluée au Québec. Cette recherche vise à analyser l'évolution morphosédimentaire et à évaluer l'efficacité des recharges de plage dans la réduction des risques d'érosion et de submersion côtière pour 5 sites situés dans l'Est du Québec. Pour ce faire, une analyse rétrospective et des suivis morphosédimentaires et hydrodynamiques ont été effectués pour chaque site à l'étude. Les méthodes de conception des recharges ont ensuite été évaluées et comparées avec l'information trouvée dans la littérature internationale. L'évaluation de l'efficacité des recharges et des recommandations par rapport aux critères à considérer dans la planification de ces projets ont par la suite été effectuées à partir des données récoltées et des données présentées dans la littérature scientifique. Les résultats démontrent que la recharge de plage peut être une méthode de protection efficace contre l'érosion et la submersion au Québec, bien que les différentes méthodes utilisées fassent grandement varier les résultats. L'utilisation récente de la recharge de plage comme méthode de protection côtière sur les côtes québécoises et le manque d'expérience et de préparation pour certains projets pourraient toutefois avoir limité leur efficacité. L'absence d'état de référence et le manque de suivi directement après la recharge pour certains projets a aussi limité leur analyse. L'amélioration des méthodes de conception, de la planification des recharges et du suivi pré et postrecharge contribuera à augmenter l'efficacité des projets futurs.

Mots clés : Recharge de plage, géomorphologie, science côtière, gestion intégrée, protection côtière

ABSTRACT

Beach nourishment is a soft engineering shore protection method still very recent in Quebec. This method has been effective on multiple coasts around the world and therefore could be further taken into consideration. However, efficiency of beach nourishments concerning large sediment volumes hasn't yet been evaluated on Quebec coasts. This research aims to analyse the morphosedimentary evolution and to evaluate the efficiency of beach nourishment to reduce coastal erosion and flooding in Quebec for 5 locations with nourishment. To do so, retrospective analysis and morphosedimentary monitoring where performed for each study sites. Conception methods where than evaluated and compared with international literature. Results shows that beach nourishment can be an effective method to protect against erosion and coastal flooding in Quebec. However, the different methods used greatly vary the results. Quebec is still beginning to use beach nourishment as a method of coastal protection and that the lack of experience and preparation for certain nourishment projects has limited their effectiveness. The absence of a reference state and the lack of monitoring regarding certain nourishments has also limited their analysis. Improved design methods, nourishment planification and pre and post nourishment monitoring will help to improve the efficiency of future nourishment projects.

Keywords: Beach nourishment, geomorphology, coastal science, integrated management, coastal protection

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	vii
RÉSUMÉ	x
ABSTRACT.....	xi
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xvi
LISTE DES FIGURES	xvii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxviii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 État des connaissances sur les recharges de plage	4
1.1 NOTIONS UTILES POUR LA CONCEPTION ET LA MISE EN PLACE DES RECHARGES DE PLAGE	4
1.1.1. Érosion historique	4
1.1.2. Profil d'équilibre.....	4
1.1.3. Profondeur de fermeture	6
1.1.4. Transport sédimentaire parallèle à la côte	9
1.2 CONCEPTION DES RECHARGES DE PLAGE.....	13
1.2.1. Méthode de déposition.....	13
1.2.2. Emplacement.....	14
1.2.3. Stratégies et techniques de conception	19
1.2.4. Matériaux	21
1.2.5. Densité de la recharge	23
CHAPITRE 2 Localisation et description des sites d'étude	24

2.1	PLAGE DE L'ANSE-AUX-COQUES.....	25
2.1.1.	Contextes géographiques, géologiques et géomorphologiques	25
2.1.2.	Contexte hydrodynamique	27
2.2	BANC LAROCQUE.....	28
2.2.1.	Contextes géographiques, géomorphologiques et géologiques	28
2.2.2.	Contexte hydrodynamique	31
2.3	PLAGE MONAGHAN.....	32
2.3.1.	Contextes géographiques, géomorphologiques et géologiques	32
2.3.2.	Contexte hydrodynamique	36
2.4	ILES-DE-LA-MADELEINE	37
2.4.1.	Contextes géographiques, géomorphologiques et géologiques	37
2.4.2.	Contexte hydrodynamique	43
	CHAPITRE 3 Méthodologie	47
3.1	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE GÉNÉRALE	47
3.2	ANALYSE HISTORIQUE DE LA DYNAMIQUE DE LA LIGNE DE RIVAGE ET DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE LA PLAGE	48
3.3	SUIVI TOPOMORPHOLOGIQUE	51
3.3.1.	Profils de plage	52
3.3.2.	Topographie par LiDAR	53
3.3.3.	Topographie par photogrammétrie SfM	55
3.4	ANALYSES DES DONNÉES TOPOMORPHOLOGIQUES.....	57
3.4.1.	Analyse des données vectorielles.....	57
3.4.2.	Analyses des données surfaciques	59
3.5	SUIVI GRANULOMÉTRIQUE	60
3.6	SUIVI DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES À PARTIR D'UNE CAMÉRA	61
	CHAPITRE 4 RÉSULTATS	62
4.1	ANSE-AUX-COQUES	62
4.1.1.	Évolution historique (1963-2015).....	62

4.1.2.	Caractérisations granulométriques	64
4.1.3.	Évolution du secteur de la recharge de plage de septembre 2012 à décembre 2019	67
4.1.4.	Causes explicatives de l'évolution du secteur	86
4.2	BANC LAROCQUE.....	90
4.2.1.	Évolution historique.....	90
4.2.2.	Caractérisations granulométriques	93
4.2.3.	Évolution du secteur de la recharge de plage d'août 2018 à novembre 2019.....	96
4.2.4.	Causes explicatives de l'évolution du secteur	107
4.3	PLAGE MONAGHAN.....	112
4.3.1.	Évolution historique.....	112
4.3.2.	Caractérisations granulométriques	114
4.3.3.	Évolution du secteur de la recharge de plage de mai 2018 à décembre 2019.....	117
4.3.4.	Causes explicatives de l'évolution du secteur	126
4.4	PLAGE DE LA MARTINIQUE	129
4.4.1.	Évolution historique.....	129
4.4.2.	Caractérisations granulométriques	132
4.4.3.	Évolution du secteur de la recharge de plage de mai 2018 à décembre 2019.....	135
4.4.4.	Causes explicatives de l'évolution du secteur	147
4.5	PLAGE DE LA POINTE AUX LOUPS	151
4.5.1.	Évolution historique.....	151
4.5.2.	Caractérisations granulométriques	153
4.5.3.	Évolution du secteur de la recharge de plage.....	156
4.5.4.	Causes explicatives de l'évolution du secteur	172
	CHAPITRE 5 DISCUSSION	176
5.1	LE CONTEXTE DES RECHARGES AU QUÉBEC	176

5.1.1.	L'environnement côtier des recharges	176
5.1.2.	Conception des recharges	178
5.2	ÉVALUATION DES MÉTHODES DE RECHARGE DE PLAGE COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS	180
5.2.1.	Réponse de la plage Monaghan	180
5.2.2.	Réponse des plages de l'Anse-aux-Coques et du banc Larocque.....	182
5.2.3.	Réponse des plages de La Martinique et de la Pointe aux Loups.....	183
5.3	RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE ET LE SUIVI DES RECHARGES DE PLAGES.....	185
5.3.1.	Recommandations générales.....	185
5.3.2.	Phase de conception.....	186
5.3.3.	Phase de réalisation.....	188
5.3.4.	Suivi et réajustements	189
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	191
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	194
	ANNEXES.....	217

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Interventions des différents sites de recharge	25
Tableau 2. Photographies aériennes utilisées pour l'ensemble des sites d'étude.	49
Tableau 3. Taux d'évolution de la cellule hydrosédimentaire de l'Anse-aux-Coques (m/an).....	62
Tableau 4. Marées où le muret a été atteint par le niveau d'eau et intensité	85
Tableau 5. Taux d'évolution des cellules hydrosédimentaires du barachois de Carleton et de la baie de Cascapédia (m/an).....	92
Tableau 6. Taux d'évolution de la cellule hydrosédimentaire de la baie de la Boule (m/an).....	112
Tableau 7. Taux d'évolution de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance (m/an).....	130
Tableau 8. Taux d'évolution de la cellule hydrosédimentaire de la Pointe aux Loups (m/an).....	151

LISTE DES FIGURES

Figure 1. a) Variations du paramètre A en fonction de la distance ; b) Profils d'équilibre pour des valeurs de A de $0,068 \text{ m}^{1/3}$ ($D = 0,1 \text{ mm}$), de $0,1 \text{ m}^{1/3}$ ($D = 0,2 \text{ mm}$) et pour la variation de A selon la distance (Adapté de Dean, 1991)	6
Figure 2. Délimitation des zones côtières selon Hallermeier (1981), Héquette (2001) et Bird (2008).....	7
Figure 3: Transformation des vagues du large vers la côte. Adaptée des figures de Davidson-Arnott (2010).....	10
Figure 4. Schématisation d'une recharge de dunes.....	15
Figure 5. Schématisation d'une recharge de plage	16
Figure 6. Schématisation d'une recharge d'avant-plage en forme de berme	17
Figure 7. Schématisation d'une méga-recharge. A) Méga-recharge vue en plan avant la dispersion sédimentaire. B) Méga-recharge vue en plan après la dispersion sédimentaire. C) Méga-recharge vue de profil.	18
Figure 8. Principales étapes de recharge d'un projet de recharge	19
Figure 9 : Localisation des sites d'étude avec suivi de recharges de plages.....	24
Figure 10. Recharge de la plage de l'Anse-aux-Coques.....	25
Figure 11. Coupe schématique transversale du littoral et ses composantes pour le secteur d'étude (Dionne, 2002).	26
Figure 12. Plage de l'Anse-aux-Coques en 2018 et 2019.....	27
Figure 13. Contexte hydrodynamique du secteur de l'Anse-aux-Coques. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.	28

Figure 14. Littoral et basses terres dans le secteur du banc Larocque. Le plateau gaspésien est également visible à l'arrière.	29
Figure 15. Recharge de plage du banc Larocque.	30
Figure 16. Banc Larocque en 2018 et 2019	31
Figure 17. Contexte hydrodynamique du secteur du banc Larocque. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.	32
Figure 18. Différents types de côte dans la région de Sept-Îles. A) Terrasse de plage; B) Falaise meuble; C) Côte rocheuse.	34
Figure 19. Recharge de la plage Monaghan.....	35
Figure 20. Plage Monaghan en 2018 et 2019	36
Figure 21. Contexte hydrodynamique du secteur de la plage Monaghan. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.	37
Figure 22. Photos obliques de 3 unités morphologiques des îles-de-la-madelaine. a) plateau de grès rouge (Cap-aux-Meules) ; b) butte des demoiselles (Havre-Aubert) ; c) tombolo reliant l'île de Cap-aux-Meules à l'îles du Havre-Aubert.	39
Figure 23. Schéma de 3 unités morphologiques des îles-de-la-madelaine. a) plateau de grès ; b) piémonts karstiques ; c) buttes volcaniques. Figure adaptée de Hétu (2020).	40
Figure 24. Recharge de la plage de La Martinique.	41
Figure 25. Plage de La Martinique en 2018 et 2019	42
Figure 26. Recharge de la plage de la Pointe aux Loups.	42
Figure 27. Plage de la Pointe aux Loups (secteur sud) en 2018 et 2019.	43
Figure 28. Contexte hydrodynamique du secteur de la plage de La Martinique. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur	

significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.....	44
Figure 29. Contexte hydrodynamique du secteur de la Pointe aux Loups. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.	46
Figure 30: Traits utilisés pour l'évolution historique du littoral selon les types de côtes.	49
Figure 31: Exemple de la méthode MobiTC	51
Figure 32. Prise de données avec DGPS Trimble © R10	53
Figure 33. Système Mobile de LiDAR Terrestre du LDGIZC	54
Figure 34. Représentation d'un levé photogrammétrique à l'aide d'un cerf-volant (1). Lors d'un relevé effectué à l'aide du drone, la caméra (2) est intégrée à l'engin aéroporté. Il n'y a donc pas de caméra externe comme pour les levés par cerf-volant et ballon dirigeable. Les cibles (3) sont utilisées comme points de contrôle.	56
Figure 35. Exemple de position des échantillons le long d'un profil (Profil n° 14, Banc Larocque)	60
Figure 36. Exemple d'installation d'une caméra de suivi.....	61
Figure 37. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de l'Anse-aux-Coques	63
Figure 38. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques.....	64
Figure 39. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude en 2019 (Anse-aux-Coques)	65
Figure 40. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran de la plage de l'Anse-aux-Coques	66
Figure 41. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran de la plage de l'Anse-aux-Coques	67

Figure 42. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 1 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.....	69
Figure 43. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 1 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	69
Figure 44. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 5 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.....	70
Figure 45. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 5 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	71
Figure 46. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.....	72
Figure 47. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	72
Figure 48. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 13 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.....	73
Figure 49. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 13 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	74
Figure 50. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 15 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.....	75
Figure 51. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 15 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	75
Figure 52. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 21 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.....	76
Figure 53. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 21 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	76
Figure 54. Distances du niveau moyen des mers par rapport à la ligne de rivage à l’Anse-aux-Coques	77
Figure 55. Distances du niveau moyen des mers par rapport à la ligne de rivage pour le secteur 1 de l’Anse-aux-Coques	78

Figure 56. Distances du niveau moyen des mers par rapport à la ligne de rivage pour le secteur 2 de l'Anse-aux-Coques	79
Figure 57. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019.....	80
Figure 58. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019.....	81
Figure 59. Différentiel d'élévation sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et octobre 2014.	82
Figure 60. Différentiel d'élévation sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre octobre 2014 et octobre 2015.....	82
Figure 61. Différentiel d'élévation sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre octobre 2015 et mai 2016.....	83
Figure 62. Différentiel d'élévation sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre mai 2016 et juin 2017.	83
Figure 63. Différentiel d'élévation sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre juin 2017 et octobre 2018.	84
Figure 64. Différentiel d'élévation sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre octobre 2018 et septembre 2019.	84
Figure 65. Événements hydrodynamiques ayant atteint le muret de L'Anse-aux-Coques	85
Figure 66. Plage de l'Anse-aux-Coques en 2014 (pendant les travaux de recharge) et en 2019.....	87
Figure 67. Évolution historique des cellules hydrosédimentaires du barachois de Carleton et de la baie de Cascapédia.	91
Figure 68. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge du banc Larocque.	93
Figure 69. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude (Banc Larocque)	94

Figure 70. Distribution et classes granulométriques sur le haut de plage du banc Larocque	95
Figure 71. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran du banc Larocque	95
Figure 72. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran du banc Larocque	96
Figure 73. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 14 juin 2018 au 25 novembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.....	97
Figure 74. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.....	98
Figure 75. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 14 juin 2018 au 25 novembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.....	99
Figure 76. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 19 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.....	99
Figure 77. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 14 du 14 juin 2018 au 25 novembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.....	100
Figure 78. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 14 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.....	100
Figure 79. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 16 du 14 juin 2018 au 25 novembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.....	101
Figure 80. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 16 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.....	102
Figure 81. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur du banc Larocque.....	103
Figure 82. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge du banc Larocque	104
Figure 83. Différentiels d’élévations sur le secteur de la recharge du banc Larocque entre août 2018 et novembre 2019.....	106

Figure 84. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge du banc Larocque entre août 2018 et novembre 2019.....	107
Figure 85. Recharge du banc Larocque en août 2019. Une microfalaise se dessine sur l'ensemble de la recharge.	108
Figure 86. Sédiments du haut estran de la plage du banc Larocque	111
Figure 87. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de la Boule (1965-2017).	113
Figure 88. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de la plage Monaghan.	114
Figure 89. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude (Plage Monaghan).....	115
Figure 90. Distribution et classes granulométriques sur le haut de plage de la plage Monaghan	116
Figure 91. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran de la plage Monaghan	116
Figure 92. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran de la plage Monaghan	117
Figure 93. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 4 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.	118
Figure 94. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 4 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.....	119
Figure 95. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 11 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.	120
Figure 96. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 11 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.....	120
Figure 97. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 6 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.	121

Figure 98. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 6 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.....	121
Figure 99. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 8 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.	122
Figure 100. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 8 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.....	123
Figure 101. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de la plage Monaghan.....	124
Figure 102. Différentiel d'élévation sur le secteur de la recharge de la plage Monaghan entre mai 2018 et octobre 2019.....	125
Figure 103. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage Monaghan entre mai 2018 et octobre 2019.....	125
Figure 104. Plage Monaghan en août 2019	127
Figure 105. Secteur de la recharge. La recharge est toujours présente sous la végétation.....	128
Figure 106. Photo oblique de la recharge en 2000, après la mise en place de la recharge.	129
Figure 107. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance.	131
Figure 108. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de la plage de La Martinique.....	132
Figure 109. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude (Plage de La Martinique)	133
Figure 110. Distribution et classes granulométriques sur le haut de plage de La Martinique.....	134
Figure 111. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran de la plage de La Martinique	134

Figure 112. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran de la plage de La Martinique.....	135
Figure 113. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 16 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	136
Figure 114. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 16 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	137
Figure 115. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 25 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	138
Figure 116. Enveloppe et profil moyen du profil n° 25 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	138
Figure 117. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	139
Figure 118. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 19 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	140
Figure 119. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 21 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	141
Figure 120. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 21 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	141
Figure 121. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de La Martinique	142
Figure 122. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge de La Martinique	143
Figure 123. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage de La Martinique entre décembre 2018 et décembre 2019.....	145

Figure 124. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge de la plage de La Martinique entre décembre 2018 et décembre 2019. (Photo du haut prise le 13 septembre 2019).....	146
Figure 125. Recharge de La Martinique avant et après la tempête Dorian.....	148
Figure 126. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la Pointe aux Loups de 1963 à 2019.....	152
Figure 127. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de la Pointe aux Loups.	153
Figure 128. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude (Pointe aux Loups).....	154
Figure 129. Distribution et classes granulométriques sur le haut de plage de la Pointe aux Loups.....	155
Figure 130. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran de la plage de la Pointe aux Loups.....	155
Figure 131. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran de la plage de la Pointe aux Loups	156
Figure 132. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 4 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	157
Figure 133. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 4 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	158
Figure 134. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	159
Figure 135. Enveloppe et profil moyen du profil n° 19 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	159
Figure 136. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 6 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	160

Figure 137. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 6 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	161
Figure 138. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	162
Figure 139. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	162
Figure 140. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 12 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups.	164
Figure 141. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 12 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	164
Figure 142. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 14 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	165
Figure 143. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 14 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	166
Figure 144. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de la Pointe aux Loups.	167
Figure 145. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge de la Pointe aux Loups.	168
Figure 146. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge de la plage de la Pointe aux Loups entre décembre 2018 et décembre 2019.	170
Figure 147. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage de la Pointe aux Loups entre décembre 2018 et décembre 2019.	171
Figure 148. Secteur de la recharge en 2019 : au sud l'enrochement et au nord la recharge.	173

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CERC	Centre de recherche en ingénierie côtière
LDGIZC	Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières
MNT	Modèle numérique de terrain
NMM	Niveau moyen des mers
PMMSGM	Pleines mers supérieures de grande marée
TPC	Transport parallèle à la côte
USACE	Corps des ingénieurs de l'armée américaine

INTRODUCTION

L'érosion et la submersion côtières sont des aléas de plus en plus importants avec l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, ainsi que du niveau marin en réponse aux changements climatiques (IPCC, 2014). Considérant que plus de la moitié de la population mondiale habite dans les régions côtières (Bird, 2008) et que l'urbanisation grandissante de ces dernières augmente le niveau de risque et de vulnérabilité des communautés (Nicholls, 1995), il est important de développer des solutions d'adaptations aux aléas côtiers efficaces à court, moyen et long terme. Différents ouvrages de protection côtière ont été mis en place le long des côtes du monde entier, avec une prédominance des infrastructures rigides telles que les enrochements, les murets, les brise-lames et les épis (Castelle et al., 2009). Toutefois, les recommandations récentes de stratégies de protection côtière proposent de prendre davantage en compte les processus naturels puisque les ouvrages rigides ont plusieurs impacts sur la dynamique de la côte (Cooper & Mckenna, 2008; Defeo et al., 2009). Ces ouvrages de protection entraînent une réduction de la largeur de la plage et un abaissement du profil de plage (Bernatchez et al., 2011; Bernatchez & Fraser, 2012; Castelle et al., 2009; Diouf Simon et al., 2021) ce qui favorise notamment le risque d'érosion et de submersion côtières (Didier et al., 2015). Dans ce contexte des méthodes douces de protection côtière, telle que la recharge de plage, sont de plus en plus utilisées mondialement depuis plusieurs décennies (Hamm et al., 2002), mais sont encore très peu utilisées au Québec.

La recharge sédimentaire est une méthode de protection côtière alternative qui consiste à alimenter en sédiments une plage, une dune ou l'avant-plage d'un secteur en érosion, de manière artificielle (Castelle et al., 2009; Hamm et al., 2002; Pinto & Silveira, 2018). Les sédiments apportés peuvent être exogènes ou provenir d'une source locale. Cette méthode dite « douce » préserve la plage dans un état proche du naturel et permet de maintenir son

utilisation à des fins récréatives. Elle peut également avoir pour vocation de maintenir l'efficacité des services écologiques fournis par certains écosystèmes côtiers (Martino & Amos, 2015; Pinto & Silveira, 2018). Elle est généralement utilisée le long de plages où une érosion modérée, mais persistante est présente (Dean, 2002). Les recharges de plage peuvent être effectuées afin de répondre à différents objectifs : 1) améliorer la stabilité côtière ; 2) améliorer la protection des infrastructures côtières ; 3) réduire la vulnérabilité à la submersion côtière ; 4) augmenter la largeur de la plage pour les usages récréatifs ; 5) protéger les écosystèmes côtiers et 6) ralentir l'érosion pour permettre la relocalisation stratégique (de Schipper et al., 2020; Hamm et al., 2002; Pinto & Silveira, 2018). La recharge est une alternative moins coûteuse que la mise en place d'infrastructures rigides, ce qui contribue à l'augmentation de l'utilisation de cette méthode (Dean, 2002).

La recharge de plage s'est avérée être efficace en bordure de plusieurs côtes du monde (Castelle et al., 2009; Hamm et al., 2002; Luo et al., 2016; Pinto & Silveira, 2018) et pourrait donc être une méthode de protection côtière à considérer davantage sur les côtes du Québec. Par ailleurs, une projet de recharge sur la plage de Parlee au Nouveau-Brunswick a démontrer l'efficacité d'une recharge dans un environnement similaire au Québec (Daigle, 2006). Toutefois, à notre connaissance, l'efficacité de recharges de plage visant à lutter contre l'érosion et la submersion côtières n'a pas encore été évaluée à l'échelle du Québec maritime. Ce mémoire de maîtrise vise donc à déterminer si la recharge de plage est une méthode efficace de protection de l'érosion et de la submersion des côtes sableuses et sablo-gravelleuse du Québec maritime. Pour ce faire, les objectifs suivants ont été établis :

- 1)** analyser l'évolution morphosédimentaire des sites à l'étude ;
- 2)** évaluer l'efficacité des recharges de plage à réduire l'érosion côtière.

Pour répondre aux objectifs, les opérations suivantes seront effectuées : 1) l'analyse rétrospective et le suivi morphosédimentaire et hydrodynamique des secteurs à l'étude ; 2) le développement d'une typologie des recharges mises en place au Québec ; 3) la revue de littérature sur les critères de conception et l'application des recharges ailleurs dans le monde et 4) le développement de critères permettant d'identifier les secteurs où la recharge pourrait

constituer une alternative, les aspects techniques à considérer dans leur conception, ainsi que le suivi environnemental nécessaire.

Les conclusions seront intégrées dans un guide adapté aux côtes du Québec pour identifier des sites potentiels de recharge et les paramètres à utiliser pour le suivi environnemental des recharges. Ce guide servira à conseiller les entreprises privées, les organisations régionales et les professionnels gouvernementaux dans la mise en place et le suivi des recharges de plage.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES RECHARGES DE PLAGE

1.1 NOTIONS UTILES POUR LA CONCEPTION ET LA MISE EN PLACE DES RECHARGES DE PLAGE

1.1.1. Érosion historique

Les recharges sont généralement effectuées là où les taux de déplacements historiques de la ligne de rivage indiquent une érosion persistante (Dean, 2002). Ainsi, l'érosion historique d'un secteur est importante à prendre en compte lors de la mise en place d'une recharge de plage. L'inclusion de ce paramètre pour la conception des recharges est d'ailleurs suggérée par plusieurs auteurs (Dean, 2002; Elko et al., 2005; Kana & Mohan, 1998; Verhagen, 1996). L'érosion historique d'un secteur est déterminée à partir d'analyse de photographies aériennes ou de levés terrain (Dean, 2002; Morton et al., 2005). Lorsque l'information n'est pas disponible, ces valeurs peuvent être estimées à partir des cartes topographique et niveaux d'eau historiques disponibles (Morton et al., 2005). Les valeurs d'érosion historique permettent, entre autres, d'évaluer la longévité du projet de recharge selon le volume sédimentaire déposé sur la plage et d'identifier les foyers d'érosion qui pourraient aussi avoir une incidence sur l'efficacité du projet (Benedet et al., 2007; Dean, 2002; Kraus & Galgano, 2001). Il est généralement supposé que l'érosion présente avant la mise en place de la recharge fera aussi partie de l'évolution du projet, celle-ci se perpétuant à la suite de la recharge (Dean, 2002; Verhagen, 1992).

1.1.2. Profil d'équilibre

La plupart des profils à l'équilibre montrent certaines similarités : 1) ils ont généralement un profil concave ; 2) les plages composées de sédiments plus grossiers ont tendance à avoir une pente plus abrupte que les plages avec des sédiments plus fins ; 3) l'estran est généralement relativement plane et 4) les vagues de tempêtes tendent à transporter les sédiments vers le

large à former des barres sableuses et à causer un recul de la plage, adoucissant ainsi la pente de la plage (Dean, 1991, 2002). Le profil d'équilibre est considéré comme un concept dynamique, car le profil de plage varie continuellement en fonction des conditions de vagues et des niveaux d'eau (Wang et al., 2009). D'ailleurs les profils en accumulation et en érosion ne présenteront généralement pas la même morphologie. Thom & Hall (1991) proposent quatre formes de profils : 1) concave ; 2) concave avec berme ; 3) concave avec berme et dune et 4) concave avec dune. La forme primaire concave est associée à l'érosion des vagues, la forme secondaire de berme à la déposition par les vagues sur le haut de plage et la forme secondaire de dune à la déposition éolienne (Thom & Hall, 1991). Toutefois, plusieurs études indiquent que le profil n'est pas concave tout au long du profil et que la forme varie de façon perpendiculaire à la côte (Holman et al., 2014; Inman et al., 1993; Masselink & Short, 1993).

Le profil d'équilibre est souvent obtenu en moyennant plusieurs profils de façon spatiale et temporelle (Bruun, 1954; Dean, 1977; Wang et al., 2009).

Bruun (1954) a proposé l'équation suivante pour le profil d'équilibre d'une plage :

$$h(y) = A_y^{2/3}$$

Où h est la profondeur d'eau pour une distance y de la ligne de rivage et A est un paramètre d'échelle, principalement lié aux caractéristiques des sédiments (Dean, 1991). Moore (1982) a lié le paramètre A à la taille des sédiments, alors que Dean (1987) l'a lié à la vitesse de chute des particules. D'autres équations ont été proposées par Bodge (1992), Inman, Elwany & Jenkins (1993) et Komar & McDougal (1994), mais la méthode proposée par Bruun (1954) et développée plus tard par Dean (1977, 1991) et Moore (1982) ne nécessite la connaissance que d'un paramètre et est la seule équation qui peut être appliquée pour prédire l'évolution du profil (Dean, 2002). Si la taille des sédiments varie en fonction de la distance par rapport à la ligne de rivage, le paramètre A peut aussi varier afin de correspondre à la taille des sédiments. Un exemple de profil d'équilibre pour des tailles de sédiments variant entre 0,1 mm et 0,2 mm est présenté sur la figure 1.

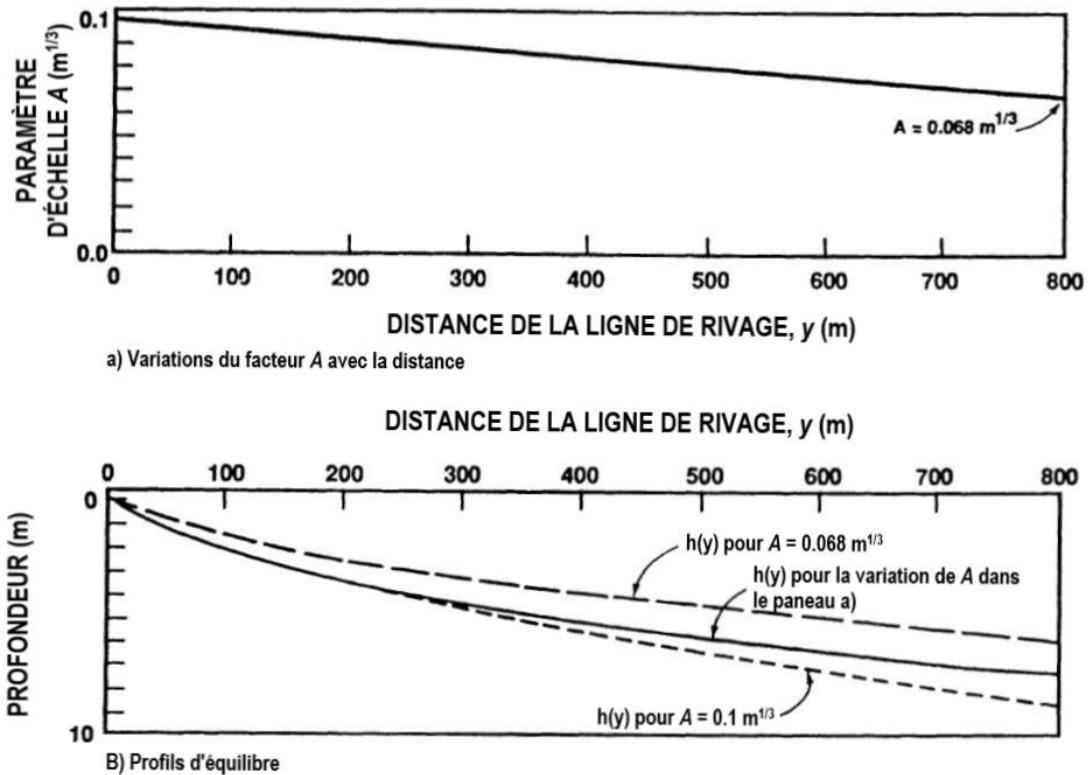


Figure 1. a) Variations du paramètre A en fonction de la distance ; b) Profils d'équilibre pour des valeurs de A de $0,068 \text{ m}^{1/3}$ ($D = 0,1 \text{ mm}$), de $0,1 \text{ m}^{1/3}$ ($D = 0,2 \text{ mm}$) et pour la variation de A selon la distance (Adapté de Dean, 1991).

Dans un projet de recharge, les sédiments sont graduellement redistribués après leur déposition vers un nouvel état d'équilibre (CHELRDC, 2007; Dean & Dalrymple, 2002). La quantité de sédiments déposés devrait être suffisante pour que la largeur désirée dans la conception de la recharge soit atteinte une fois le nouveau profil d'équilibre atteint (Anders & Hansen, 1990). Ceci permet de réduire considérablement les coûts de maintenance du projet de recharge (Anders & Hansen, 1990).

1.1.3. Profondeur de fermeture

Le concept de profondeur de fermeture a été développé par Hallermeier (1978, 1981), en proposant une délimitation de la zone côtière en trois parties, soit la zone littorale (*littoral zone*), la zone de transformation des vagues (*shoal zone*) et la zone d'eau profonde (*offshore*

zone) (figure 2). La zone littorale correspond à la partie active du système côtier, là où l'effet des vagues engendre des transformations importantes sur le fond (Bird, 2008; Birkemeier, 1985; Hallermeier, 1981). Celle-ci inclut la zone de déferlement (*surf zone*) et la zone de jet de rive (*swash zone*) (Bird, 2008). La zone de transformation des vagues correspond à l'endroit où les vagues commencent à se déformer avec la réduction de la profondeur d'eau et à avoir un effet sur le fond sans toutefois être importants, ni négligeables (Birkemeier, 1985; Hallermeier, 1981). Des déplacements de sédiments se produisent dans cette zone, mais le déplacement net est généralement minime (Birkemeier, 1985). La zone d'eau profonde est la zone où l'effet des vagues est généralement négligeable (Dean, 2002; Hallermeier, 1978, 1981).

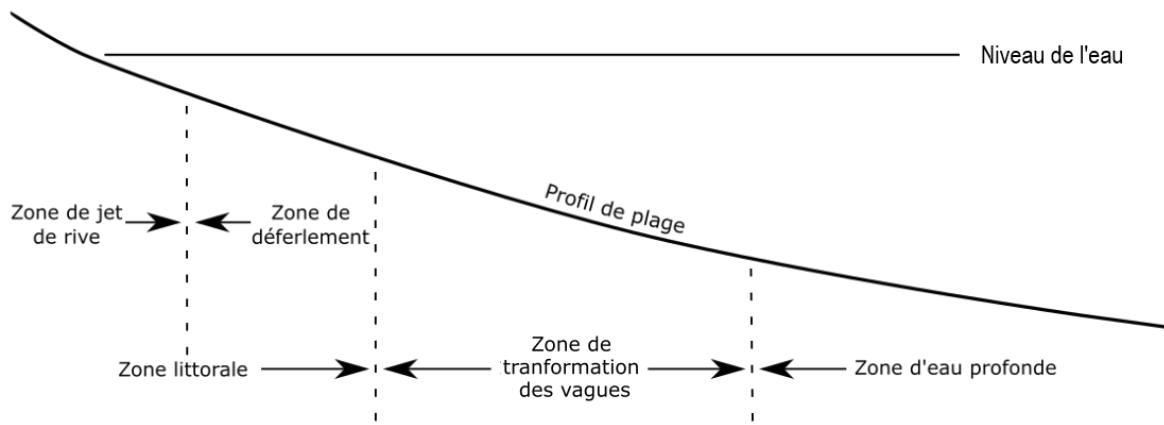


Figure 2. Délimitation des zones côtières selon Hallermeier (1981), Héquette (2001) et Bird (2008)

La profondeur de fermeture se définit comme la profondeur à partir de laquelle aucun changement mesurable d'élévation ne se produit dans le profil (Birkemeier, 1985). Celle-ci correspond à la limite entre la zone littorale et la zone de transformation des vagues. Hallermeier (1978) propose l'équation suivante pour le calcul de la profondeur de fermeture (d_f) :

$$d_f = 2.28H_e - 68.5 \left(\frac{H_e^2}{gT_e^2} \right)$$

Où H_e est la hauteur significative effective des vagues, soit la hauteur des vagues excédée 12h par année. T_e correspond à la période des vagues associée à H_e et g l'accélération gravitationnelle.

Birkemeier (1985) a par la suite évalué l'équation de profondeur de fermeture à l'aide de données terrain. Les résultats obtenus ont démontré une meilleure correspondance des données avec l'équation suivante :

$$d_1 = 1.75H_e - 57.9 \left(\frac{H_e^2}{gT_e^2} \right)$$

Dans la même étude, Birkemeier (1985) a aussi démontré qu'une correspondance raisonnable des données peut être obtenue avec l'équation simplifiée suivante :

$$d_1 = 1.57H_e$$

Il est toutefois important de noter que la définition de H_e étant la hauteur des vagues excédée 12 heures par année, la profondeur de fermeture devrait changer d'année en année (Dean, 2002).

Dans le cadre des recharges, la profondeur de fermeture est importante, car elle définit la profondeur jusqu'à laquelle le profil de la recharge devrait s'équilibrer (Dean, 2002; Willson et al., 2017). Cependant, il est possible que la recharge initiale d'un secteur engendre du transport au-delà de la profondeur de fermeture. La pente de la recharge étant plus abrupte que la pente naturelle, l'effet de la gravité est accentué, favorisant le déplacement de sédiments (Dean, 2002). D'ailleurs, la norme aux États-Unis est de recharger le profil jusqu'à la profondeur de fermeture (Brutsché et al., 2015). Dans leur étude, Kraus & Galgano (2001) affirment que du matériel de recharge placé irrégulièrement au-delà de la profondeur de fermeture peut engendrer des foyers d'érosion sur le secteur. La réfraction des vagues sur les courbes bathymétriques irrégulières de l'avant-plage aura tendance à créer des schémas de convergence et de divergence dans la déformation des vagues, créant des zones différentes d'érosion et d'accumulation.

La définition de la profondeur de fermeture pour un projet de recharge doit également tenir compte d'un intervalle de temps représentatif de la conception du projet. La profondeur de fermeture variant au fil des années, celle-ci devrait être déterminée selon un intervalle correspondant à l'intervalle de temps entre les différentes recharges, entre les tempêtes majeures ou correspondant à d'autres paramètres environnementaux pouvant influencer l'évolution du projet (Anders & Hansen, 1990).

1.1.4. Transport sédimentaire parallèle à la côte

Le transport parallèle à la côte (TPC) est le mouvement le long de la côte d'un volume de sédiments sous l'action des vagues et des courants (Komar, 1977). Celui-ci est un élément important dans la morphodynamique côtière, particulièrement dans les systèmes dominés par le sable ou le gravier (Collins & Balson, 2007). En effet, le TPC des sables et des graviers crée des systèmes de plages et de dunes et autres formes d'accumulation comme les barres sableuses, îles barrières et flèches littorales (Davidson-Arnott, 2010). Le TPC dans la plage et l'avant-plage résulte de l'opération de trois processus : **1)** le transport par jet de rive ; **2)** le transport par les courants parallèles à la côte générés par les vagues et **3)** le transport au large de la zone de déferlement, généré principalement par les courants tidaux et le vent (Davidson-Arnott, 2010). Le transport par jet de rive est principalement causé par l'action oblique des vagues et résulte du jet de rive et de la nappe de retrait sur l'estran (Davidson-Arnott, 2010). Il en résulte alors en mouvements de sédiments en dents de scie. Dans la zone de déferlement, des courants parallèles à la côte sont générés par le déferlement oblique des vagues. Les courants orbitaux (figure 3) générés par les vagues vont mettre les sédiments en suspension, qui vont ensuite être transportés par les courants parallèles à la côte. Une partie du TPC se produit aussi au large de la zone de déferlement, mais la contribution des vagues est faible (Davidson-Arnott, 2010).

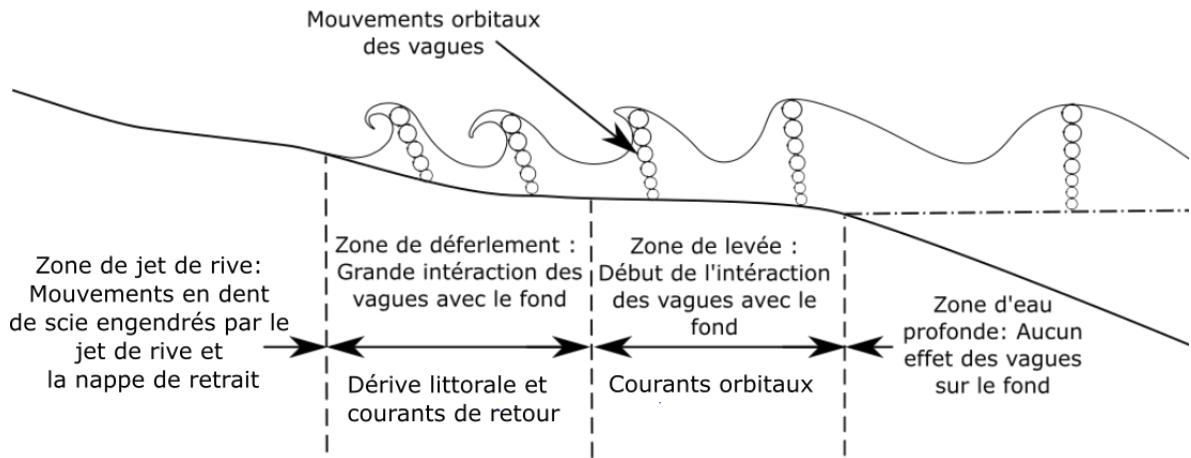


Figure 3: Transformation des vagues du large vers la côte. Adaptée des figures de Davidson-Arnott (2010)

Différentes méthodes sont employées pour déterminer les volumes de transport sédimentaire, que l'on peut diviser en quatre catégories: les mesures *in situ*, les mesures par télédétection, l'utilisation d'équations empiriques et la modélisation.

Les mesures *in situ* incluent les traceurs, les trappes à sédiments, les plaques à sédiments, les capteurs de turbidité, les bassins simulateurs de vagues et l'instrumentation de plages, barres sableuses, îles barrières, ou encore de l'accumulation en amont des infrastructures comme les épis (Allen, 1988; Davidson-Arnott, 2010; Emerson, 1991).

La télédétection peut être utilisée pour calculer des TPC nets, notamment à l'aide d'imageries satellitaires ou aériennes (Kunte & Wagle, 1993). L'étude des formes côtières par photo-interprétation peut permettre d'étudier la direction du TPC et l'étude de la distribution de la turbidité sur les images satellitaires peut permettre d'estimer la concentration de sédiments en suspension (Kunte et al., 2013). L'avantage de cette méthode est qu'elle peut permettre d'étudier le transport sédimentaire à long terme. Cette méthode est toutefois encore peu utilisée.

Les équations empiriques de transport sédimentaire permettent de prédire celui-ci. Le modèle le plus simple pour la prédition du transport côtier est l'équation semi-empirique suivante (Davidson-Arnott, 2010):

$$P_L = (ECn)_b \sin \theta_b \cos \theta_b$$

Où P_L est la composante parallèle à la côte du flux d'énergie, ECn le flux d'énergie totale au point de déferlement et θ_b l'angle des vagues dans la zone de déferlement avec la ligne de rivage. Cependant, plusieurs autres équations ont été proposées.

Inman & Bagnold (1963) ont proposé une équation qui à partir de la théorie selon laquelle l'énergie des vagues pouvait mettre les sédiments en suspension et qu'ensuite n'importe quel courant unidirectionnel pouvait transporter les sables et produire une dérive principale dans la direction du courant (Bayram et al., 2007). L'équation dérivée de cette théorie est la suivante :

$$Q = \frac{K_b}{(p_s - p)g(1 - a)} C_{gb} E_b \cos \theta_b \frac{V_1}{u_0}$$

Où Q est le taux de transport parallèle à la côte en volume par unité de temps, K_b une constante d'une valeur de 0.25, p_s la masse volumique des sédiments, p la masse volumique de l'eau, a l'index de porosité ($\cong 0.4$), C_{gb} la vitesse des vagues en eau peu profonde (Vitesse de groupe au point de déferlement), E_b est l'énergie des vagues au point de déferlement, V_1 la vitesse du courant parallèle à la côte et u_0 la vitesse orbitale maximale à la zone de déferlement.

Le centre de recherche en ingénierie côtière (CERC) du Corps des ingénieurs de l'armée américaine (USACE) a développé une équation qui reste à ce jour la plus utilisée (CERC, 1984). L'approche de la CERC prédit le taux de transport en poids immergé (I_L), celui-ci pouvant être relié à P_L par un coefficient non-dimensionnel (Davidson-Arnott, 2010). Cette approche a pour avantage d'être plus pratique que l'équation d'Inman et Bagnold, celle-ci ne nécessitant pas de mesurer le courant parallèle à la côte (Tonk & Masselink, 2005). L'équation dérivée de cette théorie est la suivante :

$$Q = \frac{pK \sqrt{g/\gamma_b}}{(p_s - p)(1 - a)} H_{s,b}^{2.5} \sin(2\theta_b)$$

Où K est un coefficient empirique ($= 0.39$) et γ_b l'indice de déferlement ($= H_b/h_b$)

Plusieurs autres équations ont été proposées, notamment par Kamphuis (1991) qui a développé une équation à partir d'essais en laboratoire avec un générateur de vagues et Bayram (2007) qui a développé une équation en prenant en compte le vent et les courants tidaux.

Finalement, Van Rijn (2014a) a utilisé un modèle axé sur les processus (CROSMOR) afin de calculer les taux de transports pour des plages de sable, de gravier et de galets. L'objectif était de développer une équation simple pouvant être utilisée autant pour les plages de sable, de graviers et de galets. L'équation peut s'écrire de la façon suivante :

$$Q = 0.00018 p_s g^{0.5} (\tan \beta)^{0.4} (D_{50})^{-0.6} H_{s,b}^{3.1} \sin 2\theta_b$$

Où $\tan \beta$ est la pente de la plage et D_{50} le diamètre médian des sédiments.

La modélisation numérique et physique peut aussi être utilisée pour estimer le transport sédimentaire en milieu côtier. Les modèles numériques ont toutefois l'avantage de pouvoir être adaptés plus facilement à différents sites que les modèles physiques, qui sont généralement conçus pour représenter les conditions à un site en particulier (Papanicolaou et al., 2008). Les modèles physiques seront généralement calibrés en bassin de vagues ou en canal jaugeur (Kobayashi, 2016). Les modèles numériques de transport sédimentaire impliquent généralement la solution numérique de plusieurs équations de continuité des sédiments et donc de transfert sédimentaire (Joyce et al., 2018; Papanicolaou et al., 2008). Plusieurs modèles de transport sédimentaires sont disponibles, tels que DELFT-3D (Deltares, 2021), CSHORE (Kobayashi et al., 2009) et X-BEACH (Roelvink et al., 2009). Le choix du modèle dépend par contre de plusieurs facteurs, tels que la nature du problème à résoudre, les ressources disponibles et le coût associé à la solution au problème (Papanicolaou et al., 2008).

Le TPC est important à prendre en compte dans les travaux de recharge de plage, car la plage tente de retrouver un état d'équilibre de façon parallèle et perpendiculaire à la côte dès que les sédiments y sont déposés (Brutsché et al., 2015; Dean & Dalrymple, 2002). Ainsi, les

sédiments se dispersent pour éventuellement sortir du secteur d'intervention (van Rijn, 2014b). Pour représenter cet effet de dispersion, il est nécessaire de lier le TPC aux modifications des formes de rivages (Dean, 2002). L'évolution des formes de rivage d'une recharge se base généralement sur l'équation de diffusion de Pelnard-Considère (1956), une équation qui résulte de la combinaison de l'équation de conservation des sédiments et de l'équation de transport parallèle à la côte linéarisée (Dean, 2002). Pour plus de détails sur la modélisation de l'évolution des formes de rivage, le lecteur est invité à consulter les ouvrages de Pelnard-Considère (1956), et de Dean (2002).

1.2 CONCEPTION DES RECHARGES DE PLAGE

1.2.1. Méthode de déposition

Les sédiments des recharges peuvent provenir de différentes sources d'emprunt: **1)** sédiments dragués au large; **2)** sédiments dragués à l'entrée de ports; **3)** sédiments provenant de zones d'accumulations côtières; **4)** sédiments provenant de dépôts reliques (Gourlay et al., 2004). Toutefois, 95% des sédiments de recharges proviennent de sources d'emprunts situées au large (Dean, 2002). Au Québec, la tendance est cependant inverse alors que la plupart du matériel de recharge provient de dépôts issus en très grande majorité de sédiments déposés dans les mers post-glaciaires (Brazeau, 1993).

Généralement, les sédiments peuvent être transportés jusqu'au site de recharge par drague aspiratrice refouleuse stationnaire, drague aspiratrice autoporteuse en marche, par bande transporteuse, par système de contournement de sédiments ou par camions (Dean, 2002; National Research Council, 1995). La méthode de déposition la plus commune est par drague aspiratrice autoporteuse en marche (Kana & Mohan, 1998). Après la recharge, les sédiments peuvent être étendus par des bulldozers, ce qui n'est généralement pas nécessaire, l'effet des vagues et des marées redonnant une apparence naturelle à la plage (Adriaanse & Coosen, 1991). Pour les plages plus achalandées, il est parfois nécessaire de reniveler les sédiments de recharge pour des raisons esthétiques ou de sécurité.

1.2.2. Emplacement

Plusieurs typologies des recharges en fonction de leur emplacement sont disponibles dans la littérature. Ces typologies incluent la recharge de dune, la recharge de plage (subaérienne), la recharge de barres ou d'avant-plage (submergée), ainsi que la combinaison de deux ou plusieurs emplacements (Campbell & Benedet, 2006; Gourlay et al., 2004; Luo et al., 2016; Pinto & Silveira, 2018; van Rijn, 2011, 2014b). Plus récemment, des projets de méga-recharges ont aussi vu le jour (de Jongh, 2017; Stive et al., 2013). Comprendre les effets de l'emplacement de la recharge et les mouvements sédimentaires associés contribue à établir la performance des recharges de plage (Gourlay et al., 2004). Pour ce mémoire, la typologie des recharges en fonction de leur emplacement est la suivante : **1)** la recharge de dune ; **2)** la recharge de plage (subaérienne) ; **3)** la recharge d'avant-plage (submergée) ; **4)** la méga-recharge.

La recharge de dune (figure 4) consiste au colmatage, au renforcement ou à la protection des dunes contre l'ouverture de brèche pendant les tempêtes (van Rijn, 2014b). Le renforcement des dunes stabilise ces dernières en augmentant leur hauteur et leur volume, tout en améliorant la valeur de l'habitat (Pinto & Silveira, 2018). Les projets de recharges dunaires ont généralement deux objectifs de base : **1)** renforcer ou élargir la zone dunaire ou **2)** fournir du sable pour une côte en érosion (Matias et al., 2004). Pour le premier objectif, l'efficacité du projet consiste en la capacité de la recharge à prévenir les dommages aux infrastructures sous des conditions de tempêtes. Pour le deuxième objectif, l'efficacité du projet consiste en la capacité de la recharge à contrer l'érosion de la dune ou de la plage pour une certaine période. Ces recharges doivent régulièrement être reconstruites, puisque le milieu côtier est en érosion (Matias et al., 2004).

Peu d'information est disponible dans la littérature scientifique quant à la recharge de dunes, ce qui concorde avec les observations de van der Wal (1998). Cependant, plusieurs études s'intéressent à l'effet des recharges sur le bilan sédimentaire des dunes (Jafari et al., 2019; van der Wal, 2004; Zawadzka, 1997). La recharge de plage peut influencer la croissance des dunes en élargissant la plage. En effet, une plage plus large peut diminuer la fréquence de

l'érosion des dunes (Nordstrom et al., 1986) et modifier l'apport sédimentaire éolien de la plage à la dune (van der Wal, 2004).

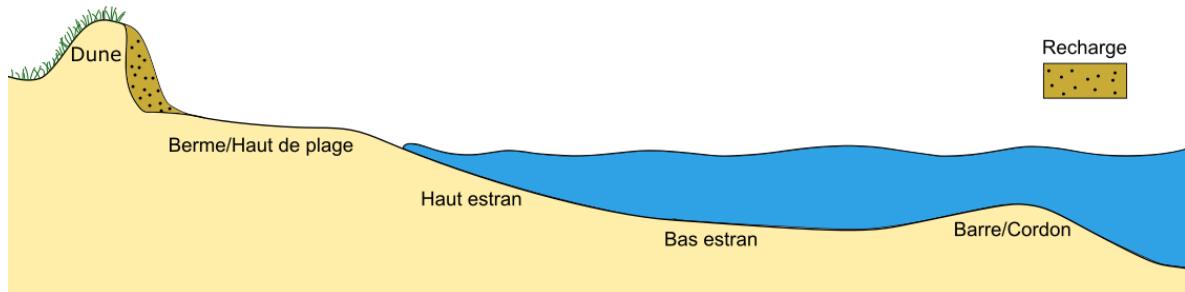


Figure 4. Schématisation d'une recharge de dunes

Les recharges de plage ou recharges subaériennes (figure 5) sont surtout utilisées pour compenser une érosion locale, protéger les infrastructures et maintenir les activités récréatives lorsque la plage est trop étroite (Cooke et al., 2012; Ojeda et al., 2008; Stronkhorst et al., 2018; van Rijn, 2011). La déposition sur la plage subaérienne promeut généralement l'élargissement des bermes vers la mer (Pinto & Silveira, 2018). Aussi, la construction d'une berme plus élevée que l'élévation naturelle du haut de plage peut permettre une protection plus efficace de la végétation et des infrastructures contre l'action des vagues (Dean, 2002). Les sédiments peuvent être déposés sur la plage sous forme de tampon le long de la plage à recharger ou comme source de sédiments continue à un ou plusieurs endroits le long de la plage, en amont de la zone en érosion (van Rijn, 2014b). Selon Van Rijn (2011), les volumes de recharges par unité de longueur sont généralement de $10 - 30 \text{ m}^3/\text{m}$ pour les côtes à faible énergie, de $30 - 75 \text{ m}^3/\text{m}$ pour les côtes à énergie modérée et de $75 - 150 \text{ m}^3/\text{m}$ pour les côtes à grande énergie. Ces recharges devraient être placées le plus possible du côté terre de la ligne des hautes eaux, dans une couche de 2-3m, avec une berme de 20 à 30 m de large au niveau du pied de la dune si nécessaire. Leur durée pratique est de l'ordre de 1 – 5 ans. La longueur transversale de la recharge devrait aussi être supérieure à 3 kilomètres afin de minimiser la perte de sable aux extrémités occasionnée par la redistribution sédimentaire sous l'effet des vagues. De plus, la pente initiale ne devrait pas être plus abrupte que 1:20 et une berme submergée devrait être incluse pour minimiser les pertes initiales de sable.

Idéalement, le matériel de la recharge devrait être légèrement plus grossier que les sédiments d'origine sur la plage et la zone de jet de rive (van Rijn, 2011). Les méthodes pour évaluer la compatibilité des sédiments sont présentées à la section 1.2.4.

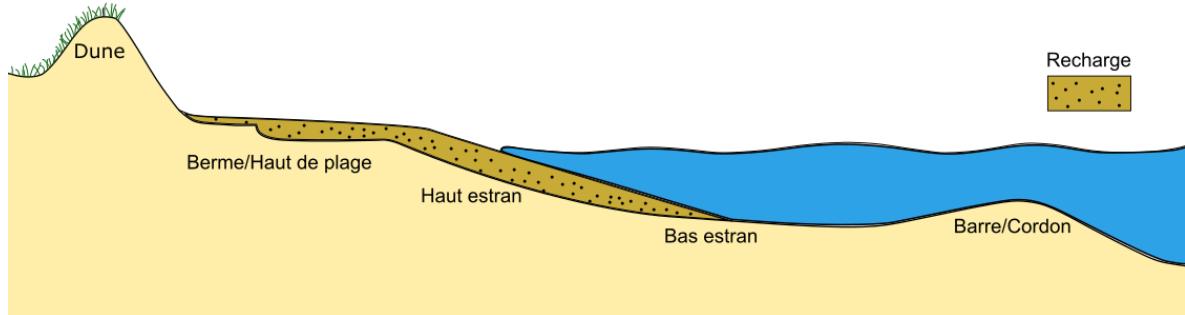


Figure 5. Schématisation d'une recharge de plage

Les recharges d'avant-plage ou submergées (figure 6) sont principalement utilisées dans les régions de dunes relativement larges et élevées, afin de maintenir ou d'augmenter le volume de sable dans la zone d'avant-plage, avec l'objectif de recharger la plage sur le long terme par les processus naturels (van Rijn, 2011). Ces recharges sont déposées sous forme de berme sous-marine à l'avant-plage (Brutsché et al., 2015). La déposition de matériel de recharge à l'avant-plage est faite dans l'objectif que le sable sera déplacé par l'action des vagues pour nourrir le profil de plage et promouvoir la dissipation de l'énergie des vagues avant de rejoindre la plage subaérienne (Cooke et al., 2012; Pinto & Silveira, 2018). La distribution naturelle des sédiments permet également des schémas de déposition et un triage correspondant davantage à ceux des sédiments originaux (Cooke et al., 2012). Les recharges d'avant-plage diffèrent des recharges de plage étant en grande partie submergées et souvent sous forme de butte ou de barre (Brutsché et al., 2015). Ces recharges sont déposées sous forme de berme sous-marine à l'avant-plage (Brutsché et al., 2015). Selon Van Rijn (2011), le volume de la recharge doit être de l'ordre du volume des barres sableuses ($300 - 500 \text{ m}^3/\text{m}$) et la longueur (2 – 5 km) de l'ordre de plusieurs fois la largeur de la zone de déferlement. Les recharges d'avant-plage sont également relativement peu coûteuses, car le sable peut être

déposé pendant la navigation en eaux peu profondes (5 – 10m). Toutefois, les recharges doivent être assez grandes, car seulement une partie du volume rejoindra la plage après 5 ans (20-30%).

Deux types de recharge d'avant-plage peuvent être distingués, soit les bermes actives et les bermes stables (Hands & Allison, 1991; McLellan & Kraus, 1991; van Rijn, 2014b). Les bermes actives alimentent la plage en sédiments par les processus de transports sédimentaires lorsque les conditions de vagues le permettent (Hands & Allison, 1991; McLellan & Kraus, 1991; van Rijn, 2014b). Les sédiments des bermes actives sont destinés à être dispersés vers la côte dans les semaines ou mois suivants la recharge (Brutsché et al., 2015). Lorsque des barres sont présentes, la recharge sous forme de berme est généralement placée au large de la barre la plus au large (van Rijn, 2014b). Les bermes stables agissent pour leur part généralement comme filtre pour les vagues, brisant les plus grandes vagues et ainsi limitant leur effet sur la côte (van Rijn, 2011, 2014b). Les vagues restantes génèrent du transport au-dessus de la recharge augmentant le transport de sédiments vers la côte. Les deux effets résultent en une séquestration des sédiments à l'arrière de la recharge d'avant-plage (van Rijn, 2011). Ce type de recharge agit ainsi comme récif artificiel ou comme brise-lame submergé (van Duin et al., 2004; van Rijn, 2011). Ces bermes conservent aussi leur volume au même endroit pour plusieurs années (Brutsché et al., 2015; Hands & Allison, 1991; McLellan & Kraus, 1991).

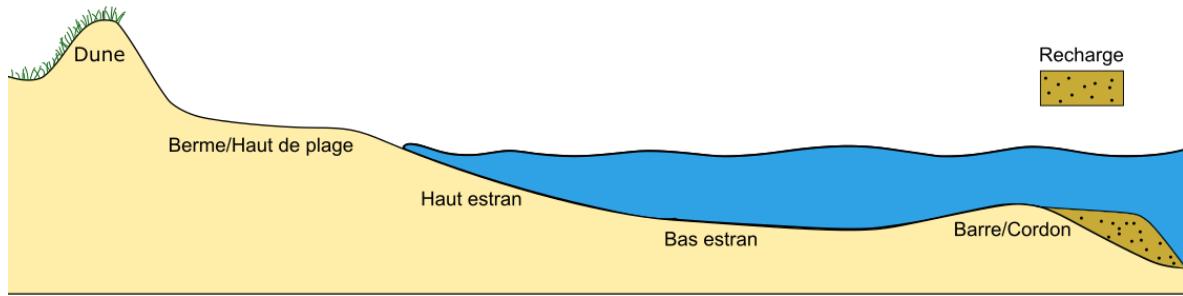


Figure 6. Schématisation d'une recharge d'avant-plage en forme de berme

Les méga-recharges (figure 7) sont un type de recharge qui tient surtout son origine de l'initiative néerlandaise du Zandmotor, une méga-recharge de $21,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Stive et al., 2013). Ces recharges sont implantées de façon à ce que l'énergie naturelle des vagues et des courants redistribue les sédiments, élargissant les plages sur une grande distance et sur une longue période (Radermacher et al., 2018; Stive et al., 2013). Les méga-recharges agissent ainsi comme source de sédiments à long terme sur plusieurs kilomètres de côte (Radermacher et al., 2018; Stive et al., 2013). Ce type d'intervention réduit la fréquence d'intervention et limite l'étendue spatiale de la recharge, ce qui permet de réduire la perturbation des écosystèmes et de contribuer à la création d'habitats et à l'amélioration des commodités pour les loisirs côtiers (Brown et al., 2016).

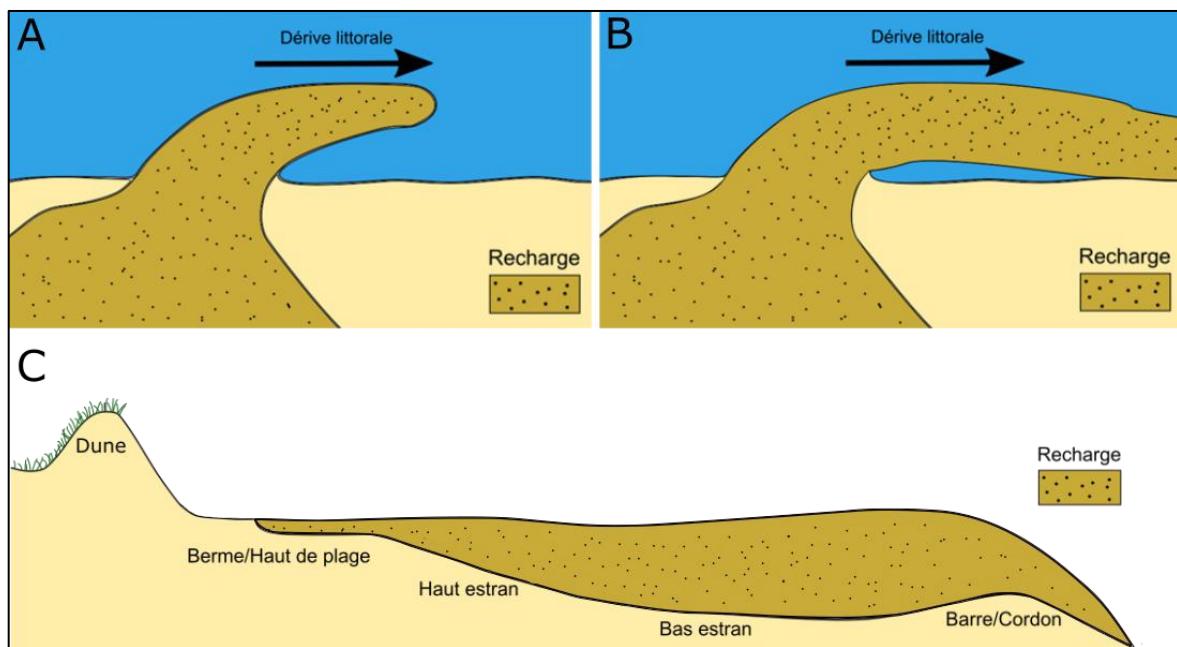


Figure 7. Schématisation d'une méga-recharge. A) Méga-recharge vue en plan avant la dispersion sédimentaire. B) Méga-recharge vue en plan après la dispersion sédimentaire. C) Méga-recharge vue de profil.

1.2.3. Stratégies et techniques de conception

Les projets de recharge ont jusqu'à trois étapes (figure 8): **1)** la recharge de conception; **2)** la recharge de maintenance; **3)** la recharge d'équilibration (Campbell & Benedet, 2006; Willson et al., 2017).

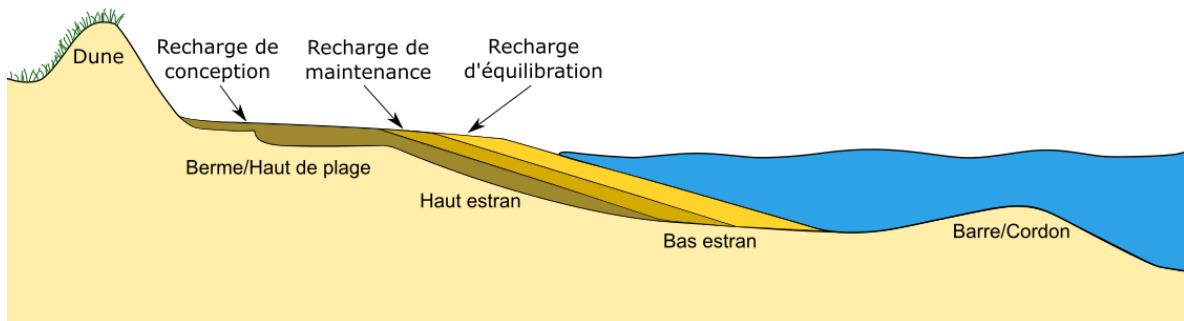


Figure 8. Principales étapes de recharge d'un projet de recharge

La recharge de conception est généralement déterminée par un processus d'itérations qui évalue les coûts et bénéfices en fonction de l'envergure et des objectifs de la recharge (Campbell & Benedet, 2006). La recharge de maintenance est souvent conçue pour minimiser les coûts annuels des recharges périodiques (Campbell & Benedet, 2006). Celle-ci est ajoutée à la recharge de conception lors de la recharge initiale afin de s'assurer que la recharge de conception est toujours présente. Lorsque la recharge de maintenance s'est dispersée et que la recharge de conception commence à s'éroder, une nouvelle recharge de maintenance doit être effectuée (Willson et al., 2017). La recharge d'équilibration est un volume supplémentaire de sédiments déposés lors de la recharge initiale. Celle-ci a comme objectif de combler les parties plus profondes du profil de plage lorsque la recharge est remaniée par les vagues (Willson et al., 2017). Cette composante de la recharge est placée avec une pente plus abrupte que la pente naturelle, ce qui permet aux vagues et courants de transporter les sédiments vers le large (Shahan, 2018). Pendant ce processus, il n'y a pas de perte sédimentaire du profil de plage, mais plutôt une redistribution sédimentaire pour créer un profil plus stable (Willson et al., 2017). Cette redistribution sédimentaire contribue à dissiper l'énergie des vagues au large (Shahan, 2018).

Selon Campbell & Benedet (2006), trois approches distinctes de planification et d'implémentation des recharges de maintenance ressortent aux États-Unis. La première approche est de reproduire le schéma d'origine de façon périodique pour remplacer les sédiments perdus. Dans ce cas, moins de matériel est utilisé, mais les foyers d'érosion sont plus vulnérables aux dommages des tempêtes. La deuxième approche est de remplacer les sédiments perdus et de surcharger les foyers d'érosion. Cette approche utilise plus de matériel, mais assure une protection uniforme pour l'entièreté du projet et la durée de vie de la recharge. Finalement, la dernière approche est d'utiliser des structures de contrôle de l'érosion (enrochements, brises-lames, murs de protection, épis, etc.) pour réduire les endroits à haut taux d'érosion dans le projet. Cette méthode assure une protection uniforme et utilise moins de matériel. Cependant, l'analyse des coûts des structures doit être prise en compte dans la comparaison des coûts annuels.

Plusieurs paramètres sont à prendre en compte lors de la conception des travaux de rechargement de plage. Parmi ceux-ci, on retrouve l'orientation de la plage, les caractéristiques des sédiments, la hauteur de la berme de la recharge, la densité de la recharge, la profondeur de fermeture, le profil d'équilibre de la plage, le transport parallèle et perpendiculaire à la côte et l'évolution des formes de rivage (Bird & Lewis, 2014; Brutsché et al., 2015; Dean, 2002). La densité de la recharge consiste au volume de sédiments placé par unité de longueur sur la côte (Dean, 2002). Différentes équations sont aussi disponibles pour permettre de définir certains paramètres tels que le profil d'équilibre (Bruun, 1954; Dean, 1977, 1991; Moore, 1982), la profondeur de fermeture (Birkemeier, 1985; Hallermeier, 1978, 1981), la transport parallèle à la côte (Bayram et al., 2007; CERC, 1984; Inman & Bagnold, 1963; Kamphuis, 1991; van Rijn, 2014a) et l'évolution des formes de rivages (Dean, 2002; Larson et al., 1997; Pelnard-Considère, 1956). Ainsi, les modèles numériques et les observations terrain peuvent être intégrés dans la conception des recharges. Les modèles physiques peuvent aussi être utilisés à condition d'avoir de bonnes données de vagues à l'entrée et d'avoir de bonnes méthodes de calibration (Verhagen, 1992).

Une méthode simple de conception qui ne nécessite pas de modélisation a vu le jour aux Pays-Bas au début des années 1990. La méthode néerlandaise de conception est une méthode

qui a su démontrer son efficacité à maintes reprises (Dean, 2002; Verhagen, 1992). Cette méthode suppose que tout sédiment de qualité déposé sur la côte aura un effet bénéfique (Dean, 2002) et que la recharge de plage n'aura pas d'influence sur le taux d'érosion historique du secteur d'intervention (Verhagen, 1992). Ceci implique donc que les taux d'érosion seront les mêmes, mais que c'est la recharge qui subira l'érosion et non la côte. Cette méthode se déroule en cinq étapes : **1)** effectuer un suivi côtier pour au moins 10 ans; **2)** calculer la perte de sédiments pré-recharge en $m^3/année$ sur une période de 10 ans; **3)** ajouter 40% de perte à ce volume; **4)** multiplier cette quantité par une durée de vie adéquate (exemple cinq ans); **5)** déposer ce volume de sédiments sur la plage, entre 1 m sous le niveau de la mer et le pied de la dune (Verhagen, 1992). Si la côte ne comprend pas de dune, la ligne de rivage peut être utilisée. Cette méthode nécessite toutefois un suivi du secteur de bonne qualité (Verhagen, 1992).

1.2.4. Matériaux

La performance des recharges est affectée par les propriétés texturales du sable utilisé (Campbell & Benedet, 2006). La plupart des auteurs affirment que les sédiments d'une recharge doivent être de la même taille ou légèrement plus grossiers que les sédiments originaires de la plage (Dean, 2002; Gourlay et al., 2004; Pinto & Silveira, 2018; van Rijn, 2011, 2014b). La recharge peut également être faite de sédiments de taille différente du sédiment d'origine. Cependant, plus le sédiment est fin, plus la diffusion est grande, les sédiments étant plus facilement érodés par l'action des vagues et des courants (Bitan & Zviely, 2020; Hamm et al., 2002). Parfois des sédiments plus grossiers que ceux d'origines sont favorisés, particulièrement quand il y a un besoin de contrer une érosion plus intense ou de stabiliser une partie de la plage (Castelle et al., 2009). D'ailleurs, les sédiments qui sont plus grossiers que ceux d'origine peuvent améliorer la longévité des recharges de plage (Bitan & Zviely, 2020). Cependant, l'utilisation de matériel trop grossier peut former une pente plus abrupte, entraînant une plage plus réfléctrice et moins adaptée aux activités de plaisance (Blott & Pye, 2004; Krumbein, 1957; van Rijn, 2014b).

Certaines procédures pour évaluer la compatibilité entre le sable de recharge et le sable d'origine sont disponibles, notamment par l'utilisation de paramètres empiriques (Campbell & Benedet, 2006). La compatibilité des sédiments réfère au degré de performance des sédiments de recharge par rapport aux sédiments d'origine (Dean, 2002). Krumbein & James (1965) ont développé une équation qui prend en compte la moyenne et l'écart-type de la taille des sédiments pour définir le volume des sédiments d'emprunt nécessaire pour être équivalent à un volume désiré de la granulométrie des sédiments d'origine. Cette méthode ne peut toutefois pas s'appliquer si les sédiments d'emprunt sont mieux triés que ceux d'origine. Dean (1975) a proposé une autre méthode en se basant sur la taille moyenne et l'écart-type des sédiments d'emprunt et des sédiments d'origine ainsi que sur le fait que la fraction fine des sédiments d'emprunt ne sera pas compatible et donc considérée comme perdue. Pour déterminer la quantité de sédiments à déposer, la proportion de sédiments compatible est considérée; si 50% des sédiments sont compatible, la quantité de sédiments est doublée. Pranzini, Anfuso & Muñoz-Perez (2018) ont développé une nouvelle méthode similaire à celle de Dean (1975) où tout sédiment plus grossier que le sédiment d'origine sera considéré comme compatible et tout sédiment plus fin incompatible.

Dans un autre ordre d'idée, Campbell & Benedet (2006) ont défini des facteurs pour déterminer la compatibilité des sédiments, soit le facteur de surremplissage et le facteur de recharge. Le facteur de surremplissage évalue les différences granulométriques entre les sédiments originaux et ceux de la recharge pour prédire le volume de sédiments de recharge nécessaire pour produire une unité identique du matériel de remplissage. Le facteur de recharge évalue la susceptibilité de la portion de sédiments plus fins à être mis en suspension, puis transportés, ce qui contribue à évaluer les besoins de recharge subséquente. Une méthode plus simple et largement utilisée pour évaluer la compatibilité est la considération des tailles médianes et moyennes des sédiments du matériel d'origine et du matériel de recharge (Brutsché et al., 2015).

1.2.5. Densité de la recharge

La densité des recharges réfère au volume de recharge par unité linéaire de plage et peut être exprimée en m^3/m ou en yd^3/pi (Dean, 2002). La densité d'une recharge est importante pour la performance d'un projet, car certaines parties de la recharge peuvent s'éroder plus rapidement. Ainsi, si la densité de la recharge est faible, les foyers d'érosion de la recharge risquent d'engendrer le besoin pour une nouvelle recharge, même si la recharge fonctionne bien de façon générale (Dean, 2002). Campbell & Benedet (2006) suggèrent la catégorisation des densités de construction initiale suivante : **1)** faible volume (moins de $200 \text{ m}^3/\text{m}$) ; **2)** volume intermédiaire (entre 200 et $400 \text{ m}^3/\text{m}$) ; **3)** grand volume (plus de $400 \text{ m}^3/\text{m}$). Par contre, selon Dean (2002), une densité de $250 \text{ m}^3/\text{m}$ est considérée comme raisonnable. Celui-ci souligne aussi que la densité d'une recharge devrait dépendre, entre autres, du climat de vagues et du taux d'érosion historique.

CHAPITRE 2

LOCALISATION ET DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE

Le suivi des recharges de plage a été réalisé sur cinq sites répartis sur les côtes de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent : la plage Monaghan à Sept-Îles, la plage de l'Anse-aux-Coques à Sainte-Luce, le banc Larocque à Carleton-sur-Mer, ainsi que les plages de La Martinique et de la Pointe aux Loups aux Îles-de-la-Madeleine (figure 9). Les caractéristiques de chacun des sites sont présentées dans les sections 2.1.1 et 2.2.2. Un tableau sommaire présentant les dates et volumes de recharge pour l'ensemble des sites est présenté ci-dessous (tableau 1).

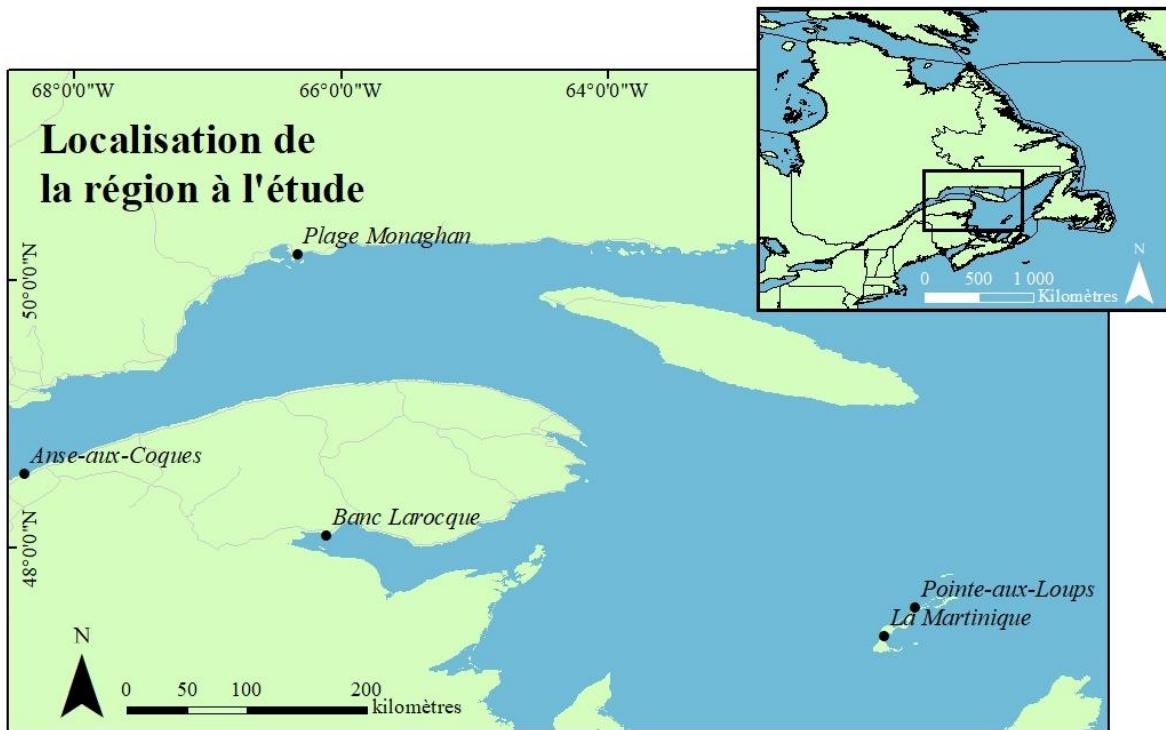


Figure 9 : Localisation des sites d'étude avec suivi de recharges de plages.

Tableau 1. Interventions des différents sites de recharge

	Interventions	Date d'intervention	Volume total (m ³)
Plage Monaghan	Unique	2000	1500 - 2000
Anse-aux-Coques	Multiples	2014 -	16 213
Banc Laroque	Unique	2011	15 000
La Martinique	Multiples	2007 -	ND
Pointe aux Loups	Multiples	2008 -	ND

2.1 PLAGE DE L'ANSE-AUX-COQUES

2.1.1. Contextes géographiques, géologiques et géomorphologiques

Le secteur à l'étude est situé dans la province géologique des Appalaches, résultant d'une double phase de plissement à l'Ordovicien supérieur et au Dévonien (Hétu, 1998). Plus précisément, le secteur se situe dans les basses-terres du Saint-Laurent, constituées de grandes plaines limono-argileuses et de terrasses sableuses organisées en marche d'escalier (Hétu, 1998). Le site d'étude se trouve aussi dans l'ensemble tectonostratigraphique de l'Anticlinorium de Québec, constitué de schistes rouges ou verts avec des quartzites et de grès argileux, tous d'âge ordovicien (Hétu, 1998).

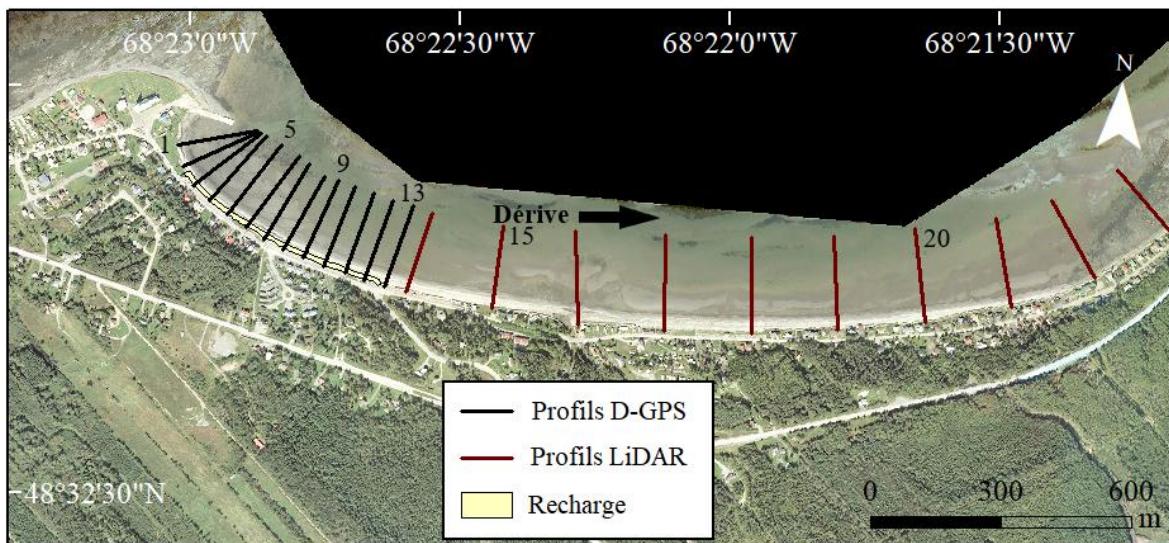


Figure 10. Recharge de la plage de l'Anse-aux-Coques.

La plage de L’Anse-aux-Coques est localisée dans la municipalité de Sainte-Luce, dans la région du Bas-Saint-Laurent (figure 9). Elle est composée d’une plage étroite (30 à 40 m de large) à prédominance de sable et de graviers et d’un large estran (160 m) sablo-argileux comportant des bancs sableux généralement parallèles au rivage (Bernatchez, Cormier, et al., 2017). Le secteur à l’étude s’étend sur environ 1 km entre le quai localisé à l’extrémité ouest de l’anse et l’embouchure du ruisseau localisé au centre de l’anse (figure 10). L’Anse-aux-Coques est bordé par la terrasse Mitis d’une altitude d’environ 6 m et une plateforme intertidale meuble (figure 11) (Dionne, 2002). Le secteur côtier est constitué d’un haut estran de sable et de gravier au pied de la terrasse Mitis et d’un bas estran meuble (Dionne, 2009). Le haut estran repose sur une unité argilo-silteuse déposée sur la surface rocheuse sous-jacente à la terrasse Mitis (Dionne, 2002; Richer-Laflèche, 2017). L’unité argilo-silteuse varie entre 0 et 16,7 m, alors que complètement à l’ouest de L’Anse-aux-Coques le haut estran repose directement sur la surface rocheuse (Richer-Laflèche, 2017). Le bas estran correspond à une plateforme d’érosion taillée dans l’argile de la mer de goldthwait avec placage de sable et de cailloux (Dionne, 2002). La dérive littorale principale s’effectue de l’ouest vers l’est (figure 10)

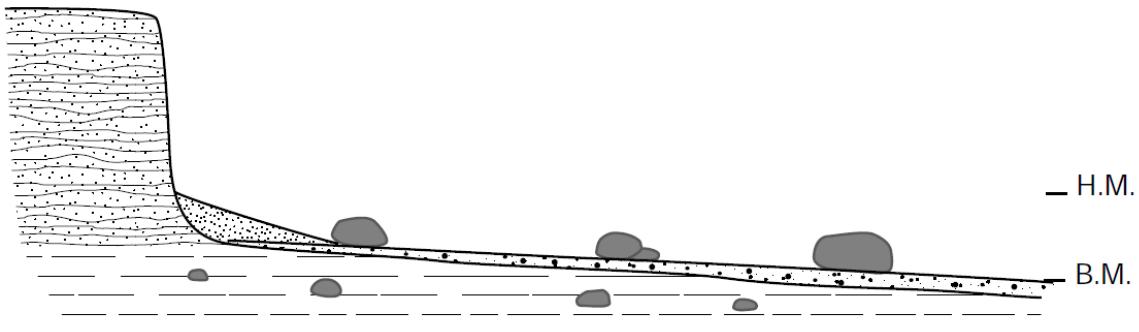


Figure 11. Coupe schématique transversale du littoral et ses composantes pour le secteur d'étude (Dionne, 2002).

À la suite des dégâts occasionnés par les tempêtes de 2005 et 2010, notamment sur la promenade et les aménagements récréatifs localisés en bordure de la plage, la plage de l’Anse-aux-Coques a fait l’objet d’une recharge en octobre 2014 (figure 12). Un total de 11 200 m³ (Yan Ropars, communication personnelle) de sédiments grossiers avec un D₅₀

d'au moins 7 mm ont été déversés sur la zone ouest de la plage, sur une distance d'environ 500 m le long de la promenade (Ropars, 2013; Van-Wiert et al., 2017). Depuis, cinq recharges d'entretien ont été effectuées avec les volumes et matériaux suivants : 1864 m³ de sable et de gravillons en 2015, 1023 m³ de sable et de gravillons en 2016, 1006 m³ de sable et de gravillons en 2017, 300 m³ de sable et gravier en 2018 et 820 m³ de sable et gravier en 2019. Un total de 16 213 m³ de matériaux a donc été déversé sur la plage de Sainte-Luce entre 2014 et 2019. Ces recharges avaient également pour objectif de bonifier le caractère esthétique de la plage.



Figure 12. Plage de l'Anse-aux-Coques en 2018 et 2019.

2.1.2. Contexte hydrodynamique

Les vagues pour le secteur à l'étude proviennent principalement du nord-est et de l'ouest-sud-ouest. Leurs hauteurs significatives sont faibles toute l'année avec des \bar{H}_s moyens oscillants entre 0,4 m pendant le mois de décembre et 0,2 m au cours des mois de juillet et août. La période moyenne des vagues est également faible et peu variable avec des valeurs proches de 3 s toute l'année (figure 13).

La marée y est de type semi-diurne d'amplitude mesotidale. Le marnage moyen y est de 3 m tandis que les marnages des plus grandes marées de vive-eau et des plus petites marées de morte-eau y sont respectivement de 4,8 m et 1,2 m (station de référence n° 2980 de Pointe-au-Père).

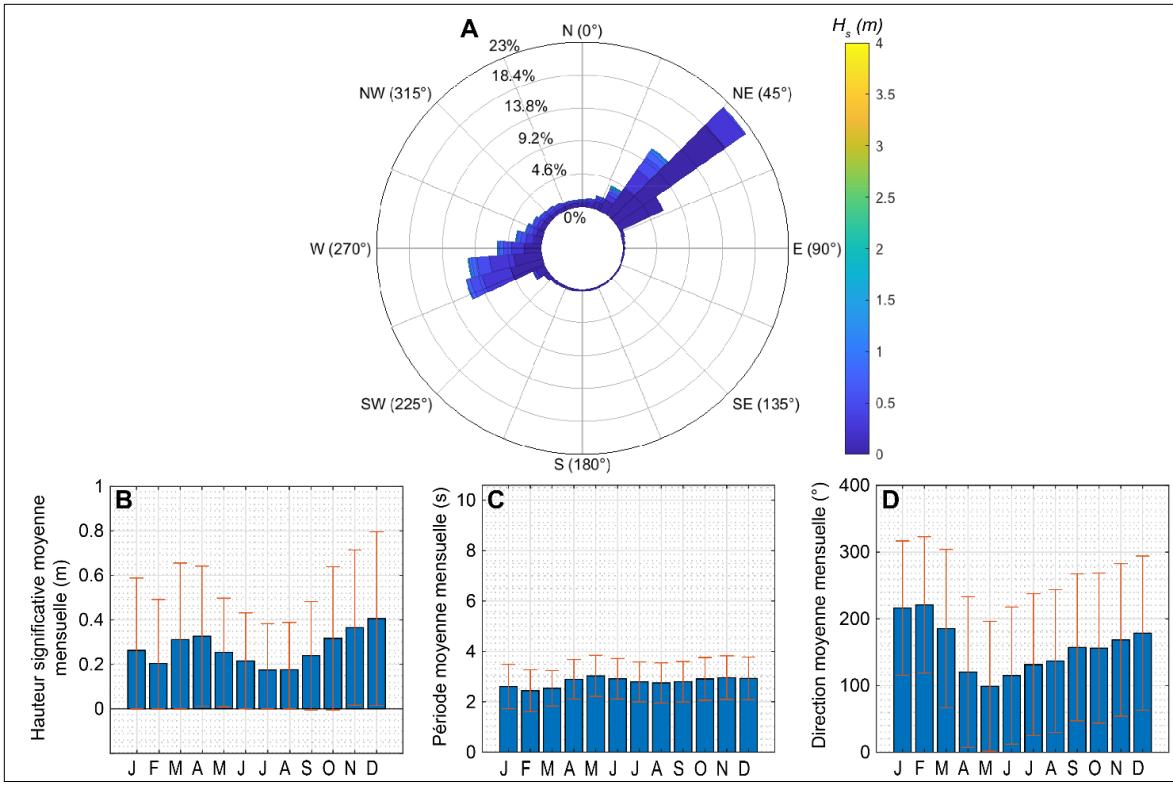


Figure 13. Contexte hydrodynamique du secteur de l’Anse-aux-Coques. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

La côte du site d’étude à une orientation nord-est, ce qui indique que le site est particulièrement sensible aux événements hydrodynamiques provenant du nord à l’est. Ainsi le site est exposé aux vagues du nord-est, mais très peu exposé aux vagues provenant de l’ouest-sud-ouest. Les caractéristiques de vagues ont été générées par le modèle WW3 (Tolman, 2014) dans le cadre du projet MoDESCo (Bandet et al., 2020; Bernatchez et al., 2017) pour l’ensemble de l’estuaire et du golfe du Saint-Laurent sur une grille à 1km de résolution

2.2 BANC LAROCQUE

2.2.1. Contextes géographiques, géomorphologiques et géologiques

Le secteur à l’étude est situé dans la baie des Chaleurs. Celle-ci se trouve dans la province géologique des Appalaches, plus précisément dans la formation de Bonaventure (Gosselin,

1988; Lebuis & David, 1977; Simard, 1986). La baie des Chaleurs fait partie de l'orogénèse acadienne, survenue au Dévonien, qui constitue la dernière phase de l'édification des Appalaches (Gosselin, 1988; Landry et al., 2013; Peulvast et al., 1996). Cette formation est caractérisée par des grès, shales et mudrocks provenant de l'ordovicien au dévonien tardif (Peulvast et al., 1996). La formation de Bonaventure tient toutefois son origine de dépôts carbonifères et est principalement constituée de conglomérats rouge ou gris, de grès et de mudstone, avec présence localisée de calcaires (Alcock, 1935; Gosselin, 1988; Kirkwood, 1989; Peulvast et al., 1996).



Figure 14. Littoral et basses terres dans le secteur du banc Larocque. Le plateau gaspésien est également visible à l'arrière.

Les basses-terres et le littoral de la région de Carleton (figure 14) sont également caractérisés par un complexe fluvioglaciaire deltaïque mis en place à partir d'un glacier occupant la baie des Chaleurs, lors de la dernière glaciation (Hétu et al., 2006). Des sédiments d'eau peu profonde et de rivage ont également été mis en place lors du retrait de la mer pendant la dernière déglaciation (Lebuis & David, 1977). Ces sédiments sont principalement composés de sable, gravier et blocs, que l'on peut retrouver sur les terrasses et hauts de plages du secteur d'étude (Lebuis & David, 1977).

Le banc Larocque est localisé à Carleton-sur-Mer, dans la région Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine (figure 15). Il se situe dans la baie des Chaleurs, le quatrième plus grand estuaire au Canada (Syvitski, 1992). Il forme une flèche littorale de sables, graviers et galets de ± 2 km qui constitue, avec le banc de Carleton au Nord, une séparation naturelle entre les eaux marines de la baie des Chaleurs et le barachois de Carleton-sur-Mer. Le haut estran du secteur est principalement constitué de graviers, alors que le bas estran est principalement constitué de sable. Le haut estran est très peu large devant l'enrochement et s'élargit devant la recharge et devant les secteurs non artificialisés. Ce site, dont environ 60 % de la superficie est occupée par le Camping de Carleton-sur-Mer et qui abrite le phare de la pointe Tracadigash, revêt une forte valeur économique, sociale et culturelle pour la municipalité et ses habitants. Le secteur à l'étude concerne la plage localisée au sud de la partie proximale du banc Larocque, le long du premier tronçon de l'avenue du Phare (figure 16 et figure 15). La flèche présente à cet endroit un fort rétrécissement dans sa largeur, mettant en péril la pérennité de la route et, par conséquent, l'accessibilité aux zones naturelles et aux infrastructures touristiques localisées à l'ouest. Ce secteur est également sujet à des problématiques de franchissement par les vagues de tempêtes (Fraser et al., 2012). La dérive littorale principale s'effectue de l'est vers l'ouest (figure 15)

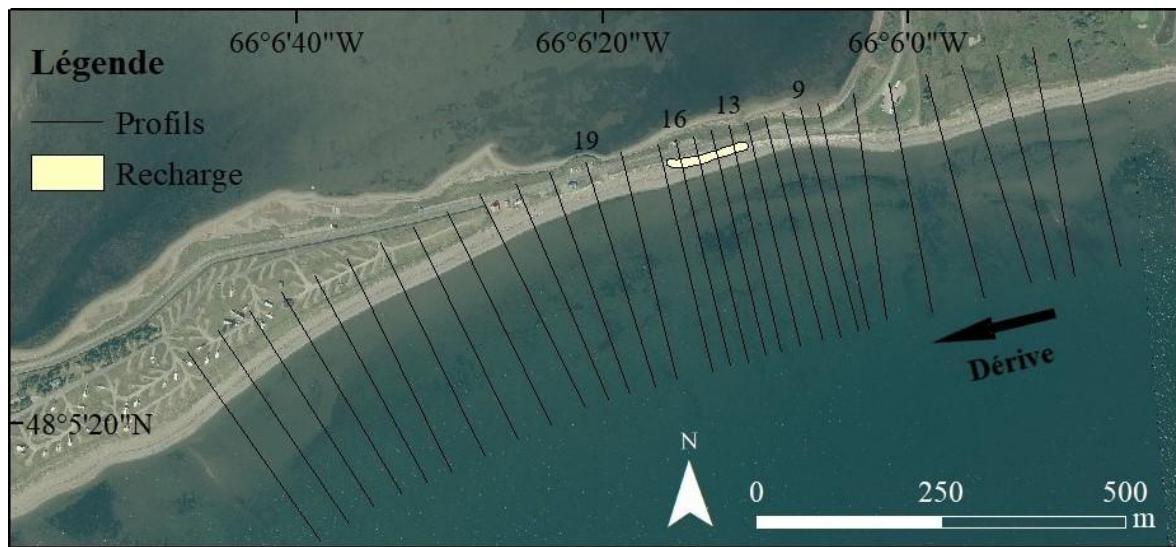


Figure 15. Recharge de plage du banc Larocque.

Lors de la tempête du 6 décembre 2010, une partie de l'enrochement, du muret de bois et de la piste cyclable longeant l'avenue du Phare ont été endommagés. À la suite de cet événement, une recharge de plage a été mise en place à l'automne 2011 (figure 15), où 15 000 m³ de sable ont été déversés sur une longueur de 261 m et une largeur de 37 m. Aucune recharge de maintenance n'a été effectuée, à notre connaissance. L'objectif de cette recharge était de réduire l'érosion, ainsi que de protéger les infrastructures.



Figure 16. Banc Larocque en 2018 et 2019

2.2.2. Contexte hydrodynamique

Les vagues pour le secteur à l'étude proviennent principalement de l'est à l'est-sud-est. Cette particularité tient à sa position en fond de la baie des Chaleurs. Les vagues y ont une faible hauteur significative avec des \bar{H}_s moyens ne dépassant pas les 0,2 m (figure 17).

La marée y est de type mixte semi-diurne d'amplitude à la limite du microtidale et du mésotidale. Le marnage moyen y est de 1,8 m tandis que les marnages des plus grandes marées de vive-eau et des plus petites marées de morte-eau y sont respectivement de 2,8 m et 0,8 m (station de référence n° 2200 de Carleton).

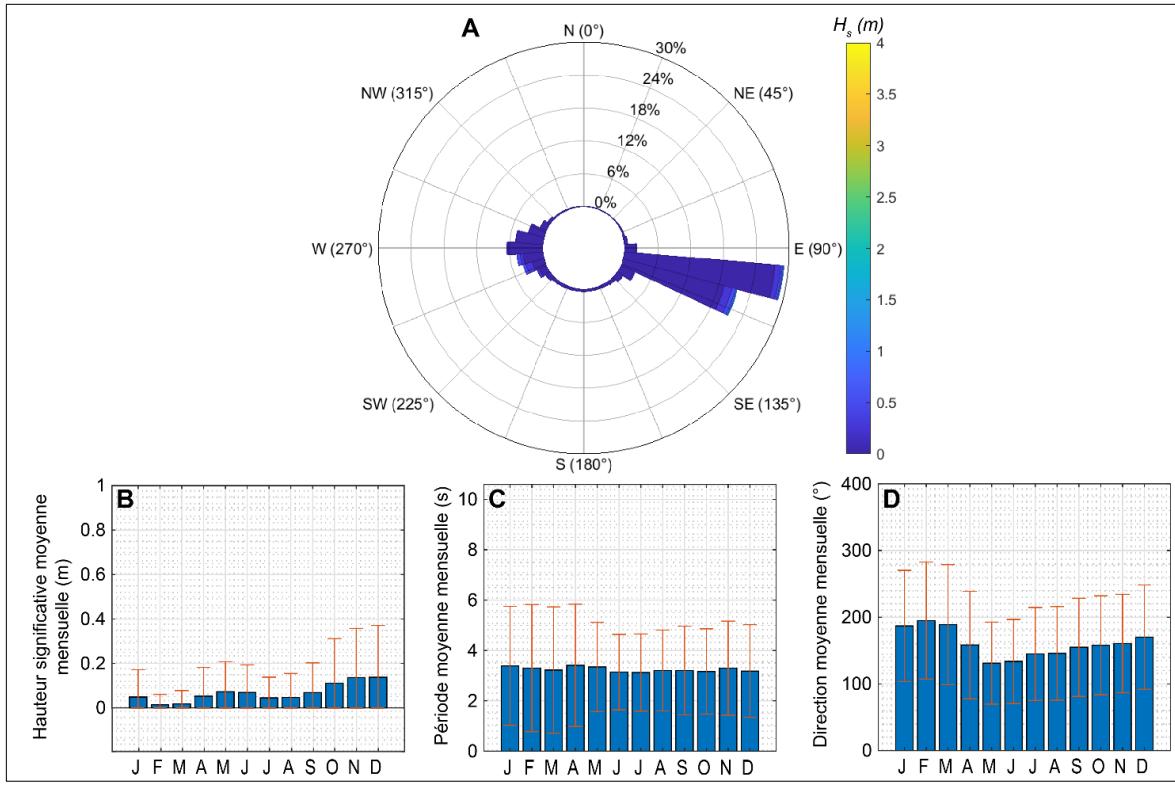


Figure 17. Contexte hydrodynamique du secteur du banc Larocque. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

La côte du site d'étude à une orientation sud-est, ce qui indique que le site est particulièrement sensible aux événements hydrodynamiques provenant du sud-ouest à l'est. Ainsi le site est exposé aux vagues du sud-est et de l'est-sud-est. Les caractéristiques de vagues ont été générées par le modèle WW3 (Tolman, 2014) dans le cadre du projet MoDESCo (Bandet et al., 2020; Bernatchez, Arsenault, et al., 2017) pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent sur une grille à 1km de résolution

2.3 PLAGE MONAGHAN

2.3.1. Contextes géographiques, géomorphologiques et géologiques

Le secteur à l'étude se situe dans la province géologique de Grenville, constituée de roches ignées et métamorphiques du précambrien et du cambrien (Bostock, 1970; Dredge, 1983). Ces formations rocheuses sont principalement constituées d'anorthosite et de gabbros,

monzogabros et autres roches d'assemblages d'oxides de fer et de titane, issues de l'intrusion mafique de Sept-Îles (Boyer Villemaire et al., 2013). Selon Dredge (1983) deux unités géologiques distinctes peuvent être observées : un plateau constitué de roc et caractérisé par une succession de collines arrondies, ainsi qu'une plaine côtière caractérisée par une série de caps rocheux sculptés par les glaciers et recouverts de dépôts marins, glaciaires et fluvio-glaciaires. Dans la région de Sept-Îles, la côte est principalement constituée de terrasses de plage, de caps rocheux et de falaises meubles (figure 18) issues de dépôts post-glaciaires (Dredge, 1983).



Figure 18. Différents types de côte dans la région de Sept-Îles. **A)** Terrasse de plage; **B)** Falaise meuble; **C)** Côte rocheuse.

La plage Monaghan est localisée dans la municipalité Sept-Îles dans la région de la Côte-Nord (figure 19). Elle est située en bordure du complexe deltaïque postglaciaire (Dubois, 1979). Plus précisément, le site à l'étude se situe dans la baie de la Boule à l'ouest de la

rivière Moisie et à l'est de la baie de Sept-Îles. Ce site est fortement exposé aux aléas d'érosion et de submersion côtières (Bermatchez et al., 2008). La côte à terrasse de plage est constituée d'un estran sableux, avec barres sableuses sur le bas estran (figure 20). La dérive littorale principale s'effectue de l'est vers l'ouest (figure 19).

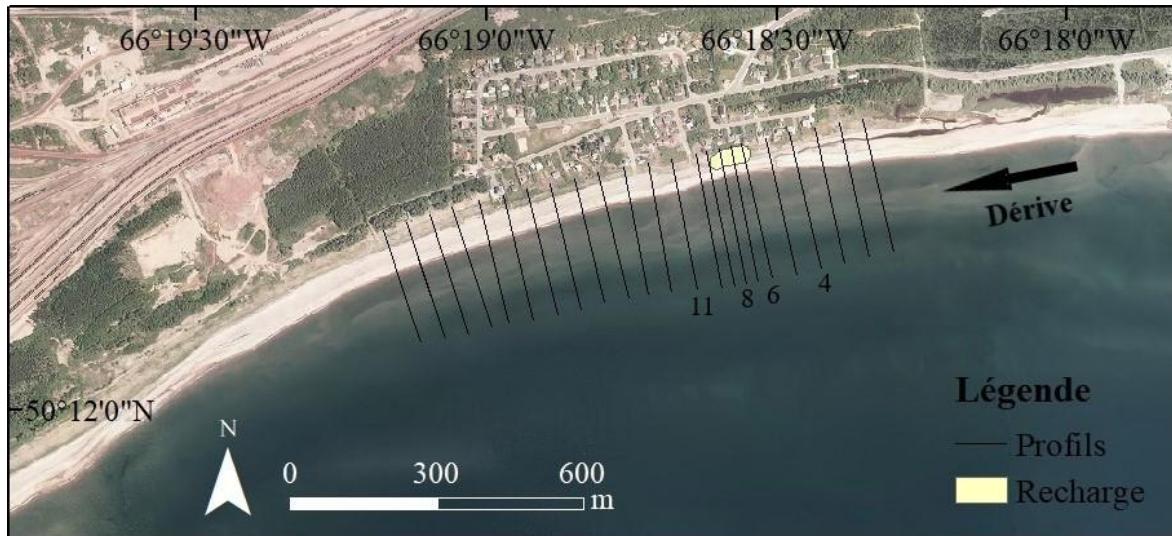


Figure 19. Recharge de la plage Monaghan.

Dans l'objectif de favoriser la formation d'une importante réserve de sable capable de faire face aux tempêtes d'automne et de maintenir l'équilibre dynamique et sédimentaire de la plage, et de réduire le recul du littoral, une recharge de plage a été mise en place en août 2000. La recharge a été construite sous forme de dune avec une longueur de 50 m, une largeur de 20 m et une hauteur moyenne de 1,5 à 2 m (Argus inc., 2001). Le volume de la recharge n'est pas connu, mais selon ces dimensions la recharge avait un volume de 1500 à 2 000 m³. L'objectif de cette recharge était principalement de limiter l'effet des tempêtes sur la côte.



Figure 20. Plage Monaghan en 2018 et 2019

2.3.2. Contexte hydrodynamique

Les vagues pour le secteur à l'étude proviennent principalement du sud-est. Leurs hauteurs significatives moyennes sont faibles toute l'année, avec des valeurs de \bar{H}_s allant de 0,1 m au cours des mois d'hiver à 0,3 m au printemps et en automne. La période moyenne des vagues est de l'ordre de 6 à 6,5 s en hiver, et de 4 à 4,5 s pendant le reste de l'année (figure 21).

La marée y est de type mixte semi-diurne d'amplitude mésotidale. Le marnage moyen y est de 2,2 m tandis que les marnages des plus grandes marées de vive-eau et des plus petites marées de morte-eau y sont respectivement de 3,5 m et 0,9 m (station de référence n° 2780 de Sept-Îles).

La côte du site d'étude à une orientation sud-est, ce qui indique que le site est particulièrement sensible aux événements hydrodynamiques provenant du sud-ouest à l'est. Ainsi le site est exposé aux vagues du sud-est. Cette orientation donne directement sur le golfe du Saint-Laurent, ce qui indique que le fetch est très important pour le site d'étude. Les caractéristiques de vagues ont été générées par le modèle WW3 (Tolman, 2014) dans le cadre du projet MoDESCo (Bandet et al., 2020; Bernatchez et al., 2017) pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent sur une grille à 1km de résolution

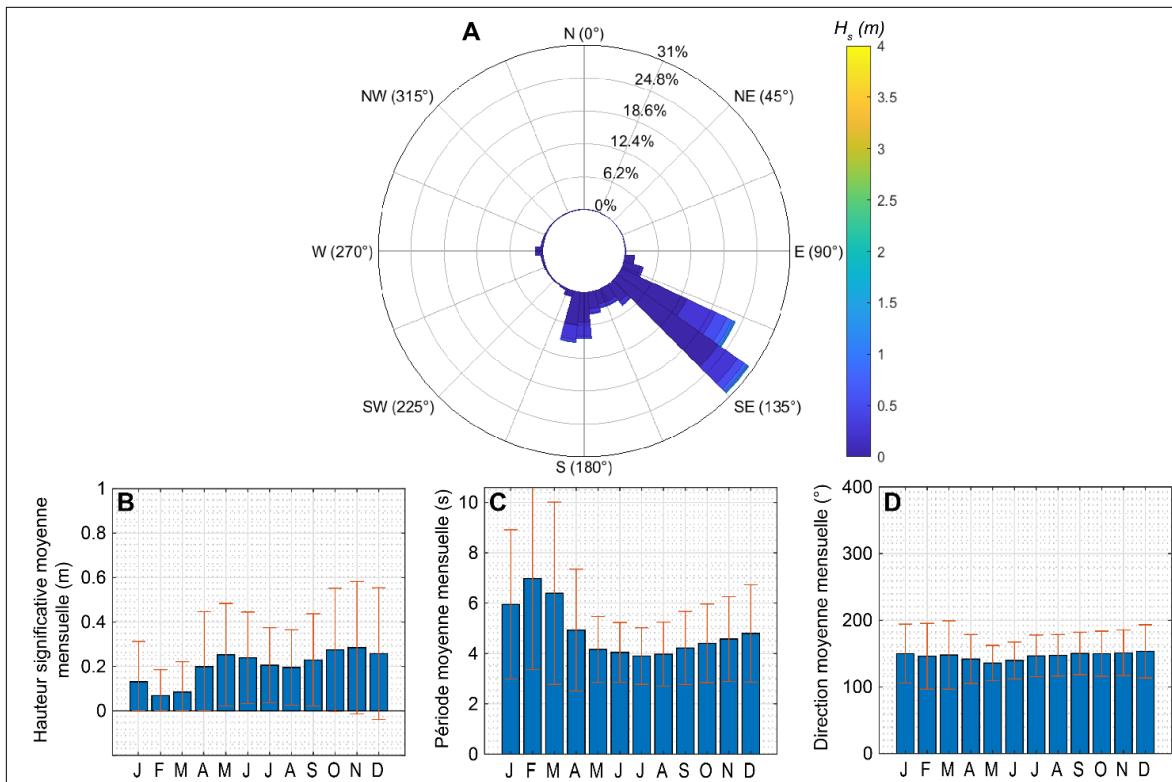


Figure 21. Contexte hydrodynamique du secteur de la plage Monaghan. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

2.4 ILES-DE-LA-MADELEINE

2.4.1. Contextes géographiques, géomorphologiques et géologiques

Les Îles-de-la-Madeleine sont un archipel d'îles d'une superficie d'environ 400 km² se situant près du centre du golfe du Saint-Laurent, à 205 km au sud-est de Gaspé, 105 km au nord -est de l'Île-du-Prince-Édouard et à 140 km au sud-ouest de Terre-Neuve (Brisebois, 1981; Rémillard et al., 2016). Six des sept îles de l'archipel sont connectées par des tombolos formés pendant l'Holocène récent (Dredge et al., 1992; Rémillard et al., 2015). La région appartient à la province géologique des Appalaches, plus spécifiquement au bassin carbonifère des maritimes (Brisebois, 1981).

La lithologie des Îles-de-la-madelaine est constituée de roches volcaniques et sédimentaires du permo-carbonifère (Brisebois, 1981; Dredge et al., 1992; Rémillard et al., 2016). Brisebois

(1981) reconnaît quatre assemblages lithologiques superposés et qui sont, de la base au sommet : **1)** un assemblage de sédiments terrigènes, carbonatés et évaporitiques, de roches volcanoclastiques et de roches volcaniques; **2)** un assemblage de roches volcaniques interstratifiées avec présence de calcaire; **3)** un assemblage de grès rouge ou gris-vert, de mudstone-claystone, de conglomérat et, localement, de calcaire dolomitique; **4)** un assemblage de grès rouge ou gris-vert, à stratifications obliques de grande taille. Des sédiments d'origine quaternaire sont aussi présents sur les îles, dont des sédiments glaciaires et glacio-marins. La présence ou non de glaciers sur les îles a été l'objet d'un débat pendant plus d'un siècle (Dredge et al., 1992; Rémiillard et al., 2016). Toutefois, ce débat a été conclu par Rémiillard (2016), qui a démontré la présence de deux calottes glaciaires différentes sur l'archipel.

Quatre unités morphologiques caractérisent les Îles-de-la-Madeleine (figure 22 & figure 23): les buttes volcaniques, les piémonts karstiques, les plateaux de grès et les tombolos (Brisebois, 1981; Dubois, 1992; Grenier & Dubois, 1992; Hétu et al., 2020). Les buttes sont des collines arrondies et coniques constituées de roches volcaniques résistantes à l'érosion (Brisebois, 1981; Dredge et al., 1992). Les plateaux correspondent à des plateformes de grès rouge élevées de quelques dizaines de mètres au-dessus du niveau de la mer, entrecoupées de collines basses liées à la présence de grès gris-vert plus résistant (Brisebois, 1981). Les piémonts karstiques se situent entre les buttes volcaniques et les plateaux de grès et proviennent de la dissolution de la formation rocheuse de Havre-aux-Maisons (Hétu et al., 2020). Les tombolos sont des cordons sableux reliant les îles principales et pouvant atteindre

jusqu'à 15 kilomètres de longueur (Brisebois, 1981). Celles-ci sont formées par les courants marins circulants entre les îles (Brisebois, 1981).

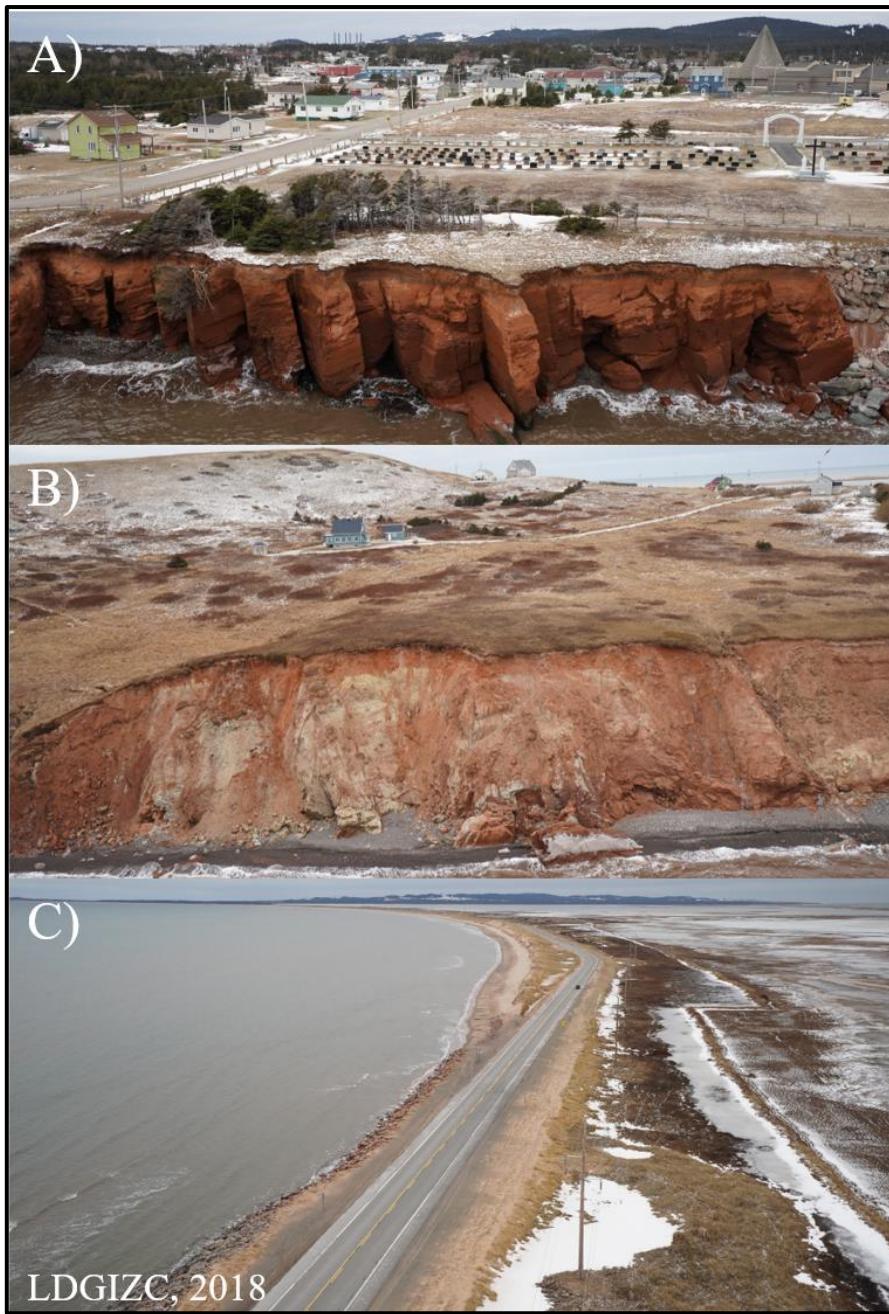


Figure 22. Photos obliques de 3 unités morphologiques des îles-de-la-madeleine. **a)** plateau de grès rouge (Cap-aux-Meules) ; **b)** butte des demoiselles (Havre-Aubert) ; **c)** tombolo reliant l'île de Cap-aux-Meules à l'îles du Havre-Aubert.

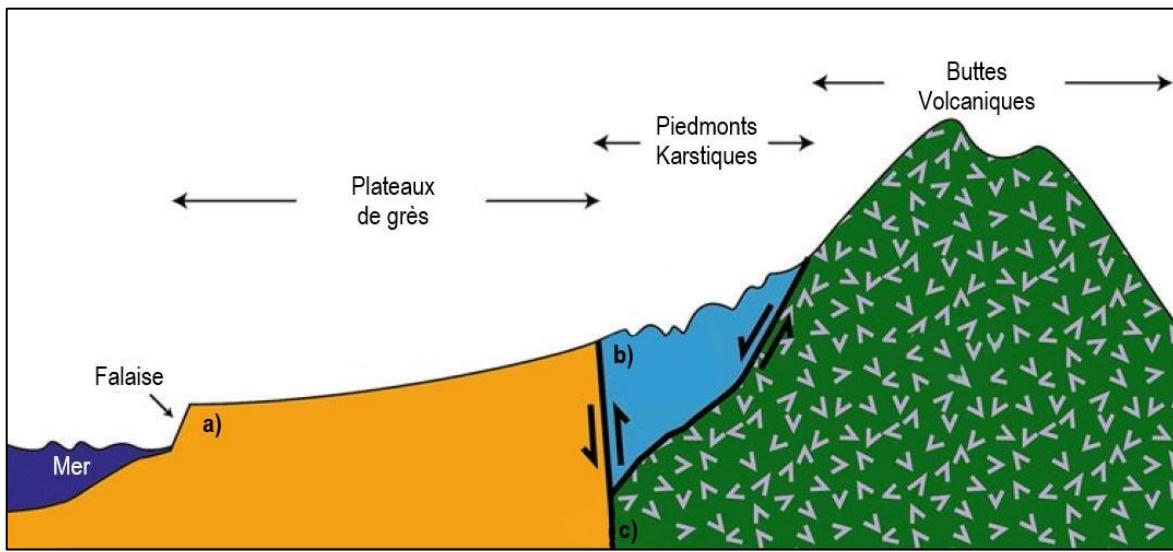


Figure 23. Schéma de 3 unités morphologiques des îles-de-la-madeleine. a) plateau de grès ; b) piémonts karstiques ; c) buttes volcaniques. Figure adaptée de Hétu (2020).

Plage de La Martinique

La plage de La Martinique est située au nord de la baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine (figure 24). Elle se situe dans la partie active de la côte à tombolo dunifié de la baie de Plaisance. Les sédiments de la plage de La Martinique sont principalement composés de sable, avec une présence beaucoup plus faible de vases et d'argiles sur l'estran (Bernatchez et al., 2010) (figure 25). Il y a aussi présence de barres sableuses sur le bas estran. La dérive littorale principale s'effectue du nord vers le sud (figure 24).

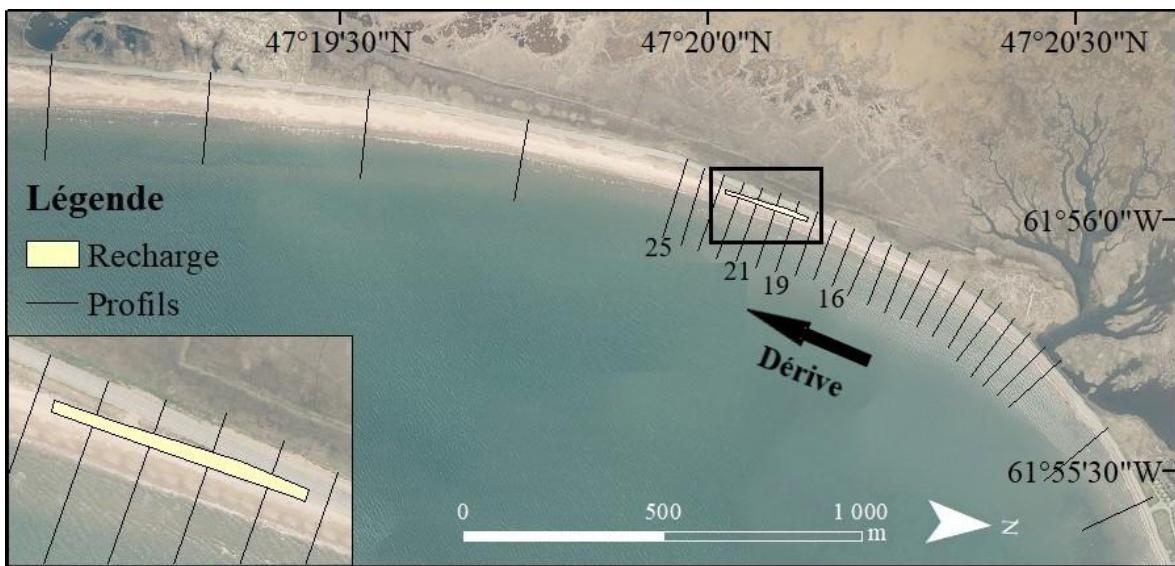


Figure 24. Recharge de la plage de La Martinique.

Les secteurs localisés en arrière de la plage de La Martinique sont sujets à des épisodes de submersion lors des fortes tempêtes provenant du nord-est au sud-est (Bernatchez et al., 2010). Depuis la moitié des années 1950s, des infrastructures sont mises en place pour protéger la route construite en 1945 (Jolicoeur & O'Carroll, 2007) et depuis 2007, des recharges sont effectuées sur le haut de plage et le haut estran (figure 24). Celles-ci couvrent la portion sud de l'enrochement, de même que la zone adjacente qui subit un effet de bout (WSP, 2015). Les travaux de recharge couvrent une longueur d'environ 410 m consécutifs (WSP, 2015). Lors des campagnes de terrain de 2019, la recharge s'étalait sur une longueur de 430 m. Les volumes des recharges ne sont pas connus, mais leurs masses varient entre 1 600 tonnes et 14 000 tonnes. Ainsi, on peut estimer un volume de recharge variant entre 1000 m³ et 8 750 m³. L'objectif de cette recharge était de réduire l'érosion et de protéger les infrastructures.



Figure 25. Plage de La Martinique en 2018 et 2019

Plage de la Pointe aux Loups

La recharge de la Pointe aux Loups se situe au nord-est de l'îlot rocheux de Pointe-aux-Loups, sur la côte ouest des Îles-de-la-Madeleine (figure 26). Celle-ci se situe aussi sur une côte à tombolo dunifié active avec présence de barres sableuses (figure 27). Les principaux phénomènes à l'origine du recul de la ligne de rivage sont les fortes tempêtes soufflant de l'ouest et du nord (Bernatchez et al., 2010). La dérive littorale principale s'effectue du sud-ouest vers le nord-est (figure 26).

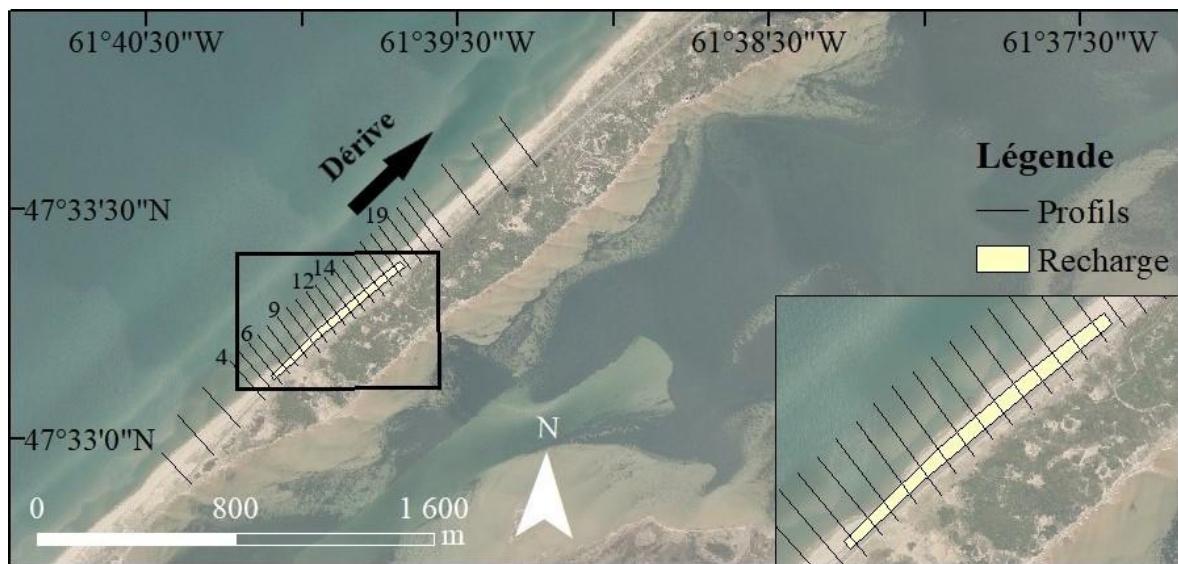


Figure 26. Recharge de la plage de la Pointe aux Loups.

Depuis 1952, des infrastructures de protection sont mises en place à la Pointe aux Loups à la suite de la construction de la route dans les années 1940s (Jolicoeur & O'Carroll, 2007). Depuis 2008, des recharges sont effectuées de part et d'autre d'un épi datant des années 1960 et en partie par-dessus un enrochement au sud-ouest de l'épi (WSP, 2015). En 2019, le secteur d'intervention est d'une longueur d'environ 800 m, dont 360 m d'enrochement (figure 26). Les volumes des recharges ne sont pas connus, mais leurs masses varient entre 1 400 tonnes et 12 000 tonnes. Ainsi, on peut estimer un volume de recharge variant entre 875 m³ et 7 500 m³. Les sédiments de la plage du site à l'étude sont des sables fins à grossiers sur le haut et le bas estran. L'objectif de cette recharge était de protéger les infrastructures lors des tempêtes. De mai à septembre 2019, un enrochement est construit sur le secteur sud de la Pointe aux Loups, remplaçant la recharge (figure 27), tandis qu'une recharge est implantée sur le secteur nord auparavant sans recharge.



Figure 27. Plage de la Pointe aux Loups (secteur sud) en 2018 et 2019.

2.4.2. Contexte hydrodynamique

Plage de La Martinique

Les vagues pour le secteur à l'étude proviennent principalement des secteurs est et nord-est. Les hauteurs significatives moyennes varient entre 0,4 et 0,6 m au cours des mois d'hiver, printemps et été puis atteignent des valeurs plus importantes de l'ordre de 0,8 m en automne. Les périodes moyennes des vagues sont comprises entre 3,5 et 6 s. Comme pour les autres sites, les périodes les plus grandes ont lieu au cours de l'hiver (figure 28).

La marée y est de type semi-diurne d'amplitude microtidale. Le marnage moyen y est de 0,6 m tandis que les marnages des plus grandes marées de vive-eau et des plus petites marées de morte-eau y sont respectivement de 1,1 m et 0,1 m (station de référence n° 1970 de Cap-aux-Meules).

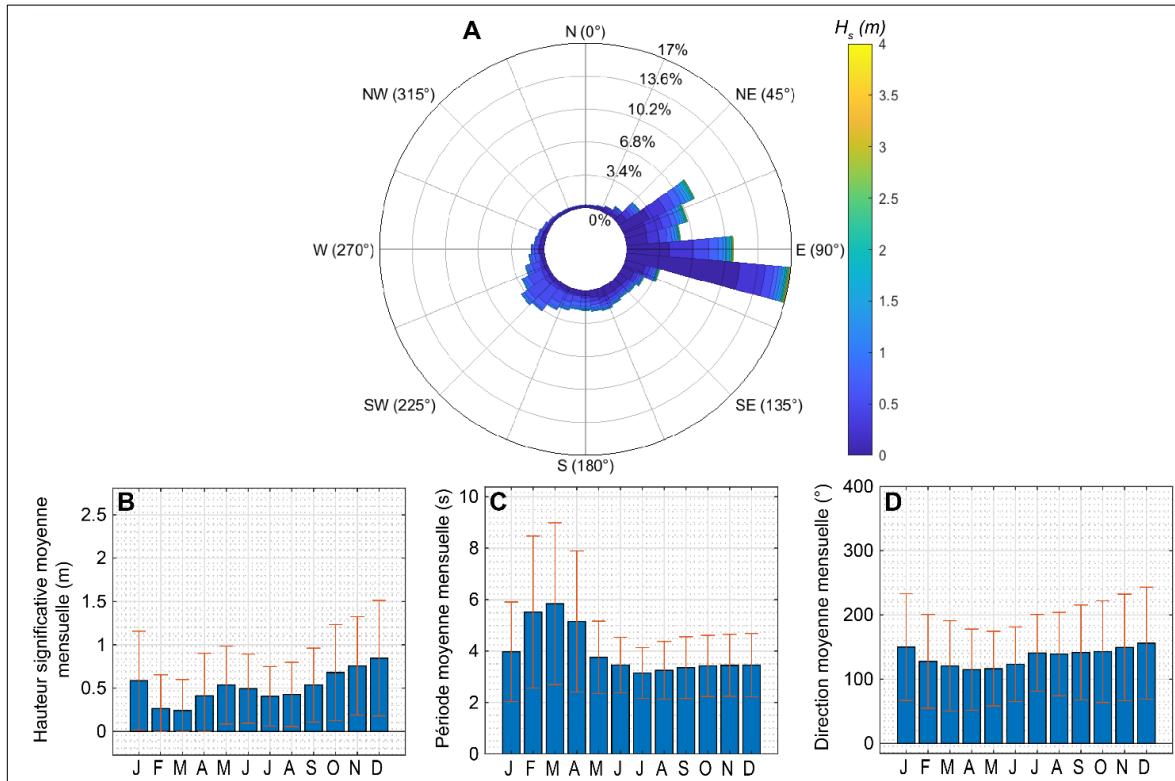


Figure 28. Contexte hydrodynamique du secteur de la plage de La Martinique. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

La côte du site d'étude à une orientation sud-est, ce qui indique que le site est particulièrement sensible aux événements hydrodynamiques provenant du sud à l'est. Ainsi le site est exposé aux vagues de l'est, mais peu exposé aux vagues provenant du nord-est. Les caractéristiques de vagues ont été générées par le modèle WW3 (Tolman, 2014) dans le cadre du projet MoDESCo (Bandet et al., 2020; Bernatchez et al., 2017) pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent sur une grille à 1km de résolution.

Plage de la Pointe aux Loups

La plage de la Pointe aux Loups présente une exposition différente des autres sites de recharges. Son ouverture sur le golfe du Saint-Laurent l'expose à un plus large spectre de directions. Ainsi, les vagues pour le secteur à l'étude proviennent des secteurs ouest-sud-ouest, nord-ouest, et nord-nord-est. La hauteur significative des vagues y est beaucoup plus importante. Les valeurs de \bar{H}_s sont supérieures à 1 m au cours de l'automne et atteignent 1,5 m pendant les mois de novembre, décembre et janvier. Elles tombent à 0,5 m durant les mois de février et mars, puis sont inférieures à 1 m le reste de l'année. La période des vagues reste par contre modérée, de l'ordre de 4 à 6 s selon les mois de l'année (figure 29).

La marée y est de type mixte diurne d'amplitude microtidale. Le marnage moyen y est de 0,5 m tandis que les marnages des plus grandes marées de vive-eau et des plus petites marées de morte-eau y sont respectivement de 0,9 m et 0,1 m (station de référence n° 1989 de la Pointe aux Loups).

La côte du site d'étude à une orientation nord-ouest, ce qui indique que le site est particulièrement sensible aux événements hydrodynamiques provenant du nord à l'ouest. Ainsi le site est surtout exposé à l'ensemble des directions de vagues pour le secteur, soit du nord-nord-est au sud-sud-ouest. Les caractéristiques de vagues ont été générées par le modèle WW3 (Tolman, 2014) dans le cadre du projet MoDESCo (Bandet et al., 2020; Bernatchez et al., 2017) pour l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent sur une grille à 1km de résolution.

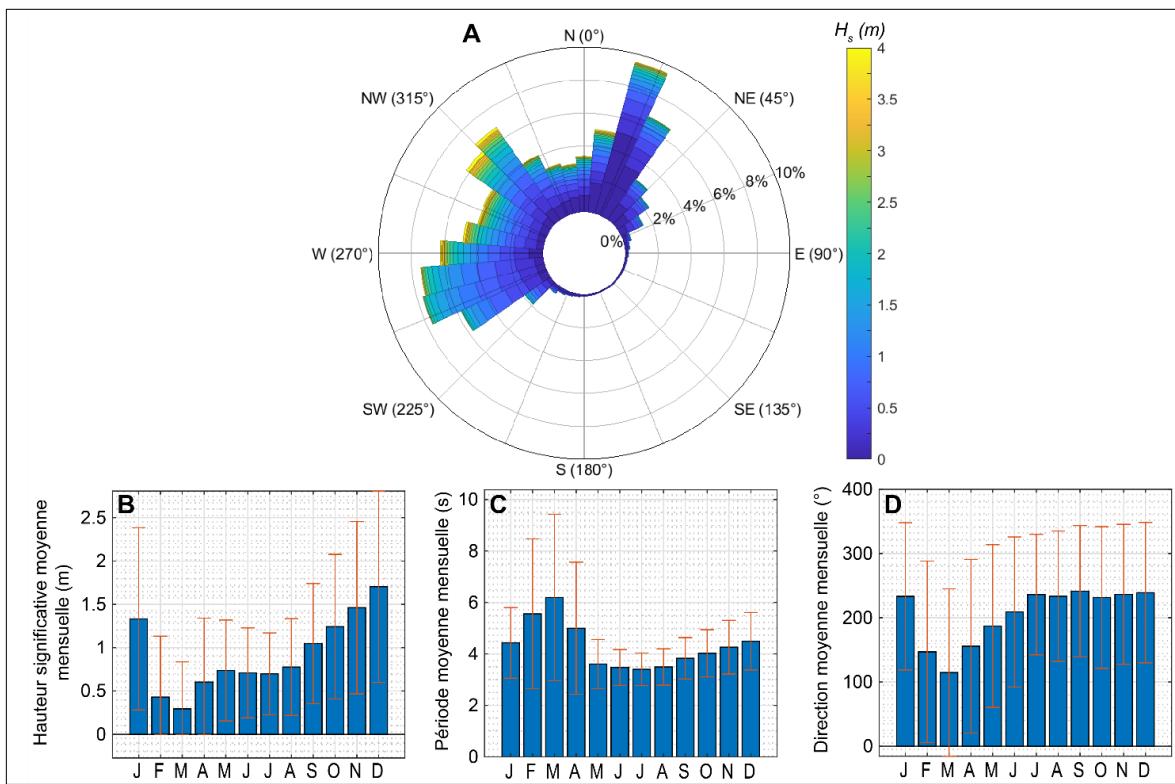


Figure 29. Contexte hydrodynamique du secteur de la Pointe aux Loups. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

3.1 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE GÉNÉRALE

Le suivi environnemental des travaux de recharge de plage vise à interpréter la réponse des cinq environnements côtiers étudiés à ce type d'interventions. Dans un premier temps, une analyse rétrospective des dynamiques de la ligne de rivage a été réalisée à partir de photographies aériennes historiques. Les objectifs de cette analyse sont d'identifier et de quantifier les dynamiques des lignes de rivages des sites d'étude avant le début du suivi morphodynamique. Ainsi, un état de référence peut être établi avant la mise en place des recharges de plage et l'évolution des lignes de rivages pré-intervention et post-intervention peut aussi être comparée. Dans un second temps, un protocole de suivi des variations morphodynamiques actuelles a été mis en place. Il repose sur l'acquisition de données sédimentologiques et topomorphologiques ponctuelles (granulométrie, profils de plages, modèles numériques de terrains). Pour tous les sites d'étude, le cadre de référence utilisé est la cellule hydrosédimentaire. Ainsi, l'évolution de la recharge et des secteurs témoins de la cellule est observée, permettant de différencier l'effet de la recharge des autres paramètres environnementaux. Le secteur de chaque recharge est défini par la position de la recharge et 100 m de chaque côté afin d'étudier l'effet de la recharge sur les transects à proximité. Les transects à plus de 100 m sont également étudiés pour voir jusqu'où l'effet de la recharge peut se faire sentir, mais également pour voir comment un secteur sans recharge soumis aux mêmes conditions évolue. Cette section du mémoire présente les matériels et méthodes utilisés dans le cadre de cette maîtrise.

3.2 ANALYSE HISTORIQUE DE LA DYNAMIQUE DE LA LIGNE DE RIVAGE ET DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE LA PLAGE

La ligne de rivage et le trait de côte peuvent se définir de manière distincte pour l'évolution côtière (Bird, 2008; Oertel, 2005). Chaque segment de côte possède alors une ligne de rivage et un trait de côte, chacun défini par un indicateur distinct. Pour l'évolution historique des systèmes côtiers et la caractérisation côtière, le choix de cet indicateur dépend du type de côte (Bernatchez & Fraser, 2012; Boak & Turner, 2005). Pour les côtes à falaise, le sommet de talus est utilisé (trait de côte). Pour les côtes sans falaises ou les côtes basses, la limite de végétation dense est utilisée (ligne de rivage). Pour les côtes artificielles, c'est la limite supérieure des ouvrages de protection (trait de côte) (Bernatchez & Fraser, 2012). Ainsi le trait de côte est déterminé par un indicateur morphologique tel que le sommet de talus, alors que la ligne de rivage peut être déterminée par d'autres indicateurs qui ne sont pas nécessairement morphologiques, telle que la limite de végétation dense. Parfois, la ligne de rivage peut toutefois correspondre au trait de côte. Dans le cadre de cette étude, c'est la ligne de rivage qui est le plus souvent utilisée, les côtes basses étant prédominantes pour les secteurs à l'étude. Afin de faciliter la lecture de ce mémoire, le terme « ligne de rivage » sera utilisé tout au long du rapport pour faire référence à la ligne utilisée pour établir l'évolution côtière.

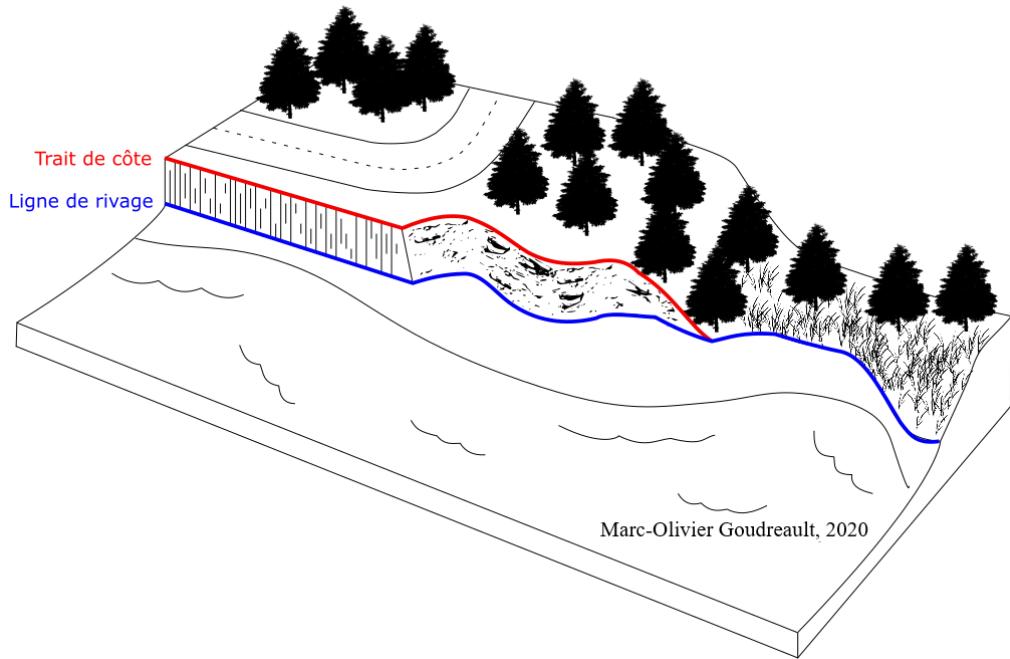


Figure 30: Traits utilisés pour l'évolution historique du littoral selon les types de côtes. Inspiré de Bérubé & Thibault (1996).

L'analyse historique de la dynamique de la ligne de rivage a été réalisée à partir de photographies aériennes verticales prises entre 1963 et 2019 (tableau 2). Les photographies les plus anciennes (1963 à 2004), produites par le gouvernement du Québec dans le cadre de diverses campagnes d'acquisition, ont été numérisées à une résolution de 600 dpi.

Tableau 2. Photographies aériennes utilisées pour l'ensemble des sites d'étude.

Année	Date	Résolution	Type de photographie	Site d'étude	Appareil
1963	1963-07-23	21 cm	Noir et blanc	Anse-aux-Coques	Avion
1976	1976-08-03	60 cm	Noir et blanc	Anse-aux-Coques	Avion
1993	1993-08-07	25 cm	Infrarouge	Anse-aux-Coques	Avion
2009	2009-09-17	21 cm	Couleur	Anse-aux-Coques	Avion
2012	2012-05-28	20 cm	Couleur	Anse-aux-Coques	Avion
2015	na	30 cm	Couleur	Anse-aux-Coques	Avion
1963	1963-07-23	21 cm	Noir et blanc	Banc Larocque	Avion

1974	1974-08-12	77 cm	Noir et blanc	Banc Larocque	Avion
2004	2004-07-26	70 cm	Noir et blanc	Banc Larocque	Avion
2007	na	1 m	Lidar	Banc Larocque	Avion
2018	2018-09-16	30 cm	Couleur	Banc Larocque	Avion
<hr/>					
1965	na	76 cm	Noir et blanc	Plage Monaghan	Avion
1979	1979-07-06	83 cm	Noir et blanc	Plage Monaghan	Avion
1996	1996-10-11	63 cm	Noir et blanc	Plage Monaghan	Avion
2001	2001-09-07	1,69 m	Noir et blanc	Plage Monaghan	Avion
2009	na	20 cm	Couleur	Plage Monaghan	Avion
2017	2017-07-22	30 cm	Couleur	Plage Monaghan	Avion
<hr/>					
1963	1963-08-20	67 cm	Noir et blanc	Îles-de-la-Madeleine	Avion
1983	1983-06-30	42 cm	Noir et blanc	Îles-de-la-Madeleine	Avion
2008	na	14 - 28 cm	Lidar	Îles-de-la-Madeleine	Avion
2015	2015-06-08	20 cm	Couleur	Îles-de-la-Madeleine	Avion
2019	2019-05-13	20 cm	Couleur	Îles-de-la-Madeleine	Avion

Les photographies les plus récentes ont été exploitées dans leur format numérique d'origine (2006 à 2019). Les séries d'images ont été géométriquement corrigées et géoréférencées par une méthode de transformation polynomiale de deuxième ordre, basée sur un ajustement par la méthode des moindres carrés à partir de 6 à 9 points de contrôle (algorithme LSF). L'erreur du géoréférencement est estimée à $\pm 0,90$ m.

La ligne de rivage peut être définie comme l'interface physique entre le domaine terrestre et le domaine marin (Dolan et al., 1980). Toutefois, sa position change temporellement vu la nature dynamique des niveaux d'eau à la côte et des autres processus liés à l'évolution côtière, tels que les processus cryogéniques pour les falaises et les plateformes rocheuses et le transport éolien pour les côtes sablonneuses (Bernatchez & Dubois, 2004; Boak & Turner, 2005). Plusieurs indicateurs peuvent être utilisés afin de caractériser l'évolution côtière. Une synthèse de ces indicateurs est disponible dans Boak & Turner (2005).

L'analyse historique des dynamiques de la ligne de rivage a été effectuée avec les logiciels MobiTC V3, QGIS 3.2.0 et ArcGIS 10.6. La ligne de rivage a été numérisée à partir de

photographies aériennes (figure 31) pour l'ensemble de la cellule hydrosédimentaire de chaque site. Une ligne de référence a été générée par l'outil MobiTC. Cette ligne correspond à une position moyenne de la ligne de rivage pendant la période couverte par les photos aériennes et permet de définir l'orientation des transects sur lesquels l'évolution sera calculée (figure 31). Ces transects sont des lignes perpendiculaires à la ligne de référence générées à un intervalle de 50 m sur chacun des secteurs d'étude.

La distance entre la ligne de rivage et la ligne de référence pour chaque année permet de calculer le taux d'évolution entre deux dates à chacun des transects. Ces taux d'évolution sont exprimés en m/an. Les taux calculés sur des secteurs comportant de l'artificialité tel que les enrochements et les murs n'ont pas été pris en compte.

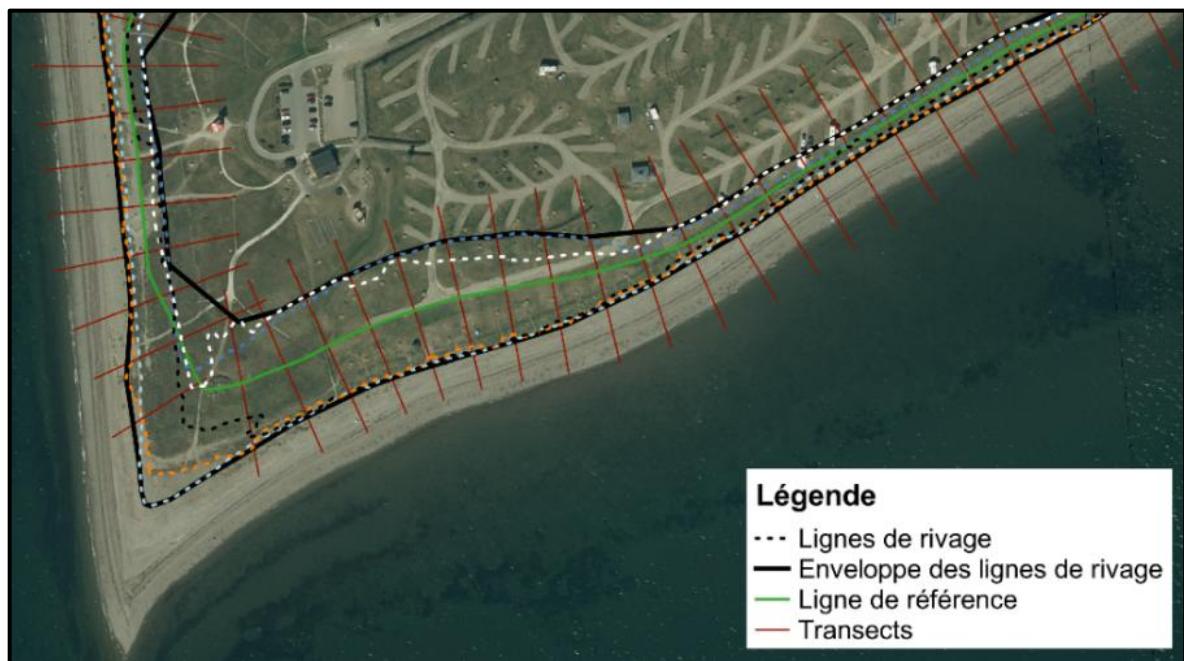


Figure 31: Exemple de la méthode MobiTC

3.3 SUIVI TOPOMORPHOLOGIQUE

Le suivi topomorphologique des cinq sites a été réalisé entre mai 2018 et décembre 2019. Sur le site de l'Anse-aux-Coques, des données acquises à partir de septembre 2012 dans le cadre de travaux antérieurs menés par le LDGIZC ont aussi été utilisées pour étendre l'analyse des dynamiques morphosédimentaires. Au total, 7 levés Lidar, 14 levés

photogrammétriques et 40 levés de profils de plages ont permis d'établir les bilans sédimentaires et la variabilité morphologique de l'ensemble des sites suivis à une échelle saisonnière pluriannuelle.

3.3.1. Profils de plage

Les relevés de profils de plage ont été effectués avec des GPS-différentiels (DGPS) Trimble © R8 Model 3 et R10 Model 1 et 2 (figure 32). Si nécessaire, des antennes radio Trimble © HPB 430-450 MHz ont été utilisées pour effectuer des mesures jusqu'à 12 km des points de base (bornes du réseau géodésique du Québec ou bornes implantées par le LDGIZC). Les DGPS ont été utilisés en modes *RTK* (*Real Time Kinematic*) permettant de mesurer des points avec une précision de 3 cm en latitude, longitude et élévation en temps réel.

Les points ont été mesurés en mode topocontinu, un mode de prise de données prenant des points GPS en continu selon un intervalle spatial spécifié. Les points acquis dans le cadre de ce projet avaient un intervalle de 50 cm le long des profils, de façon perpendiculaire à la ligne de rivage. Ces profils recoupent ainsi la ligne de rivage et se prolongent de part et d'autre dans les zones supratidales et infratidales. En plus des coordonnées géographiques (latitude, longitude et élévation), les paramètres morphologiques (position du pied de la terrasse de plage, de la falaise ou de l'ouvrage de protection, position de la ligne de rivage, position de la flexure, position des barres sableuses) ont été renseignés pour chaque point mesuré. Ce protocole a été répété à chaque date de prise de données sur les mêmes profils.



Figure 32. Prise de données avec DGPS Trimble © R10

3.3.2. Topographie par LiDAR

Des données topographiques des plages ont été acquises avec le système mobile de Lidar terrestre (SMLT) du LDGIZC (figure 33). Cet appareil installé sur un véhicule tout terrain de type côte à côte est composé d'un balayeur laser, d'un système de navigation inertiel GPS-INS (composé d'un IMU et d'un récepteur GPS) et d'une caméra. Il permet l'acquisition rapide et précise de nuages de points topographiques à très haute définition.



Figure 33. Système Mobile de LiDAR Terrestre du LDGIZC

Le balayeur laser est un Riegl VQ-250 à miroir rotatif. La fréquence de balayage utilisée est de 100 Hz pour permettre l'acquisition de 300 000 points par seconde à une vitesse du véhicule variant entre 10 et 40 km/h. Pour enregistrer les mouvements et la position du véhicule, le système de navigation inertiel GPS-INS installé sur le véhicule est le POS-LV 220 du manufacturier Applanix. Ce système est composé d'un récepteur GPS, de deux antennes GPS Trimble Zephyr model 2, d'une centrale inertuelle (IMU) et d'un instrument de mesure de distance (DMI). Finalement, une caméra est utilisée en complément au capteur laser afin de colorer et d'aider à l'interprétation du nuage de points. La caméra couleur vidéographique *PointGrey Grasshopper* GRAS-50S5C-C à capteur CCD a une résolution de 2448 par 2048. Une description détaillée du système est disponible dans Van-Wiers et al. (2017).

Pour chacun des levés, des points de contrôle sont également levés au DGPS pour assurer la qualité des données produites. Les points de contrôle ont été utilisés lors de la phase de validation pour le calcul du biais et de la RMSE (Root Mean Square Error). Préalablement, les données brutes ont été post-traitées à partir du logiciel LP360. Plusieurs algorithmes de

classification semi-automatisée ont été utilisés afin de filtrer le bruit induit par les différents éléments présents sur le site d'étude telle que la végétation et les infrastructures anthropiques ainsi que par les mauvaises conditions atmosphériques. Les infrastructures de protection ont toutefois été conservées. Suite à cette étape, les modèles numériques de terrain (MNT) d'une définition de 5 cm ont été exportés.

3.3.3. Topographie par photogrammétrie SfM

La topographie par photogrammétrie SfM (Structure from Motion) est une méthode qui repose sur l'utilisation d'images multiples afin de reconstruire la géométrie trois dimensions d'un objet ou d'une surface (Fonstad et al., 2013). Cette méthode permet d'obtenir des nuages de points topographiques à haute résolution, comparable à la résolution obtenue dans un levé LiDAR (Fonstad et al., 2013). Cette approche de la photogrammétrie simplifie et démocratise la reconstitution de surfaces 3D à partir d'images 2D (Smith et al., 2016; Westoby et al., 2012). Elle propose une plus grande automatisation de la correspondance entre les images et dans les calculs des paramètres externes de la caméra, notamment avec l'aide des algorithmes SIFT (Fonstad et al., 2013; Lindeberg, 2012). Cette méthode permet également de reconnaître des caractéristiques communes dans une même image et/ou dans plusieurs images aux échelles et aux points de vue sensiblement différents (Fonstad et al., 2013).

Dans le cadre de cette étude, les images aériennes de basse altitude traitées par SfM ont été collectées à l'aide de cerfs-volants, de ballons d'hélium ou de drones (figure 34). Le cerf-volant et le ballon d'hélium sont accompagnés d'une caméra Ricoh GR2. Les drones DJI Mavic 2 Pro ou Phantom 4 RTK disposent chacun de leur propre caméra interne. Dans tous les cas, le protocole d'acquisition des images s'est effectué en deux étapes.

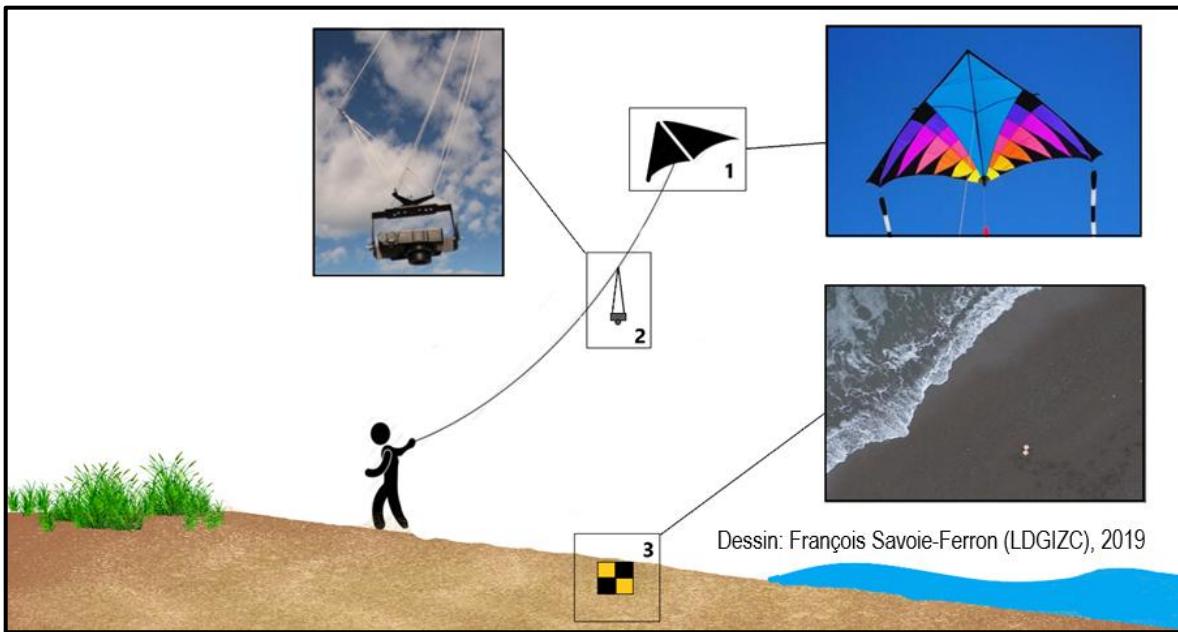


Figure 34. Représentation d'un levé photogrammétrique à l'aide d'un cerf-volant (1). Lors d'un relevé effectué à l'aide du drone, la caméra (2) est intégrée à l'engin aéroporté. Il n'y a donc pas de caméra externe comme pour les levés par cerf-volant et ballon dirigeable. Les cibles (3) sont utilisées comme points de contrôle.

Dans un premier temps, un réseau de points de contrôle a été mis en place (figure 34-3). Appelés GCPs (*Ground Control Points*), les points ont été disposés au sol de manière homogène sur l'ensemble du secteur de chacun des sites d'étude. Selon la taille des sites, l'utilisation de 10 à 25 cibles a été nécessaire. Les positions X, Y et Z des cibles ont été mesurées avec des GPS-différentiels selon la même méthode que celle présentée dans la section 3.3.1. Cependant, la durée et le nombre d'enregistrements des points ont été augmentés.

Dans un deuxième temps, des images ont été collectées lors des survols des sites (figure 34-2). Les images ont été collectées de manière à obtenir un fort recouvrement latéral ($> 70\%$) et frontal ($> 80\%$) entre elles. Cette couverture a été obtenue manuellement par le déplacement au sol de l'opérateur pour les images collectées à l'aide de cerfs-volants et de ballons d'hélium et automatiquement dans le cas des drones, grâce à la paramétrisation des survols. Les appareils photo ont été réglés en mode priorité à la vitesse d'obturation avec la

sélection d'une valeur adaptée aux conditions météorologiques. Ce mode permet d'éviter le flou induit par les mouvements de la caméra tout en laissant à la caméra la gestion des autres paramètres.

Le traitement des images par photogrammétrie SfM a ensuite été réalisé en laboratoire à l'aide d'un supercalculateur et du logiciel Agisoft Metashape Pro. L'algorithme de netteté de Metashape a été utilisé pour estimer la qualité des images. Toutes les images dont l'indice de netteté était inférieur à 0,6 ont été supprimées afin de conserver la qualité des reconstructions. Les images retenues ont été alignées avec les paramètres de qualité les plus élevés. L'alignement des images a d'abord été optimisé par l'ajustement progressif des paramètres externes de la caméra, en établissant le seuil du nombre minimum d'images par point d'appairage à 3 et en utilisant un filtre de réduction graduelle de l'erreur de reprojection. Les GCPs ont ensuite été positionnés sur les images. Cette action permet de géoréférencer les nuages de points et d'améliorer l'alignement des caméras et la géométrie des nuages de points. Ces derniers ont ensuite été densifiés pour obtenir une définition de ± 1000 points/m². Tout comme la méthode présentée pour l'acquisition des nuages de points Lidar, la végétation et les bâtiments ont été filtrés pour ne garder que la topographie de surface. Ces traitements ont permis d'exporter des modèles numériques de surface (MNS) d'une définition de 5 cm et une orthophotographie d'une définition de $\pm 1,5$ cm.

3.4 ANALYSES DES DONNÉES TOPOMORPHOLOGIQUES

L'analyse des données topomorphologiques comprend l'analyse des données vectorielles de profil de plage et des données surfaciques provenant de la photogrammétrie et du Lidar. Ces données ont été utilisées pour effectuer l'analyse de la variabilité pluriannuelle et saisonnière des sites d'étude.

3.4.1. Analyse des données vectorielles

Variabilité pluriannuelle des profils

L'analyse des profils se fait à partir de 134 lignes de profils répartis sur les 5 sites d'étude. Pour chacun des sites, deux profils témoins situés à 100 m de la recharge sont analysés, à l'exception de l'Anse-aux-Coques où les profils témoins sont situés à 50 m à l'ouest de la

recharge et 100 m à l'est et où 2 profils supplémentaires à l'est sont également analysés. Les profils témoins permettent d'évaluer l'évolution du même secteur sans la présence de recharge et l'influence de la recharge hors de la zone d'intervention.

Sur la plage de l'Anse-aux-Coques, l'analyse de la variation du profil de plage a été effectuée à partir des profils n°s 1, 5, 9, 13, 15 et 20. La position des profils est illustrée sur la figure 10. Les profils n°s 1 et 13 sont situés de part et d'autre de la recharge et les profils 15 et 20 sont situés plus loin à l'est de la recharge.

Sur le banc Larocque, l'analyse de la variation du profil de plage a été effectuée à partir des profils n°s 9, 13, 16 et 19. La position des profils est illustrée sur la figure 15. Les profils n°s 9 et 19 sont situés de part et d'autre de la recharge. Les profils n°s 13 et 16 ont été choisis, car ils représentent bien la variabilité de l'ensemble des profils de la recharge. Les profils sur la recharge sont tous situés dans un même environnement et évoluent sensiblement de la même façon.

Sur la plage Monaghan, l'analyse de la variation du profil de plage a été effectuée à partir des profils n°s 4, 6, 8 et 11. La position des profils est illustrée sur la figure 19. Les profils n°s 4 et 11 sont situés de part et d'autre de la recharge. Les profils n°s 6 et 8 ont été choisis, car ils représentent bien la variabilité de l'ensemble des profils de la recharge. Les profils sur la recharge sont tous situés dans un même environnement et évoluent sensiblement de la même façon.

Sur la plage de La Martinique, l'analyse de la variation du profil de plage a été effectuée à partir des profils n°s 16, 19, 21 et 25. La position des profils est illustrée sur la figure 24. Les profils n°s 16 et 25 sont situés de part et d'autre de la recharge. Les profils sur la recharge sont tous situés dans un même environnement et évoluent sensiblement de la même façon. Toutefois, les profils de ce site présentent une variabilité plus importante que ceux des sites précédents. Les profils n°s 19 et 21 ont été choisis, car ils représentent bien la variabilité de l'ensemble des profils de la recharge, le profil n° 19 étant plus variable sur l'estran et moins à la recharge et le profil n° 21 étant plus variable à la recharge, mais moins sur l'estran.

Sur la plage de la Pointe aux Loups, l'analyse de la variation du profil de plage a été effectuée à partir des profils n°s 4, 6, 9, 12, 14 et 19. La position des profils est illustrée sur la figure 26. Les profils n°s 4 et 19 sont situés de part et d'autre de la recharge. Un plus grand nombre de profils est analysé à la Pointe aux Loups à cause de la plus grande longueur de la recharge et de la variabilité plus importante des profils. Aussi, un plus grand nombre d'interventions différentes ont été effectuées sur ce site. Les profils n°s 6, 9 et 12 sont situés sur le secteur où la recharge a été remplacée par un enrochement. Celui-ci a été entamé en mai 2019 et complété en septembre 2019. Le profil n° 14 était initialement situé à 100 m de la recharge. Cependant, en juillet 2019, le secteur nord du site de la Pointe aux Loups sur lequel se situe le profil n° 14 a été rechargé.

Largeurs de plage au niveau moyen des mers (*NMM*)

Sur l'ensemble des sites d'étude les largeurs de plages au NMM ont été calculées pour la période 2018-2019. Pour ce faire, l'ensemble des profils ont été utilisés afin de générer une isoligne pour chaque date de levé au NMM correspondant à chaque site. Les distances entre les isolignes et la ligne de rivage la plus récente ont été calculées afin de visualiser les variations de largeurs de plages au NMM pendant la période d'étude. Ces niveaux sont indiqués sur les figures de profils des sections 4.1 à 4.5.

Chaque secteur a été divisé en sous-secteurs avec des caractéristiques d'évolution propres, afin de mieux expliquer l'influence des recharges de plages sur les résultats. Les enveloppes et moyennes de largeurs de plage et les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage sont exprimés en mètres.

3.4.2. Analyses des données surfaciques

L'analyse des données surfaciques a été réalisée en créant des différentiels de MNT. Ces différentiels ont ensuite été utilisés pour calculer le volume de sédiments érodés (érosion), de sédiments déposés (accrétion), de sédiments mobilisés (érosion + accrétion) et le bilan sédimentaire (érosion - accrétion). Les différentiels de MNT permettent également d'acquérir une représentation spatiale à haute résolution des variations d'élévations.

3.5 SUIVI GRANULOMÉTRIQUE

Une campagne d'échantillonnage a été réalisée pour chacun des sites, totalisant 209 échantillons. Les échantillons ont été récoltés sur chacun des profils de la recharge et à 100 m de part et d'autre de celle-ci. Six échantillons ont été récoltés sur chaque profil, un sur le haut de plage, deux sur le haut estran et trois sur le bas estran (figure 35). Pour l'Anse-aux-Coques le plan d'échantillonnage est différent, car il suit l'échantillonnage effectué dans le projet de *Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers* (Bernatchez, Cormier, et al., 2017). Pour ce projet entre 4 et 5 échantillons ont été récoltés par profil, généralement de 2 à 3 échantillons sur le haut estran et 1 à 2 échantillons sur le bas estran.

Les échantillons ont été séchés au four pendant 24 h à une température de 100 °C, puis tamisés avec une colonne de tamis à $\frac{1}{2}$ phi (ϕ) d'intervalle, selon le protocole défini par Folk (1980). La taille des tamis variait entre 4 ϕ (63 mm) et -6 ϕ (0,063 mm). La masse obtenue pour chaque fraction granulométrique a été compilée dans le logiciel Microsoft Excel. Ensuite, le logiciel R a été utilisé afin de générer des statistiques supplémentaires et de produire les figures.

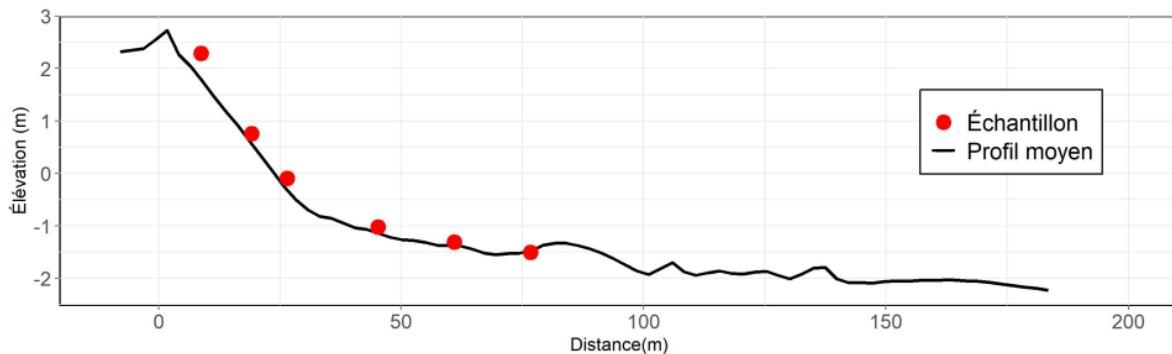


Figure 35. Exemple de position des échantillons le long d'un profil (Profil n° 14, Banc Larocque)

Le diamètre médian (D_{50}) de chaque échantillon et les différentes classes granulométriques sont présentés afin de caractériser les sites et la variabilité de la taille des grains le long de la côte. Les classes granulométriques correspondent à l'échelle de Udden-Wentworth (Udden, 1914; Wentworth, 1922).

3.6 SUIVI DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES À PARTIR D'UNE CAMÉRA

Les caméras utilisées pour le suivi de la plage de L'Anse-aux-Coques sont la Reconyx™ HYPERFIRE HF2X et Spypoint LIVE-3G (figure 36). La caméra est configurée pour prendre une photo toutes les 15 minutes, ce qui permet d'avoir une bonne couverture temporelle des différents processus côtiers. L'analyse des images se fait à l'aide du logiciel *VirtualDub* qui permet de faire des vidéos accélérées avec les photos de la caméra. Ainsi, il est possible de visualiser un grand nombre de photos rapidement et par la suite, identifier les processus et événements d'intérêts dans le temps.

Les photos Reconyx ont été analysés en identifiant les événements où les niveaux d'eau atteignaient les ouvrages de protection.



Figure 36. Exemple d'installation d'une caméra de suivi

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4.1 ANSE-AUX-COQUES

4.1.1. Évolution historique (1963-2015)

La figure 37 présente l'évolution historique du littoral de la cellule hydrosédimentaire de l'Anse-aux-Coques pour la période 1963-2015, soit l'ensemble de la couverture des photos aériennes pour ce site d'étude. Le taux d'évolution y est représenté de l'ouest vers l'est. Les infrastructures de protection étant fortement présentes sur les côtes de ce site d'étude, de nombreux secteurs se retrouvent sans calcul d'évolution valide.

Le taux d'évolution pour la période 1963-2015 est positif, avec une moyenne de déplacement de la ligne de rivage de 0,06 m par année (tableau 3). Pour la période post-recharge (2012-2015), la vitesse de progradation de la ligne de rivage est en augmentation par rapport à la période pré-recharge (1963-2012) qui était très stable. La recharge a lieu en 2014. Il s'agit toutefois d'une tendance à court terme, ne couvrant que trois ans d'évolution dont seulement un an avec recharge. Les taux d'évolution de l'ensemble de la cellule n'ont pu être comparés au taux d'évolution du secteur de la recharge, car celui-ci est complètement artificialisé (figure 37).

Tableau 3. Taux d'évolution de la cellule hydrosédimentaire de l'Anse-aux-Coques (m/an).

	1963-2012	2012-2015	1963-2015
Cellule hydrosédimentaire	0,02	1,07	0,06

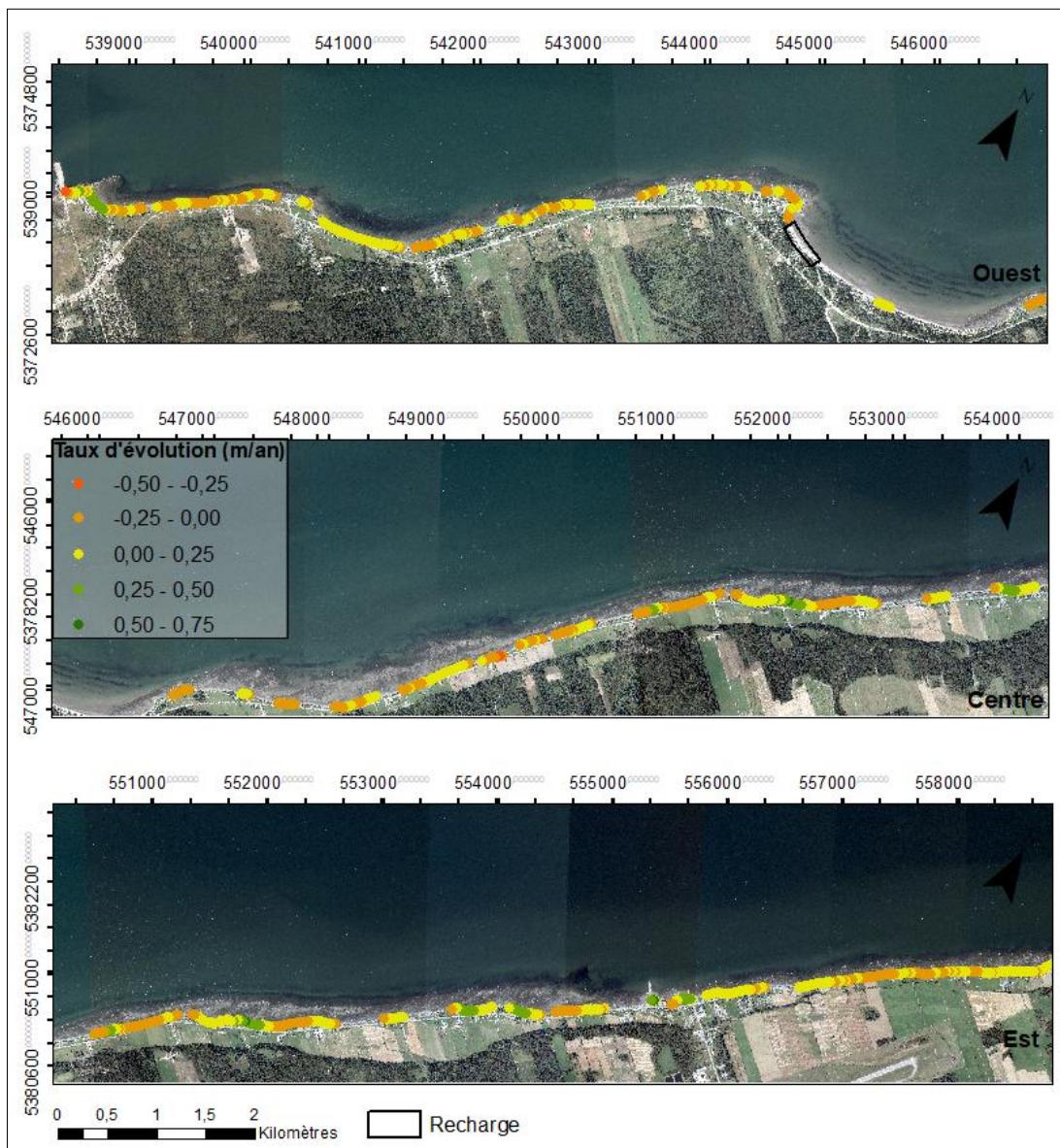


Figure 37. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de l'Anse-aux-Coques

La figure 38 illustre la position de la ligne de rivage entre 1963 et 2015, pour le secteur de la recharge de plage. La recharge est délimitée par les lignes pointillées perpendiculaires aux lignes de rivages. La zone en gris représente l'enveloppe de mobilité de la ligne de rivage. Les années 1963 et 1976 correspondent aux années sans artificialité. L'évolution sans artificialité montre une avancée considérable de la ligne de rivage entre 1963 et 1976. En 1992 des travaux d'aménagement d'une promenade et d'un muret ont été effectuées

(GENIVAR, 2012). Ainsi, pour les années 1993, 2009 et 2012, la ligne de rivage correspond à la position du muret le long de la promenade. Le muret a été mis en place en 1992, probablement à la suite d'un recul important, sa position étant plusieurs mètres vers les terres par rapport à la ligne de rivage de 1976. En 2015, un an après la recharge, la ligne de rivage avance de près de 10 m. Cette avancée correspond à la mise en place de la recharge, laquelle devient l'indicateur de la ligne de rivage entre les transects 792 à 811.

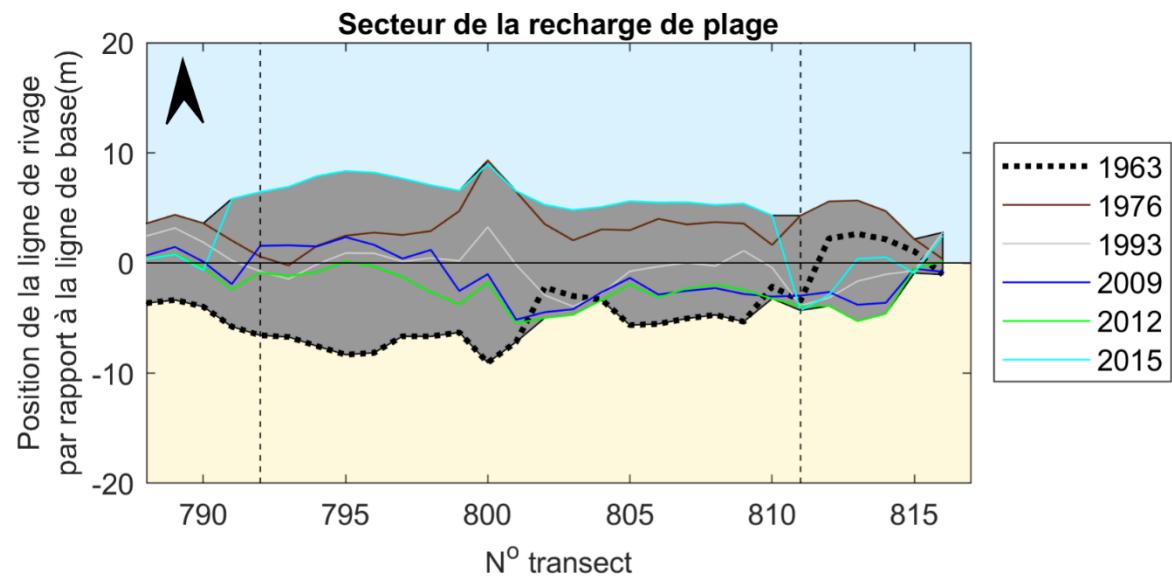


Figure 38. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de l’Anse-aux-Coques

4.1.2. Caractérisations granulométriques

Sur le site de l’Anse-aux-Coques, 48 échantillons ont été récoltés le long de 12 profils, sur le haut et le bas estran. Les données présentées proviennent de la campagne d’échantillonnage de 2019. Les résultats sont exprimés en phi (ϕ) vu la grande variabilité dans la taille des sédiments entre les sites. L’analyse des caractéristiques granulométriques s’effectue dans un premier temps en décrivant les caractéristiques générales du site, puis en divisant le secteur de la plage en deux unités morphologiques, soit le haut estran et le bas estran.

Les résultats de 2019 indiquent que le site d’étude possède un D_{50} moyen de 1,59 ϕ (0,33 mm), ce qui correspond à la classe du sable moyen. Cependant, comme il est possible

d'observer sur la figure 39 les classes granulométriques principales sont celles du sable fin (49,61%), du sable moyen (12,56%) et des cailloux (8,55%). Ces classes indiquent une plage à la granulométrie assez homogène, étant principalement constituée de sable.

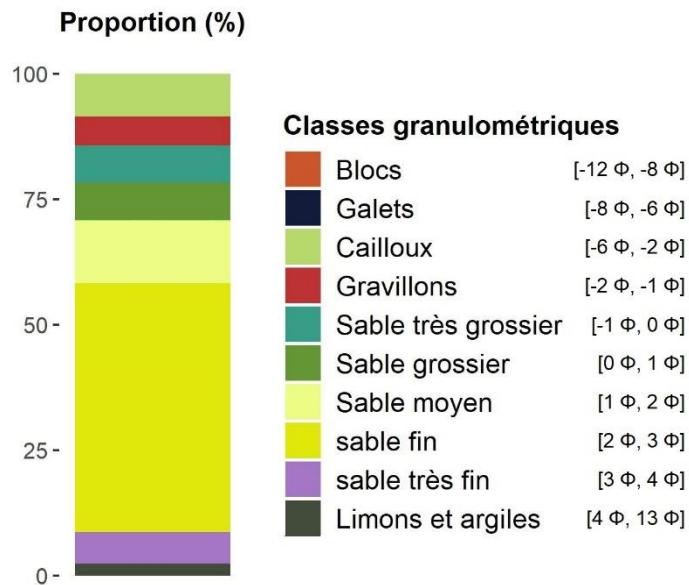


Figure 39. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude en 2019 (Anse-aux-Coques)

Les échantillons du haut estran de 2019 affichent un D_{50} moyen de $0,72 \phi$ (0,61 mm), ce qui correspond à la classe du sable grossier. Sur la figure 40b la proportion des différentes classes indique que le sable fin (32,77%), le sable moyen (18,97%) et les cailloux (13,57%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire à l'exception des profils n° 1, profil n°8 et n°12 (figure 40a). Le profil n°1 affiche une distribution bimodale avec un mode vers $2,5 \phi$ et un autre mode vers $-0,5 \phi$. Le profil n° 8 affiche une distribution bimodale avec un mode vers $2,5 \phi$ et un autre mode vers $-3,5 \phi$. Le profil n° 12 affiche quant à lui une distribution bimodale avec une concentration des sédiments vers $2,5 \phi$ et -5ϕ . Tous les autres profils affichent une distribution unimodale avec un mode vers $2,5 \phi$, ce qui correspond à la classe du sable fin. Ainsi, les sédiments sur le haut estran sont plutôt fins et homogènes avec une certaine portion de sédiments plus grossiers.

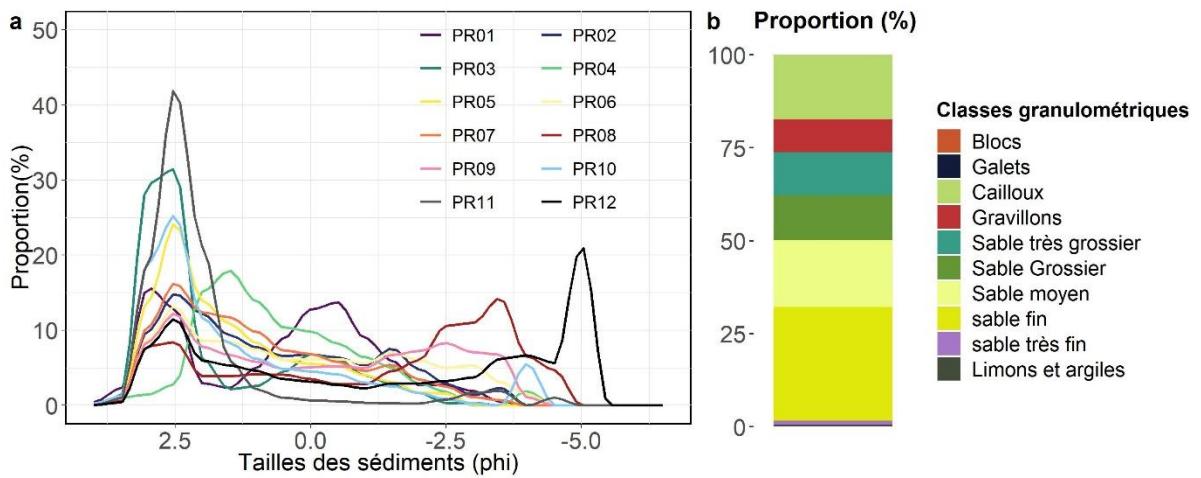


Figure 40. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran de la plage de l'Anse-aux-Coques

Les échantillons du bas estran affichent un D_{50} moyen de $2,46 \phi$ ($0,18 \text{ mm}$), ce qui correspond à la classe du sable fin. Sur la Figure 41b la proportion des différentes classes indique que les sables fins (66,46%) et sables très fins (11,41%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire à l'exception des profils n° 1 et n°11 (figure 41a). Le profil n°1 affiche une distribution bimodale avec un mode vers $3,5 \phi$ et un autre mode vers $-0,5 \phi$. Le profil n° 11 affiche quant à lui une distribution bimodale avec un premier mode vers 3ϕ et un deuxième mode vers -4ϕ . Tous les autres profils affichent une distribution unimodale avec un mode vers 3ϕ , ce qui correspond à la classe du sable fin. Ainsi, les sédiments sur le bas estran sont plutôt fins et homogènes avec peu de sédiments plus grossiers.

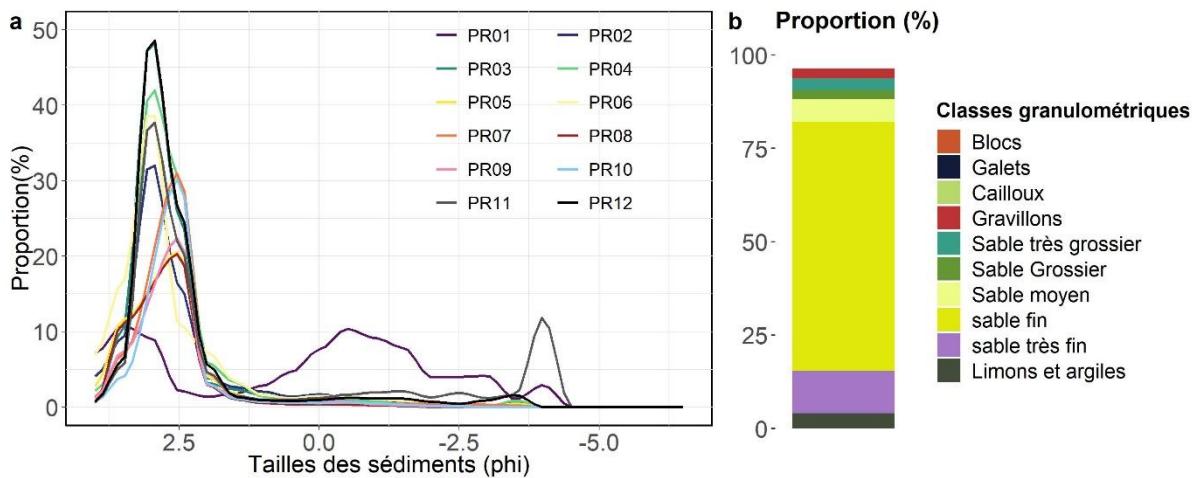


Figure 41. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran de la plage de l'Anse-aux-Coques

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des échantillons est présentée avec les profils de plage dans la section suivante.

4.1.3. Évolution du secteur de la recharge de plage de septembre 2012 à décembre 2019

Profils de plage

L'analyse des profils de l'Anse-aux-Coques s'effectue sur les profils n°s 1, 5, 9, 13, 15 et 21. Les profils 1 à 13 constituent le secteur de la recharge, alors que les profils 15 et 21 sont situées à l'est de la recharge. Le "secteur de la recharge" inclue les profils sur la recharge et les premiers profils de part et d'autres de celle-ci. Ces profils ont également été extraits à partir de MNE, leur fréquence d'acquisition est donc plus faible. La recharge ayant eu lieu en octobre 2014, le levé de septembre 2012 représente l'état pré-recharge et le levé d'octobre 2014 l'état initial de la recharge.

Sur le profil n° 1 (figure 42), situé à l'ouest de la recharge, on peut observer la présence d'une barre à ± 40 m de la ligne de rivage le 21 septembre 2012. Celui-ci migre légèrement vers la côte en date du 23 octobre 2014. On peut également observer un léger exhaussement du haut estran entre septembre 2012 et octobre 2014. Entre 2014 et 2015, le haut estran reste plutôt stable, alors que le bas estran s'abaisse avec la disparition de la barre sableuse. Le profil reste ensuite assez stable, à l'exception d'un léger abaissement du bas estran, jusqu'au 13 juin

2017. Entre juin 2017 et mai 2019, il y a un léger exhaussement du bas estran et formation de la barre sableuse à \pm 100 m de la ligne de rivage. Ce dernier migre vers la côte entre le 18 mai et le 7 août 2019 avant de se stabiliser jusqu'au 11 décembre 2019 (figure 42). La plus grande enveloppe de mobilité du profil est causée par la formation et la destruction de la barre sableuse (figure 43). Il est également possible d'observer un abaissement du profil sur le bas estran, près de la flexure et vers 150 m de la ligne de rivage, entre le 23 octobre 2014 et le 13 juin 2017 (figure 42). Une légère mobilité est visible sur le haut estran, correspondant à un exhaussement entre septembre 2012 et octobre 2014, un abaissement du profil entre octobre 2014 et juin 2017, puis un exhaussement entre juin 2017 et le 5 mai 2019 (figure 42).

Le NMM atteint la barre sableuse à \pm 100 m de la ligne de rivage à partir de 2017. Ensuite le niveau atteint également le bas estran près de la flexure entre 50 m et 75 m. Le PMSGM atteint la partie supérieure du haut estran. Dans l'ensemble, le profil présente peu de mobilité (figure 43). Aussi, la flexure se situe vers 30 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage d'environ 30 m. L'écart-type du profil affiche une variabilité plus importante sur le bas estran, causée par la migration de la barre sableuse (figure 42). L'écart-type ne couvre pas l'entièreté de l'enveloppe de variabilité, ce qui indique que l'ensemble des profils ne se situent pas dans une distribution normale des données. Cet écart est principalement dû à l'exhaussement du profil entre 2012 et 2014 et à la mobilité de la barre sableuse qui crée des variations plus importantes sur le bas estran.

Finalement la taille médiane des sédiments est plus grossière sur le haut estran et plus fine sur le bas estran (figure 43). Le haut estran est constitué de sable moyen, la flexure de gravillons et le bas estran de sables fins et de limons.

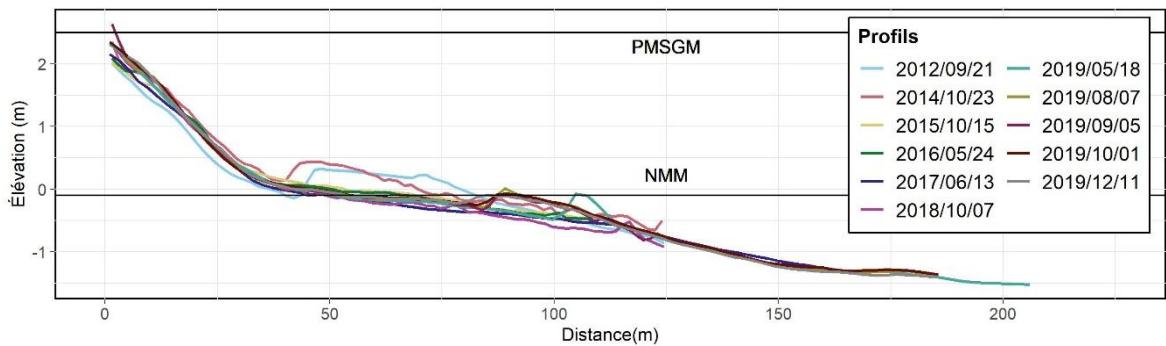


Figure 42. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 1 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

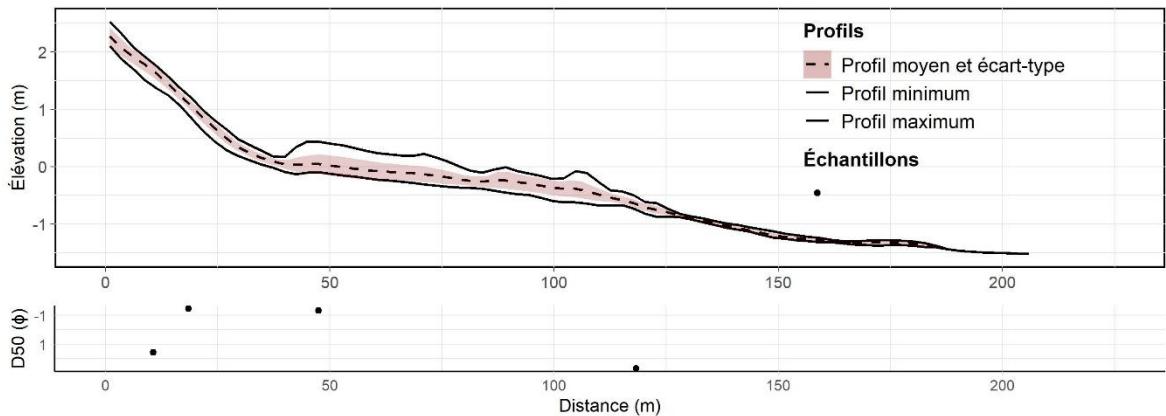


Figure 43. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 1 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 5, est situé sur la recharge. Un exhaussement important de la partie supérieure du haut estran est visible entre le 21 septembre 2012 et le 23 octobre 2014 (figure 44). Cet exhaussement correspond à la mise en place de la recharge. Toutefois, pour cette même période, le profil s'abaisse sur le haut estran près de la flexure. Entre octobre 2014 et juin 2017, la partie supérieure du haut estran s'abaisse, alors que le haut estran s'exhausse près de la flexure. La flexure passe alors de ± 40 m à ± 55 m. À noter que la plage a fait l'objet d'une recharge d'entretien en 2017. Entre le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019, le profil s'abaisse sur la partie inférieure du haut estran. Pour cette même période, la flexure recule jusqu'à

± 40 m de la ligne de rivage, réduisant la largeur de la plage de 15 m. L'ensemble du profil reste ensuite constant jusqu'au 11 décembre 2019. La flexure du profil moyen se situe vers 40 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage moyenne d'environ 40 m. Le profil est très stable sur le bas estran, mais le haut estran affiche une enveloppe de mobilité de $\pm 0,5$ m à 2 m (figure 45).

Le NMM atteint le haut estran vers la flexure et le PMSGM la partie supérieure du haut estran (figure 44). L'écart-type du profil affiche deux pics de variabilité, le premier à la flexure et le deuxième sur la partie supérieure du haut estran (figure 44). L'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur l'ensemble du bas estran, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données sur le bas estran. Toutefois, l'enveloppe du haut estran se situe à plus d'un écart-type de la moyenne. Cet écart est attribuable à la mise en place de la recharge en 2014, qui crée alors un soulèvement irrégulier du haut estran, et aux variations topographiques à la flexure.

Finalement la taille médiane des sédiments est plus grossière sur le haut estran et plus fine sur le bas estran (figure 45). Le haut estran est constitué de sable moyen et de cailloux plus près de la flexure et le bas estran, de sables fins.

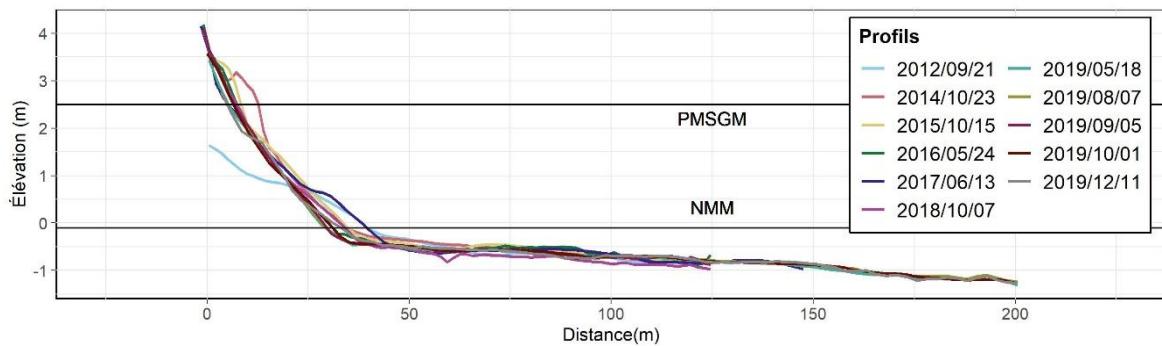


Figure 44. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 5 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

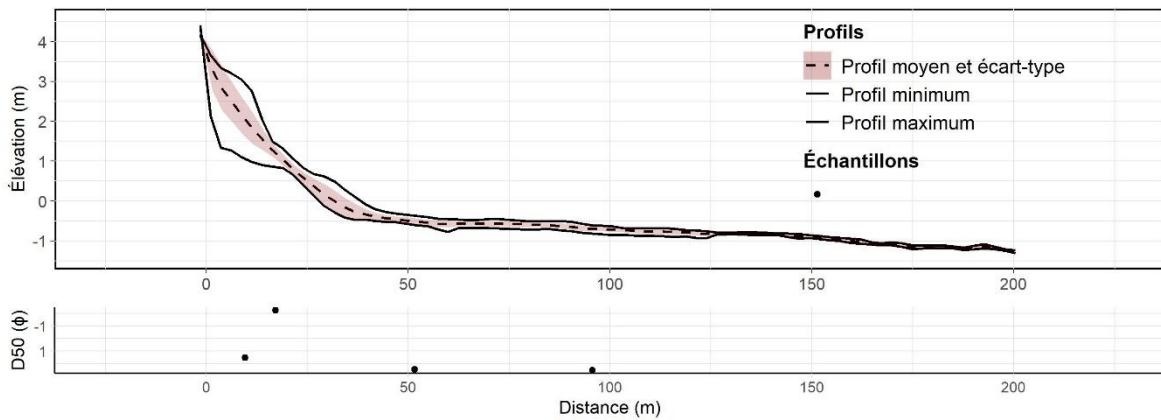


Figure 45. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 5 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Sur le profil n° 9, situé sur la recharge, un exhaussement important de la partie supérieure du haut estran est visible entre le 21 septembre 2012 et le 23 octobre 2014 (figure 46). Cet exhaussement correspond à la mise en place de la recharge en 2014. Pour cette même période, la partie inférieure du haut estran s’abaisse. Entre octobre 2014 et mai 2016, il y a abaissement de la partie supérieure du haut estran. Il y a ensuite exhaussement à la flexure en juin 2017. À noter que la plage a fait l’objet d’une recharge d’entretien en 2017. Entre juin 2017 et mai 2019, le profil s’abaisse sur le haut estran près de la flexure, puis se soulève près de la flexure jusqu’au 11 décembre 2019. Sur le bas estran, il y a migration des barres et de la flexure vers la côte entre le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019 (figure 47). La position de la flexure se déplace de ± 55 m à ± 40 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une réduction de la largeur de plage de 15 m. La flexure du profil moyen se situe vers 40 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage moyenne d’environ 40 m. En résulte une enveloppe de mobilité de $\pm 0,5$ à 1 m sur le haut estran (figure 47). Le bas estran est plutôt stable.

Le NMM atteint le haut estran vers la flexure et le PMSGM la partie supérieure du haut estran (figure 46). L’écart-type du profil affiche deux pics de variabilité, le premier à la flexure et le deuxième sur la partie supérieure du haut estran (figure 44). L’écart-type couvre

l'enveloppe de variabilité sur la plupart du bas estran, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données sur le bas estran. Toutefois, l'enveloppe de la partie supérieure du haut estran et la flexure se situent à plus d'un écart-type de la moyenne. Cet écart est aussi attribuable à la mise en place de la recharge en 2014 et à l'exhaussement près de la flexure en 2017.

Finalement la taille médiane des sédiments est plus grossière sur le haut estran et plus fine sur le bas estran (figure 47). Le haut estran est constitué de gravillons et de cailloux plus près de la flexure. Le bas estran est constitué de sables fins.

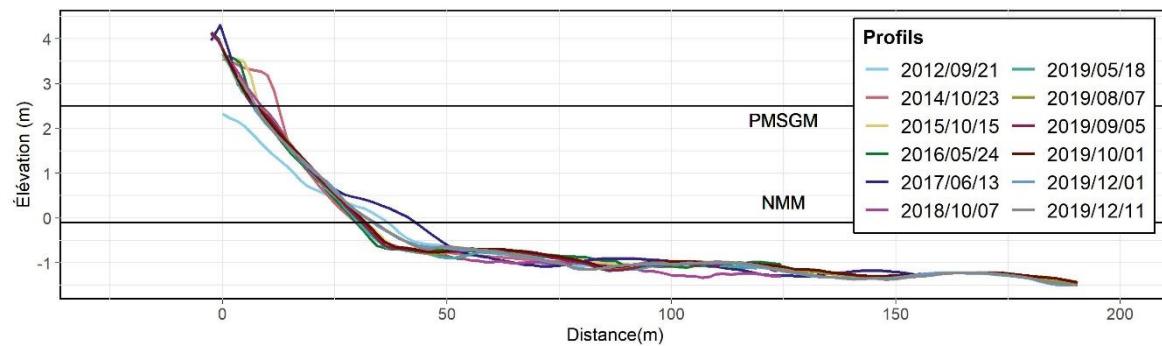


Figure 46. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

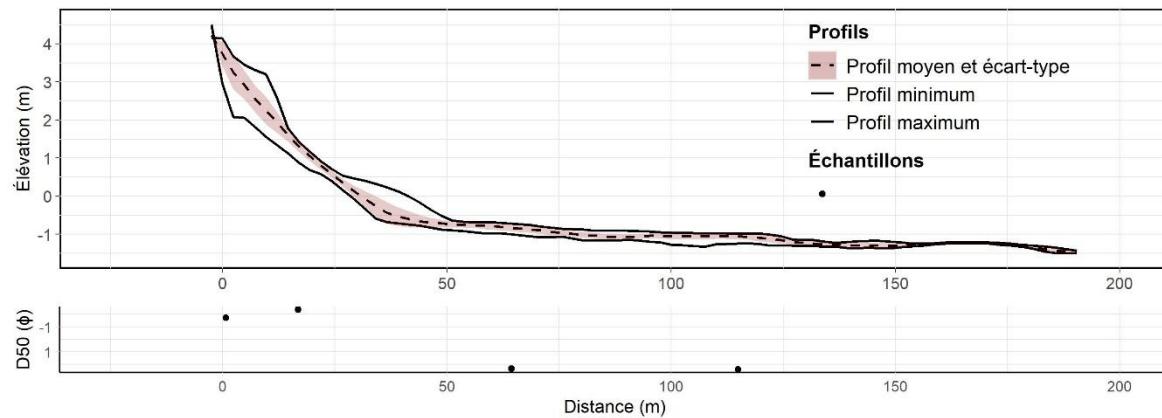


Figure 47. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 13, situé tout juste à l'est de la recharge, est plutôt stable entre septembre 2012 et juin 2017, puis affiche un érosion sur le haut estran, particulièrement près de la flexure, entre le 13 juin 2017 et le 1^{er} décembre 2019. Par la suite, le profil s'abaisse légèrement jusqu'au 11 décembre 2019 (figure 48). Pour cette même période, la position de la flexure passe d'environ 35 m de la ligne de rivage à 50 m, pour une augmentation de la largeur de la plage de 15 m. La flexure du profil moyen se situe vers 50 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage moyenne d'environ 50 m. C'est à cet endroit sur le profil que l'enveloppe de mobilité est la plus importante, atteignant $\pm 0,5$ m (figure 49). Le reste du profil est très stable.

Le NMM atteint la partie inférieure du haut estran et le PMSGM atteint la partie supérieure du haut estran, près du muret. L'écart-type du profil affiche un pic de variabilité à la flexure (figure 49). L'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données. Par contre, l'enveloppe près de la flexure se situe à plus d'un écart-type de la moyenne. Ceci est attribuable aux variations plus importantes près de la flexure, qui atteignent près de 2 m.

Finalement la taille médiane des sédiments est plus grossière sur le haut estran et plus fine sur le bas estran (figure 49). Le haut estran est constitué de sable très grossier et de gravillons et le bas estran, de sables fins.

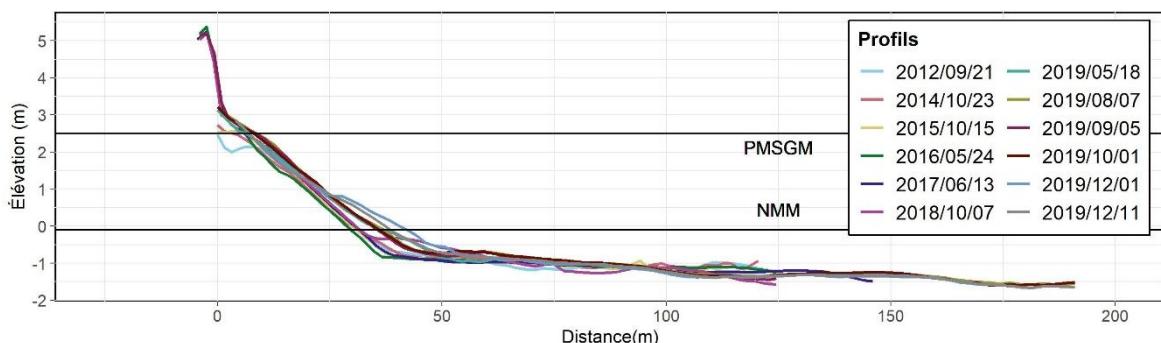


Figure 48. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 13 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

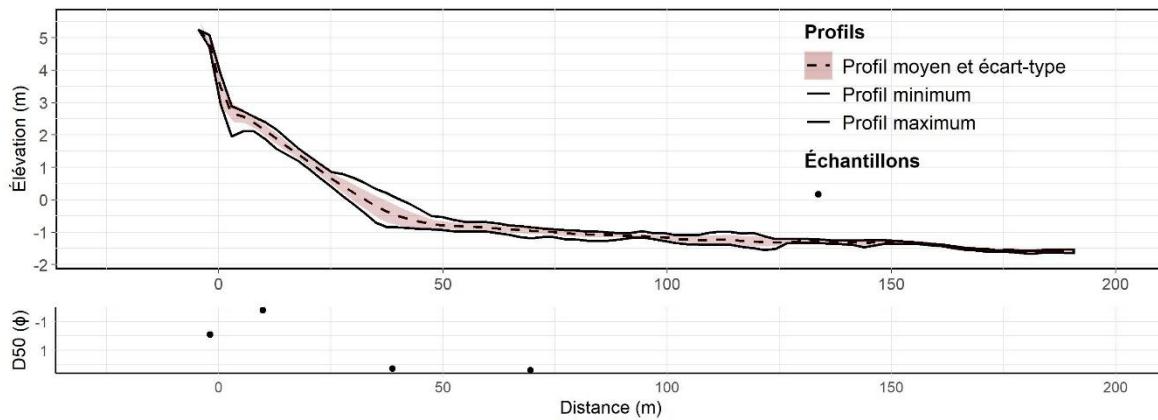


Figure 49. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 13 à l’Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 15, situé 300 m à l'est de la recharge, est plutôt stable entre septembre 2012 et octobre 2014, à l'exception de la partie supérieure du haut estran qui se soulève de $\pm 1\text{m}$. Le profil affiche ensuite un abaissement sur le bas estran, particulièrement près de la flexure, en date du 15 octobre 2015. Par la suite, le profil reste stable jusqu'en mai 2016, puis se rehausse graduellement jusqu'en septembre 2019 (figure 50). Pour cette même période, la position de la flexure reste plutôt stable, à $\pm 40\text{ m}$ de la ligne de rivage, à l'exception du profil de septembre 2019 où la flexure se situe à $\pm 30\text{ m}$ de la ligne de rivage. La flexure du profil moyen se situe tout de même vers 40 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage moyenne d'environ 40 m. C'est à cet endroit sur le profil que l'enveloppe de mobilité est la plus importante, atteignant $\pm 1\text{ m}$ (figure 51). Le reste du profil est très stable.

Le NMM atteint la partie inférieure du haut estran et le PMSGM atteint la partie supérieure du haut estran, près du muret en haut de plage. L'écart-type du profil affiche deux pics de variabilité, à la flexure et à la base de l'enrochement (figure 51). L'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données. Toutefois, l'enveloppe près de la flexure et à la base du muret se situe à plus d'un écart-type de la moyenne, ce qui est

attribuable aux variations plus importantes à ces endroits. Ce profil ne contient pas d'analyse granulométrique.

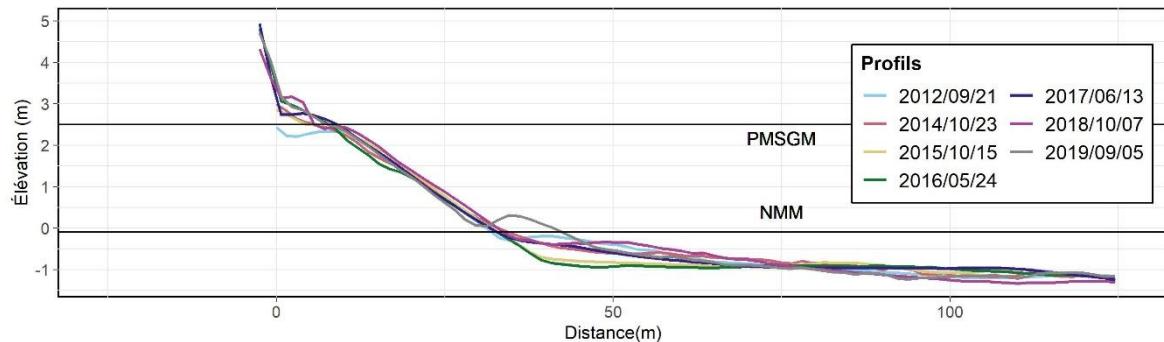


Figure 50. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 15 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

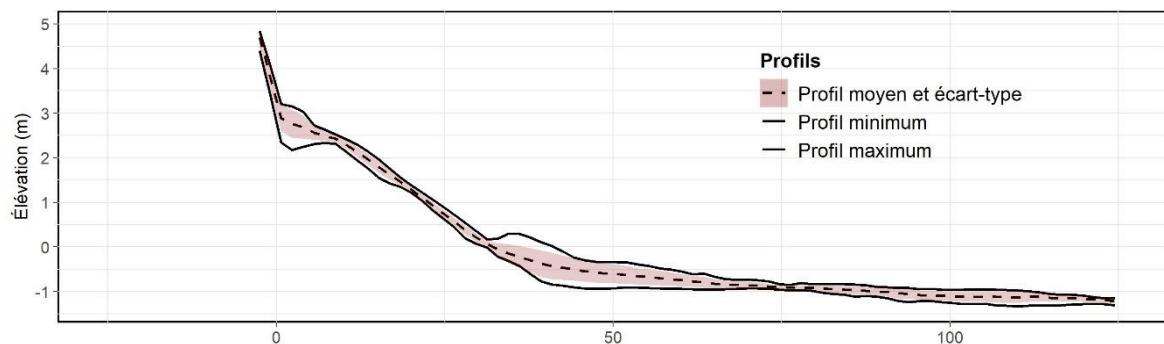


Figure 51. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 15 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 21, situé 1,4 km à l'est de la recharge, est plutôt stable entre septembre 2012 et octobre 2015. Le profil affiche ensuite un exhaussement sur le bas estran, particulièrement près de la flexure, en date du 24 mai 2015. Par la suite, le profil s'abaisse en juin 2017, puis reste plutôt stable jusqu'en septembre 2019 (figure 52). Pour cette même période, la position de la flexure reste plutôt stable, à ± 30 m de la ligne de rivage. La flexure du profil moyen se situe également vers 30 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage moyenne d'environ 30 m. C'est à cet endroit sur le profil que l'enveloppe de mobilité est la plus importante, atteignant $\pm 0,75$ m (figure 53). Le reste du profil est très stable.

Le NMM atteint la partie inférieure du haut estran et le PMSGM atteint directement l'enrochement situé en haut de plage. L'écart-type du profil affiche un pic de variabilité à la flexure (figure 53). L'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données. Cependant, l'enveloppe près de la flexure affiche une enveloppe de variabilité supérieure à un écart-type, ce qui est attribuable au levé de mai 2016 qui affiche un profil plus haut que tous les autres. Ce profil ne contient pas d'analyse granulométrique.

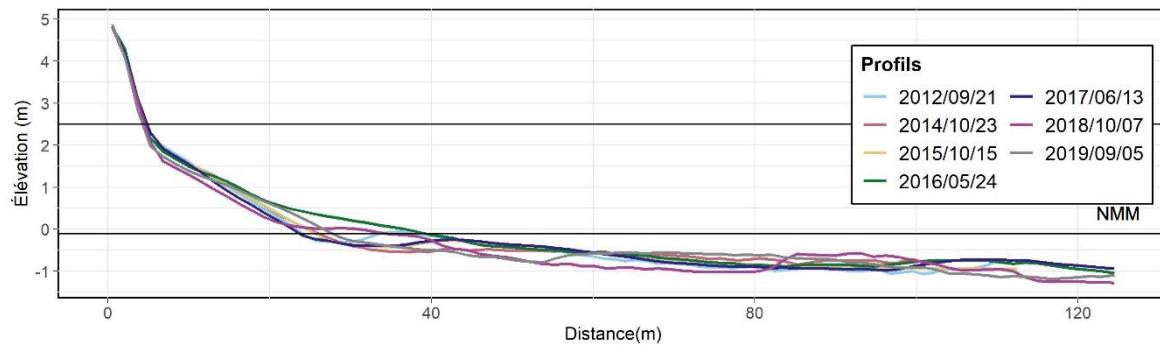


Figure 52. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 21 du 21 septembre 2012 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

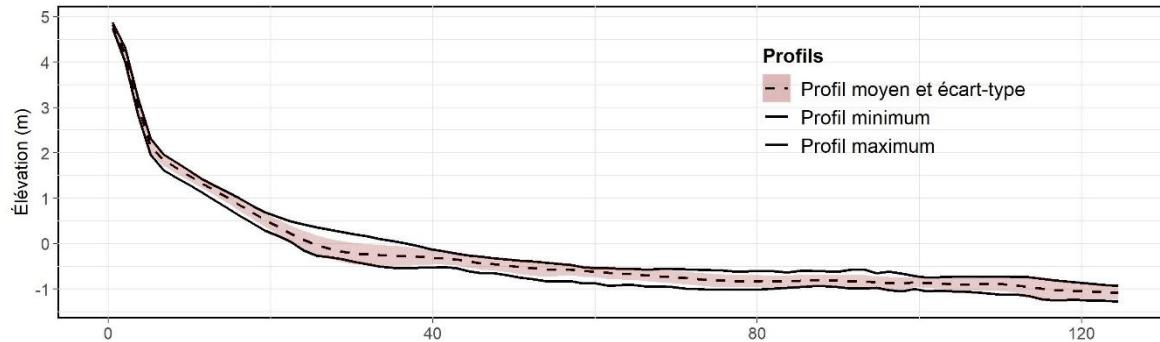


Figure 53. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 21 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Largeurs de plage

L'évolution de l'isoligne du NMM, ainsi que l'évolution de la largeur de plages au NMM sont étudiées. Pour ce faire, les distances entre chaque isoligne du NMM et la ligne de rivage sont calculées. Afin d'analyser les variations des largeurs de plages, le secteur de l'Anse-

aux-Coques a été subdivisé en deux sous-secteurs. Le secteur 1 constitue la partie ouest de l'Anse-aux-Coques et consiste en l'évolution des profils n°s 1 à 13, soit le secteur de la recharge. Le secteur 2 constitue la partie est de l'Anse-aux-Coques et consiste en l'évolution des profils n°s 13 à 22, soit le secteur témoin (figure 54). Sur la figure 54, la ligne pointillée indique la délimitation est du secteur de la recharge. La distance par rapport à la côte est calculée à partir de la ligne de rivage.

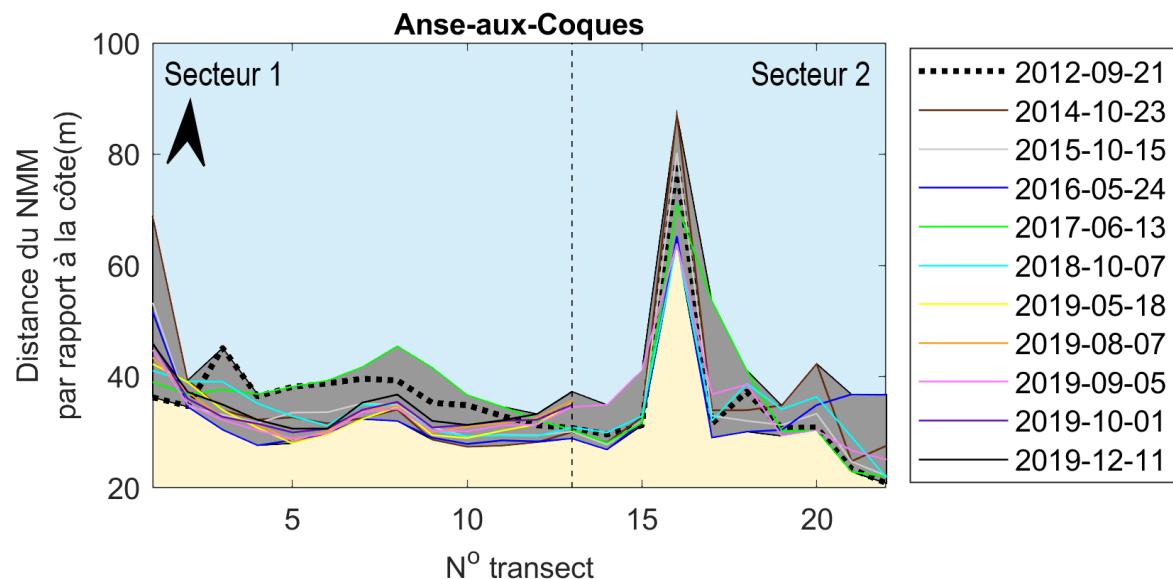


Figure 54. Distances du niveau moyen des mers par rapport à la ligne de rivage à l'Anse-aux-Coques

Le secteur 1 indique des déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage allant de -32,55 m à -14,80 m entre le 15 septembre 2012 et le 11 décembre 2019. Ces déplacements sont calculés pour chaque isoligne du NMM par rapport au niveau NMM de la période de référence pré-recharge, soit septembre 2012. La moyenne de ces déplacements est de -2,61 m, ce qui indique une légère diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 55, on aperçoit un déplacement négatif constant entre le 15 septembre 2012 et le 24 mai 2016. L'isoligne du NMM se déplace ensuite vers le large, pour ensuite se déplacer progressivement vers la côte jusqu'en décembre 2019. À noter que le site a fait l'objet d'une recharge d'entretien en 2017. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM pour l'ensemble de la période d'étude est négatif pour tous les profils à

l'exception des profils n°s 12 et 13. Pour ce même secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 27,33 m à 68,80 m. La moyenne de ces largeurs est de 34,04 m.

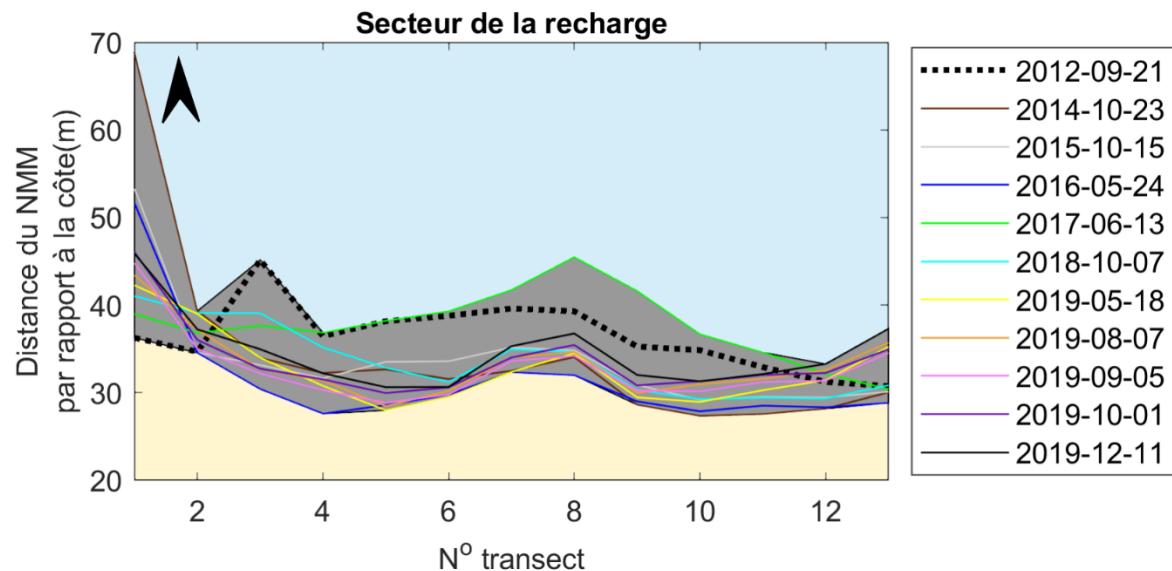


Figure 55. Distances du niveau moyen des mers par rapport à la ligne de rivage pour le secteur 1 de l'Anse-aux-Coques

Le secteur 2 indique des déplacements de -14,80 m à 22,14 m entre le 15 septembre 2012 et le 11 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de 1,43 m, ce qui indique une augmentation de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 56, on aperçoit de façon générale un déplacement positif entre septembre 2012 et octobre 2014, puis un déplacement négatif jusqu'au 5 septembre 2019. Pour ce secteur, les levés topographiques prennent fin en septembre 2019. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est positif pour les profils n°s 14, 15, 17, 18, 21 et 22, puis négatif pour les profils 16, 19 et 20. Pour ce secteur, les largeurs de plages au NMM varient entre 20,79 m et 87,40 m. La moyenne de ces largeurs est de 36,09 m. La plage beaucoup plus large au profil n° 16 est due à la présence du delta d'un cours d'eau.

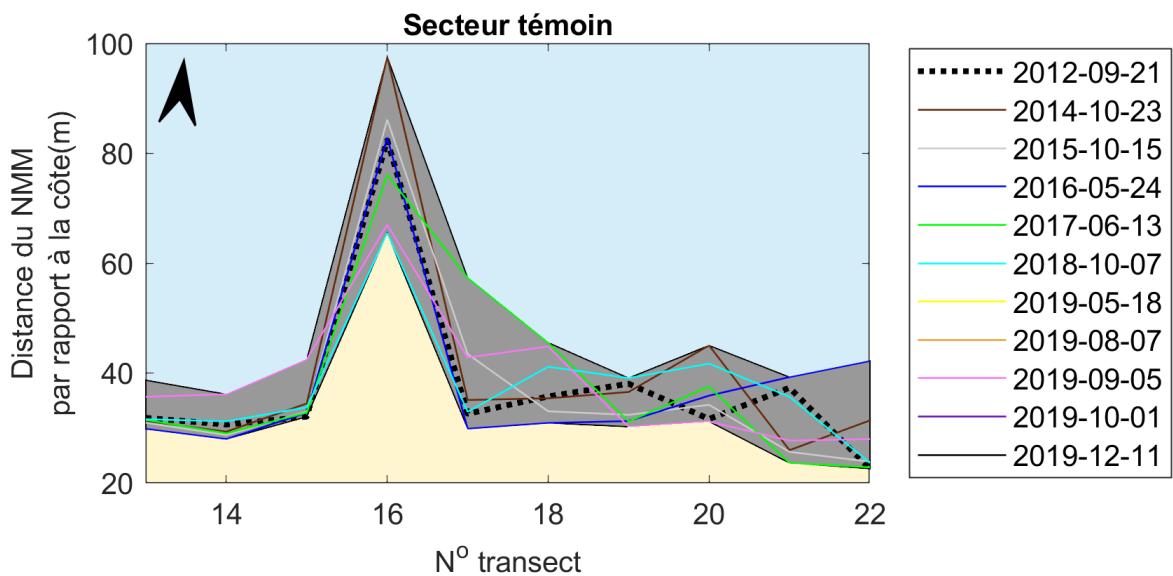


Figure 56. Distances du niveau moyen des mers par rapport à la ligne de rivage pour le secteur 2 de l'Anse-aux-Coques

Bilans sédimentaires

Les changements morphologiques mesurés à l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019 montrent l'alternance de périodes excédentaires, déficitaires et équilibrées sur le plan des dynamiques sédimentaires. Vu la grandeur du site d'étude, les résultats des différentiels d'élévation seront présentés sous forme de figure synthèse (figure 57) et individuellement pour chacune des périodes étudiées (figures 59 – 64).

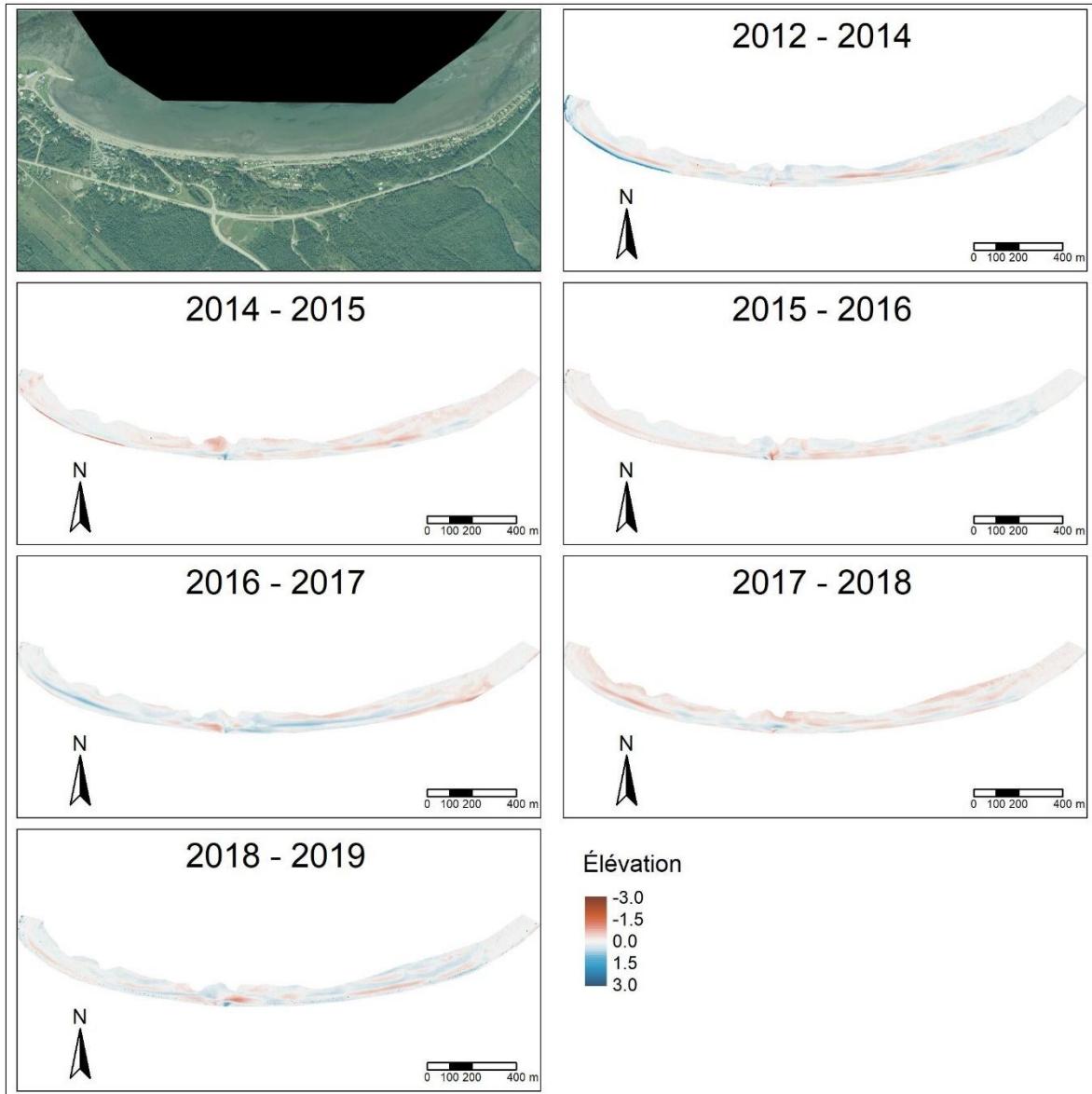


Figure 57. Différentiels d’élévations sur le secteur de la recharge de l’Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019.

Les périodes comprises entre septembre 2012 et octobre 2014, entre juin 2016 et novembre 2017 et entre octobre 2018 et septembre 2019 indiquent des bilans sédimentaires positifs (figure 58). Les périodes comprises entre octobre 2014 et octobre 2015 et entre novembre 2017 et octobre 2018 indiquent des bilans sédimentaires négatifs. La période comprise entre octobre 2015 et mai 2016 affiche quant à elle un bilan sédimentaire près de l’équilibre.

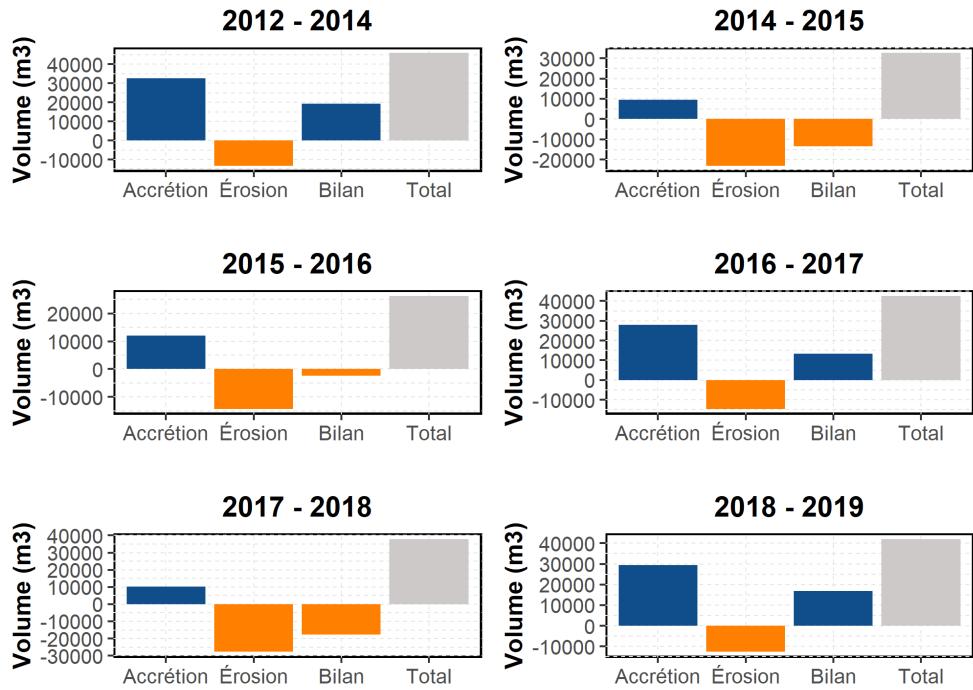


Figure 58. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019.

Le bilan de la période comprise entre septembre 2012 et octobre 2014 présente un excédent sédimentaire de 19 203 m³ (sur un total de 45 911 m³ de sédiment mobilisés). Il s'explique par les travaux de rechargement en sédiments à hauteur de 11 200 m³ qui ont été effectués en octobre 2014 et par une accumulation naturelle à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire. Le relevé de la plage avait été effectué au moment des travaux pour pouvoir bénéficier d'un état zéro du secteur rechargé. La figure 59 indique une importante accumulation sur la partie supérieure de la plage, à l'ouest du secteur, qui correspond à la mise en place de la recharge. On peut également observer un abaissement un peu plus bas sur la plage sur le même secteur. Le reste de la plage est généralement légèrement en accumulation, avec certains endroits localisés en déficit sédimentaire.

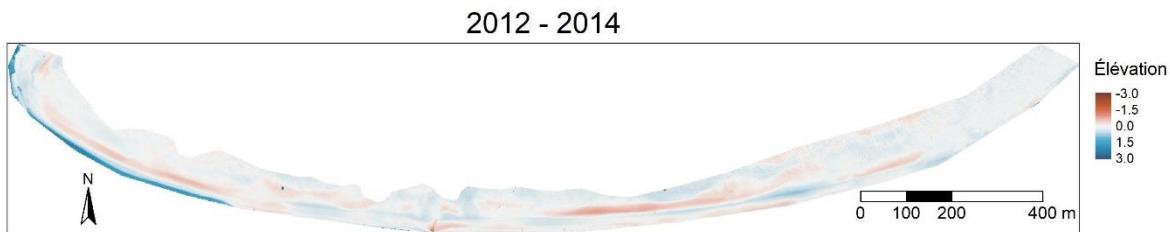


Figure 59. Différentiel d’élévation sur le secteur de la recharge de l’Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et octobre 2014.

La période consécutive aux travaux de la recharge initiale a été marquée par un important déficit sédimentaire (figure 58). Entre octobre 2014 et octobre 2015, le secteur à l’étude a présenté un bilan déficitaire de $\pm 13\ 495\text{ m}^3$ (sur un total de $\pm 32\ 609\text{ m}^3$ de sédiment mobilisés). Pour cette période, une recharge $\pm 2\ 050\text{ m}^3$ a aussi été effectuée. La figure 60, montre qu’à l’ouest l’abaissement le plus important provient de l’érosion des sédiments apportés lors de la recharge d’octobre 2014. Toutefois, l’est de la zone d’étude est aussi généralement en léger déficit sédimentaire.

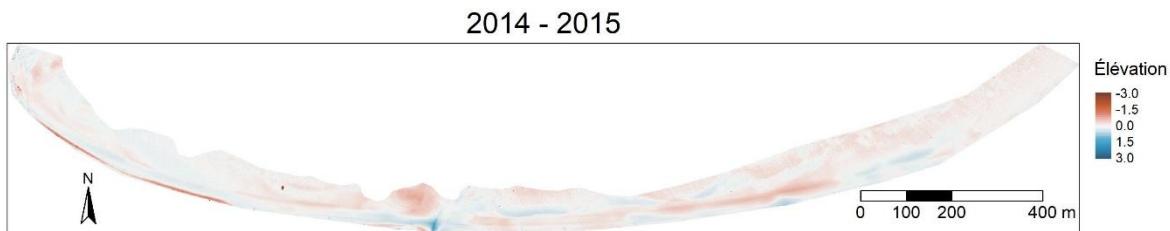


Figure 60. Différentiel d’élévation sur le secteur de la recharge de l’Anse-aux-Coques entre octobre 2014 et octobre 2015.

La troisième période (octobre 2015 à mai 2016) est caractérisée par un bilan sédimentaire près de l’équilibre, alors qu’une perte de $\pm 2\ 330\text{ m}^3$ sur un total de $\pm 26\ 330\text{ m}^3$ de sédiments mobilisés. Pour cette période, la plage n’avait pas fait l’objet de recharge. Il semble également y avoir un léger déplacement de sédiments de l’est vers l’ouest (figure 61).

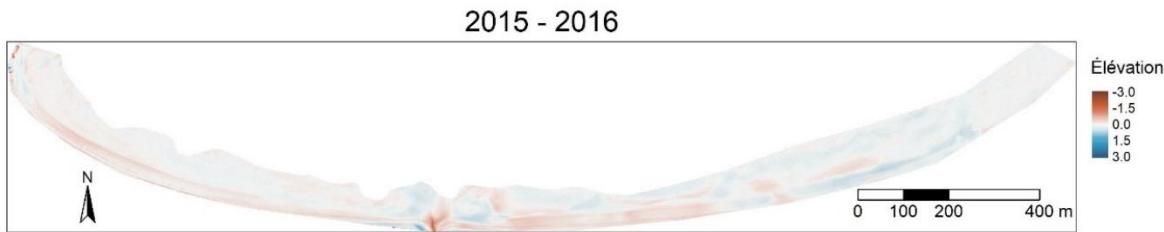


Figure 61. Différentiel d’élévation sur le secteur de la recharge de l’Anse-aux-Coques entre octobre 2015 et mai 2016.

La quatrième période (mai 2016 - novembre 2017) est caractérisée par un bilan positif de $\pm 13\ 366\ m^3$ (sur un total de $\pm 42\ 620\ m^3$ de sédiments mobilisés). Pour cette période, la plage avait fait l’objet de deux recharges sédimentaires $\pm 1080\ m^3$ en juin 2016 et de $\pm 1\ 000\ m^3$ en juin 2017. La figure 62 indique que les endroits principalement en accumulation sont sur la recharge et au centre-est du secteur d’étude. L’est du secteur d’étude affiche davantage d’érosion, principalement sur la partie supérieure de la plage.



Figure 62. Différentiel d’élévation sur le secteur de la recharge de l’Anse-aux-Coques entre mai 2016 et juin 2017.

La cinquième période (novembre 2017 et octobre 2018) indique une perte sédimentaire de $\pm 17\ 610\ m^3$. Pour cette période, la plage avait fait l’objet d’une recharge de $300\ m^3$. Sur la figure 63, on peut observer une érosion plus marquée sur la recharge, à l’ouest du secteur d’étude, mais que l’ensemble de la cellule hydrosédimentaire est généralement en érosion.

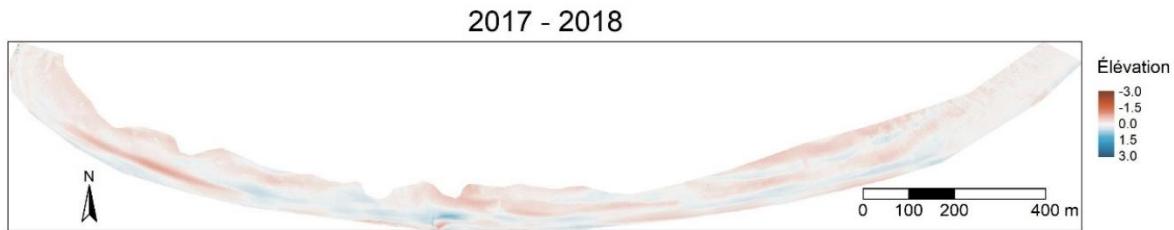


Figure 63. Différentiel d’élévation sur le secteur de la recharge de l’Anse-aux-Coques entre juin 2017 et octobre 2018.

La dernière période (octobre 2018 – septembre 2019) affiche un bilan positif de $\pm 16\,861\text{ m}^3$ (sur un total de $\pm 42\,089\text{ m}^3$ de sédiments mobilisés). Pour cette période, la plage avait fait l’objet d’une recharge de $\pm 800\text{ m}^3$. La figure 64 indique que les sédiments de recharges ont été mobilisés ailleurs sur le site d’étude, la recharge étant assez stable et même en érosion à son extrémité ouest. L’ensemble du site est légèrement en accumulation, avec certaines zones en érosion.

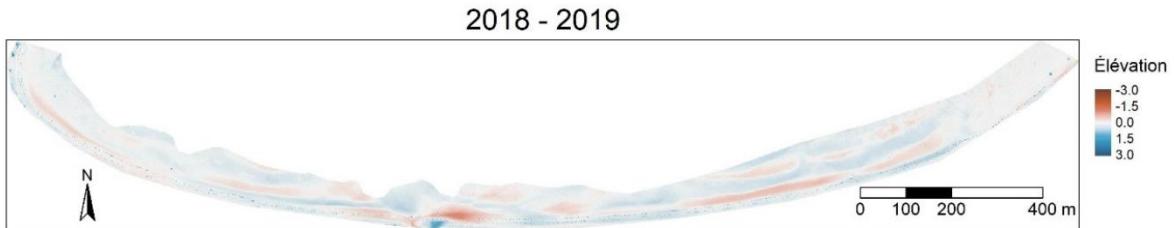


Figure 64. Différentiel d’élévation sur le secteur de la recharge de l’Anse-aux-Coques entre octobre 2018 et septembre 2019.

Suivi des conditions environnementales à partir d'une caméra

Les photos des caméras couvrent la période du 18 novembre 2014 au 25 février 2022. Les photos comprises entre le 26 mai et le 10 juin 2016, le 23 octobre et le 11 novembre 2016 ainsi que le 11 janvier et le 16 février 2017 sont toutefois manquantes.



Figure 65. Événements hydrodynamiques ayant atteint le muret de L'Anse-aux-Coques

La figure 65 illustre l'Anse-aux-Coques pendant deux tempêtes combinées à de grandes marées, soit le 29 mars 2021 et le 26 avril 2021. On peut observer que le jet de rive atteint le muret, mais que les vagues sont tout de même atténuées par la plage avant de frapper le muret. Il y a d'ailleurs seulement eu franchissement mineur à une occasion. Lors de la tempête du 30 décembre 2016. Pendant l'analyse des photos Reconyx, il a été observé que le niveau d'eau a atteint le muret pour au moins 17 marées pour la période d'étude. Le tableau 4 indique le nombre de fois où le muret a été atteint en fonction du mois pour la période d'analyse.

Tableau 4. Marées où le muret a été atteint par le niveau d'eau et intensité

Marée	Intensité	Franchissement
29 octobre 2015	Le jet de rive a atteint le muret	Non
15 décembre 2015	Le jet de rive a atteint le muret	Non
11 janvier 2016	Le jet de rive a atteint le muret	Non
13 janvier 2016	Les vagues ont atteint le muret	Non
16 novembre 2016	Le jet de rive a atteint le muret	Non
30 décembre 2016	Les vagues ont atteint le muret	Franchissement mineur sans accumulation
4 janvier 2017	Les vagues ont atteint le muret	Non
27 avril 2017	Le jet de rive a atteint le muret	Non

19 novembre 2017	Le jet de rive a atteint le muret	Non
28 octobre 2018	Le jet de rive a atteint le muret	Non
22 novembre 2018	Le jet de rive a atteint le muret	Non
17 octobre 2019	Les vagues ont atteint le muret	Non
11 décembre 2019	Le jet de rive a atteint le muret	Non
10 avril 2020	Le jet de rive a atteint le muret	Non
29 mars 2021	Le jet de rive a atteint le muret	Non
26 avril 2021	Le jet de rive a atteint le muret	Non
6 décembre 2021	Le jet de rive a atteint le muret	Non

4.1.4. Causes explicatives de l'évolution du secteur

Évolution de la plage et de la recharge au fil des années

La plage de l'Anse-aux-Coques fait partie d'un secteur très artificialisé depuis longtemps. Comme observé sur les photographies aériennes et indiqué dans le rapport de GENIVAR (2012), la promenade dans sa position actuelle est présente depuis 1992. Ainsi, l'évolution historique est peu concluante, la ligne de rivage étant fixée artificiellement depuis plusieurs années. Toutefois, l'évolution de la ligne de rivage pour la période non artificialisée (1963-1993) indique une enveloppe de variabilité beaucoup plus importante avant 1993.

Les levés réalisés indiquent une importante accumulation sédimentaire ainsi qu'un rehaussement du profil suite à la mise en place de la recharge en 2014. Le relèvement du profil est principalement situé sur la partie supérieure du haut estran. La majeure partie de l'érosion s'effectue pendant la première année du projet, entre octobre 2014 et octobre 2015, puis entre novembre 2017 et octobre 2018. Les périodes d'érosion résultent donc en partie des recharges qui amènent une grande quantité de sédiments nouveaux sur la plage qui sont ensuite mobilisés. Depuis 2018, les largeurs de plage, les profils et le bilan sédimentaire du secteur de la recharge sont plutôt en équilibre. Ainsi, les recharges d'entretien effectuées pour cette période semblent suffisantes. La figure 66 illustre l'état de la plage pendant les travaux de recharge et en 2019, soit 5 ans après la recharge initiale.



Figure 66. Plage de l'Anse-aux-Coques en 2014 (pendant les travaux de recharge) et en 2019.

Les profils de plage sur la recharge indiquent que la largeur de plage à la flexure a diminué par rapport à l'état initial, avant la recharge, ce qui résulte en une plage plus abrupte. Toutefois, la partie supérieure du haut estran est beaucoup plus élevée en 2019 qu'en 2012. Cette partie du profil est aussi plutôt stable depuis 2017. Ainsi, les largeurs de plage au NMM sont moins grandes depuis l'implantation de la recharge. La plage est donc plus abrupte, moins large et le NMM se situe plus près de la ligne de rivage qu'en 2012. Cependant, le soulèvement du haut estran a permis d'éloigner l'isoligne du niveau PMSGM de la ligne de rivage, résultant en une augmentation de la largeur de plage au PMSGM. Ainsi, les niveaux d'eau n'atteignent pas le muret et l'énergie des vagues est plus susceptible d'être dissipée lors de hauts niveaux d'eau.

Finalement, les bilans sédimentaires indiquent qu'à l'exception de la recharge initiale, les recharges ont peu d'impact sur le bilan sédimentaire à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire. En effet, les variations interannuelles des bilans sédimentaires semblent davantage liées à des facteurs externes.

Comparaison avec les secteurs témoins

Les profils témoins situés à 50 m de part et d'autre de la recharge, affichent moins de mobilité que les profils situés sur la recharge. Le profil n° 1, situé à l'ouest, est très stable sur le haut estran, à l'exception du profil de 2014, et sur une bonne partie du bas estran. Il y a toutefois

apparition et migration d'une barre sableuse à une distance de ± 100 m en 2019. La barre migrant vers la côte pourrait suggérer une migration du système vers la côte, cependant la flexure conserve sa position. Pour ce secteur, tel qu'illustré sur la figure 56, la largeur de plage au NMM diminue à partir de la recharge initiale.

Le profil n° 13, situé à l'est du site présente un exhaussement du profil sur le haut estran près de la flexure entre 2014 et 2017. Pendant cette même période, les profils de la recharge affichent un abaissement. Il pourrait alors y avoir diffusion des sédiments de la recharge, ce qui concorderait avec la direction de la dérive principale pour ce secteur qui se fait de l'ouest vers l'est. Le reste du profil reste toutefois stable et les autres périodes sont marquées par des changements morphologiques beaucoup moins importants. La position du PMSGM suggère que la recharge n'a pas eu d'effet bénéfique sur la dissipation des vagues à cet endroit, pour de hauts niveaux d'eau. La position du NMM suggère par contre une plus grande dissipation pour des niveaux moyens.

Les profils n° 15 et n° 21 situés à l'est du site indiquent moins de variabilité que les profils situés sur la recharge. Les profils affichent une certaine mobilité au niveau de la flexure, mais restent assez stables ailleurs sur le profil. La variabilité sur ces profils ne semble pas être liée à la recharge, ce qui suggère que celle-ci n'a pas d'effet sur une grande distance le long de la côte. Les bilans sédimentaires indiquent également qu'à l'exception de la recharge initiale, les recharges ont peu d'impact sur le bilan sédimentaire à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire. En effet les variations interannuelles des bilans sédimentaires semblent davantage liées à des facteurs externes, les périodes d'excédents ou de pertes sédimentaires à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire n'étant pas nécessairement liées aux recharges et l'amplitude de la mobilisation de sédiments étant d'un ordre beaucoup plus grand que celui de la recharge.

Évaluation de l'efficacité de la recharge de plage

L'objectif principal de la recharge de la plage de l'Anse-aux-Coques était de protéger les infrastructures, en particulier la promenade. L'exhaussement du haut estran a permis d'éloigner le PMSGM de la promenade, favorisant la dissipation de l'énergie des vagues sur

la plage pour les niveaux d'eau élevés. L'analyse des photos Reconyx a permis de voir que l'énergie des vagues atteignait toutefois parfois le muret. En effet, le muret a été atteint au moins 17 fois entre le 29 octobre 2015 et le 6 décembre 2021. Cependant, il y a seulement eu franchissement lors d'un événement de tempête, ce qui indique que la recharge protège généralement bien le muret. Ainsi, la recharge la protège plutôt bien la promenade de l'énergie des vagues, bien que celle-ci reste vulnérable lors d'événements extrêmes.

Selon Weggel (1996), la plupart des projets de recharges ont une durée de vie de 3 à 10 ans. La recharge ayant été mise en place en 2014, celle-ci se situe donc à l'intérieur de cet intervalle. Les résultats indiquent aussi qu'environ 17 % de la recharge a été érodée pendant la première année du projet. Plusieurs auteurs ont observé des pertes initiales oscillant entre 1 % et 40 % (CIRIA et al., 2007; Pinto & Silveira, 2018; Verhagen, 1996), indiquant que la perte de 17 % dans la première année se situe plutôt dans la moyenne que dans les extrêmes. Le rapport de 2017 sur le suivi de la recharge de Sainte-Luce (Bernatchez, Cormier, et al., 2017) indiquait une érosion marquée de la recharge entre 2014 et 2016. Toutefois, en 2019, le profil est encore stable et plus élevé sur le haut estran qu'en 2012. Ainsi, la recharge est restée plutôt stable.

La distribution de la granulométrie étant unimodale et s'approchant d'une distribution normale suggère que la taille des sédiments de la recharge est plutôt semblable à la taille des sédiments naturels du système. Cependant, la taille utilisée pour la recharge initiale est de -2,81 ϕ (Tremblay et al., 2014), correspondant à la classe des cailloux, ce qui est supérieur à la granulométrie moyenne du haut estran de -1,19 ϕ . Dans le rapport de 2017 sur le suivi de la recharge de Sainte-Luce (Bernatchez, Cormier, et al., 2017), les données granulométriques de 2014 démontrent que les sédiments pré-recharge du haut estran étaient principalement composés de sable fin et moyen, mais que suite à la recharge, en 2015, les sédiments étaient principalement composés de gravier fin et moyen. En 2016, 2 ans après la recharge, le sable est redevenu dominant, avec une prédominance du sable moyen et grossier. Les analyses granulométriques de 2019 montrent également une plage dominée par le sable. Les recommandations dans la littérature suggèrent une granulométrie équivalente ou légèrement plus grossière (Bachand & Comtois, 2016; Dean, 2002; Delft Hydraulics Laboratory, 1987;

Stauble, 2007). Le D50 de la recharge étant sensiblement plus élevé que le D50 moyen du haut estran et le profil de plage devenant plus abrupte après la mise en place de la recharge suggèrent que les sédiments de la recharge ne correspondent pas tout à fait aux recommandations de la littérature, ceux-ci étant plus grossiers. Des sédiments plus près de la distribution granulométrique des sédiments d'origine auraient potentiellement conservé une pente plus douce et auraient pu permettre de dissiper davantage l'énergie des vagues pour des niveaux d'eau moyens. Finalement la plage indique un retour aux conditions pré-recharge au niveau de la granulométrie, mais conserve une pente plus abrupte sur le haut estran.

Le niveau des PMSGM n'atteint plus le muret, mais se situe toutefois très près de celui-ci. Ainsi, lors des fortes tempêtes combinées à de hauts niveaux d'eau, les vagues peuvent atteindre le muret. Les tempêtes ayant atteint le muret entre 2014 et 2016 sont d'ailleurs documentées dans le rapport final *Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers (2014-2016) : rapport final* (Bernatchez, Cormier, et al., 2017). Il est à noter que contrairement à ce qu'on retrouve dans la littérature, la densité de la recharge est assez faible. Campbell et Benedet (2006) suggèrent une division des volumes de construction en trois catégories : 1) volume faible (moins de 200 m³/m) ; 2) volume intermédiaire (200 – 400 m³/m) et 3) volume important (plus de 400 m³/m). Le volume de recharge initiale de l'Anse-aux-Coques de ± 22 m³/m est donc de faible ampleur par rapport à d'autres projets de recharge. Une recharge avec un plus grand volume permettrait potentiellement d'élever davantage le profil de plage et de mieux dissiper l'énergie des vagues pour les niveaux d'eau plus élevés.

4.2 BANC LAROCQUE

4.2.1. Évolution historique

La

figure 67 représente l'évolution historique des cellules hydrosédimentaires du barachois de Carleton et de la baie de Cascapédia pour la période 1963-2018, soit l'ensemble de la couverture des photos aériennes pour ce site d'étude. Le taux d'évolution y est représenté de l'ouest vers l'est. On peut observer une prédominance de côtes stables, légèrement en érosion

ou légèrement en accumulation, avec des valeurs se situant entre -0,25 m par année et 0,50 m par année. Une partie du secteur ouest, principalement constitué de falaises meubles, obtient des valeurs négatives plus importantes situées entre -0,25 m et -1,20 m par année (figure 67 ouest). Une autre partie du secteur ouest, le banc Larocque, obtient des valeurs positives plus importantes situées entre 0,50 m et 2,02 m par année.

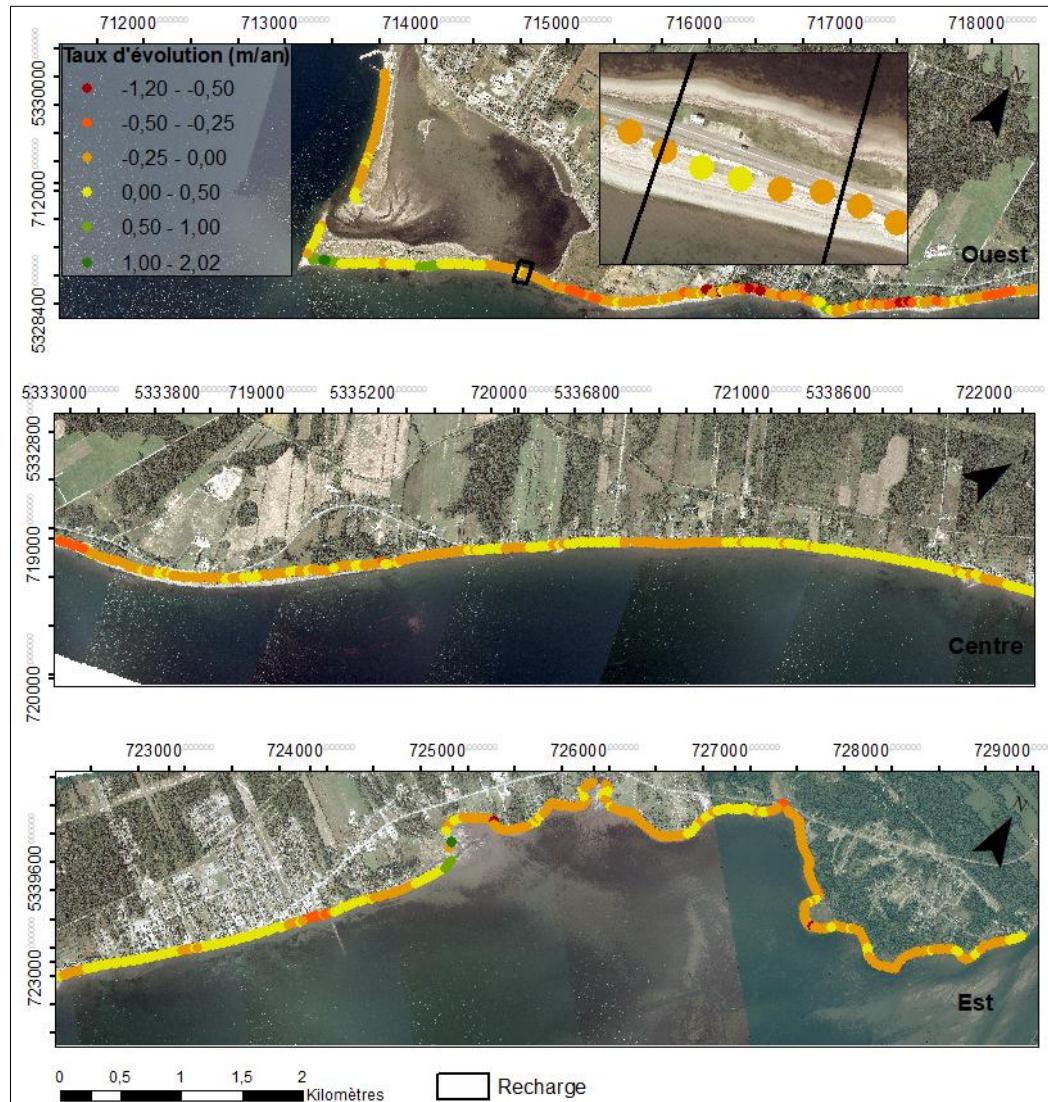


Figure 67. Évolution historique des cellules hydrosédimentaires du barachois de Carleton et de la baie de Cascapédia.

Le taux d'évolution pour la période 1963-2018 est négatif à l'échelle des cellules hydrosédimentaires et du secteur de la recharge (tableau 5). Ce taux est aussi négatif pour la période pré-recharge (1963-2007) et post-recharge (2007-2018). La recharge a lieu en 2011. Il est possible d'observer une accélération du recul de la ligne de rivage entre la période pré-recharge et post-recharge à l'échelle des cellules hydrosédimentaires et du secteur de la recharge, ainsi que des valeurs négatives d'évolution de la ligne de rivage plus importante pour le secteur de la recharge pour les deux périodes. Ces valeurs de recul sont toutefois plutôt faibles, avec des taux variant entre -0,01 m et -0,17 m. Le secteur de la recharge est aussi particulièrement sujet à l'érosion (

figure 67).

Tableau 5. Taux d'évolution des cellules hydrosédimentaires du barachois de Carleton et de la baie de Cascapédia (m/an).

	1963-2007	2007-2018	1963-2018
Cellule hydrosédimentaire	-0,01	-0,04	-0,01
Secteur de la recharge	-0,05	-0,17	-0,08

La figure 68 illustre la position de la ligne de rivage entre 1963 et 2018, pour le secteur de la recharge de plage. La recharge est délimitée par les lignes pointillées perpendiculaires aux lignes de rivages. La zone en gris représente l'enveloppe de mobilité de la ligne de rivage. La position de la ligne de rivage de 2018 constitue la seule ligne post-recharge. Les lignes de rivages affichent un recul entre les années 1963 et 2004 et une avancée pour la période 2004-2007. La période 2007-2018 affiche un recul aux extrémités de la recharge, soit aux transects 143 à 147 et 151 à 154. Par contre, pour cette même période, la ligne de rivage avance devant la recharge, soit aux transects 147 à 151.

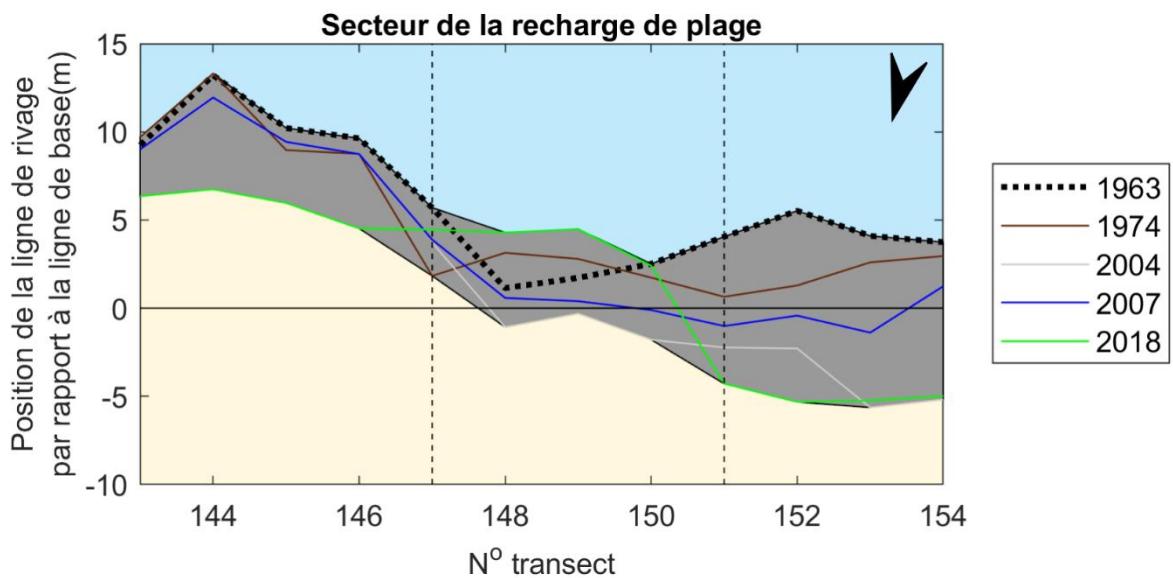


Figure 68. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge du banc Larocque.

4.2.2. Caractérisations granulométriques

Sur le site du banc Larocque, 36 échantillons ont été récoltés le long de 6 profils, sur le haut et le bas estran. Les profils PT1 et PT2 sont les profils témoins situés à 100 m de part et d'autre de la recharge et les profils PR1 à PR4, les profils situés sur la recharge. Les données présentées proviennent de la campagne d'échantillonnage de 2018. Les résultats sont exprimés en phi (ϕ), vu la grande variabilité de la taille des sédiments entre les sites. L'analyse des caractéristiques granulométriques s'effectue dans un premier temps en décrivant les caractéristiques générales du site, puis en divisant le secteur de la plage en trois unités morphologiques, soit le haut de plage, le haut estran et le bas estran.

Les résultats démontrent que le site d'étude possède un D_{50} moyen de $-2,05 \phi$, ce qui correspond à la classe des cailloux. Comme il est possible d'observer sur la figure 69, les classes granulométriques principales sont celles des cailloux (53,78%), du sable moyen (16,27%) et du sable grossier (10,81%). Les classes indiquent donc une plage mixte de cailloux et sables.

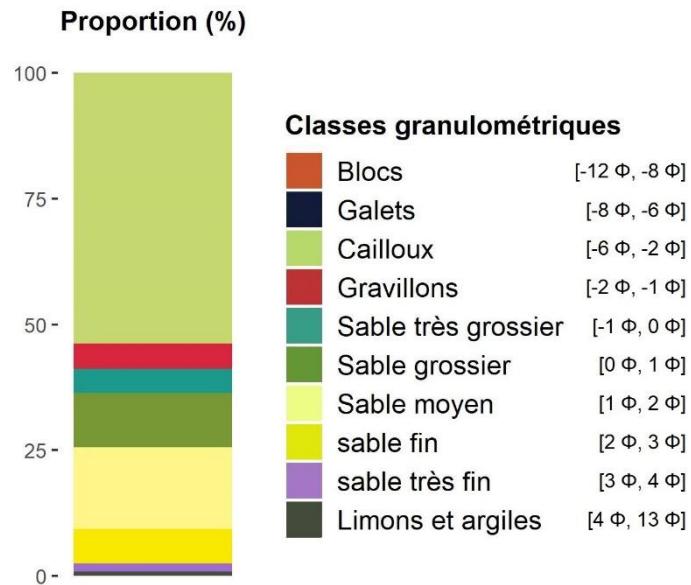


Figure 69. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude (Banc Larocque)

Les échantillons du haut de plage affichent un D_{50} moyen de 0,21 φ, ce qui correspond à la classe du sable grossier. Sur la figure 70b la proportion des différentes classes indique que les sables grossiers (42,81%), les sables moyens (22,87%) et les cailloux (16,47%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire affichant une concentration des sédiments entre 1 φ et 0,5 φ et, dans une moindre mesure, entre −2,5 φ et −5 φ (figure 70a). Le profil PR1 affiche quant à lui une distribution bimodale avec une concentration des sédiments vers −1 φ et −5,5 φ. Les profils PR2 et PT2 démontrent aussi une distribution légèrement plus grossière que les autres profils, avec un premier mode davantage vers 0,5 φ que 1 φ. Ainsi, les sédiments sur le haut de plage sont constitués d'un mélange de sable et de cailloux, avec une prédominance de sable. Le profil PT1 ne contient pas d'échantillon de haut de plage, car celui-ci est constitué d'un enrochement.

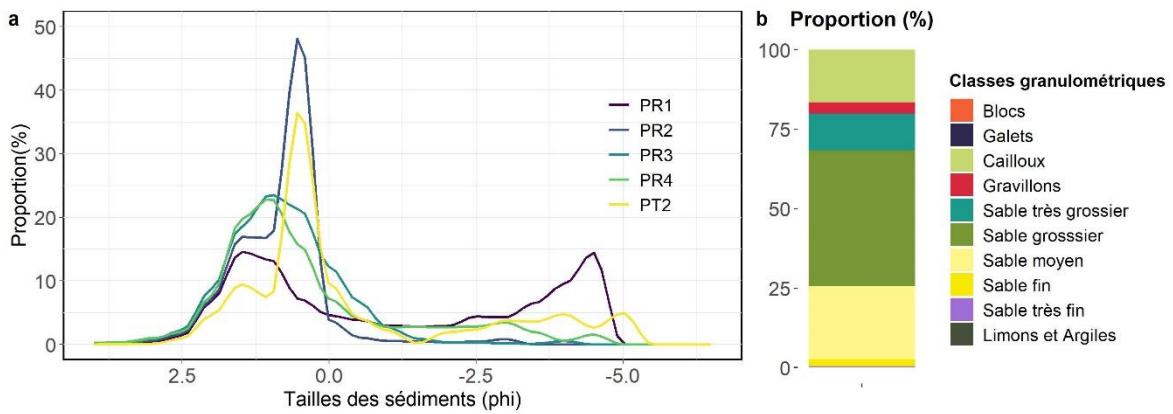


Figure 70. Distribution et classes granulométriques sur le haut de plage du banc Larocque

Les échantillons du haut estran affichent un D_{50} moyen de $-3,00 \phi$, ce qui correspond à la classe des cailloux. Sur la Figure 71b la proportion des différentes classes indique que les cailloux (71,45%), les gravillons (8,50%) et les sables moyens (7,74%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire affichant une concentration des sédiments entre -4ϕ et -6ϕ et une asymétrie négative (Figure 71a). Le profil PR4 affiche toutefois une concentration plus importante vers $-2,5 \phi$. Ainsi, les sédiments sur le haut estran sont principalement constitués de cailloux, avec une présence de sables et gravillons qui se visualise par l'asymétrie de la courbe.

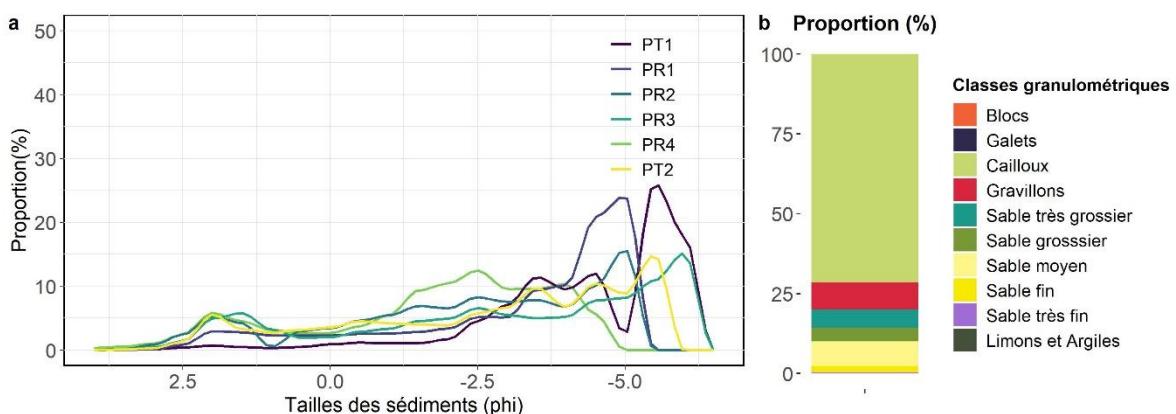


Figure 71. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran du banc Larocque

Les échantillons du bas estran affichent un D_{50} moyen de $-2,05 \phi$, ce qui correspond à la classe des cailloux. Sur la Figure 72b la proportion des différentes classes indique que les cailloux (56,66%), les sables moyens (18,46%) et les sables fins (10,90%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire affichant une distribution bimodale avec une concentration des sédiments vers 2ϕ et -5ϕ (Figure 72a). Le profil PT1 affiche toutefois une distribution légèrement plus grossière avec des modes vers 1ϕ et -6ϕ . Ainsi, les sédiments sur le bas estran sont principalement constitués d'un mélange hétérogène de cailloux et de sables.

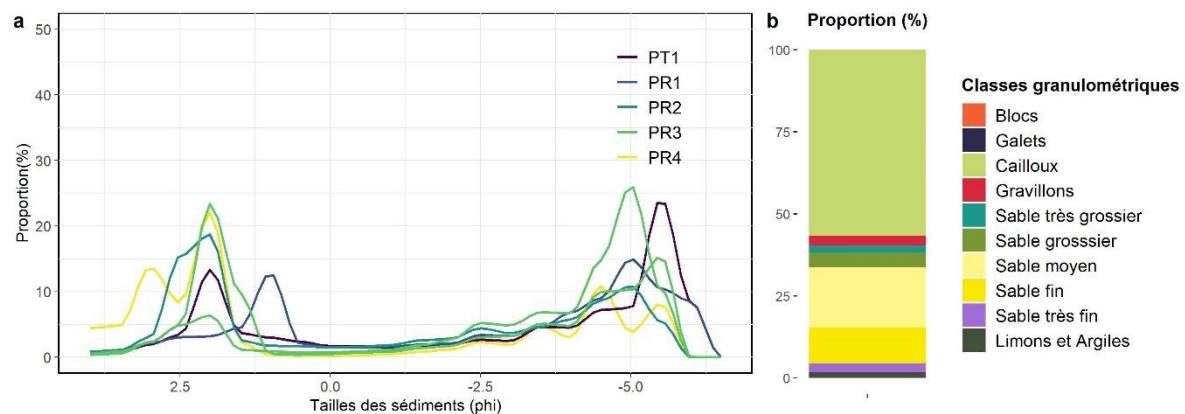


Figure 72. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran du banc Larocque

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des échantillons sera présentée avec les profils de plage dans la section suivante.

4.2.3. Évolution du secteur de la recharge de plage d'août 2018 à novembre 2019

Profils de plage

Sur le site du banc Larocque, les profils n°s 9, 14, 16 et 19 sont analysés. Le profil n° 9, situé à 100 m à l'est de la recharge, est caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement du profil (figure 73). Sur le haut estran, le profil se rehausse entre le 14 juin et le 22 novembre 2018, puis s'abaisse jusqu'en décembre 2019. Sur le bas estran, le profil se rehausse légèrement entre le 14 juin 2018 et le 27 septembre 2019 pour atteindre sa position la plus

haute. Ensuite, le profil s'abaisse légèrement jusqu'en décembre 2019. Le profil affiche une enveloppe de mobilité d'environ 25 cm sur le haut estran et d'environ 50 cm sur le bas estran (figure 74). Les barres sableuses de bas estran sont aussi caractérisées par les phases d'abaissement et d'exhaussement, mais restent stables de façon perpendiculaire à la côte. La flexure se situe à environ 20 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage de ± 20 m. Le NMM atteint la partie supérieure du haut estran et le PMSGM atteint l'enrochement en haut de plage. L'écart-type indique une variabilité plutôt constante tout au long du profil.

La taille des sédiments est plus grossière sur le haut estran et plus fine sur le bas estran (figure 74). Le haut estran et la flexure sont constitués de sédiments de la classe des cailloux. Sur le bas estran, les sédiments sont constitués de sables moyens et de sables fins.

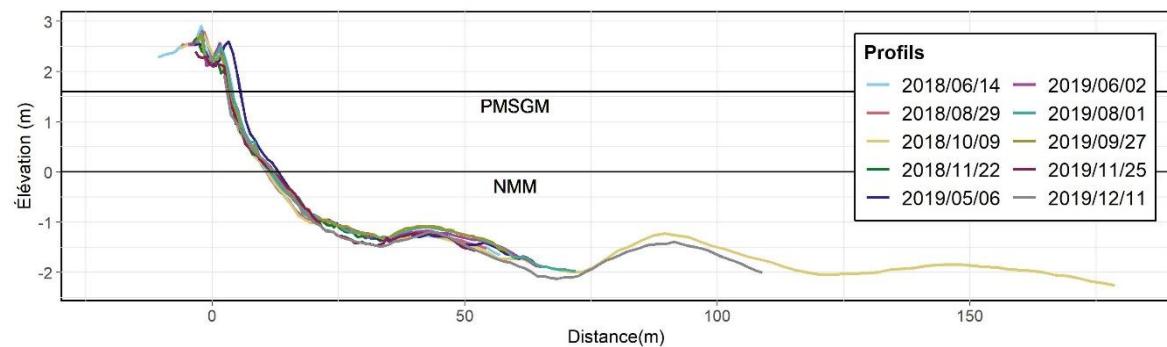


Figure 73. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 14 juin 2018 au 25 novembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

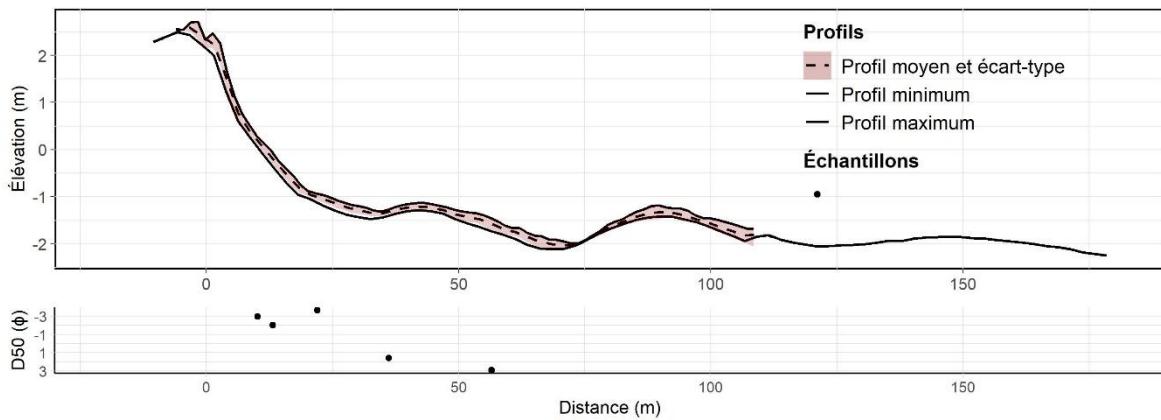


Figure 74. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 19, situé 100 m à l'ouest de la recharge est aussi caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement du profil (figure 75). Le profil se rehausse légèrement entre le 14 juin 2018 et le 1^{er} août 2019, pour atteindre sa position la plus haute. Ensuite, le profil reste plutôt stable jusqu'en septembre 2019, puis s'abaisse légèrement jusqu'en décembre 2019. Le profil affiche une enveloppe de mobilité d'environ 50 cm sur la partie supérieure du haut estran et sur le bas estran, puis d'environ 25 cm de la moitié du haut estran à la flexure (figure 76). Sur le haut de plage, à environ 10 m de la ligne de rivage, on observe une érosion de 2,65 m entre le 29 août 2018 et le 9 octobre 2018. La flexure se situe à environ 35 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage de ± 35 m. Le NMM atteint la moitié du haut estran et le PMSGM la partie supérieure du haut estran. L'écart-type indique une variabilité plutôt constante tout au long du profil.

La taille des sédiments est plus fine sur le haut de plage et le haut estran et plus grossière sur le bas estran (figure 76). Le haut de plage est caractérisé par des sédiments de la classe du sable grossier. Le haut estran est caractérisé par des sédiments de la classe des cailloux. Près de la flexure et sur tout le bas estran, les sédiments font partie de la classe des cailloux.

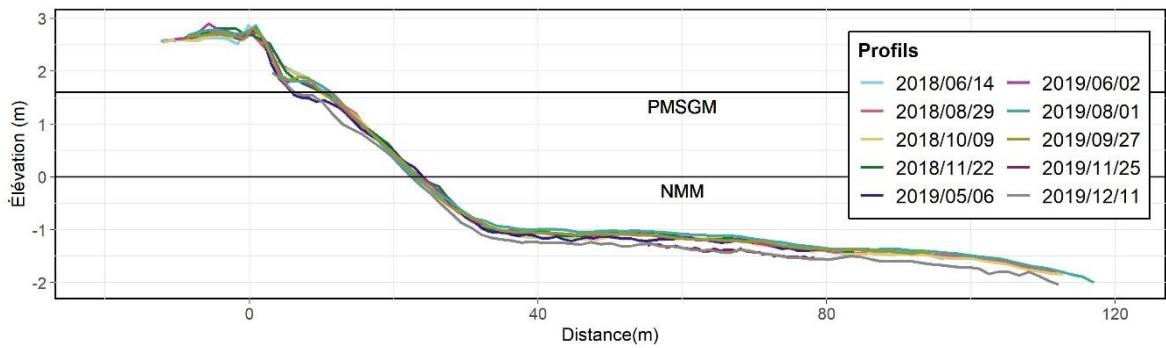


Figure 75. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 14 juin 2018 au 25 novembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

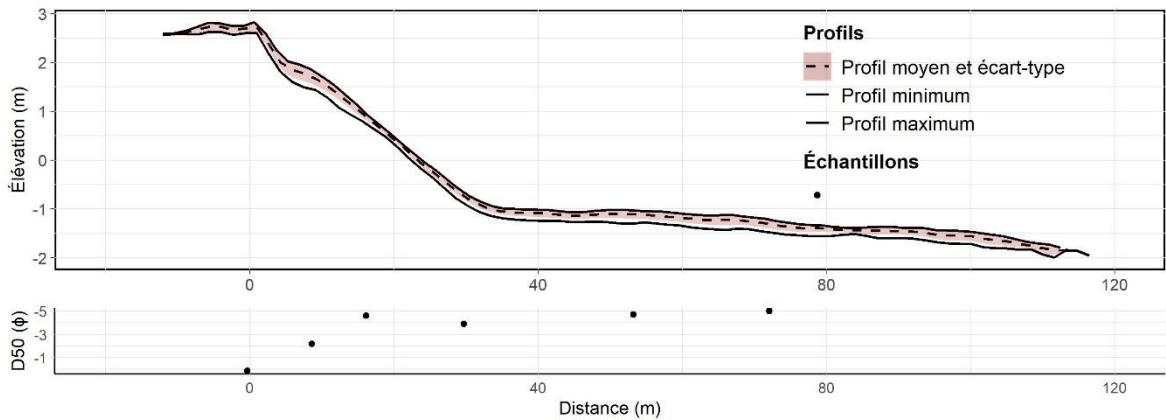


Figure 76. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 19 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 14, situé sur la recharge est aussi caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement du profil (figure 77). Le profil s'abaisse entre le 29 août et le 22 novembre 2018, sur la partie supérieure du haut estran, mais reste stable sur le reste du profil. Le profil reste ensuite plutôt stable jusqu'en septembre 2019, avant de s'abaisser en décembre 2019. Le profil affiche une enveloppe de mobilité d'environ 50 cm sur l'ensemble du profil (figure 78). Sur le haut de plage, de 5 à 10 m de la ligne de rivage, on observe une érosion de la recharge de 8,25 m entre le 29 août 2018 et le 22 novembre 2018. La flexure se situe à environ 30 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage de ± 30 m. Le NMM atteint la partie inférieure du haut estran et le PMSGM la partie supérieure du haut estran, près de la

recharge. L'écart-type indique une variabilité plus importante sur le haut estran que sur le bas estran.

La taille des sédiments est plus fine sur le haut de plage et plus grossière près de la flexure et sur le bas estran, à l'exception de l'échantillon près de la flexure de la barre qui affiche une granulométrie plus fine (figure 78). Le haut de plage, constitué de la recharge, est caractérisé par des sédiments de la classe du sable grossier. Le haut estran est caractérisé par des sédiments de la classe des cailloux. Près de la flexure et sur la partie supérieure de bas estran, les sédiments font partie de la classe des cailloux. La partie inférieure du bas estran est constituée de sable grossier.

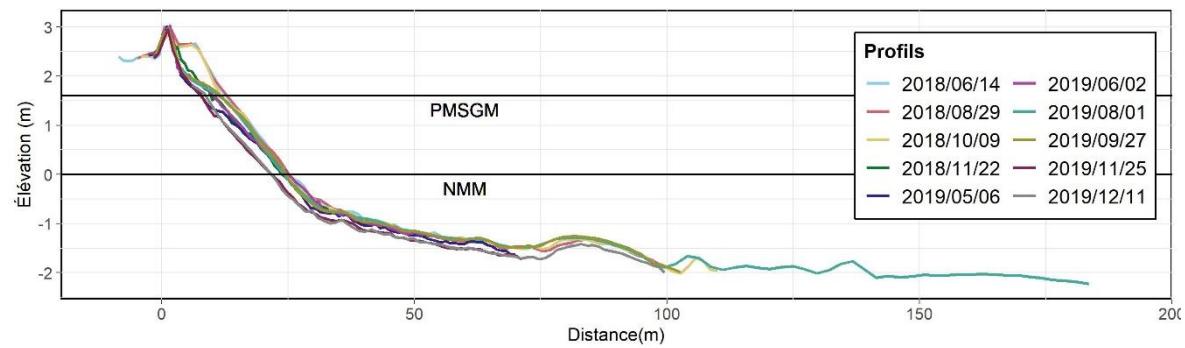


Figure 77. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 14 du 14 juin 2018 au 25 novembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

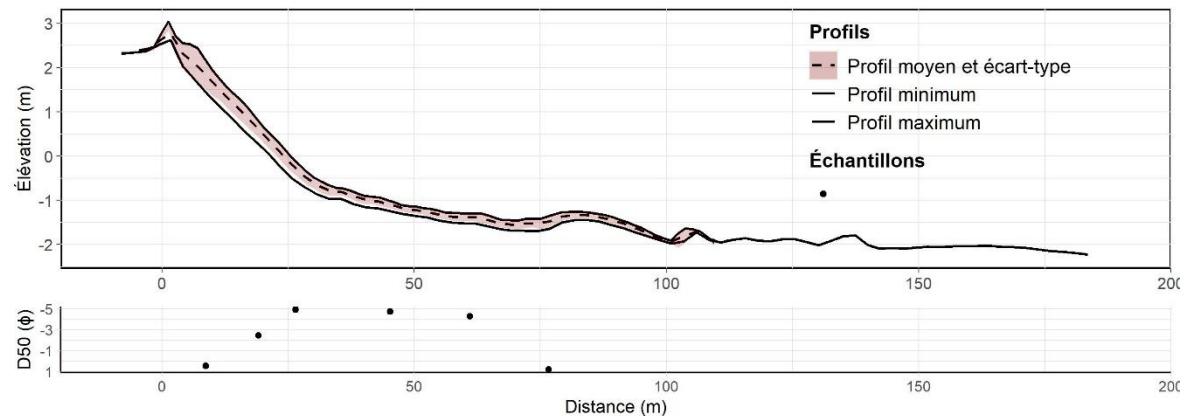


Figure 78. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 14 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 16, situé sur la recharge est aussi caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement du profil (figure 79). Le profil s'abaisse entre le 29 août et le 22 novembre 2018, sur la partie supérieure du haut estran, mais reste stable sur le reste du profil. Le profil reste ensuite plutôt stable jusqu'en septembre 2019, avant de s'abaisser en décembre 2019. Le profil affiche une enveloppe de mobilité de 50 cm à 75 cm sur l'ensemble du profil (figure 79). Sur le haut de plage, de 5 à 10 m de la ligne de rivage, on observe une érosion de la recharge de 8,06 m entre le 9 octobre 2018 et le 22 novembre 2018. La barre sableuse situé à \pm 90 m de la ligne de rivage est aussi caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement du profil, mais reste stable de façon perpendiculaire à la côte. La flexure se situe à environ 30 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage de \pm 30 m. Le NMM atteint la moitié du haut estran et le PMSGM la partie supérieure du haut estran, près de la recharge. L'écart-type indique un pic de variabilité sur la partie supérieure du haut estran, là où la recharge s'est érodée.

La taille des sédiments est plus fine sur le haut de plage et plus grossière sur le haut estran. Les sédiments sur le bas estran sont plus fins, à l'exception de l'échantillon vers 60 m de la ligne de rivage qui affiche une granulométrie plus grossière (figure 80). Le haut de plage, constitué de la recharge, est caractérisé par des sédiments de la classe du sable grossier. Le haut estran est caractérisé par des sédiments de la classe des cailloux. Le bas estran est constitué de sable moyen, à l'exception de l'échantillon vers 60 m de la ligne de rivage qui est constitué de cailloux.

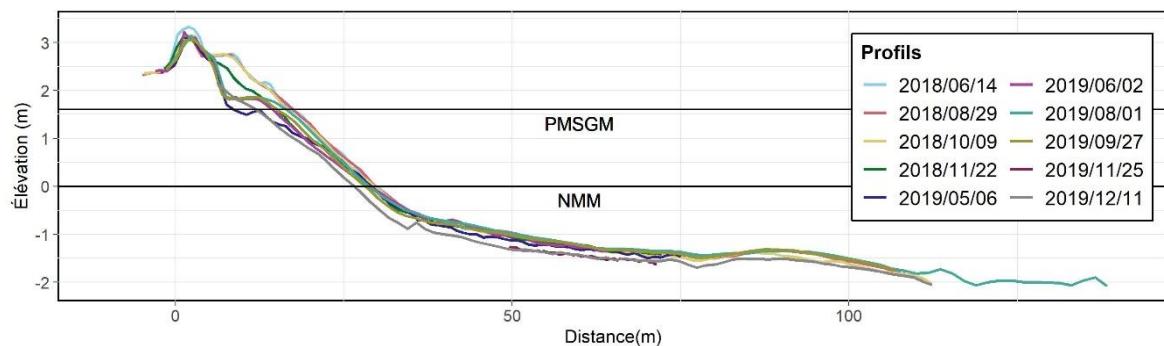


Figure 79. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 16 du 14 juin 2018 au 25 novembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

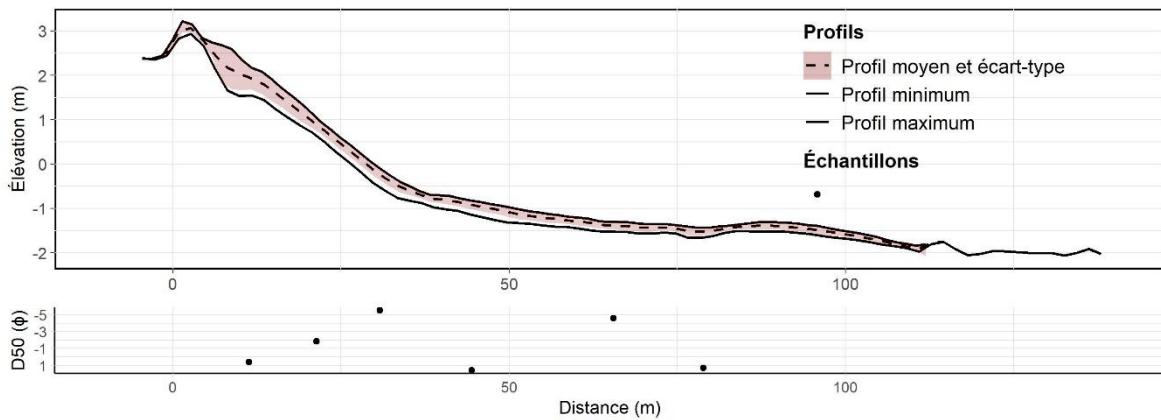


Figure 80. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 16 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

Largeurs de plage

Afin d'analyser les variations des largeurs de plages, le secteur du banc Larocque a été subdivisé en quatre sous-secteurs (figure 81). Le secteur 1 est situé à l'est du site et consiste en l'évolution des profils n°s 1 à 5. Le secteur 2 est situé au centre-est du site et consiste en l'évolution des profils n°s 6 à 12. Le secteur 3, constitué de la recharge, est situé au centre-ouest du site et consiste en l'évolution des profils n°s 13 à 16. Le secteur 4 est situé à l'ouest du site et consiste en l'évolution des profils n°s 17 à 31. Sur la figure 81, les lignes pointillées indiquent le secteur de la recharge, soit la recharge et 100 m de part et d'autre. Sur la figure 82, les lignes pointillées indiquent la délimitation de la recharge. La distance par rapport à la côte est calculée à partir de la ligne de rivage.

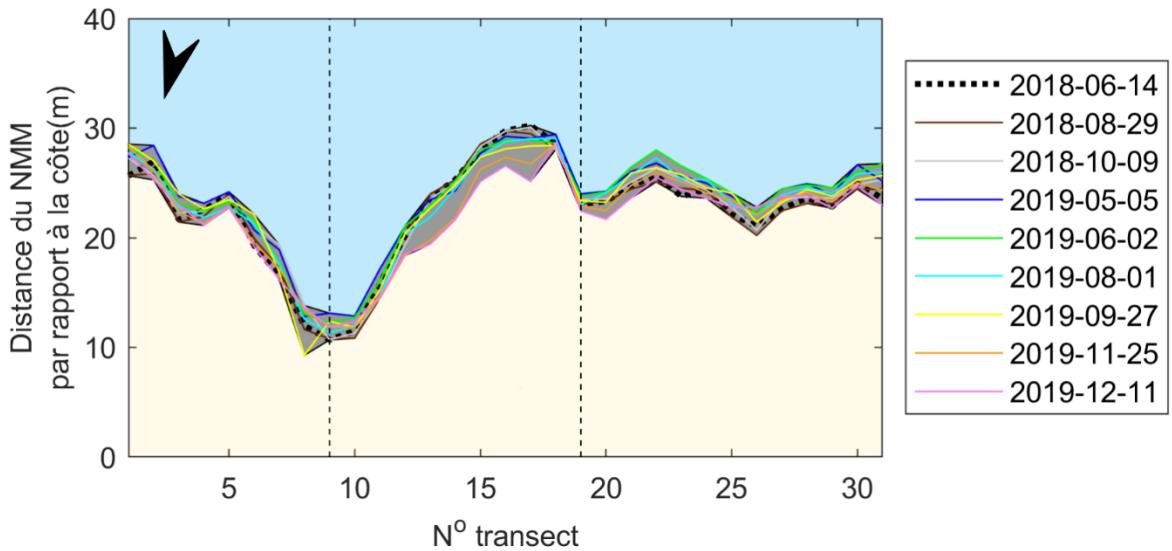


Figure 81. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur du banc Larocque.

Le secteur 1 est caractérisé par une côte à falaise meuble non artificialisée. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -1,68 à 2,88 m entre le 14 juin 2018 et le 11 décembre 2019. Ces déplacements sont calculés pour chaque isoligne du NMM par rapport à la période de référence correspondant au premier levé, soit le 14 juin 2018. La moyenne de ces déplacements est de 0,33 m, ce qui indique une augmentation de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 81, on aperçoit que l'isoligne du NMM présente peu de mobilité, puis se déplace positivement entre le 14 juin 2018 et le 5 mai 2019 et négativement jusqu'au 1^{er} août 2019. L'isoligne se déplace ensuite de façon positive jusqu'au 27 septembre 2019, puis négative jusqu'au 11 décembre 2019. Le bilan du déplacement de la ligne de rivage au NMM pour la période d'étude est négatif pour tous les profils, à l'exception du profil n° 1. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 21,13 m à 28,54 m. La moyenne de ces largeurs est de 24,44 m. Ce secteur affiche aussi une diminution de la largeur des plages de l'est vers l'ouest.

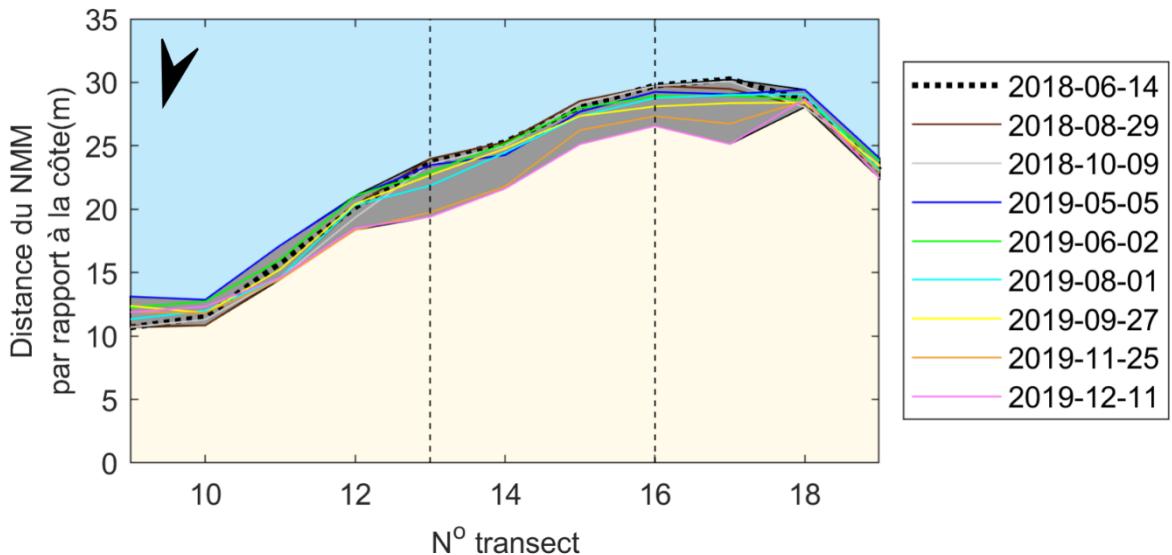


Figure 82. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge du banc Larocque

Le secteur 2 est caractérisé par une côte à flèche littorale artificialisée par un enrochement. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -2,70 m à 2,86 m entre le 14 juin 2018 et le 25 novembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -0,38 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 81, on aperçoit que l'isoligne du NMM présente peu de mobilité, puis se déplace positivement entre le 14 juin 2018 et le 5 mai 2019 et négativement jusqu'au 27 septembre 2019. L'isoligne se déplace ensuite de façon positive jusqu'au 11 décembre 2019. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est positif pour les profils n°s 8, 9 et 10, puis négatif pour les profils n°s 6, 7, 11, 12. Les largeurs de plage au NMM varient de 9,28 m à 22,14 m. La moyenne de ces largeurs est de 15,60 m.

Le secteur 3 est caractérisé par une côte à flèche littorale avec recharge. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -4,25 m à 0,47 m entre le 14 juin 2018 et le 25 novembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -1,16 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 82, on aperçoit que l'isoligne du NMM reste plutôt stable jusqu'en septembre 2019, puis se déplace négativement entre le 27 septembre 2019 et le 11 décembre 2019. Le bilan du déplacement

entre la ligne de rivage et le NMM est négatif pour tous les profils. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 19,39 m à 29,76 m. La moyenne de ces largeurs est de 25,66 m. Ce secteur affiche aussi une augmentation de la largeur des plages de l'est vers l'ouest.

Le secteur 4 est caractérisé par une côte à flèche littorale non artificialisée. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -5,11 m à 2,79 m entre le 14 juin 2018 et le 25 novembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de 0,43 m, ce qui indique une augmentation de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 81, on aperçoit que l'isoline du NMM se déplace de façon positive jusqu'en juin 2019, puis se stabilise. Ensuite, elle se déplace de façon négative jusqu'au 11 décembre 2019. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est positif pour les profils n°s 18, 23, 25 à 29 et 31, puis négatif pour les profils n°s 17, 19 à 22, 24, 30 et 32. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 20,22 m à 30,24 m. La moyenne de ces largeurs est de 24,74 m. Ce secteur affiche aussi une augmentation de la largeur des plages près de la recharge.

Bilans sédimentaires

Les évolutions morphologiques mesurées sur le secteur de la recharge du banc Larocque montrent un fonctionnement morphosédimentaire dominé par un transit longitudinal. Les cartes de différentiels d'élévation montrent des phases d'exhaussement puis d'abaissement des différentes parties de la plage sans créer d'impact significatif sur les bilans sédimentaires (figure 83).

Pendant la période du suivi, le secteur est caractérisé par un bilan sédimentaire excédentaire, avec des bilans sédimentaires intermédiaires proches de l'équilibre (figure 84). Au cours de cette même période, la zone la plus problématique, localisée au droit de l'enrochement, montre des phases d'exhaussement (août à décembre 2018 et septembre à novembre 2019) et d'abaissement de la plage (décembre 2018 à septembre 2019).

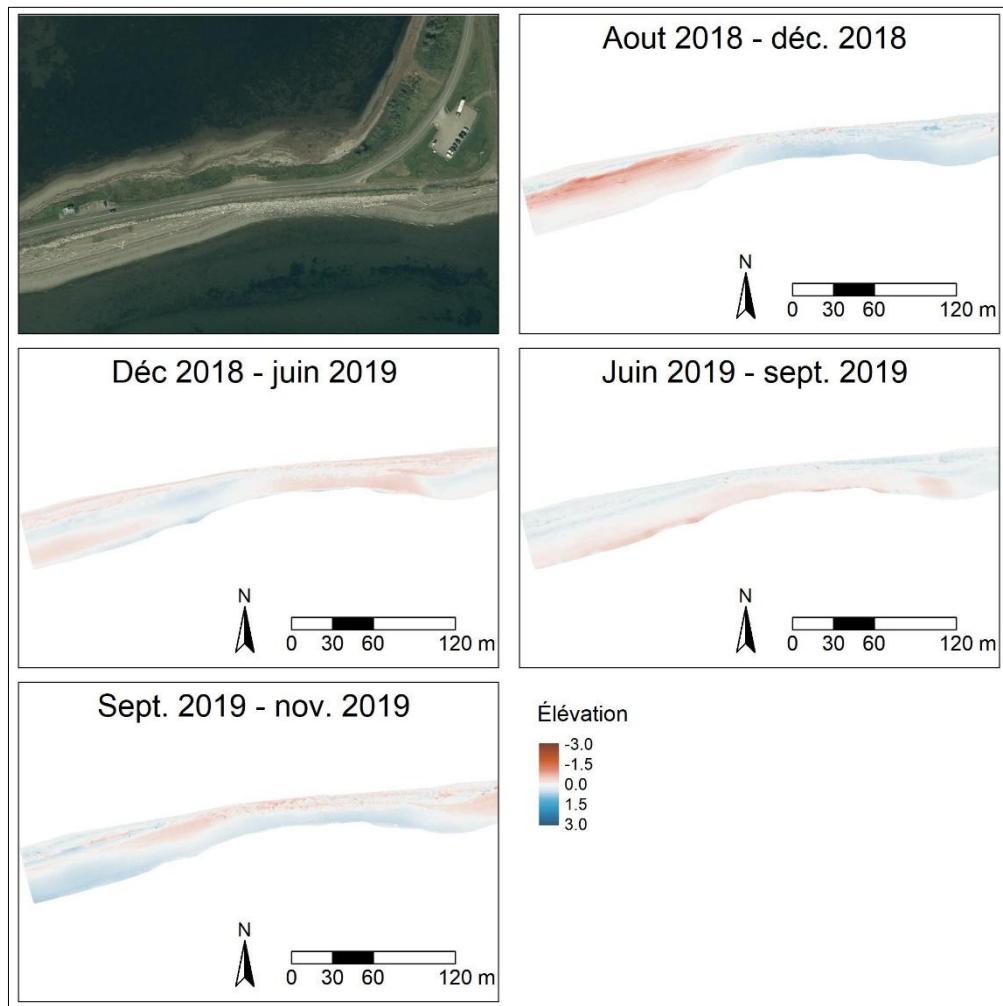


Figure 83. Différentiels d’élévations sur le secteur de la recharge du banc Larocque entre août 2018 et novembre 2019.

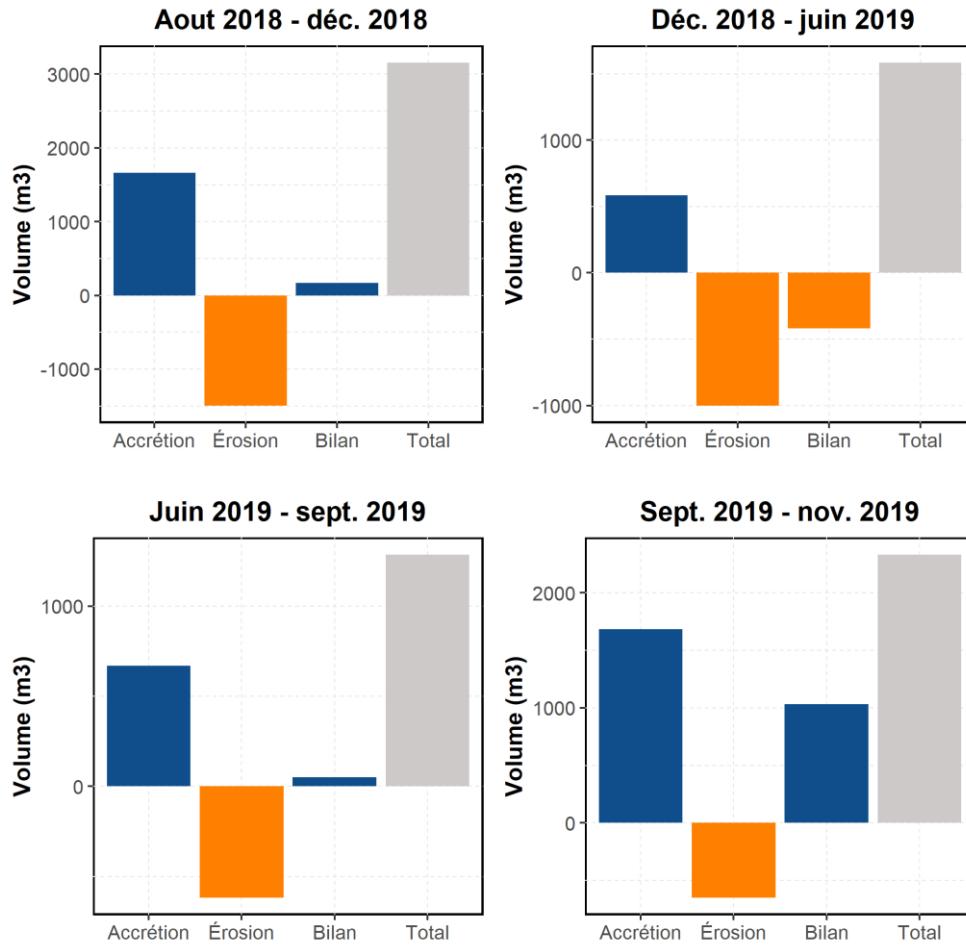


Figure 84. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge du banc Larocque entre août 2018 et novembre 2019.

4.2.4. Causes explicatives de l'évolution du secteur

Évolution de la plage et de la recharge au fil des années

L'évolution historique du secteur indique que le secteur du banc Larocque est plus sujet à l'érosion que le reste de la cellule hydrosédimentaire. Bien que les taux d'érosion soient plutôt modérés, le secteur de la recharge est huit fois plus sujet à l'érosion que l'ensemble de la cellule hydrosédimentaire pour la période 1963-2018. Toutefois, la ligne de rivage à l'avant de la recharge s'est déplacée positivement à la suite de la mise en place de la recharge, contrairement aux secteurs adjacents qui ont subi du recul.

Les résultats du suivi pour la période 2018-2019 indiquent des phases d'abaissement et d'exhaussement qui n'affectent pas les bilans de façon importante. Nous observons cependant un léger abaissement du haut estran et une érosion de la recharge entre le début de 2018 et la fin de 2019 (figure 85). L'analyse de la largeur des plages au NMM indique une différence claire entre le site de recharge, le secteur de falaise et le secteur de la flèche littorale sans artificialité par rapport au secteur de la flèche littorale avec l'enrochement. Les premiers évoluent de façon similaire, ayant une enveloppe de variabilité plus grande et des moyennes de largeurs de plages situées entre 24,44 m et 25,66 m. Le secteur de l'enrochement possède une enveloppe de variabilité beaucoup plus faible et une largeur de plage moyenne de 15,60 m. La moyenne du déplacement du NMM est négative pour les secteurs de l'enrochement et de la recharge, la recharge affichant aussi des valeurs de recul plus importantes. Les largeurs de plage au NMM augmentent toutefois en s'éloignant du secteur de l'enrochement pour le secteur de la recharge et de la falaise meuble. Pour le secteur de la recharge, le NMM atteint la partie inférieure du haut estran et le PMSGM la partie supérieure du haut estran, ce qui indique que l'énergie des vagues est susceptible d'être dissipée pour des niveaux d'eau moyens et des niveaux d'eau élevés.



Figure 85. Recharge du banc Larocque en août 2019. Une microfalaise se dessine sur l'ensemble de la recharge.

Comparaisons avec les secteurs témoins

Les secteurs témoins complètement à l'est et à l'ouest de la recharge se comportent sensiblement de la même façon que le secteur de la recharge, étant aussi caractérisés par des phases d'abaissement et d'exhaussement. Toutefois, le secteur directement à l'est de la recharge, constitué de l'enrochement, affiche des largeurs de plages moins importantes que le secteur de la recharge. Sur ce secteur, le NMM atteint la partie supérieure du haut estran et le PMSGM atteint directement l'enrochement. Le secteur à l'est, sans artificialité, affiche des largeurs de plage légèrement inférieures au secteur de la recharge. Tout comme sur la recharge, le NMM atteint la partie inférieure du haut estran et le PMSGM la partie supérieure du haut estran. La granulométrie est aussi assez constante entre les différents profils, le haut de plage affichant un mode vers $1,5 \phi$, le haut estran vers -5ϕ et le bas estran deux modes vers 2ϕ et -5ϕ . On peut toutefois observer que le profil n°1 de la recharge affiche une granulométrie plus grossière avec un premier mode vers -4ϕ .

Évaluation de l'efficacité de la recharge de plage

L'objectif principal de la recharge du banc Larocque était de protéger de l'érosion le barachois et les infrastructures, en l'occurrence la piste cyclable, la route et le camping. Kraus & Galgano (2001) définissent un foyer d'érosion comme étant tout endroit dont le taux d'érosion est plus élevé que celui des plages adjacentes ou similaires. Ainsi, le secteur de la recharge du banc Larocque peut être considéré comme un foyer d'érosion par rapport à la cellule hydrosédimentaire. Malgré cela, le secteur conserve une largeur de plage suffisante au NMM pour dissiper l'énergie des vagues. Le niveau du PMSGM atteint la limite entre la recharge et le haut estran, ce qui signifie que des événements hydrodynamiques à haut niveau d'eau pourraient avoir un effet sur la recharge, mais que celle-ci semble malgré tout bien protéger les infrastructures.

La distribution granulométrique indique que le haut de plage est principalement constitué de sable moyen à grossier, le haut estran de cailloux et le bas estran de sable fin à moyen et de cailloux. L'asymétrie vers la fraction fine d'une distribution peut s'expliquer par la déposition de matériel plus fin sur du matériel plus grossier et donc de la présence de deux sources sédimentaires (McLaren, 1981). Une telle distribution indiquerait un « surplus » de sédiments fins (Blott & Pye, 2001). Comme la recharge est constituée de sédiments plus fins, cette asymétrie pourrait être causée par la distribution des sédiments de recharge sur le haut estran. Ceci pourrait aussi indiquer que les sédiments utilisés pour la recharge étaient trop fins par rapport à la granulométrie d'origine. La distribution bimodale sur le bas estran pourrait aussi être expliquée par la diffusion des sédiments de recharge sur le bas estran, l'un des modes correspondant au sable grossier. Cette distribution pourrait toutefois également être expliquée par la présence de sédiments de contacts glaciaires à l'est du site d'étude (Syvitski, 1992; Veillette & Cloutier, 1993). La présence de sables et de cailloux sur le haut estran est illustrée sur la figure 86.



Figure 86. Sédiments du haut estran de la plage du banc Larocque

Pour la conception, les proportions suivantes étaient proposées : moins de 5 % de particules fines, plus de 30 % de sable moyen à grossier, plus de 30 % de graviers fins à moyen et moins de 10 % de particules supérieures à 20 mm (-4,32 ϕ) (Pesca environnement, 2011). Ces proportions respectent la granulométrie de la plage actuelle, mais le matériel de recharge encore présent indique une granulométrie plus fine, étant composée de sable grossier, sans graviers.

Les premières campagnes de terrain ayant été effectuées en 2018, soit 7 ans après la recharge, il n'est pas possible de connaître l'état initial du site. Ainsi, la morphologie de la plage et la granulométrie avant et juste après la recharge ne sont pas connues. La mise en place d'un protocole de suivi avant et après les travaux de rechargement aurait permis une meilleure analyse de l'efficacité de la recharge. Somme toute, la recharge est efficace pour dissiper l'énergie des vagues pour les niveaux d'eau moyens et plus élevés. Cependant, sachant que les largeurs de plage augmentent en s'éloignant de l'enrochement et que les largeurs de plages sont inférieures pour le secteur de l'enrochement, des travaux de rechargement qui s'étendraient au secteur de l'enrochement pourraient s'avérer encore plus bénéfiques. Toujours selon la définition de Campbell et Benedet (2006), la recharge du banc Larocque est considérée comme une recharge de faible volume, ayant une densité de $\pm 57 \text{ m}^3/\text{m}$. Ainsi si une recharge était de nouveau à effectuer, une densité plus grande serait à considérer.

4.3 PLAGE MONAGHAN

4.3.1. Évolution historique

La figure 87 représente l'évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de la Boule pour la période 1965-2017, soit l'ensemble de la couverture des photos aériennes pour ce site d'étude. Le taux d'évolution y est représenté de l'ouest vers l'est. Il est possible d'observer une alternance de secteurs en accumulation, situés entre 0 m et 1,50 m par année d'évolution, et des secteurs en érosion, situés entre 0 m et -3 m/an. Un secteur affiche des valeurs de recul beaucoup plus importantes, soit entre -3 m et -7,50 m/an, sur la flèche littorale de la pointe de Moisie (figure 87 est).

Tableau 6. Taux d'évolution de la cellule hydrosédimentaire de la baie de la Boule (m/an).

	1965-1996	2001-2017	1965-2017
Cellule hydrosédimentaire	0,19	-0,21	0,03
Secteur de la recharge	0,30	1,04	0,47

Le taux d'évolution pour la période 1965-1996 est positif à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire et du secteur de la recharge (tableau 6). Les taux d'évolution pour les périodes pré-recharge (1965-1996) et post-recharge (2001-2017) sont aussi positifs pour le secteur de la recharge. Toutefois, le taux d'évolution de la période post-recharge (2001-2017) est négatif à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire, alors qu'il y a une augmentation de la vitesse de progradation pour le secteur de la recharge, de 0,30 m à 1,04 m par année. À noter que la période 1996 – 2001 car l'inclusion de la ligne de rivage de 2001 pour la période pré-recharge influençait trop les données d'évolution, et ce, à cause de la mise en place de la recharge.

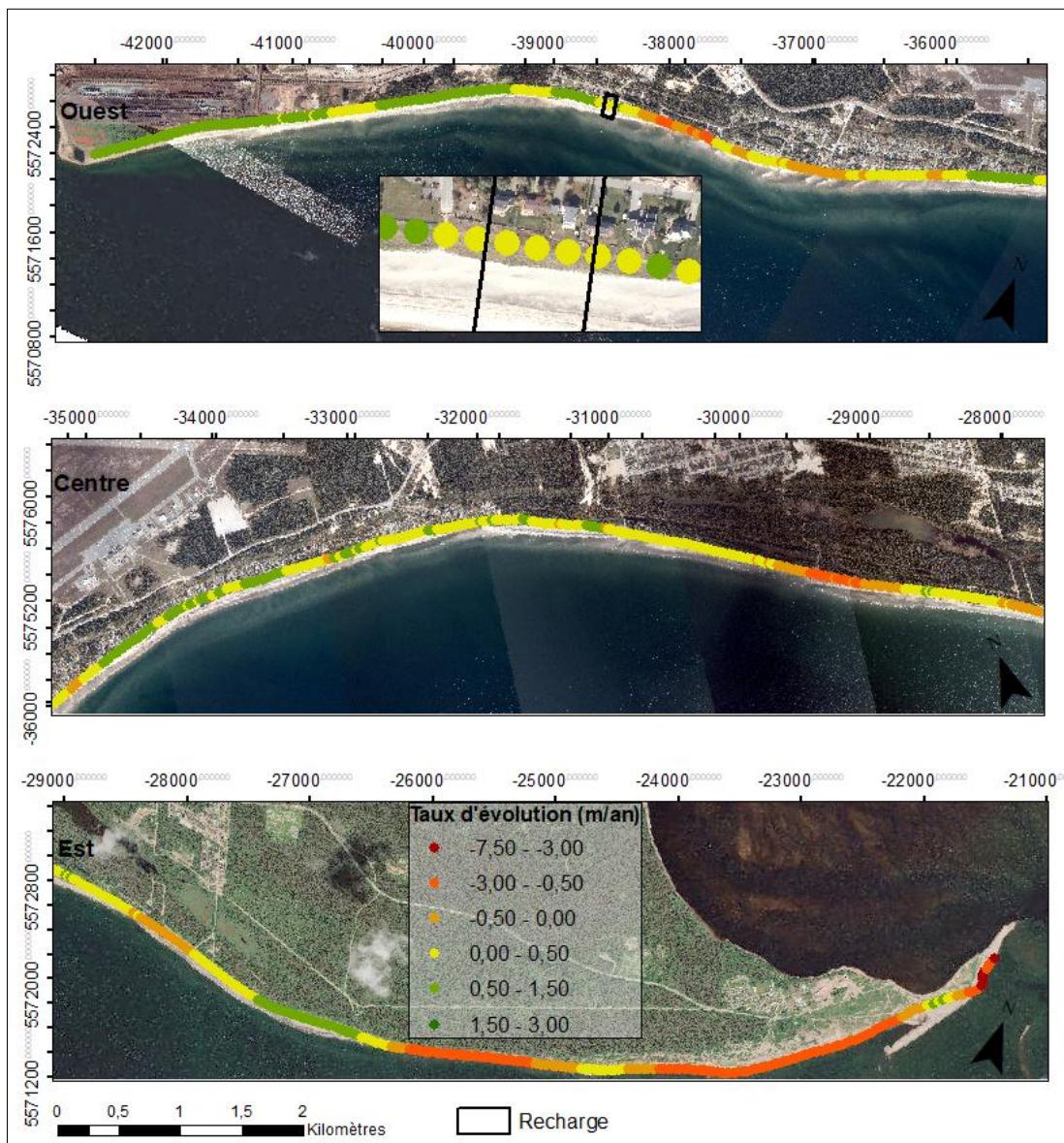


Figure 87. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de la Boule (1965-2017).

La figure 88 illustre la position de la ligne de rivage entre 1965 et 2017, pour le secteur de la recharge de plage. La recharge est délimitée par les lignes pointillées perpendiculaires aux lignes de rivages. La zone en gris représente l'enveloppe de mobilité de la ligne de rivage. Pour la période 1965-2017, le secteur de la recharge affiche une alternance de progradation et de recul de la ligne de rivage. Entre 1963 et 1979, la ligne de rivage recule à l'avant de la recharge et à l'est de celle-ci, soit aux transects 171 à 175, alors qu'elle avance pour les

transects 169 à 170 et 176 à 179. Pour l'ensemble du secteur, la ligne de rivage prograde de 1979 à 1996, puis recule entre 1996 et 2001. La recharge est effectuée en août 2000. De 2001 à 2017, il y a progradation de près de 20 m.

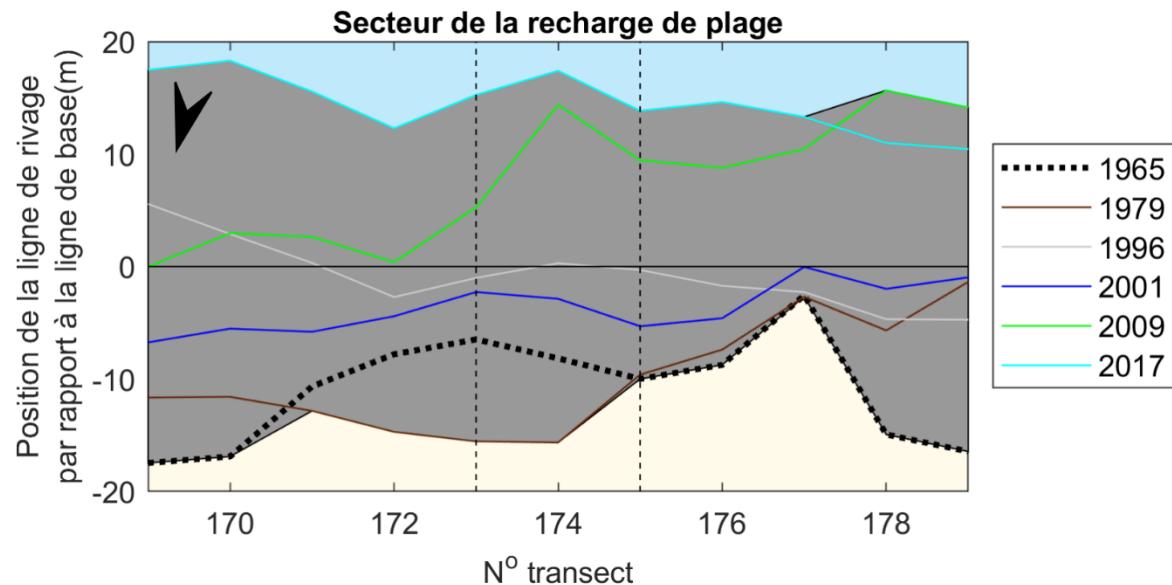


Figure 88. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de la plage Monaghan.

4.3.2. Caractérisations granulométriques

Sur le site de la plage Monaghan, 30 échantillons ont été récoltés le long de 5 profils, sur le haut et le bas estran. Les données présentées proviennent de la campagne d'échantillonnage de 2018. Les résultats sont exprimés en phi (ϕ) vu la grande variabilité de la taille des sédiments entre les sites. L'analyse des caractéristiques granulométriques s'effectue dans un premier temps en décrivant les caractéristiques générales du site, puis en divisant le secteur de la plage en trois unités morphologiques, soit le haut de plage, le haut estran et le bas estran.

Les résultats démontrent que le site d'étude possède un D_{50} moyen de $1,72 \phi$, ce qui correspond à la classe du sable moyen, près de la limite du sable fin. Comme il est possible d'observer sur la figure 89, les classes granulométriques principales sont celles du sable moyen (37,92%), du sable fin (36,51%) et du sable grossier (17,15%). La plage est donc très homogène, 99,53% du site étant constitué de sable.

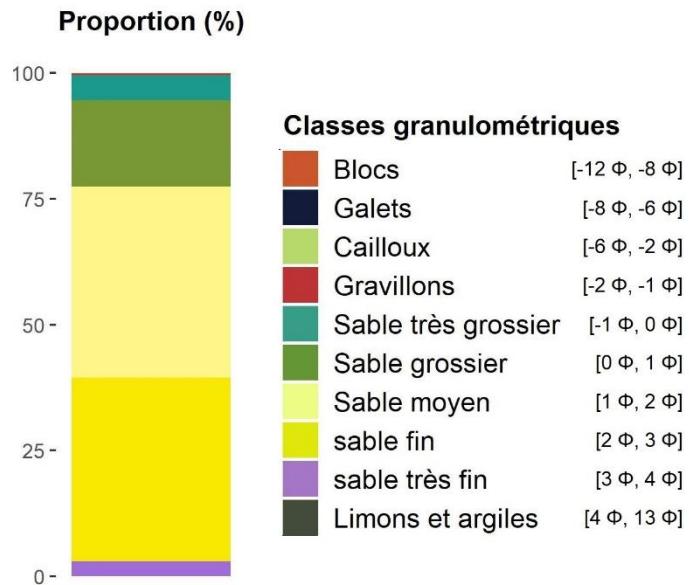


Figure 89. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude (Plage Monaghan)

Les échantillons du haut de plage affichent un D_{50} moyen de 1,56 ϕ , ce qui correspond à la classe du sable moyen. Sur la figure 90b la proportion des différentes classes indique que le sable moyen (46,92%), le sable fin (26,18%) et le sable grossier (21,42%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire, affichant une distribution unimodale avec une grande concentration des sédiments vers 1,5 ϕ (figure 90a). Ainsi, les sédiments sur le haut estran sont plutôt homogènes et fins, les échantillons étant constitués de 99,83% de sable.

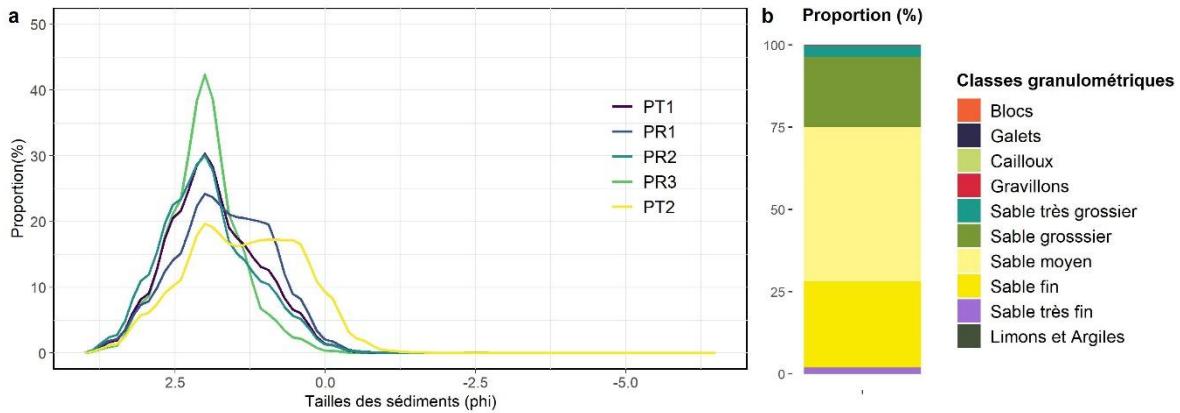


Figure 90. Distribution et classes granulométriques sur le haut de plage de la plage Monaghan

Les échantillons du haut estran affichent un D_{50} moyen de $1,47 \phi$, ce qui correspond à la classe du sable moyen. Sur la figure 91b la proportion des différentes classes indique que le sable moyen (43,50%), le sable fin (23,85%) et le sable grossier (23,79%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire, affichant une distribution unimodale avec une grande concentration des sédiments vers $1,5 \phi$ (figure 91a). Le profil PR3 affiche toutefois une granulométrie légèrement plus fine, le premier mode se situant vers $2,5 \phi$. Ainsi, les sédiments sur le haut estran sont plutôt homogènes et fins, les échantillons étant constitués de 99,58% de sable.

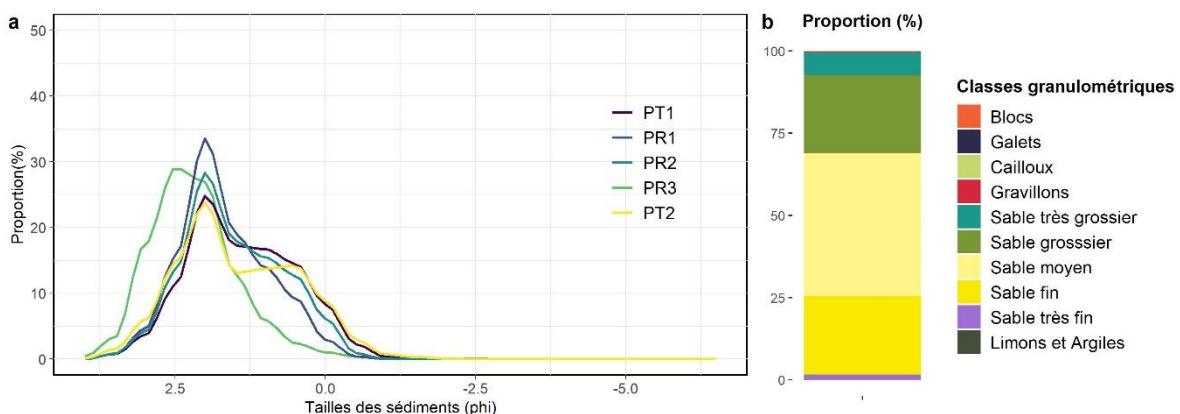


Figure 91. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran de la plage Monaghan

Les échantillons du bas estran affichent un D_{50} moyen de 1,94 ϕ , ce qui correspond à la classe du sable moyen, tout près de la limite du sable fin. Sur la figure 92b la proportion des différentes classes indique que le sable fin (48,78%), le sable moyen (31,38%) et le sable grossier (10,6%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire avec une grande concentration des sédiments vers 2 ϕ (figure 92a). Tous les profils affichent une distribution unimodale, à l'exception du profil PR3 qui affiche un deuxième mode vers 0,5 ϕ . Le profil PR3 affiche alors une granulométrie légèrement plus grossière. Cependant, ce mode est très inférieur au premier mode. Ainsi, les sédiments sur le bas estran sont plutôt homogènes et fins, les échantillons étant constitués de 99,33% de sable.

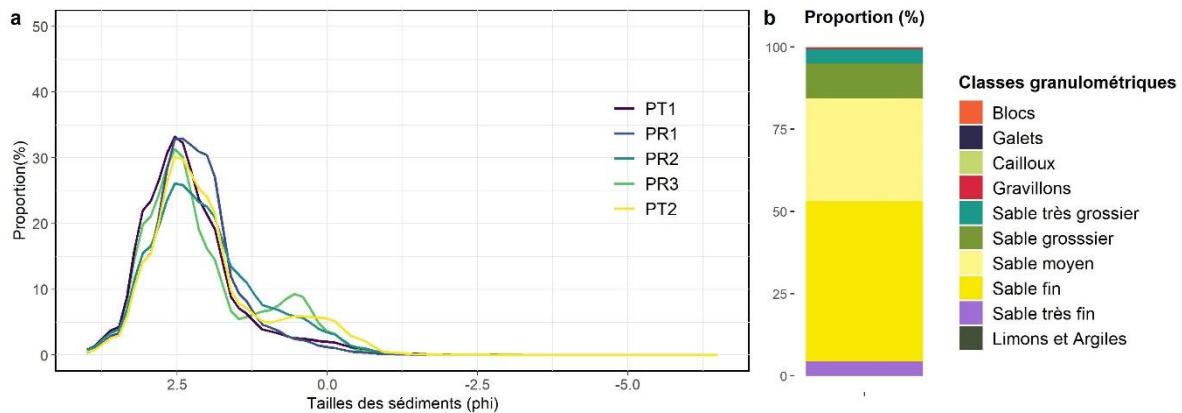


Figure 92. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran de la plage Monaghan

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des échantillons sera présentée avec les profils de plage dans la section suivante.

4.3.3. Évolution du secteur de la recharge de plage de mai 2018 à décembre 2019

Profils de plage

Sur la plage Monaghan, les profils n°s 4, 6, 8 et 11 sont analysés. Le profil n° 4, situé à 100 m à l'est de la recharge est caractérisé par un rehaussement constant du profil entre le 16 mai 2018 et le 13 décembre 2019 (figure 93). Pendant cette période, une berme se forme en haut de plage et il y a migration vers la côte de la barre sableuse situé à \pm 175 m de la ligne de

rivage. En résulte une enveloppe de mobilité de 1 à 2 m sur l'ensemble du profil, avec une enveloppe plus importante en haut de plage (figure 94). Le NMM atteint l'estran entre 60 m et 100 m de la ligne de rivage et le PMSGM le haut du profil entre 10 et 75 m de la ligne de rivage selon la date du levé. L'écart-type indique un pic de variabilité à l'endroit de la formation de la berme. Sur le haut de l'estran, le profil minimum se retrouve au-dessus d'un écart-type de la moyenne, ce qui est attribuable aux levés du 16 mai et du 15 juillet 2018 qui représente un profil beaucoup plus bas que pour les autres levés, sans formation de berme. Cependant, l'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données.

La taille des sédiments est plus fine sur le haut de plage et sur le bas de l'estran et plus grossière sur la crête de la berme (figure 94). Toutefois, la granulométrie est très homogène. Le haut de plage est caractérisé par des sédiments des classes de sables moyens et sables fins. La berme fait partie de la classe du sable grossier. Le bas estran est constitué de sable fin.

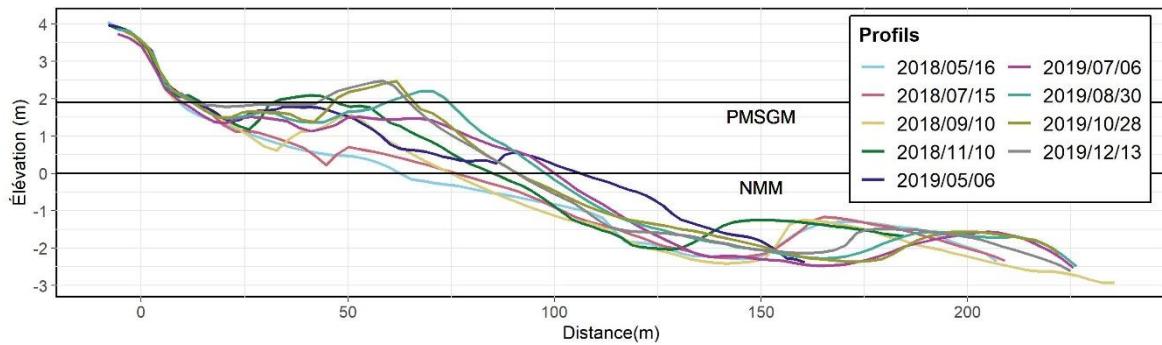


Figure 93. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 4 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

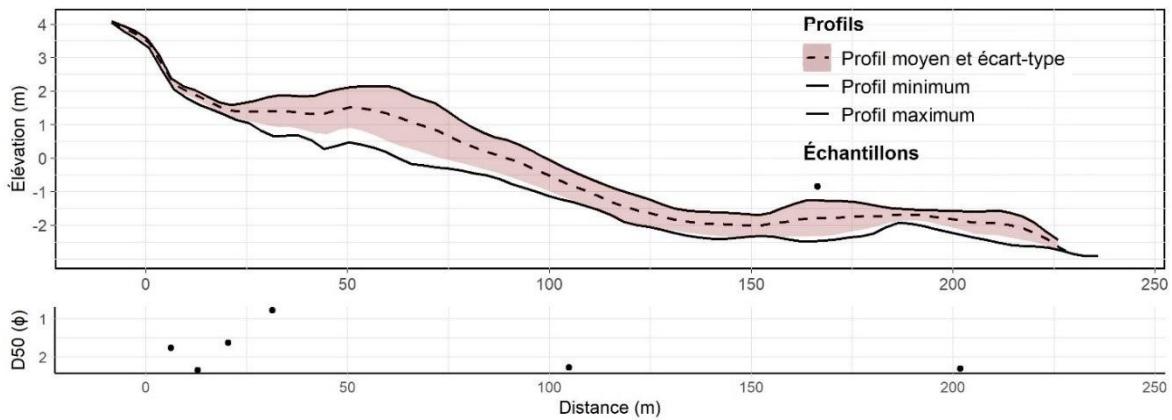


Figure 94. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 4 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 11, situé à 100 m à l'ouest de la recharge est caractérisée par un abaissement du profil entre le 16 mai 2018 et le 10 novembre 2018 (figure 95). Le profil se relève ensuite pendant l'été 2019, où il y a formation d'une berme en haut de plage. Il y a ensuite migration vers la côte de la première barre située à ± 125 m de la ligne de rivage. En résulte une enveloppe de mobilité de 1 à 2 m sur l'ensemble du profil, avec une enveloppe plus importante en haut de plage (figure 96). Le NMM atteint l'estran entre 50 m et 90 m de la ligne de rivage et le PMSGM le haut de l'estran entre 10 et 50 m de la ligne de rivage. L'écart-type indique deux pics de variabilité, le premier à l'endroit de la formation de la berme et le deuxième à l'endroit de la migration de la barre sableuse. Le profil minimum se retrouve au-dessus d'un écart-type de la moyenne, ce qui est attribuable à la différence entre les levés de 2018 et de 2019, alors qu'il y a formation d'une berme et migration de la barre sableuse. Cependant, l'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approche d'une distribution normale des données.

La taille des sédiments est plus grossière sur le haut de plage sur la crête de la berme et plus fine sur le bas de l'estran (figure 96). Cependant, la granulométrie est très homogène. Le haut de plage et la berme sont caractérisés par des sédiments de la classe du sable moyen. Le bas estran est constitué de sable fin

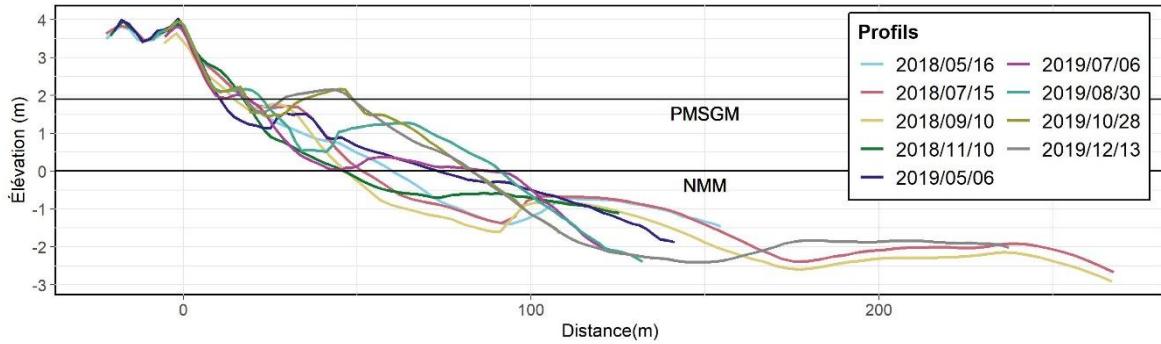


Figure 95. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 11 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

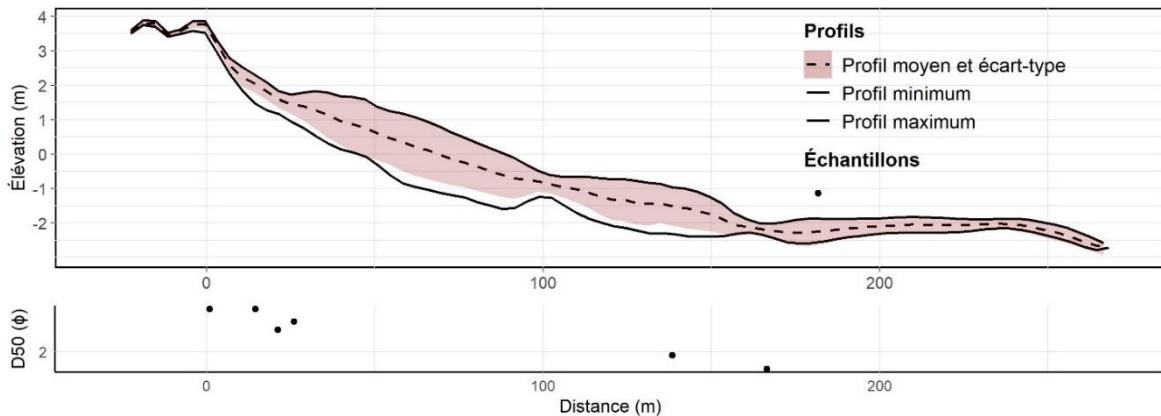


Figure 96. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 11 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 6, situé sur la recharge est caractérisé par un rehaussement constant du profil entre le 16 mai 2018 et le 13 décembre 2019 (figure 97). Pendant cette période, une berme se forme en haut de plage et la barre sableuse situé à ± 150 m de la ligne de rivage migre vers la côte. En résulte une enveloppe de mobilité de 1 à 2,5 m sur l'ensemble du profil, avec une enveloppe plus importante en haut de plage (figure 98). Le NMM atteint l'estran entre 60 m et 100 m de la ligne de rivage et le PMSGM le haut de l'estran entre 10 et 60 m de la ligne de rivage. L'écart-type indique un pic de variabilité à l'endroit de la formation de la berme. Le profil minimum se retrouve au-dessus d'un écart-type de la moyenne, ce qui est attribuable à la différence entre les levés de 2018 et de 2019, alors qu'il y a formation d'une berme et

migration de la barre sableuse. Cependant, l'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données.

La taille des sédiments est plus grossière sur le haut de plage et sur la berme et plus fine sur le bas estran (figure 98). Toutefois, la granulométrie est très homogène. Tous les échantillons font partie de la classe du sable moyen, à l'exception de l'échantillon le plus au large qui fait partie de la classe du sable fin.

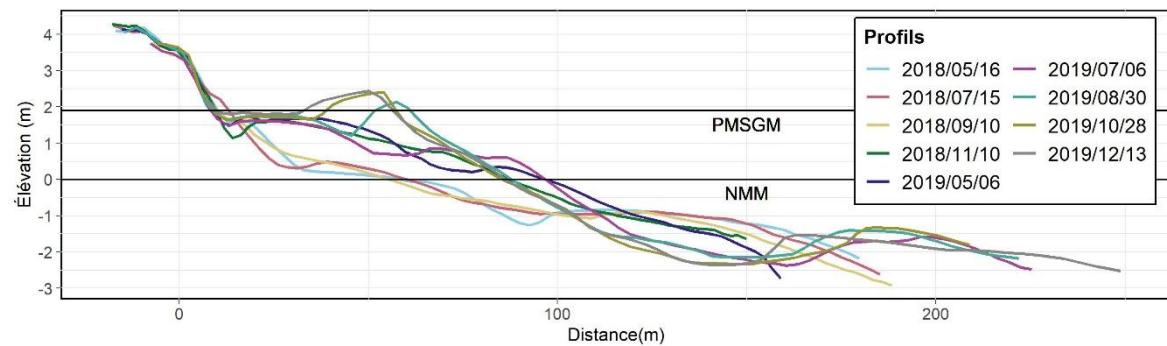


Figure 97. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 6 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

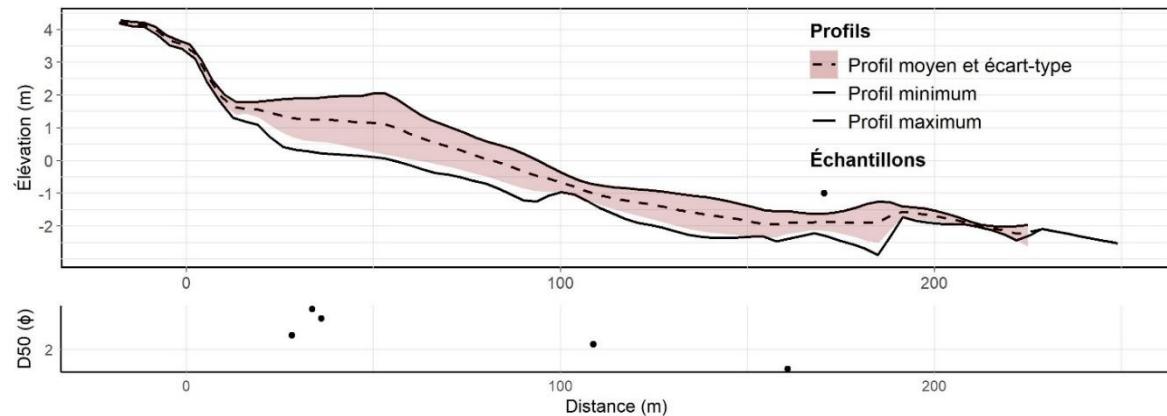


Figure 98. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 6 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 8, situé sur la recharge est caractérisé par un rehaussement constant du profil entre le 16 mai 2018 et le 13 décembre 2019 (figure 99). Pendant cette période, une berme

se forme en haut de plage et la barre sableuse situé à \pm 125 m de la ligne de rivage migre vers la côte. En résulte une enveloppe de mobilité de 1 à 2,5 m sur l'ensemble du profil, avec une enveloppe plus importante en haut de plage (figure 100). Le NMM atteint l'estran entre 50 m et 100 m de la ligne de rivage et le PMSGM le haut de l'estran entre 10 m et 60 m de la ligne de rivage. L'écart-type indique un pic de variabilité à l'endroit de la formation de la berme. Le profil minimum se retrouve au-dessus d'un écart-type de la moyenne, ce qui est attribuable à la différence entre les levés de 2018 et de 2019 alors qu'il y a formation d'une berme et migration de la barre sableuse. Cependant, l'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données.

La taille des sédiments est plus grossière sur le haut de plage et sur la berme et plus fine sur le bas estran (figure 100). Par contre, la granulométrie est très homogène. Les échantillons du haut de plage et de la berme sont constitués de sables moyens et de sables grossiers. Les échantillons du bas estran sont constitués de sables moyens et de sables fins.

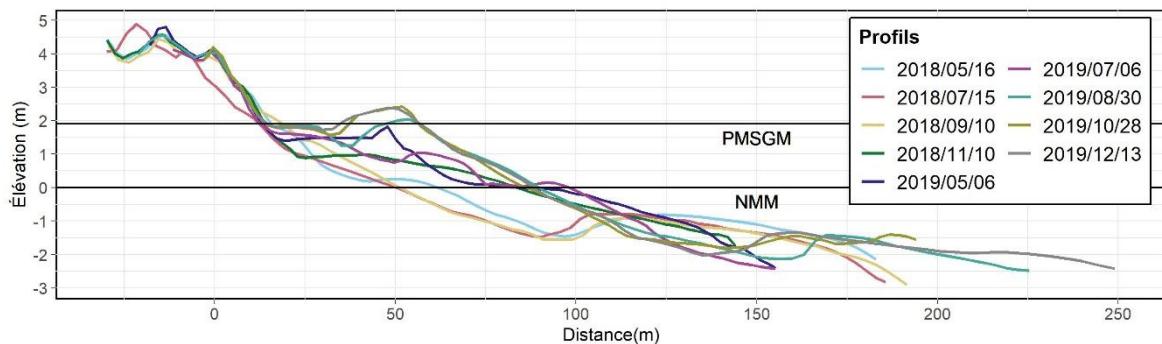


Figure 99. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 8 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

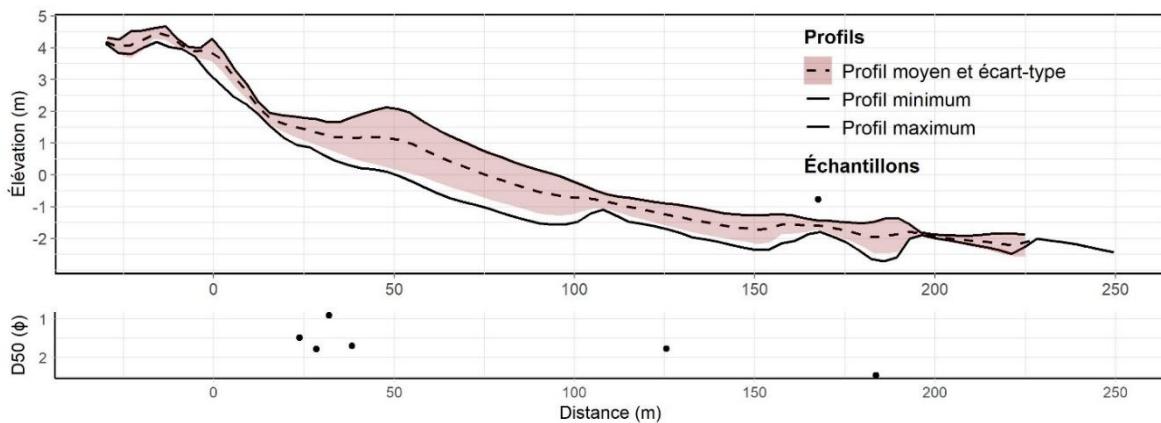


Figure 100. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 8 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

Largeurs de plage

Afin d'analyser les variations des largeurs de plages, le secteur de la plage Monaghan a été subdivisé en deux sous-secteurs. Le secteur 1 est situé à l'est du site, qui comprend la recharge, consiste en l'évolution des profils n°s 1 à 11. Le secteur 2 est situé à l'ouest du site et consiste en l'évolution des profils n°s 12 à 23. Sur la figure 101, les lignes pointillées indiquent le secteur de la recharge, soit la recharge et 100 m de part et d'autre. La distance par rapport à la côte est calculée à partir de la ligne de rivage.

Le secteur 1 est caractérisé par une côte à terrasse de plage non artificialisée. La recharge se trouve dans ce secteur entre les profils n°s 6 et 8. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -17,21 m à 43,32 m entre le 16 mai 2018 et le 12 décembre 2019. Ces déplacements sont calculés pour chaque isoligne du NMM par rapport à la période de référence correspondant au premier levé, soit le 16 mai 2018. La moyenne de ces déplacements est de 12,12 m, ce qui indique une augmentation de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 101, on aperçoit que les isolignes du NMM sont très variables de façon parallèle à la côte. Toutefois, on voit aussi que les largeurs de plage sont en augmentation par rapport à l'isoligne du premier levé, principalement à partir du 10 novembre 2018. Le bilan du déplacement du NMM par rapport à la ligne de rivage est positif

pour les profils n°s 3 à 11 et négatif pour les profils n°s 1 et 2. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 46,10 m à 107,39 m. La moyenne de ces largeurs est de 82,44 m.

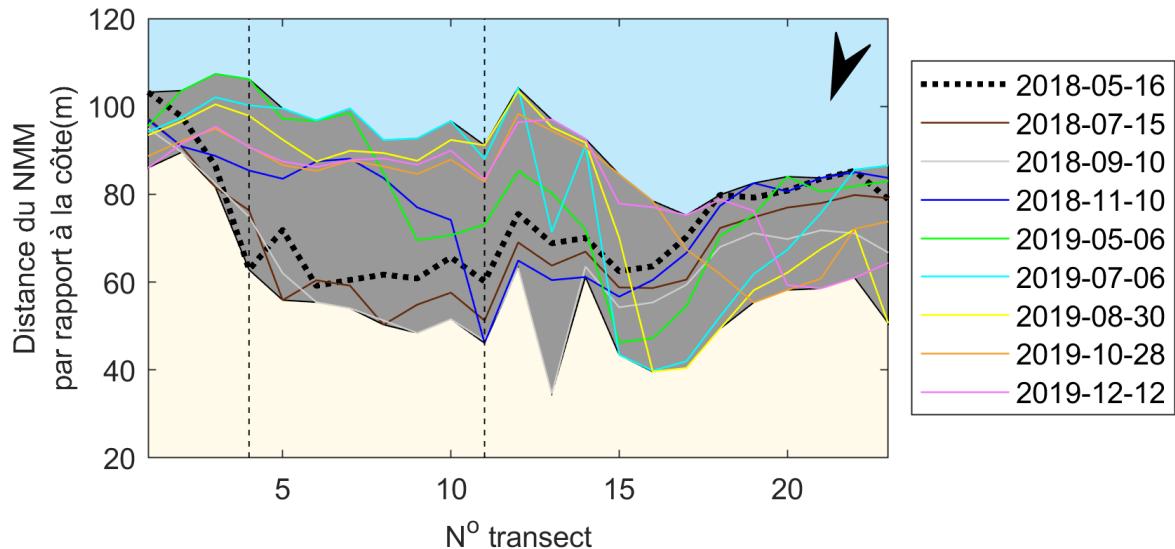


Figure 101. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de la plage Monaghan

Le secteur 2 est caractérisé par une côte à terrasse de plage non artificialisée. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -34,21 m à 28,72 m entre le 16 mai 2018 et le 12 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -4,62 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 101, on aperçoit que les isolignes du NMM sont très variables dans le temps et de façon parallèle à la côte. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est positif pour les profils n°s 12 à 17 et négatifs pour les profils n°s 18 à 24. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 34,62 m à 104,22 m. La moyenne de ces largeurs est de 70,76 m.

Bilans sédimentaires

Les évolutions morphologiques mesurées sur la plage Monaghan dévoilent une plage en accumulation. Les cartes de différentiels d’élévation entre mai 2018 et octobre 2019 montrent que l’est de la plage s’exhausse de 1 à 3 m alors que l’ouest s’exhausse en haut de plage, mais s’abaisse de jusqu’à 2 m sur le haut estran (figure 102).

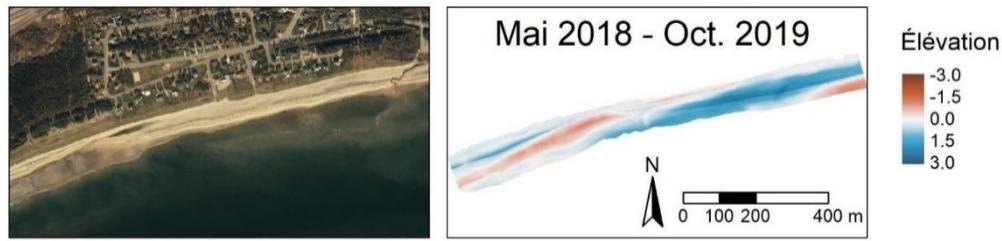


Figure 102. Différentiel d’élévation sur le secteur de la recharge de la plage Monaghan entre mai 2018 et octobre 2019.

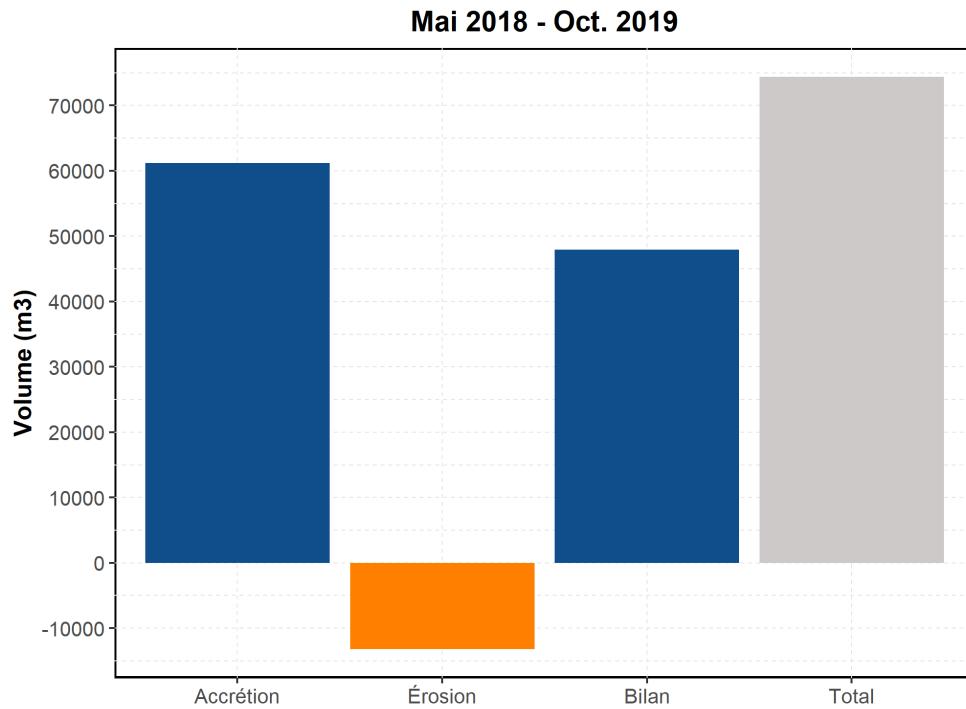


Figure 103. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage Monaghan entre mai 2018 et octobre 2019.

Pendant la période du suivi, le secteur est tout de même caractérisé par un bilan sédimentaire excédentaire de $\pm 48\,000\text{ m}^3$ (figure 103).

4.3.4. Causes explicatives de l'évolution du secteur

Évolution de la plage et de la recharge au fil des années

L'évolution historique du secteur indique que la cellule hydrosédimentaire a évolué de façon positive de 1965 à 1996, puis négative de 2001 à 2017, soit la période depuis l'implantation de la recharge. Pour cette même période, il y a eu une accélération de l'accumulation sédimentaire du secteur de la recharge, passant de 0,30 m par année de 1965 à 1996 à 1,04 m par année de 2001 à 2017. Ainsi, le secteur de la recharge affiche une tendance inverse à celui du reste de la cellule hydrosédimentaire, ce qui indique une certaine efficacité de la recharge de plage. Le secteur n'est généralement pas sujet à l'érosion, mais peut néanmoins être sujet à une grande mobilité caractérisée par des périodes successives d'érosion et d'accumulation (figure 88). L'évolution des largeurs de plage au NMM indique aussi que les largeurs de plage peuvent être très variables de façon parallèle à la côte, ce qui signale que certains secteurs pourraient se détériorer, et ce, même si la plage s'avère généralement en accumulation. De plus, l'évolution historique indique une position de la ligne de rivage en 2017 d'environ 20 m plus au large qu'en 2000 pour le secteur de la recharge. La ligne de rivage étant plus près des infrastructures en 2001 et la grande variabilité spatiale et temporelle de la ligne de rivage pourraient avoir justifié la mise en place d'une recharge, très ponctuelle, dans un secteur pourtant en accumulation à l'échelle historique. Comme le montrent les images obliques de 2000, le secteur est bordé d'une microfalaise et implique donc une phase d'érosion avant la mise en place de la recharge en août 2000. La plage est aussi relativement étroite.

Les profils de plages indiquent tous une grande mobilité de l'enveloppe des profils entre 2018 et 2019, caractérisée par un exhaussement constant des profils de plages. Ainsi, une importante accumulation sédimentaire s'effectue sur le site, menant à la création d'une berme et à l'élargissement du haut de plage. Les profils indiquant une migration des barres sableuses

vers la côte, l'accolement de celles-ci sur la plage pourrait expliquer la grande accumulation sédimentaire.

Pour l'ensemble de la période d'étude, les largeurs de plage au NMM augmentent de façon importante, confirmant que le milieu est en accumulation (figure 104). Pour ce site, le NMM atteint l'estran vers 90 m à 100 m de la ligne de rivage et le PMSGM la partie supérieure de l'estran, en deçà du sommet de la berme.



Figure 104. Plage Monaghan en août 2019

Comparaison avec les secteurs témoins

Tout le secteur étant en accumulation, les secteurs témoins se comportent de façon assez similaire au secteur de la recharge. Cependant, les profils indiquent une hauteur du haut de plage légèrement plus élevée pour les profils sur la recharge, particulièrement sur le profil n° 8, que sur les profils témoins. Cette élévation plus importante est due à la recharge qui est toujours présente sous la végétation (figure 105). À l'est de la recharge, le secteur est aussi caractérisé par un exhaussement constant de la plage et une grande augmentation des largeurs de plages. À l'ouest, le profil s'abaisse en 2018, mais se rehausse en 2019 pour atteindre une morphologie similaire à celle des autres profils. Le secteur à l'ouest est toutefois moins en

accumulation que le secteur de la recharge, tandis que le secteur est affiche des augmentations de largeur de plage au NMM un peu moindres que le secteur de la recharge. Le NMM atteint aussi l'estran vers 90 m à 100 m de la ligne de rivage et le PMSGM la partie supérieure de l'estran, en deçà du sommet de la berme pour l'ensemble des profils.



Figure 105. Secteur de la recharge. La recharge est toujours présente sous la végétation.

Évaluation de l'efficacité de la recharge de plage

Les objectifs principaux de la recharge étaient de favoriser la formation d'une importante réserve de sable capable de faire face aux tempêtes d'automne, de maintenir l'équilibre dynamique et sédimentaire de la plage et de protéger des résidences. Le secteur de la recharge est grandement en accumulation devant la recharge et de part et d'autre de celle-ci. La recharge semble avoir permis de stabiliser le milieu, toutefois la migration des barres entraîne une mobilisation de sédiments qui est d'ampleur beaucoup plus importante que la recharge, ce qui rend difficile l'interprétation des données sur ce site. Le volume de recharge estimé de 1500 m³ à 2000 m³ en fait la plus petite recharge parmi les sites d'étude. La longueur de seulement 50 m en fait aussi une recharge très ponctuelle qui pourrait difficilement avoir un impact sur tout le secteur d'étude d'une longueur de ± 1 km. Par contre, advenant des

tempêtes à haut niveau d'eau, l'exhaussement du haut de plage occasionnée par la mise en place de la recharge pourrait limiter l'effet des tempêtes. On peut observer sur la figure 106 qu'au moment de l'implantation de la recharge, la plage était beaucoup moins large, ce qui a pu permettre de limiter ponctuellement l'effet des vagues générées lors des tempêtes.



Figure 106. Photo oblique de la recharge en 2000, après la mise en place de la recharge.

Le suivi du site a débuté en 2018, soit 18 ans après la recharge réalisée en 2000. L'état initial du site, la morphologie de plage ainsi que la granulométrie de la plage et de la recharge avant et juste après la recharge ne sont donc pas connus. La mise en place d'un protocole de suivi avant et après les travaux de rechargement aurait permis une meilleure analyse de l'efficacité de la recharge.

4.4 PLAGE DE LA MARTINIQUE

4.4.1. Évolution historique

La figure 107 représente l'évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance pour la période 1963-2019, soit l'ensemble de la couverture des photos aériennes pour ce site d'étude. Le taux d'évolution y est représenté du nord vers le sud. De façon

générale, la cellule hydrosédimentaire est en accumulation dans le centre de la baie, jusqu'à 5 m par année et en érosion aux extrémités de la baie. Ceci s'explique notamment par la présence d'une dérive littorale convergente vers le centre de la baie. Entre le centre et les extrémités, la ligne de rivage est plutôt stable. Les taux de recul se situent généralement entre 0 m et -0,5 m par année. Une partie du secteur nord atteint cependant des valeurs négatives allant jusqu'à -1,50 m par année. La recharge se situe dans ce secteur.

Tableau 7. Taux d'évolution de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance (m/an).

	1963-2008	2008-2019	1963-2019
Cellule hydrosédimentaire	1,06	-0,81	0,70
Secteur de la recharge	-0,19	0,16	-0,13

Le taux d'évolution à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire est positif pour la période 1963-2019 (tableau 7), avec un taux de déplacement moyen de 0,70 m par année. À l'échelle du secteur de la recharge, le taux est toutefois négatif avec un taux moyen de déplacement de -0,13 m par année. Il y a inversion des tendances pour la cellule hydrosédimentaire et le secteur de la recharge entre la période pré-recharge (1963-2008) et post-recharge (2008-2019). La cellule hydrosédimentaire était en accumulation pour la période pré-recharge et est maintenant en érosion pour la période post-recharge. Le secteur de la recharge était en érosion pour la période pré-recharge et est maintenant en accumulation. Dans le cas de la recharge, il y a changement d'indicateur de la ligne de rivage, passant de la limite de la végétation dense à la limite côté mer de la recharge.

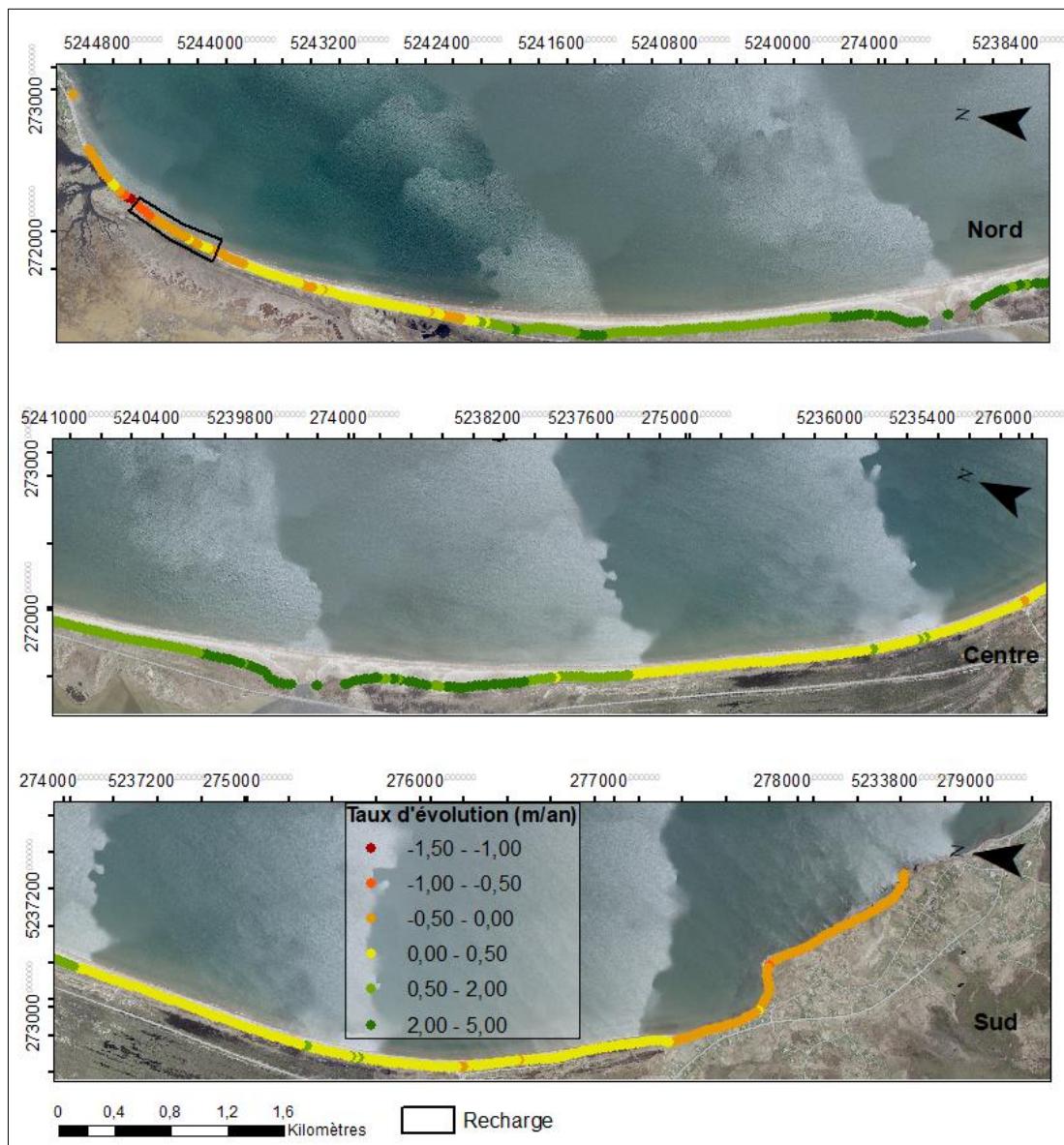


Figure 107. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance.

La figure 108 illustre la position de la ligne de rivage entre 1963 et 2019, pour le secteur de la recharge de plage. La recharge est délimitée par les lignes pointillées perpendiculaires aux lignes de rivage. La zone en gris représente l'enveloppe de mobilité de la ligne de rivage. Le programme de recharge pour ce secteur a débuté en 2008. De façon générale, les lignes de rivage indiquent une érosion soutenue entre 1963 et 2001, suivi d'une stabilisation pour l'année 2008, année de l'implantation de la recharge. La ligne de rivage de 2015 avance

devant la recharge et au sud de la recharge, soit aux transects n°s 578 à 582. En 2019, la ligne de rivage avance toujours pour une partie de la recharge, soit des transects n°s 563 à 571, mais recule pour les transects n°s 571 à 578 de la recharge et au sud, aux transects n°s 578 à 582.

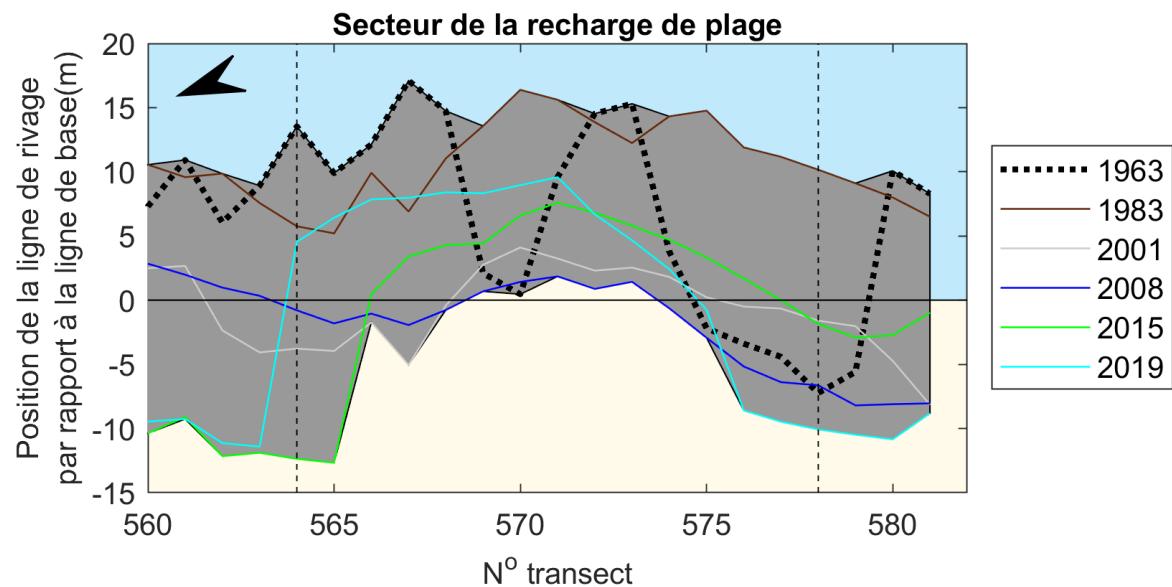


Figure 108. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de la plage de La Martinique.

4.4.2. Caractérisations granulométriques

Sur le site de la plage de La Martinique, 36 échantillons ont été récoltés le long de 6 profils, sur le haut et le bas estran. Les données présentées proviennent de la campagne d'échantillonnage de 2018. Les résultats sont exprimés en phi (ϕ) vu la grande variabilité de la taille des sédiments entre les sites. L'analyse des caractéristiques granulométriques s'effectue dans un premier temps en décrivant les caractéristiques générales du site, puis en divisant le secteur de la plage en trois unités morphologiques, soit le haut de plage, le haut estran et le bas estran.

Les résultats démontrent que le site d'étude possède un D_{50} moyen de $1,86 \phi$, ce qui correspond à la classe du sable moyen, près de la limite du sable fin. Comme il est possible d'observer sur la figure 109, les classes granulométriques principales sont celles du sable fin

(40,17%), du sable moyen (39,39%) et des cailloux (16,73%). La plage est donc plutôt homogène, 81,83% du site étant constitué de sable, mais contient aussi du matériel plus grossier.

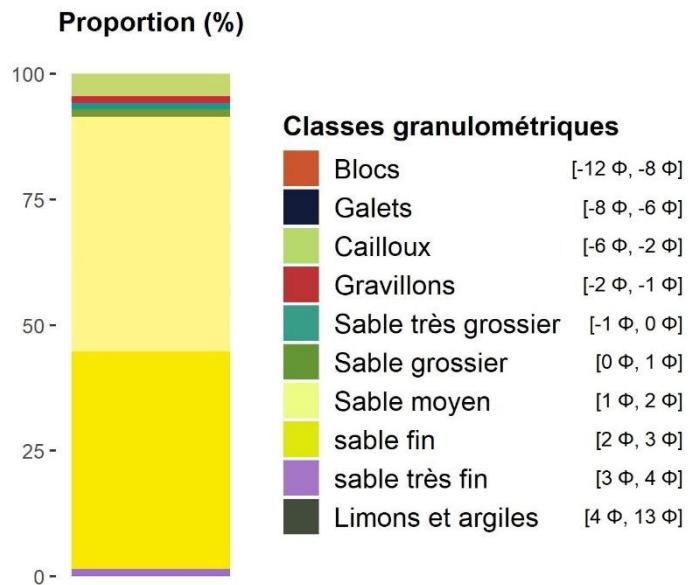


Figure 109. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude (Plage de La Martinique)

Les échantillons du haut de plage affichent un D_{50} moyen de 1,18 φ, ce qui correspond à la classe du sable moyen. Sur la figure 110b la proportion des différentes classes indique que le sable fin (40,17%), le sable moyen (39,39%) et les cailloux (16,73%) sont les classes granulométriques dominantes. Les profils PT1 et PR1 sont absents, le haut de plage étant respectivement situé sur un enrochement et un remblai par-dessus un enrochement. La distribution indique que les profils PR3 et PT2, affichent une distribution unimodale avec une grande concentration des sédiments vers 2,5 φ (figure 110a). Les profils PR2 et PR4 affichent aussi une concentration de sédiments vers 2,5 φ, mais affichent une distribution bimodale avec un deuxième mode entre -4,5 et -5 φ. Ainsi, les sédiments sur le haut estran sont plutôt homogènes et fins, avec 81,83% de sable, mais sont aussi caractérisés par la présence de sédiments plus grossiers. À noter que le matériel de recharge, bien que généralement fin, contient aussi visuellement du matériel plus grossier sur le haut de plage.

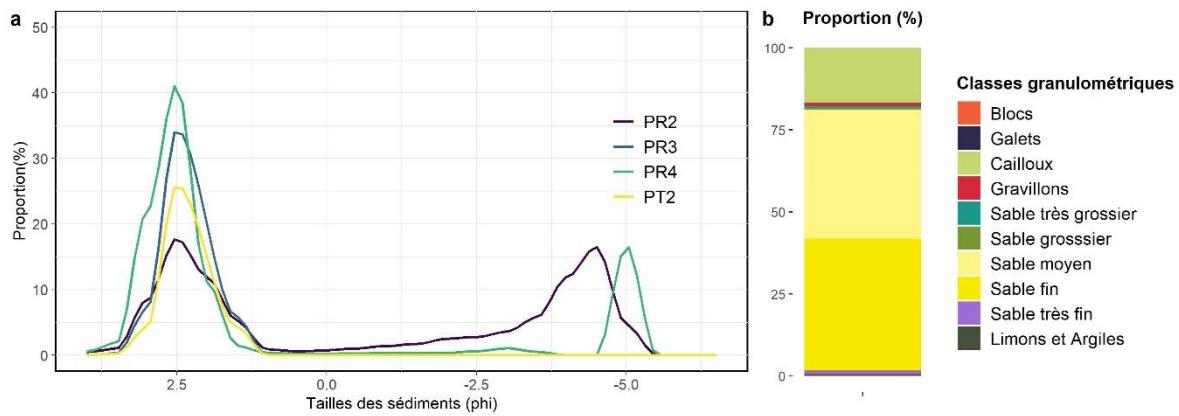


Figure 110. Distribution et classes granulométriques sur le haut de plage de La Martinique

Les échantillons du haut estran affichent un D_{50} moyen de $1,84 \phi$, ce qui correspond à la classe du sable moyen. Sur la figure 111b la proportion des différentes classes indique que le sable moyen (56,06%) et le sable fin (35,70%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire, affichant une distribution unimodale avec une grande concentration des sédiments vers 2ϕ (figure 111a). Ainsi, les sédiments sur le haut estran sont plutôt homogènes et fins, les échantillons étant constitués de 95,90% de sable.

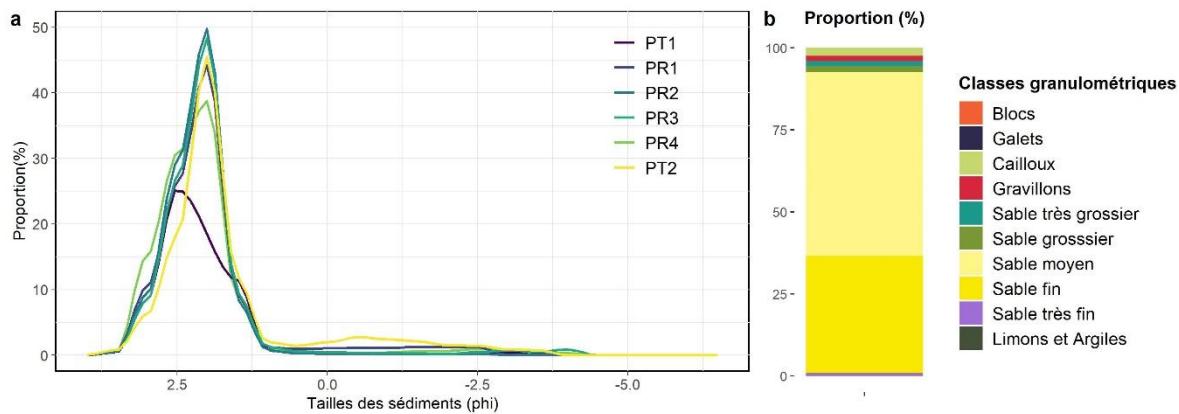


Figure 111. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran de la plage de La Martinique

Les échantillons du bas estran affichent un D_{50} moyen de $2,02 \phi$, ce qui correspond à la classe du sable fin, près de la limite du sable moyen. Sur la figure 112b la proportion des différentes classes indique que le sable fin (48,20%) et le sable moyen (42,83%) sont les

classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire, affichant une distribution unimodale avec une grande concentration des sédiments vers 2ϕ (figure 112a). Ainsi, les sédiments sur le bas estran sont plutôt homogènes et fins, les échantillons étant constitués de 95,32% de sable.

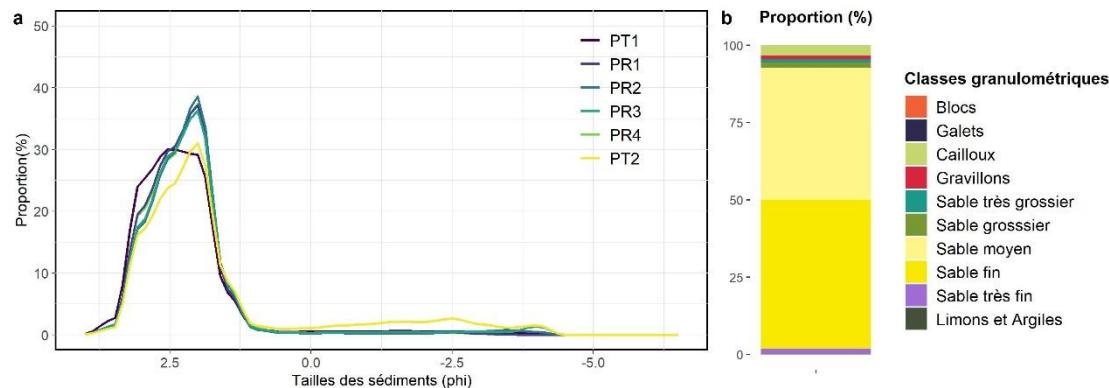


Figure 112. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran de la plage de La Martinique

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des échantillons sera présentée avec les profils de plage dans la section suivante.

4.4.3. Évolution du secteur de la recharge de plage de mai 2018 à décembre 2019

Profils de plage

Sur la plage de La Martinique, les profils n°s 16, 19, 21 et 25 sont analysés. Le profil n° 16, situé à 100 m au nord de la recharge est caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement (figure 113). Pour la période du 17 mai 2018 au 27 décembre 2018, le profil s'abaisse sur le haut estran et s'élève sur le bas estran. Il semble ainsi y avoir un transfert des sédiments du haut estran vers le bas estran. Entre décembre 2018 et mai 2019, il y a exhaussement du profil sur le haut estran et déplacement de la flexure vers le large. Une barre se forme à ± 30 m de la ligne de rivage et le bas estran se relève entre les distances de 60 m à 80 m de la ligne de rivage. Cette accumulation concorde avec le bilan sédimentaire positif lié à la recharge ponctuelle de décembre 2018. La période du 9 mai au 4 décembre 2019 est

marquée par un abaissement important du haut estran et un léger abaissement du bas estran. Du 4 décembre au 25 décembre 2019, le profil s'élève sur le haut estran et sur le bas estran.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de $\pm 0,5$ m sur le bas estran et de ± 1 m sur le haut estran (figure 114). Aussi, la flexure du profil moyen se situe à ± 25 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage de 25 m. Le NMM atteint le haut de l'estran près de la flexure et le PMSGM le haut estran près de la recharge (figure 113). L'écart-type indique un pic de variabilité sur le haut estran. L'écart-type couvre presque l'ensemble de l'enveloppe de variabilité du profil, ce qui indique que l'ensemble des levés s'approchent d'une distribution normale des données.

La taille des sédiments est très constante tout le long du profil avec une légère tendance à l'affinement du haut estran vers le bas estran (figure 114). Tous les échantillons se situent à la limite du sable moyen et du sable fin.

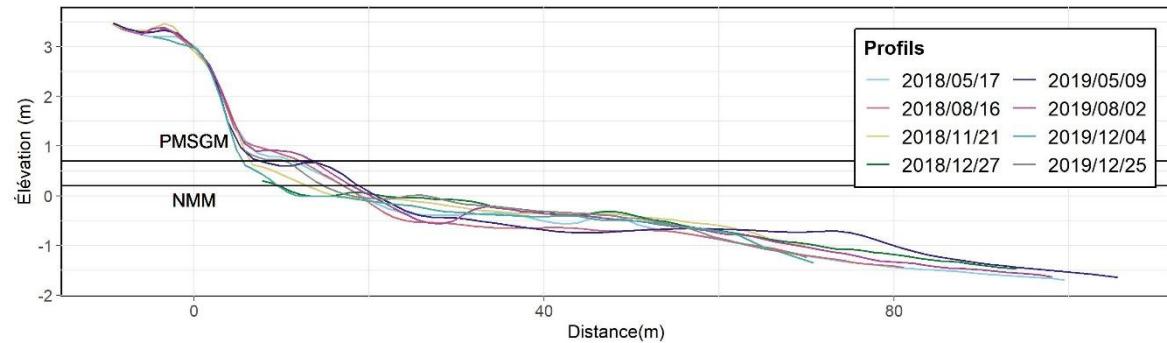


Figure 113. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 16 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

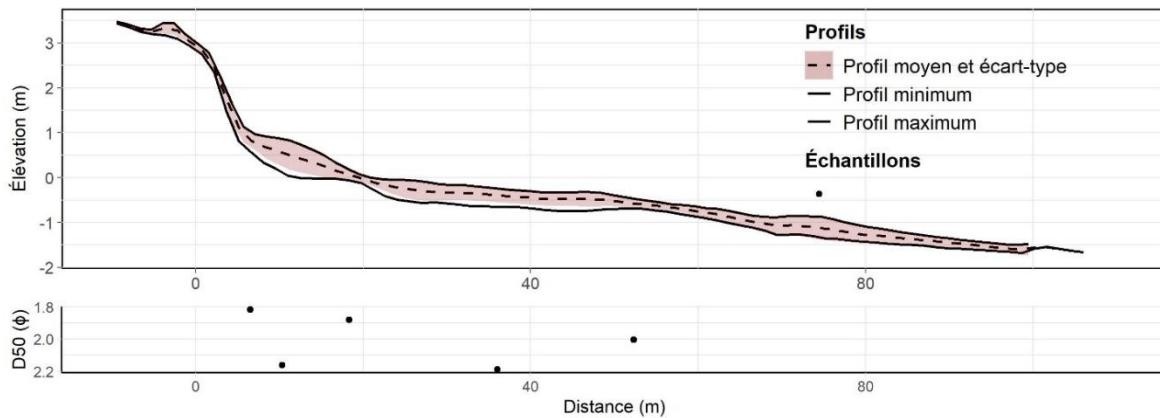


Figure 114. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 16 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 25, situé à 100 m au sud de la recharge est caractérisé par des phases d’abaissement et d’exhaussement (figure 115). Pour la période du 17 mai 2018 au 27 décembre 2018, le profil s’abaisse sur le haut estran et s’élève sur le bas estran. Il semble ainsi y avoir un transfert des sédiments du haut estran vers le bas estran. Aussi, il semble y avoir un léger exhaussement de la dune entre août et novembre 2018. Entre le 27 décembre 2018 et le 4 décembre 2019, il y a une érosion graduelle de la dune et exhaussement du haut estran et abaissement du bas estran. Entre le 4 et le 25 décembre 2019, il y a une légère accumulation au pied de la dune, léger abaissement de haut estran et léger exhaussement du bas estran. L’accumulation au sommet de la dune en novembre 2018 et au pied de la dune en décembre 2019 est toutefois probablement due à une accumulation de neige, tel qu’observé sur les caméras de suivi.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de 0,5 m à 1 m sur l’ensemble du profil (figure 116). Aussi, la flexure du profil moyen se situe à ± 45 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage de 45 m. Le NMM atteint le haut de l’estran près de la flexure et le PMSGM la mi-hauteur de l’estran (figure 115). L’écart-type indique un pic de variabilité sur le haut estran, près de la flexure, et au sommet de la dune. L’écart-type couvre presque l’ensemble de l’enveloppe de variabilité du profil, ce qui indique que l’ensemble des levés

s'approchent d'une distribution normale des données. Ce profil ne contient pas d'analyse granulométrique.

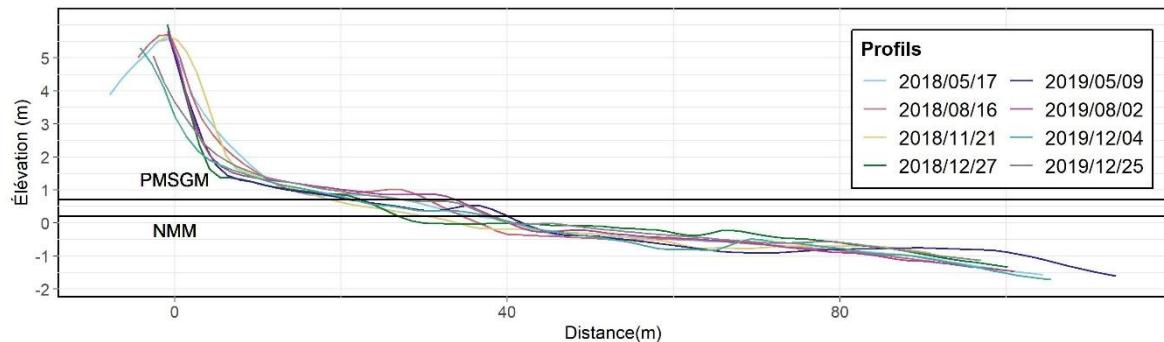


Figure 115. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 25 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

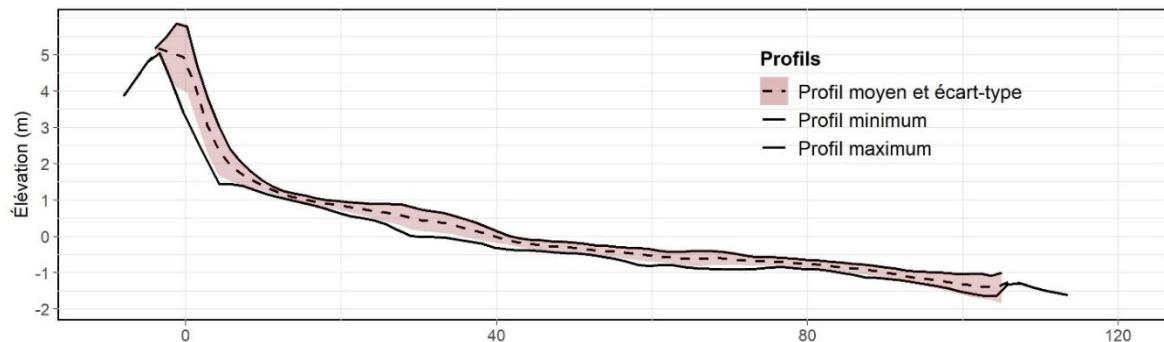


Figure 116. Enveloppe et profil moyen du profil n° 25 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 19, situé sur la recharge est caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement (figure 117). Pour la période du 17 mai 2018 au 27 décembre 2018, le profil s'abaisse sur le haut estran et reste stable sur le bas estran. La recharge en haut de plage est en partie érodée, reculant de $\pm 3,5$ m. Pour la période du 27 décembre 2018 au 2 août 2019, il y a un fort exhaussement du haut estran, accompagné par la reformation de la berme érodée en 2018. Le bas estran reste plutôt stable jusqu'à une distance de ± 45 m de la ligne de rivage, puis s'abaisse. Pour cette même période, la recharge reste stable. Comme la recharge ponctuelle de décembre 2018 est effectuée sur le secteur sud de la recharge, celle-ci n'est pas

présente sur ce profil. Pour la période du 2 août au 25 décembre 2019, le profil s'abaisse légèrement sur le haut estran et s'exhausse légèrement sur le bas estran. À partir du 4 décembre 2019, la recharge effectuée en septembre 2019 est visible sur le profil, qui affiche une avancée de ± 3 m retrouvant sa position de mai 2018.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de 0,5 m à 1,5 m sur l'ensemble du profil (figure 118). Aussi, la flexure du profil moyen se situe à ± 25 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage de 25 m. Le NMM atteint le haut estran près de la flexure et le PMSGM la moitié du haut estran (figure 117). L'écart-type indique un pic de variabilité sur le haut estran, là où il y a formation et érosion d'une berme. L'écart-type sur le bas estran couvre presque l'ensemble de l'enveloppe de variabilité, ce qui indique que l'ensemble des levés s'approche d'une distribution normale des données. Toutefois, le profil minimum sur le haut estran se retrouve au-dessus d'un écart-type de la moyenne, ce qui est attribuable au levé du 27 décembre 2018 qui représente un profil beaucoup plus bas que pour les autres levés.

La taille des sédiments est constante sur le haut et le bas estran, mais plus grossière sur le haut de plage (figure 118). Les échantillons du haut et bas estran se situent à la limite du sable moyen et du sable fin, alors que les sédiments de la recharge sur le haut de plage font partie de la classe des gravillons.

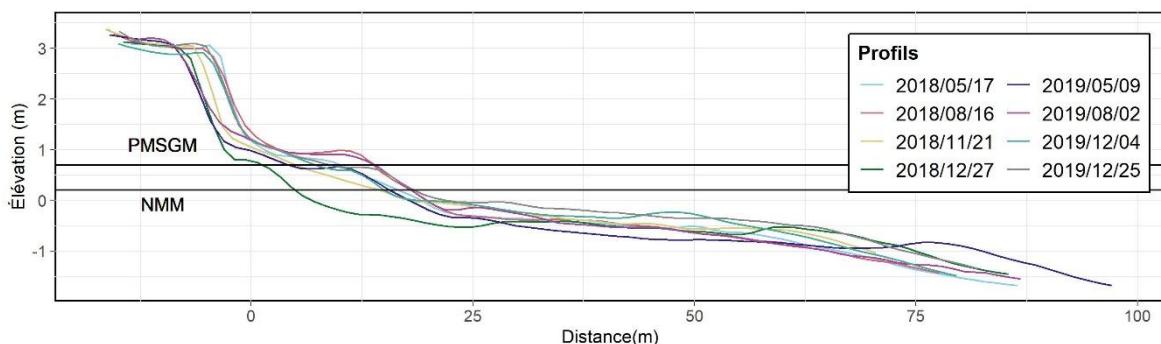


Figure 117. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

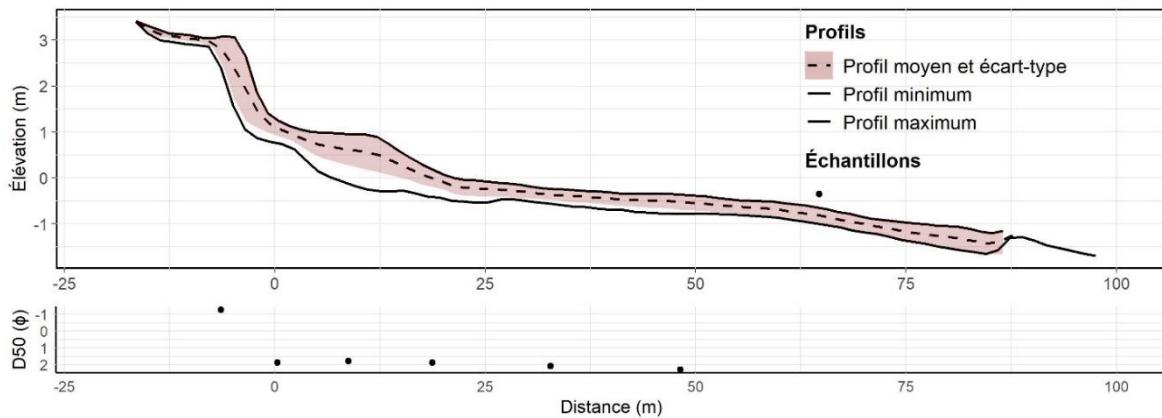


Figure 118. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 19 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 21, situé sur la recharge est caractérisé par des phases d’abaissement et d’exhaussement (figure 119). Pour la période du 17 mai 2018 au 21 novembre 2018, le profil s’abaisse sur le haut estran et se relève sur le bas estran. La recharge en haut de plage est en partie érodée, reculant de $\pm 2,5$ m, mais la recharge de décembre 2018 la fait avancer de $\pm 3,5$ m. Pour la période du 27 décembre 2018 au 2 août 2019, il y a un fort exhaussement du haut estran, accompagné par la reformation de la berme érodée en 2018. Il y a toutefois abaissement du bas estran. Pour cette même période, la recharge reste stable. Le profil s’abaisse légèrement sur le haut estran et le bas estran jusqu’au 4 décembre 2019. La recharge de septembre est aussi visible sur le profil du 4 décembre 2019, le profil se surélevant en haut de plage. Du 4 au 25 décembre 2019, la recharge reste stable, et il y a exhaussement sur l’ensemble du profil.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de 0,5 m à 1 m sur le bas estran et de 1 m à 1,5 m sur le haut estran et le haut de plage (figure 120). L’enveloppe est plus importante sur le haut estran, là où il y a formation de la berme, et au sommet de la recharge. Aussi, la flexure du profil moyen se situe à ± 20 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage de ± 20 m. Le NMM atteint le haut estran près de la flexure et le PMSGM la mi-hauteur du haut estran (figure 119). L’écart-type indique un pic de variabilité sur le haut de plage, sur la recharge. L’écart-type couvre presque l’ensemble de l’enveloppe de variabilité, ce qui

indique que l'ensemble des levés s'approche d'une distribution normale des données. Cependant, le profil minimum à la limite du haut estran et du haut de plage se retrouve au-dessus d'un écart-type de la moyenne, ce qui est attribuable au levé du 21 novembre 2018 qui représente le recul le plus important de la recharge.

La taille des sédiments est plutôt homogène, mais légèrement plus fine sur le haut de plage et sur le bas estran (figure 120). Les échantillons se situent tous à la limite du sable moyen et du sable fin.

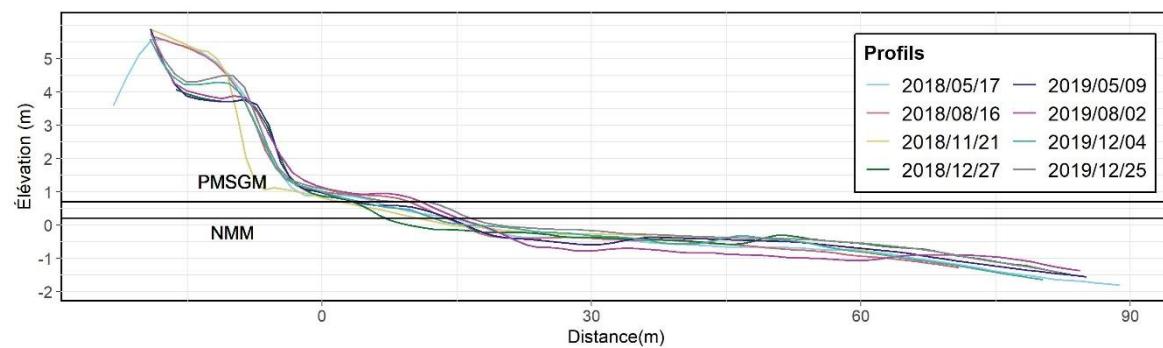


Figure 119. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 21 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

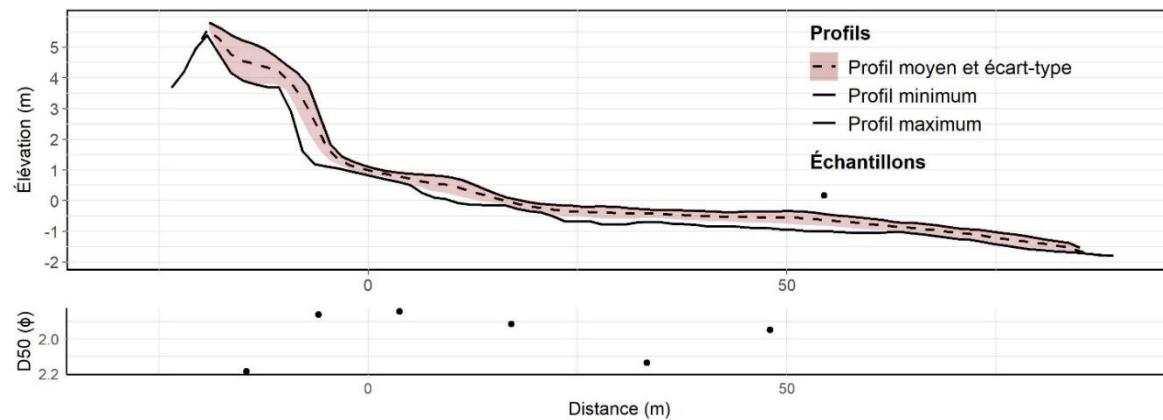


Figure 120. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 21 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

Largeurs de plage

Afin d'analyser les variations des largeurs de plages, le secteur de la plage de La Martinique a été subdivisé en quatre sous-secteurs. Le secteur 1 est situé au nord du site et consiste en l'évolution des profils n°s 1 à 10. Le secteur 2 est situé au centre-nord du site et consiste en l'évolution des profils n°s 11 à 15. Le secteur 3, constitué de la recharge, est situé au centre-sud du site et consiste en l'évolution des profils n°s 16 à 25. Le secteur 4 est situé au sud du site et consiste en l'évolution des profils n°s 26 à 30. Sur la figure 121, les lignes pointillées indiquent le secteur de la recharge, soit la recharge et 100 m de part et d'autre. Sur la figure 122, les lignes pointillées indiquent la délimitation de la recharge. La distance par rapport à la côte est calculée à partir de la ligne de rivage.

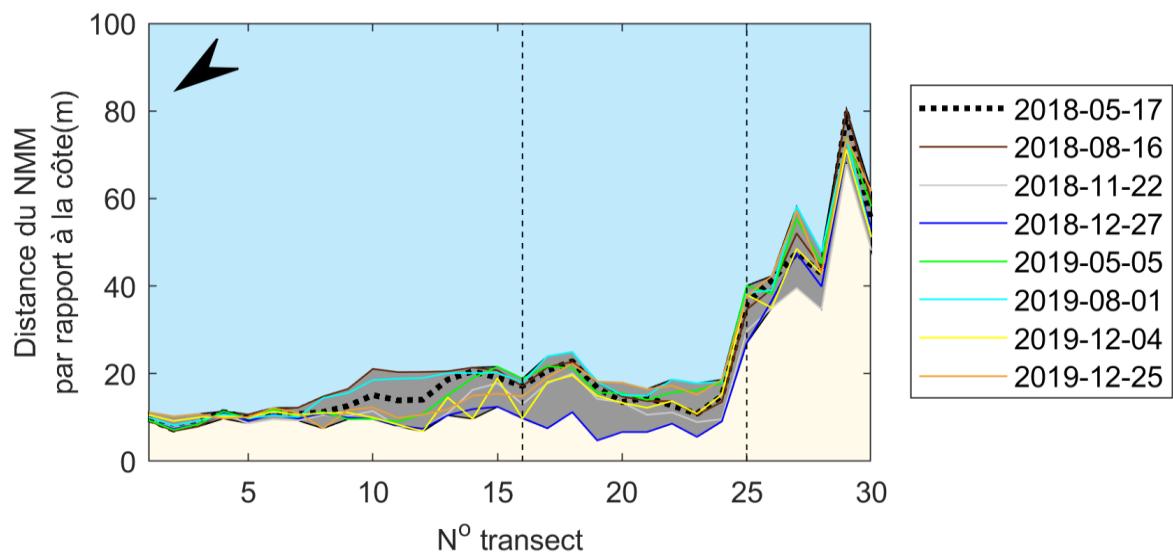


Figure 121. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de La Martinique

Le secteur 1 est caractérisé par une côte à tombolo dunifié artificialisée par un enrochement. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -5,47 m à 6,00 m entre le 17 mai 2018 et le 25 décembre 2019. Ces déplacements sont calculés pour chaque isoligne du NMM par rapport à la période de référence correspondant au premier levé, soit le 17 mai 2018. La moyenne de ces déplacements est de -0,18 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. La figure 121 indique que la largeur de

plage au NMM est plutôt stable jusqu'au 5 mai 2019, puis elle subit un déplacement positif jusqu'au 25 décembre 2019. L'enveloppe de mobilité est assez faible. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est positif pour les profils n°s 1, 2 et 5 à 7, puis négatif pour les profils n°s 3,4 et 8 à 10. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 6,88 m à 21,10 m. La moyenne de ces largeurs est de 10,59 m.

Le secteur 2 est caractérisé par une côte à tombolo dunifié artificialisé par un enrochement remblayé. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -10,85 m à 6,46 m entre le 17 mai 2018 et le 25 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -2,71 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. La figure 121 affiche une tendance à l'élargissement de la plage pendant l'été et au rétrécissement pendant l'automne et l'hiver. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM pour l'ensemble de la période de suivi est négatif pour tous les profils. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 6,79 m à 21,58 m. La moyenne de ces largeurs est de 14,87 m.

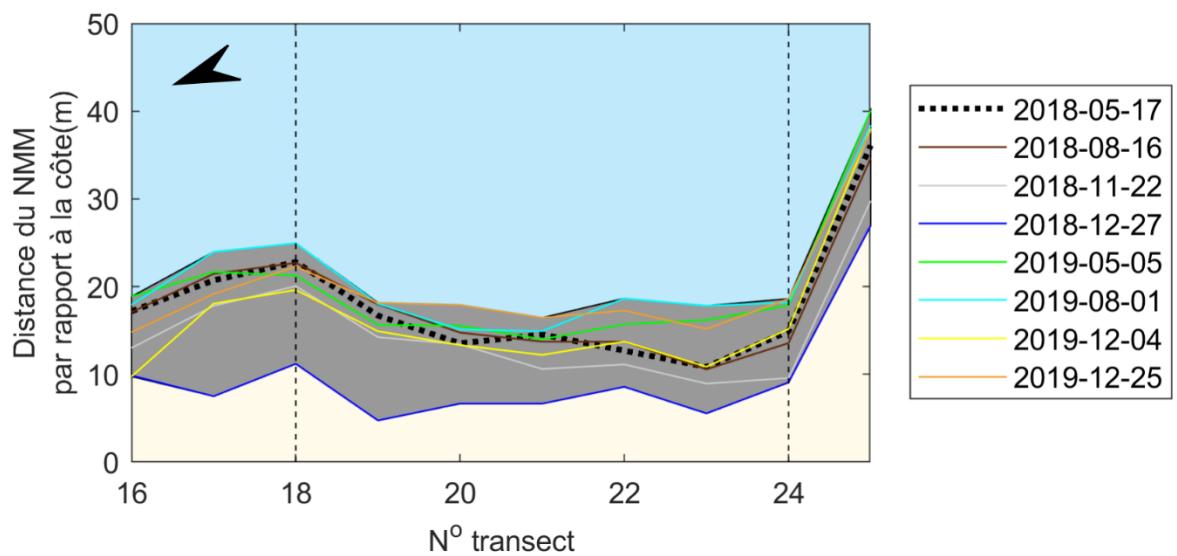


Figure 122. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge de La Martinique

Le secteur 3 est caractérisé par une côte à tombolo dunifié avec recharge. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -11,59 m à 10,64 m entre le 17 mai 2018

et le 25 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -1,29 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. La figure 122 affiche une tendance à l'élargissement de la plage pendant l'été et au rétrécissement pendant l'automne et l'hiver. Pour ce qui est de la recharge de septembre 2019, on peut observer qu'elle permet un maintien d'une largeur de plage équivalente à celle du 17 mai 2018 pour décembre 2019, mais que la largeur est tout de même inférieure au mois d'août 2019. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM pour l'ensemble de la période de suivi est positif pour tous les profils n°os 19 à 25, puis négatifs pour les profils n°os 16 à 18. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 4,73 m à 40,07 m. La moyenne de ces largeurs est de 17,17 m.

Le secteur 4 est caractérisé par une côte à tombolo dunifié sans artificialité. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -11,59 m à 10,64 m entre le 17 mai 2018 et le 25 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -1,30 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. La figure 122 affiche une tendance à l'élargissement de la plage entre 2018 et 2019. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM pour l'ensemble de la période de suivi est positif pour les profils n°os 26, 27 et 30, puis négatif pour les profils n°os 28 et 29. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 34,68 m à 80,43 m. La moyenne de ces largeurs est de 33,41 m.

Bilan sédimentaire

La période comprise entre décembre 2018 et mai 2019 est caractérisée par un bilan sédimentaire proche de l'équilibre (figure 123). Elle a toutefois été marquée par des dynamiques morphosédimentaires très contrastées. Les apports sédimentaires à hauteur de $\pm 4\,000\text{ m}^3$ ont essentiellement été d'origine anthropique. Ils proviennent d'une recharge sédimentaire ponctuelle effectuée sur la zone sud du secteur à l'étude en décembre 2018 de $\pm 5\,400\text{ m}^3$ (figure 124). L'érosion s'est quant à elle concentrée sur la plage à l'endroit de l'enrochement (partie nord du secteur d'étude). Plus ou moins 4 000 m^3 de sédiments ont été transportés en dehors du secteur étudié (figure 123).

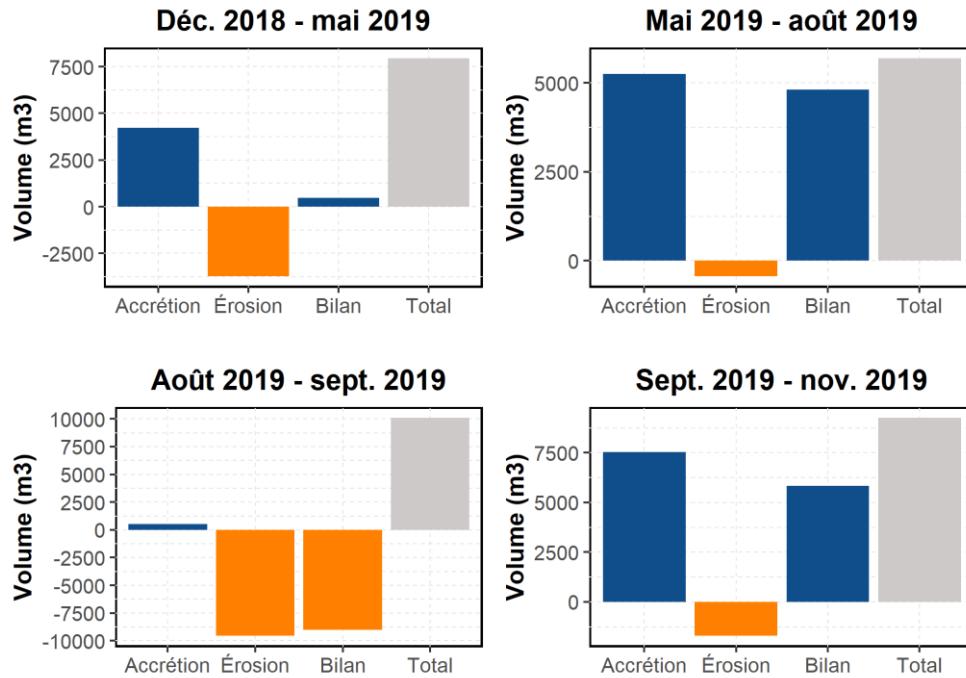


Figure 123. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage de La Martinique entre décembre 2018 et décembre 2019.

La période comprise entre mai 2019 et août 2019 a été marquée par un exhaussement de la plage et de la dune sur l'ensemble du secteur étudié (figure 124). $\pm 4\,840\text{ m}^3$ de sédiments nouveaux se sont déposés (sur un total de $\pm 5\,100\text{ m}^3$ de sédiment mobilisés) (figure 123). Aucune recharge n'ayant eu lieu pendant cette période, l'accumulation s'est effectuée de façon naturelle.

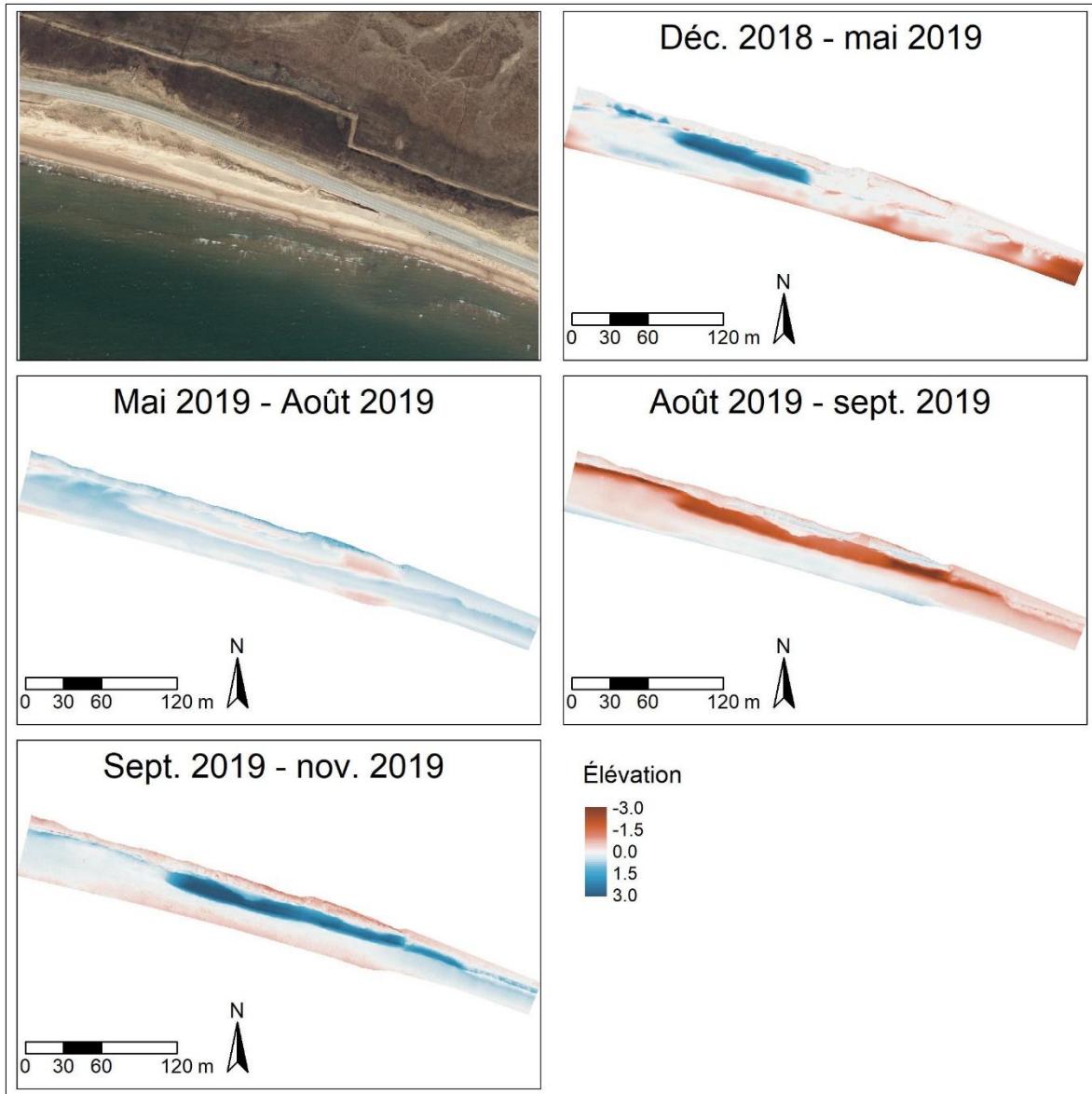


Figure 124. Différentiels d’élévations sur le secteur de la recharge de la plage de La Martinique entre décembre 2018 et décembre 2019. (Photo du haut prise le 13 septembre 2019).

Les périodes suivantes correspondent aux effets de la tempête Dorian et de la réponse anthropique à la forte érosion causée par cet événement météo-océanique extrême. Entre août et septembre 2019, la recharge de plage a été érodée de manière quasi intégrale (figure 124). Le front dunaire localisé au sud de la recharge a également reculé de plusieurs mètres. Au total, ce sont $\pm 9\,260\text{ m}^3$ de sédiments qui ont été enlevés par la tempête Dorian (sur un total

de $\pm 9\,600\text{ m}^3$ de sédiment mobilisés). Suite à cela, $\pm 7\,200\text{ m}^3$ de sédiments supplémentaires sont déposés sur le secteur entre septembre 2019 et décembre 2019 (Figure 123). De ce volume, $\pm 2\,600\text{ m}^3$ s ont été artificiellement déposés pour reconstituer l'intégralité de la recharge. Ainsi, $\pm 4\,600\text{ m}^3$ se sont déposés de façon naturelle.

4.4.4. Causes explicatives de l'évolution du secteur

Évolution de la plage et de la recharge au fil des années

L'évolution historique indique une inversion de tendance dans les taux de déplacements de la côte. Entre 1963 et 2018, les taux sont positifs à l'échelle de la cellule, mais négatifs pour le secteur de la recharge. Entre 2008 et 2019, après les premiers travaux de recharge, les taux sont négatifs à l'échelle de la cellule, mais positifs pour le secteur de la recharge. En se basant sur les taux avant la mise en place de la recharge, le secteur de la recharge peut être caractérisé de foyer d'érosion, celui-ci étant en érosion alors que le reste de la cellule était en accumulation. Ainsi, pour la période récente, la ligne de rivage est plutôt stable devant la recharge, bien qu'elle ait beaucoup reculé depuis 1963 et reste très proche de la route 199. Il est important aussi de noter que le secteur au nord de la recharge de La Martinique est une ancienne passe de marée, ce qui constitue une cause du développement de foyer d'érosion (Kraus & Galgano, 2001).

Les résultats des bilans sédimentaires et des profils de plage démontrent que l'équilibre de la plage de La Martinique est essentiellement artificiel. Lors des grandes tempêtes, principalement à l'automne, la recharge est érodée puis reconstruite (figure 125). La recharge peut alors subir des reculs allant jusqu'à -3,5 m. Les bilans sédimentaires et les profils témoignent alors principalement de la mise en place d'une recharge, puis de l'érosion de celle-ci. Cependant, une tendance à l'accumulation lors des mois d'été et début d'automne et à l'érosion lors des derniers mois d'automne et d'hiver est observable. Aussi, les largeurs de plage au NMM indiquent tout de même une stabilisation de la largeur des plages entre mai 2018 et décembre 2019. En 2018, il semble également y avoir un transfert de sédiments du haut estran vers le bas estran. Le NMM atteint la partie inférieure du haut estran, ce qui permet aux vagues à ce niveau d'eau d'être en partie dissipées. Le PMSGM atteint la partie

supérieure du haut estran, ce qui permet en partie de dissiper l'énergie des vagues. Par contre, la recharge peut tout de même être affectée lors d'événements hydrodynamiques importants.



Figure 125. Recharge de La Martinique avant et après la tempête Dorian.

Comparaison avec les secteurs témoins

Les secteurs témoins évoluent de façon sensiblement différente du secteur de la recharge. Les bilans sédimentaires indiquent que la majorité des variations de volumes se limitent strictement à la recharge elle-même. Aussi, ne faisant pas l'objet de recharge, le haut du profil de ces secteurs affiche une enveloppe de mobilité beaucoup moins importante que celle des profils devant la recharge. Les hauteurs de plage sont assez semblables devant la recharge et devant l'enrochement, se situant vers 1 m, alors que la hauteur du secteur naturel se situe vers 1,5 m.

Au nord de la recharge, le haut de plage est très peu variable, étant fixé par un enrochement. Toutefois, on peut tout de même y observer une accumulation suite à la recharge ponctuelle de décembre 2018, suggérant aussi une diffusion du sédiment vers le nord. Cette diffusion s'effectue à l'inverse du courant de dérive principale, mais pourrait tout de même être liée à la recharge si les événements hydrodynamiques de cette période ont favorisé une diffusion vers le nord. De plus, ce secteur affiche aussi une accumulation en décembre 2019, soit 2 mois après la recharge de septembre 2019. En 2018, il semble aussi y avoir une migration des sédiments du haut estran vers le bas estran. Les largeurs de plages au NMM diminuent

entre le 17 mai 2018 et le 25 décembre 2019. Les largeurs de plage sont aussi inférieures au secteur de la recharge.

Au sud de la recharge, la majeure partie de l'érosion s'effectue en 2018. Il semble aussi y avoir migration des sédiments du haut estran vers le bas estran en 2018. Dans ce secteur, on observe une diminution des largeurs de plage au NMM. Les largeurs de plages atteignent toutefois une largeur moyenne de 52,03 m, et sont donc beaucoup plus larges que dans les autres secteurs.

Évaluation de l'efficacité de la recharge de plage

Les objectifs de la recharge étaient de réduire l'érosion et de protéger la route 199 lors des tempêtes. Les changements morphologiques montrent les efforts réalisés par le ministère des Transports du Québec (MTQ) pour stabiliser ce secteur de la route. La mise en place des recharges a permis de protéger les infrastructures en éloignant la route de la ligne de rivage. Plusieurs recharges ont aussi été effectuées en prévention, celles-ci étant effectuées avant l'arrivée de tempêtes. Cependant, elles n'ont que partiellement permis de réduire l'érosion, les recharges étant régulièrement érodées par les tempêtes. L'évolution historique témoigne d'un inversement de tendance vers la progradation depuis 2008. Alors que le reste de la cellule hydrosédimentaire affiche des taux de déplacement négatifs, le secteur de la recharge affiche des taux positifs, ce qui montre tout de même que la recharge a permis de réduire l'érosion en limitant le recul de la côte. Aussi, les largeurs de plage au NMM pour 2018-2019 indiquent une diminution, mais le secteur de la recharge conserve une largeur de plage moyenne de 14,87 m.

Les bilans sédimentaires et les profils de plage indiquent que les événements érosifs sont encore très importants, menant à des reculs ponctuels de la recharge allant jusqu'à 3,5 m. L'escarpement de la pente pourrait être une raison pouvant expliquer une érosion aussi importante de la recharge. Selon Van Rijn (2011), la pente initiale d'un projet de recharge ne devrait pas être supérieure à 1:20, les pertes initiales de sédiments pouvant être largement influencées par la pente. En effet, Raudkivi & Dette (2002) ont démontré que l'augmentation de la pente d'une recharge de 1:15 à 1:10 entraîne une augmentation marquée de l'érosion.

Or, la pente initiale de la recharge de La Martinique est de $\pm 1:2$, ce qui la rend très sensible à l'érosion.

La distribution généralement unimodale de la granulométrie suggère aussi que la taille des sédiments de la recharge est plutôt semblable à la taille des sédiments naturels du système. Sur l'ensemble des profils effectués sur la recharge, les sédiments sont de la même taille sur la recharge que sur le reste du profil, à l'exception du profil n° 19 qui est principalement constitué de gravillons sur la recharge. Les sédiments du secteur sont plutôt fins, variant entre le sable fin et le sable moyen. Une granulométrie trop fine peut engendrer une érosion plus importante de la recharge et favoriser un transfert des sédiments du haut estran vers le bas estran (Dean, 1991 ; Van Rijn, 2011). En 2018, les profils de plages indiquent un transfert de sédiments du haut estran vers le bas estran, ce qui vient appuyer la possibilité d'un sédiment trop fin pour la recharge.

La recharge de La Martinique a été en partie efficace, en réussissant à protéger la route 199 et en réduisant l'érosion du secteur. Toutefois, pour ce faire, de grandes quantités de sable ont dû être déversées sur la plage, souvent plus d'une fois par année. La façon dont les recharges ont été mises en place témoigne de l'urgence de protéger les routes à l'approche de tempêtes. En effet, aucun plan, devis ou étude de la durabilité de la recharge n'a été entrepris, ce qui en fait une recharge qui protège des tempêtes, mais qui résiste très peu de temps et qui nécessite régulièrement une reconstruction. De plus, peu d'information est disponible sur l'état initial des recharges, sauf exception, lorsque le moment des levés concordait avec le moment de reconstruction de la recharge. Ainsi, afin d'assurer l'efficacité du programme de recharges, il serait recommandé d'effectuer une étude de faisabilité en respectant les critères de conception de la recharge recommandés dans la littérature, notamment en ce qui concerne la pente et la granulométrie. Il serait aussi important de rendre cette information disponible, notamment par le biais de plans et devis. De plus, un suivi concerté entre les équipes de planification et d'exécution des travaux serait souhaitable.

4.5 PLAGE DE LA POINTE AUX LOUPS

4.5.1. Évolution historique

La figure 126 représente l'évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la pointe aux Loups, pour la période 1963-2019, soit l'ensemble de la couverture des photos aériennes pour ce site d'étude. Le taux d'évolution y est représenté de l'ouest vers l'est. L'ensemble de la cellule de la Pointe aux Loups est en érosion, à l'exception d'un secteur stable ou en accumulation à l'extrémité est. Les valeurs de recul peuvent atteindre -2 m par année. Pour le secteur en accumulation, les valeurs se situent entre 0 et 1 m par année, mais peuvent atteindre 1,50 m par année de façon ponctuelle.

Tableau 8. Taux d'évolution de la cellule hydrosédimentaire de la Pointe aux Loups (m/an)

	1963-2008	2008-2019	1963-2019
Cellule hydrosédimentaire	-0,60	-1,39	-0,75
Secteur de la recharge	-0,73	-0,27	-0,64

Les taux d'évolution à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire et du secteur de la recharge sont négatifs avec des valeurs respectives de -0,75 m par année et -0,64 m par année (tableau 8). À l'échelle de la cellule, les valeurs de recul ont augmenté entre la période pré-recharge (1963-2008) et post-recharge (2008-2019), passant de -0,60 m par année à -1,39 m par année. À l'échelle de la recharge, ces valeurs ont toutefois diminué passant de -0,73 m par année à -0,27 m par année.

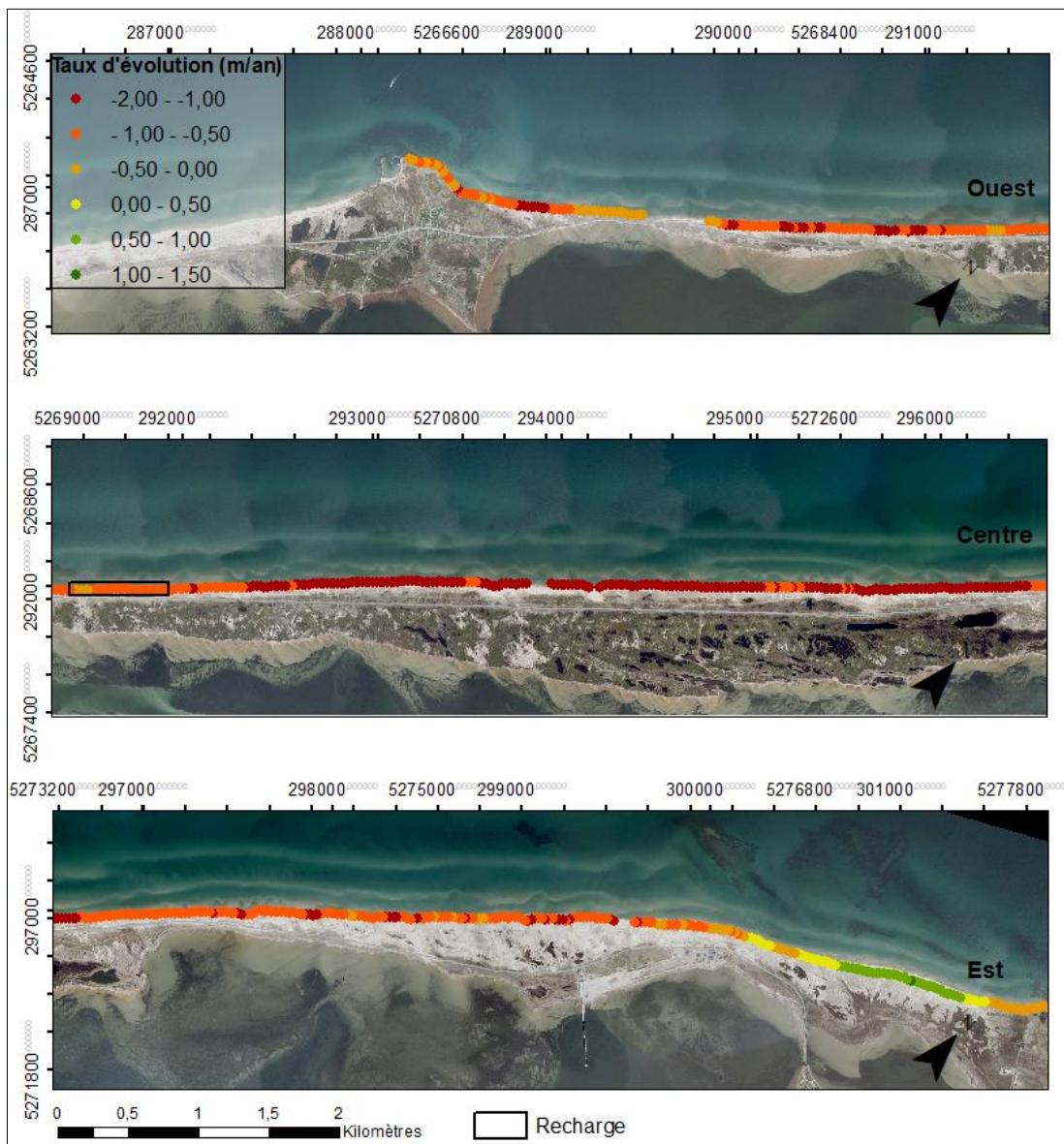


Figure 126. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la pointe aux Loups de 1963 à 2019

La figure 127 illustre la position de la ligne de rivage entre 1963 et 2019, pour le secteur de la recharge de plage. La recharge est délimitée par les lignes pointillées perpendiculaires aux lignes de rivages. La zone en gris représente l'enveloppe de mobilité de la ligne de rivage. Depuis 2008, un programme de recharge a été mis en place pour ce secteur. De 1963 à 2019, le secteur de la recharge affiche un recul soutenu de la ligne de rivage avec un ralentissement du recul à partir de 2008. Le ralentissement est davantage marqué devant la recharge, entre

les transects n°s 535 et 562 qu'aux extrémités, entre les transects n°s 531 et 535, ainsi que n°s 562 et 566.

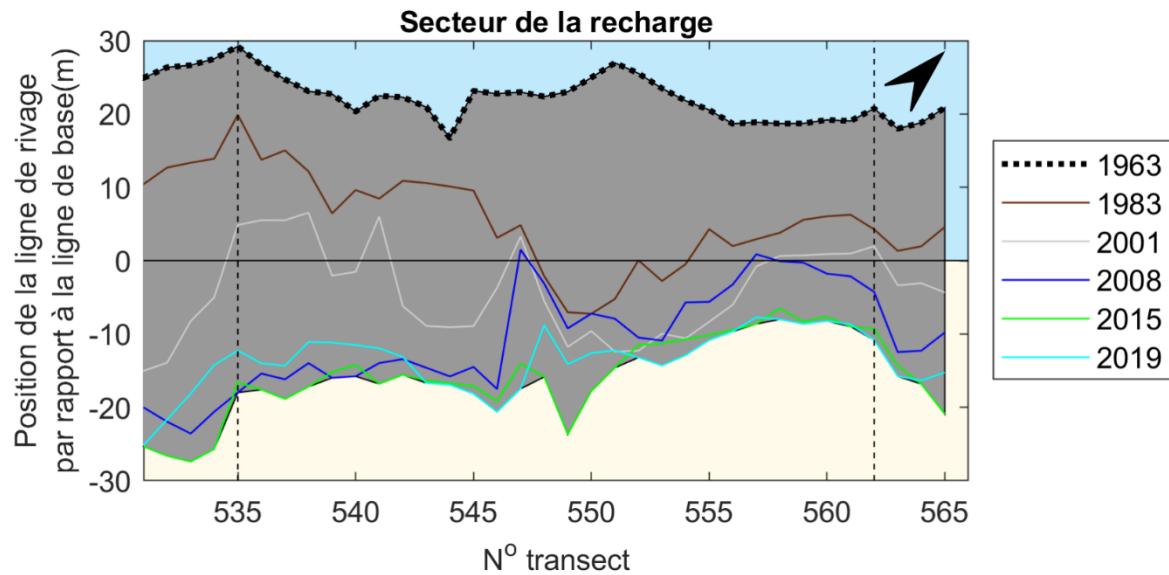


Figure 127. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de la Pointe aux Loups.

4.5.2. Caractérisations granulométriques

Sur le site de la plage de la Pointe aux Loups, 53 échantillons ont été récoltés le long de 9 profils, sur le haut et le bas estran. Les données présentées proviennent de la campagne d'échantillonnage de 2018. Les résultats sont exprimés en phi (ϕ) vu la grande variabilité dans la taille des sédiments entre les sites. L'analyse des caractéristiques granulométriques s'effectue dans un premier temps en décrivant les caractéristiques générales du site, puis en divisant le secteur de la plage en trois unités morphologiques, soit le haut de plage, le haut estran et le bas estran.

Les résultats démontrent que le site d'étude possède un D_{50} moyen de 1,49 ϕ , ce qui correspond à la classe du sable moyen. Comme il est possible d'observer sur la figure 128, les classes granulométriques principales sont celles du sable moyen (86,15%) et du sable grossier (6,95%). La plage est donc très homogène, 97,95% du site étant constitué de sable.

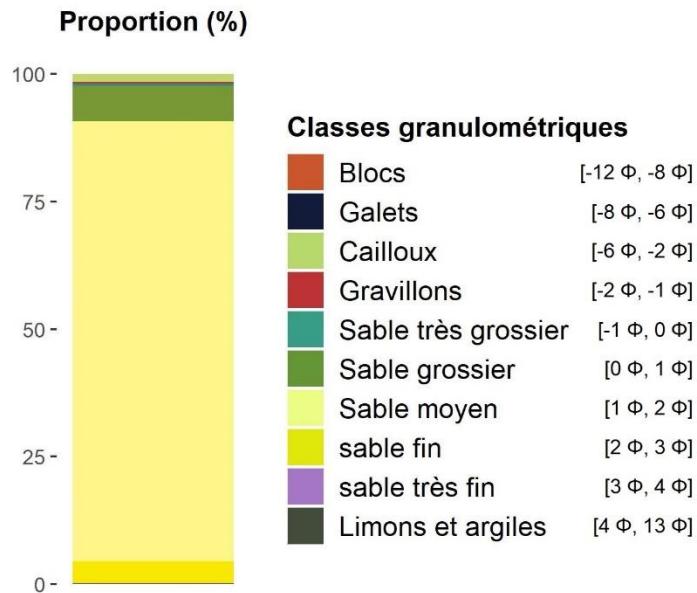


Figure 128. Proportion des classes granulométriques pour l'ensemble du site d'étude (Pointe aux Loups)

Les échantillons du haut de plage affichent un D_{50} moyen de 1,59 φ, ce qui correspond à la classe du sable moyen. Sur la figure 129b la proportion des différentes classes indique que le sable moyen (77,66%), le sable fin (9,64%) et les cailloux (5,22%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire, affichant une distribution unimodale avec une grande concentration des sédiments vers 1,5 φ (figure 129a). Toutefois, le profil PR1 indique aussi une présence de cailloux. Ainsi, les sédiments sur le haut de plage sont plutôt homogènes et fins, les échantillons étant constitués de 93,31% de sable, mais affichent aussi la présence de cailloux de façon plus sporadique.

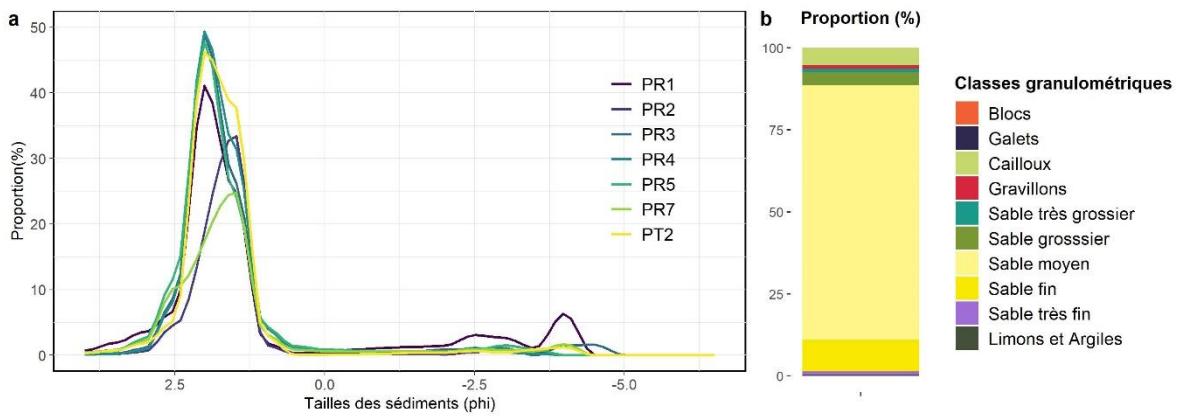


Figure 129. Distribution et classes granulométriques sur le haut de plage de la Pointe aux Loups

Les échantillons du haut estran affichent un D_{50} moyen de 1,55 ϕ , ce qui correspond à la classe du sable moyen. Sur la figure 130b la proportion des différentes classes indique que le sable moyen (92,13%) et le sable fin (5,09%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de façon similaire, affichant une distribution unimodale avec une grande concentration des sédiments vers 1,5 ϕ (figure 130a). Ainsi, les sédiments sur le haut estran sont très homogènes et fins, les échantillons étant constitués de 99,84% de sable.

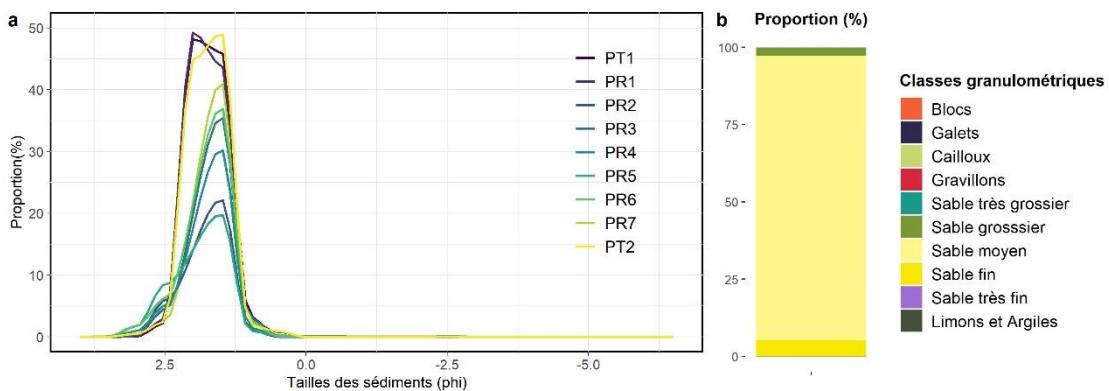


Figure 130. Distribution et classes granulométriques sur le haut estran de la plage de la Pointe aux Loups

Les échantillons du bas estran affichent un D_{50} moyen de 1,39 ϕ , ce qui correspond à la classe du sable moyen. Sur la Figure 131b la proportion des différentes classes indique que le sable moyen (84,30%) et le sable grossier (10,81%) sont les classes granulométriques dominantes. La distribution indique aussi que l'ensemble des profils d'échantillonnage se comportent de

façon similaire, affichant une distribution unimodale avec une grande concentration des sédiments vers $1,5 \phi$ (figure 131a). Ainsi, les sédiments sur le bas estran sont très homogènes et fins, les échantillons étant constitués de 97,95% de sable.

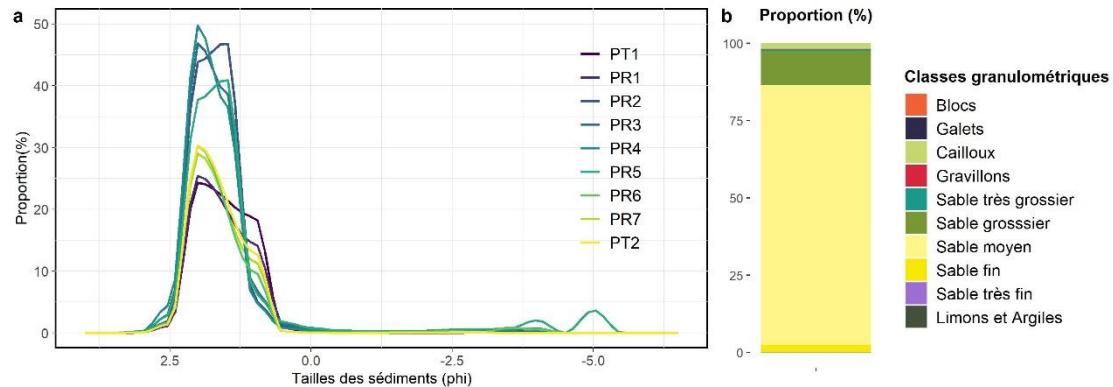


Figure 131. Distribution et classes granulométriques sur le bas estran de la plage de la Pointe aux Loups

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des échantillons sera présentée avec les profils de plage dans la section suivante.

4.5.3. Évolution du secteur de la recharge de plage

Profils de plage

À l'instar des observations faites sur le site de la plage de La Martinique, le fonctionnement de la plage de la Pointe aux Loups est lui aussi complètement artificiel. Il témoigne des efforts réalisés par le Ministère des Transports du Québec pour maintenir ce secteur de la route 199 opérationnel.

Sur la plage de la Pointe aux Loups, les profils n°s 4, 6, 9, 12, 14 et 19 sont analysés. Le profil n° 4, situé à 100 m au sud de la recharge est caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement (figure 132). Pour la période du 21 mai au 10 août 2018 il y a formation d'une berme sur le haut estran et abaissement du bas estran. Entre le 10 août et le 23 décembre 2018, il y a un important abaissement de la plage et la formation d'une barre à ± 80 m de la ligne de rivage, causant un rehaussement du bas estran à cet endroit. Il semble ainsi y avoir un transfert des sédiments du haut estran vers le bas estran. Pendant cette même période, il y a érosion de la dune en haut de plage de $\pm 5,5$ m. Entre décembre 2018 et mai 2019, il y a

exhaussement du profil sur le haut estran et disparition de la barre. La période du 6 mai au 3 décembre 2019 est marquée par un abaissement important du haut estran et un léger abaissement du bas estran. Du 4 décembre au 25 décembre 2019, le profil s'élève sur le bas estran.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de 1 m à 1,5 m sur le haut estran et de 0,5 m à 1 m sur le bas estran (figure 133). Le NMM et le PMSGM atteignent l'estran entre 20 m et 45 m de la ligne de rivage (figure 132). La flexure est difficilement identifiable sur ce profil.

L'écart-type est plutôt constant le long du profil, avec deux pics de variabilité au pied de la dune et sur la barre sableuse. L'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approche d'une distribution normale des données. Toutefois, l'enveloppe se situe au-delà d'un écart-type à l'endroit de la formation de la berme. La granulométrie sur le profil est assez homogène, mais plus fine au pied de la dune sur le haut de l'estran. Tous les échantillons font partie de la classe du sable moyen.

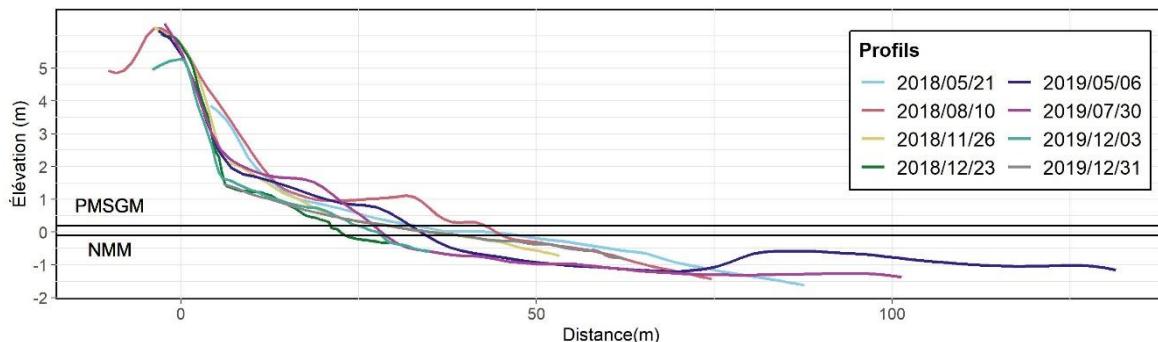


Figure 132. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 4 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

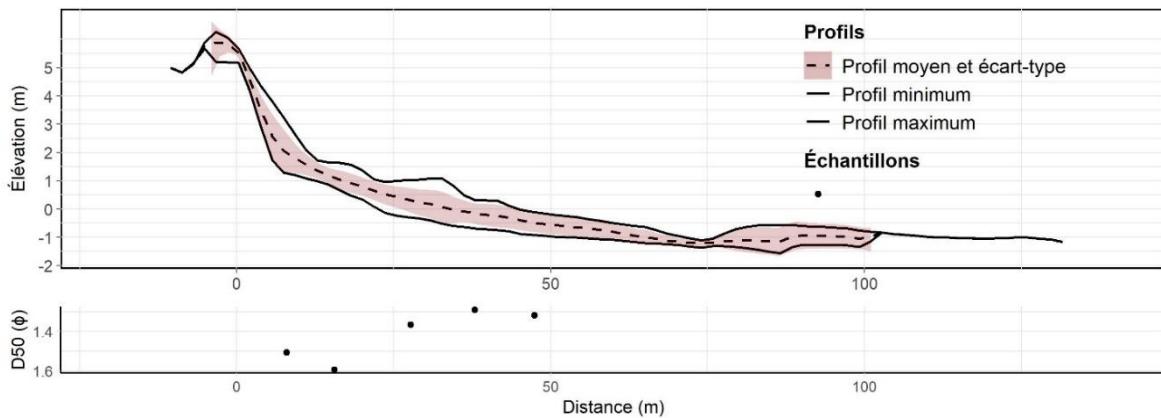


Figure 133. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 4 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 19, situé à 100 m au nord de la recharge, est caractérisé par un abaissement constant du haut estran entre le 21 mai 2018 et le 31 décembre 2019 (figure 134). Il y a toutefois un léger exhaussement de la partie supérieure du haut estran pendant le mois de décembre 2019. Pendant cette période, il y a aussi un léger exhaussement du haut de plage. Le bas estran reste plutôt stable, avec un léger exhaussement entre le 21 mai 2018 et le 23 décembre 2018, puis un léger abaissement jusqu'au 30 juillet 2019. La flexure du profil moyen se situe à ± 50 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage d'environ 50 m.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de ± 1 m sur le haut estran et de $\pm 0,5$ m sur le bas estran (figure 135). Le NMM et le PMSGM atteignent le haut estran entre 25 m et 45 m de la ligne de rivage (figure 134). L'écart-type indique une variabilité plus importante sur le haut estran. Celui-ci couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approche d'une distribution normale des données. Cependant, l'enveloppe se situe au-delà d'un écart-type de la moyenne sur le haut estran, près de la flexure. Ceci est attribuable au levé du 21 mai 2018 qui affiche un haut estran beaucoup plus élevé que pour les autres levés. Il n'y a pas de granulométrie pour ce profil.

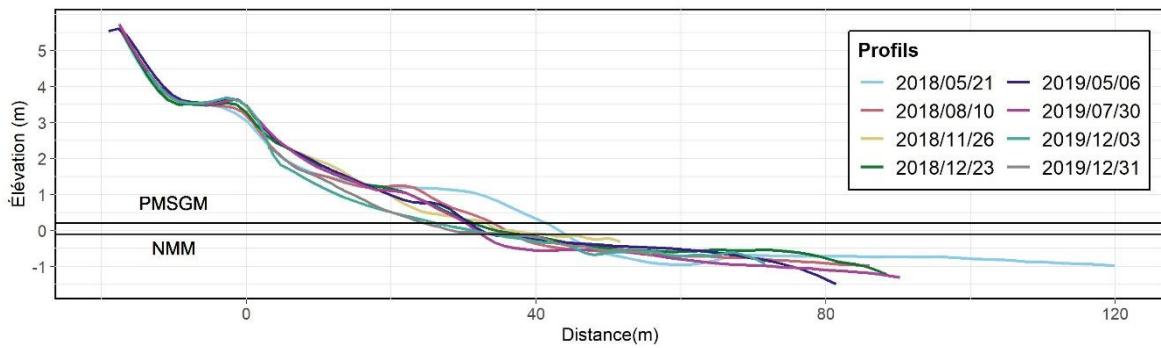


Figure 134. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

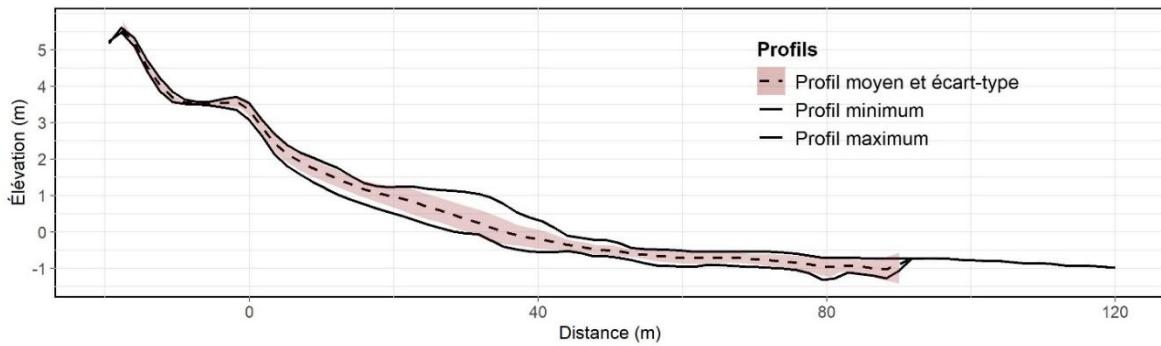


Figure 135. Enveloppe et profil moyen du profil n° 19 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 6, situé sur la recharge, est caractérisé par des phases d’abaissement et d’exhaussement (figure 136). À noter que les profils commencent au pied de l’enrochement à partir du 3 décembre 2019, la recharge ayant été remplacée par un enrochement. Pour la période du 21 mai 2018 au 26 novembre 2018 le haut estran est plutôt stable, alors que le bas estran s’abaisse. Entre novembre et décembre 2018, il y a un important abaissement sur l’ensemble du profil et une érosion de la recharge de $\pm 6,5$ m. La période du 23 décembre 2018 au 3 décembre 2019 est marquée par un exhaussement du haut estran, toutefois le profil est très abrupt, le profil s’arrête alors à environ 30 m de la ligne de rivage. Du 4 décembre au 25 décembre 2019, le profil s’abaisse sur le bas estran.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de ± 2 m sur le haut estran et de $\pm 0,5$ m sur le bas estran (figure 137). Le NMM et le PMSGM atteignent le haut estran entre 10 m et 45 m de la ligne de rivage (figure 136). En date du 31 décembre 2019, ces niveaux se situent très près du pied de l'enrochement. La flexure est difficilement identifiable sur ce profil.

L'écart-type indique une variabilité plus importante sur le haut estran. Celui-ci couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données. Cependant, l'enveloppe se situe au-delà d'un écart-type de la moyenne sur le haut estran, ce qui est attribuable aux levés de décembre 2018 et juillet 2019 qui affichent un abaissement important du haut estran. La granulométrie sur le profil est assez homogène, sur tout le profil (figure 137). Tous les échantillons font partie de la classe du sable moyen.

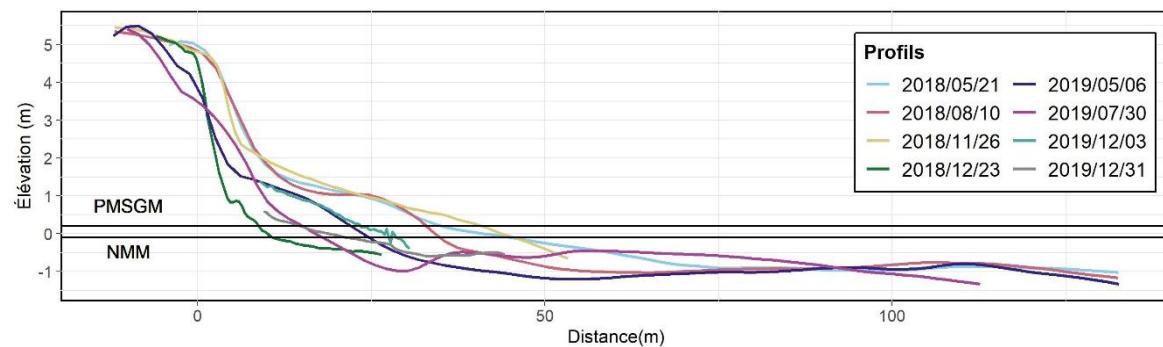


Figure 136. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 6 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

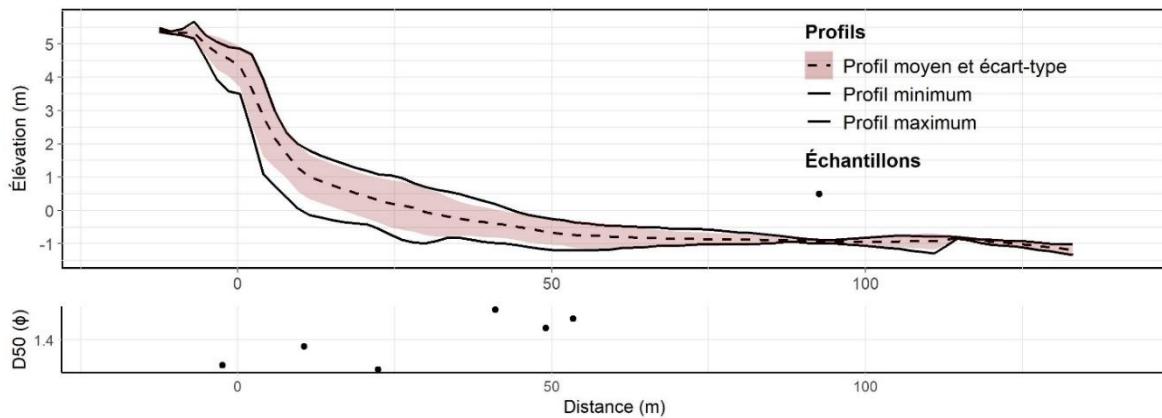


Figure 137. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 6 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 9, situé sur la recharge, est caractérisé par des phases d’abaissement et d’exhaussement (figure 138). À noter que les profils commencent au pied de l’enrochement à partir du 3 décembre 2019. Pour la période du 21 mai 2018 au 10 août 2018 le haut estran est plutôt stable, alors que le bas estran s’abaisse légèrement. Une recharge est effectuée entre le 10 août et le 26 novembre 2018. On peut toutefois observer un léger recul de la recharge, un léger abaissement du haut estran et un exhaussement sur le bas estran. Entre novembre et décembre 2018, le profil s’abaisse de façon importante sur le haut et le bas estran et la recharge recule de $\pm 4,5$ m. Cependant, la recharge semble avoir été remodelée, car son sommet est également plus bas. La recharge reste stable jusqu’au 30 juillet 2019, date du dernier levé avant la mise en place de l’enrochement. Le profil s’abaisse légèrement de décembre 2018 à mai 2019, puis se relève jusqu’au 31 décembre. En date du 31 décembre, une barre est aussi visible à ± 55 m de la ligne de rivage. En 2018, l’érosion la plus marquée s’effectue à l’automne, alors qu’en 2019 cette période est marquée par un exhaussement (figure 138).

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de ± 2 m sur le haut estran et de $\pm 0,5$ m sur le bas estran (figure 139). Le NMM et le PMSGM atteignent l’estrان entre 10 m et 35 m de la ligne de rivage (figure 138). La flexure est difficilement identifiable sur ce profil.

L'écart-type indique une variabilité plutôt constante, mais plus importante sur le haut estran près de la recharge. Celui-ci couvre l'enveloppe de variabilité sur la majeure partie du profil, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approche d'une distribution normale des données. Cependant, l'enveloppe se situe au-delà d'un écart-type de la moyenne sur l'estran entre 10 m et 35 m de la ligne de rivage, ce qui est attribuable au levé du 30 juillet 2019 qui affiche un abaissement important du profil. La granulométrie sur le profil est assez homogène, mais légèrement plus grossière sur le bas estran (figure 139). Tous les échantillons font partie de la classe du sable moyen.

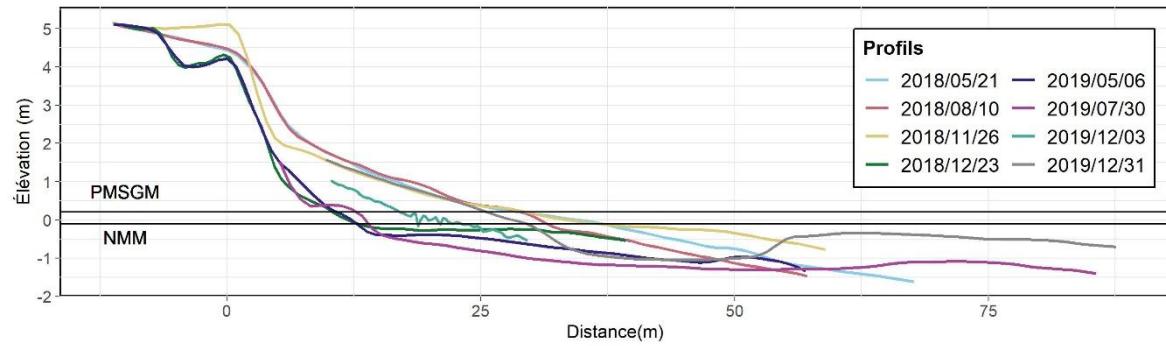


Figure 138. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

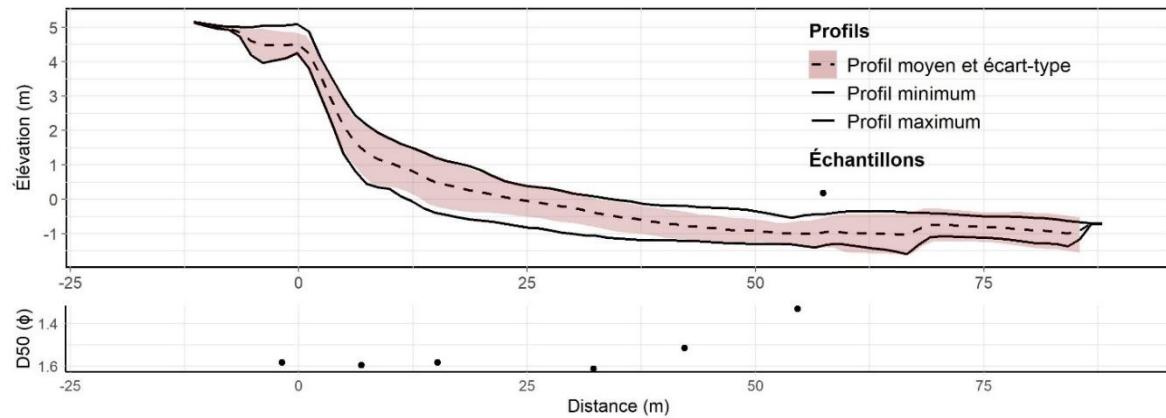


Figure 139. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 12, situé sur la recharge, est caractérisé par des phases d’abaissement et d’exhaussement (figure 140). À noter que les profils commencent au pied de l’enrochement à partir du 3 décembre 2019. Pour la période du 21 mai au 10 août 2018, le profil reste plutôt stable, mais un léger exhaussement se prononce sur le haut estran. Entre le 10 août et le 26 novembre 2018 la recharge est complètement érodée, reculant de \pm 9 m. Pour cette même période, il y a un important abaissement de tout le profil. Une recharge est effectuée entre novembre et décembre 2018. Pendant cette période le haut estran se relève et le bas estran reste stable. Entre décembre 2018 et mai 2019, le profil s’abaisse de façon importante sur le haut estran et reste plutôt stable sur le bas estran. Entre mai et juillet 2019, une nouvelle recharge est effectuée et l’ensemble du profil affiche un exhaussement. Le haut estran s’abaisse ensuite graduellement jusqu’au 31 décembre 2019.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de \pm 2 m sur le haut estran et de \pm 0,5 m sur le bas estran (figure 141). En 2018, le NMM et le PMSGM atteignent la mi-haut estran. En 2019, le NMM atteint la partie supérieure de l’estrان et le PMSGM atteint le pied de l’enrochement (figure 140). La flexure est difficilement identifiable sur ce profil.

L’écart-type indique deux pics de variabilité sur le haut de plage constitué de la recharge et sur l’estrان vers 25 m de la ligne de rivage. L’enveloppe se situe au-delà d’un écart-type de la moyenne pour ces mêmes endroits, ce qui est attribuable à l’érosion de la recharge en novembre 2018 et à la formation d’une berme en août 2018 (figure 140). La granulométrie sur le profil est assez homogène, mais légèrement plus grossière sur le bas estran (figure 141). Tous les échantillons font partie de la classe du sable moyen.

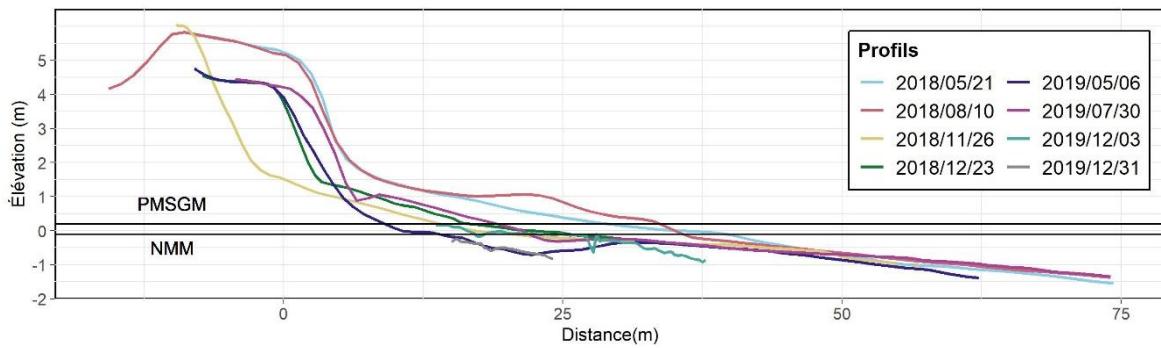


Figure 140. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 12 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups.

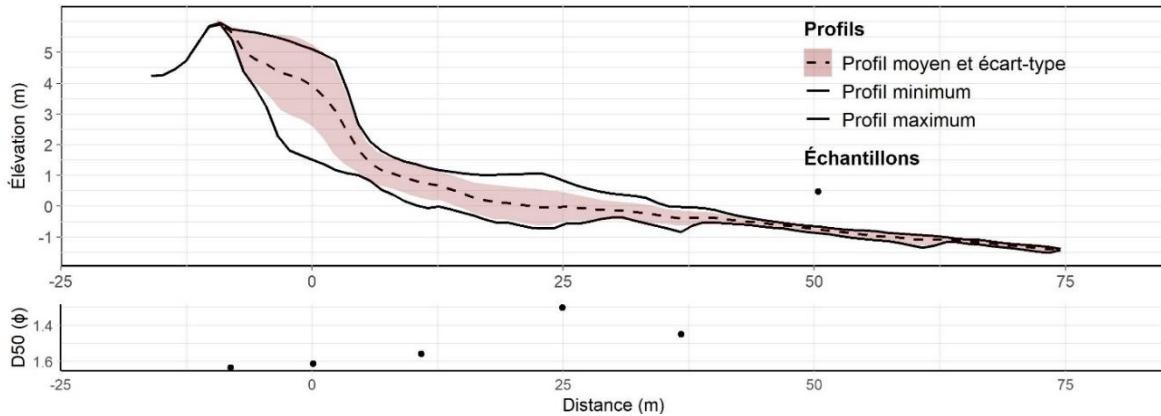


Figure 141. Enveloppe, profil moyen et écart-type et distribution granulométrique du profil n° 12 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 14, situé sur la recharge, est caractérisé par des phases d’abaissement et d’exhaussement (figure 142). À noter que les profils commencent au pied de l’enrochement à partir du 3 décembre 2019 et que ce profil n’avait pas fait l’objet d’une recharge en 2018. La période du 21 mai au 26 novembre 2018 indique un abaissement du haut estran. Le bas estran reste plutôt stable. Toutefois, on peut noter une érosion de $\pm 1,5$ m au pied de la dune entre le 10 août et le 26 novembre 2018. Entre novembre et décembre 2018, le profil affiche un exhaussement du haut estran et un bas estran stable. De décembre 2018 à mai 2019, le profil reste stable sur le haut estran, mais se relève légèrement sur le bas estran. Une recharge est effectuée entre le 6 mai et le 30 juillet 2019. Pendant cette période, le haut estran affiche

un exhaussement alors que le bas estran reste plutôt stable. La recharge est érodée de $\pm 1,5$ m entre le 30 juillet et le 3 décembre 2019. Pour la période du 3 décembre au 31 décembre 2019, le profil s'abaisse sur le haut estran. Le profil affiche une tendance à l'érosion pendant l'automne et l'hiver et un exhaussement pendant l'été. Cependant, cette tendance est artificielle, car elle découle principalement des travaux de rechargement de plage.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de ± 1 m sur le haut estran et de $\pm 0,5$ m sur le bas estran (figure 143). L'enveloppe du haut de plage, consistant en la mise en place et l'érosion de la recharge, est beaucoup plus importante soit de ± 9 m horizontalement et ± 4 m verticalement. La granulométrie sur le profil est assez homogène, mais légèrement plus grossière sur le haut estran et au point d'échantillonnage le plus au large (figure 143). Le NMM et le PMSGM atteignent l'estran entre 25 m et 40 m de la ligne de rivage (figure 142). La flexure est difficilement identifiable sur ce profil.

L'écart-type indique une variabilité plutôt constante sur le profil, mais plus importante à la limite du haut de plage constituée de la recharge et de l'estran. L'enveloppe se situe au-delà d'un écart-type de la moyenne sur le haut de plage, ce qui est attribuable à la mise en place de la recharge à l'été 2019 (figure 143). Tous les échantillons font partie de la classe du sable moyen.

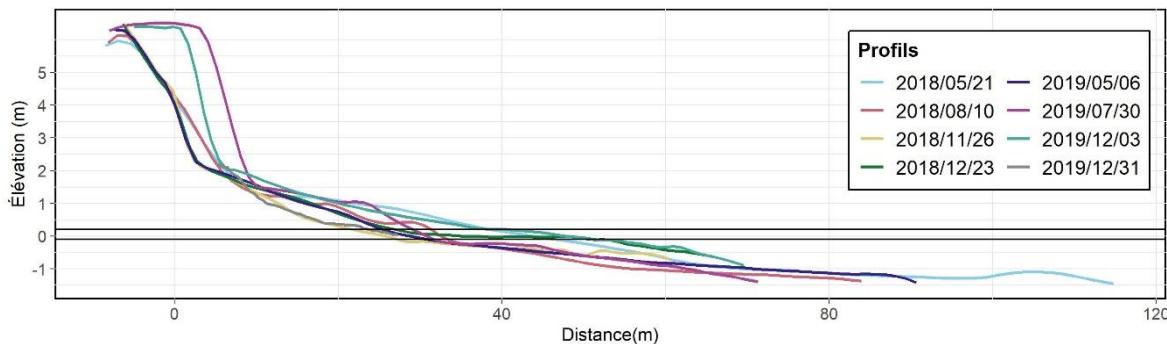


Figure 142. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 14 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

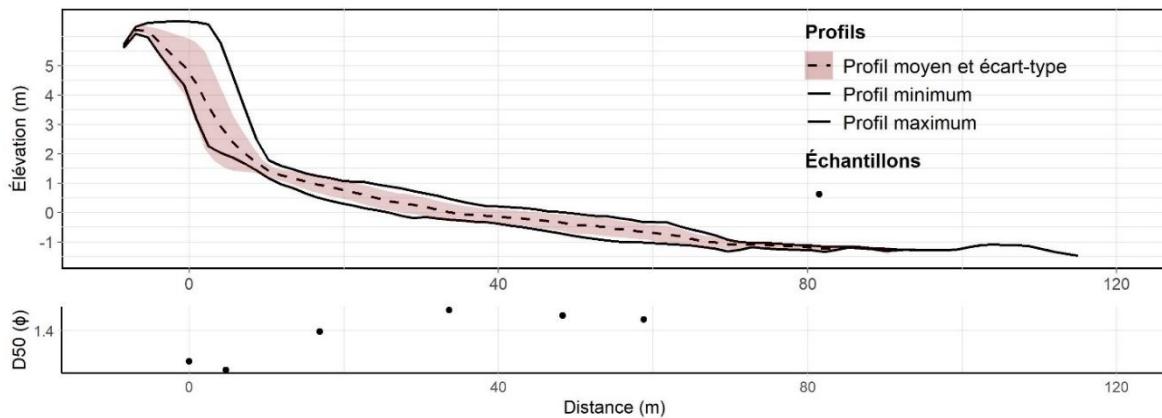


Figure 143. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 14 sur la plage de la Pointe aux Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Largeurs de plage

Afin d'analyser les variations des largeurs de plage, le secteur de la plage de la Pointe aux Loups a été subdivisé en quatre sous-secteurs. Le secteur 1 est situé au sud du site et consiste en l'évolution des profils n°s 1 à 5. Le secteur 2 est situé au centre-sud du site et consiste en l'évolution des profils n°s 6 à 12. Ce secteur contient la zone de la recharge, laquelle a été remplacée par un enrochement en 2019. Le secteur 3 est situé au centre-nord du site et consiste en l'évolution des profils n°s 13 à 16. Ce secteur est caractérisé par l'absence de recharge en 2018 et la mise en place d'une recharge en 2019. Le secteur 4 est situé au nord du site et consiste en l'évolution des profils n°s 17 à 27. Sur la figure 144, les lignes pointillées indiquent le secteur de la recharge, soit la recharge elle-même et 100 m de part et d'autre. Sur la figure 145, les lignes pointillées indiquent la délimitation de la recharge. La distance par rapport à la côte est calculée à partir de la ligne de rivage.

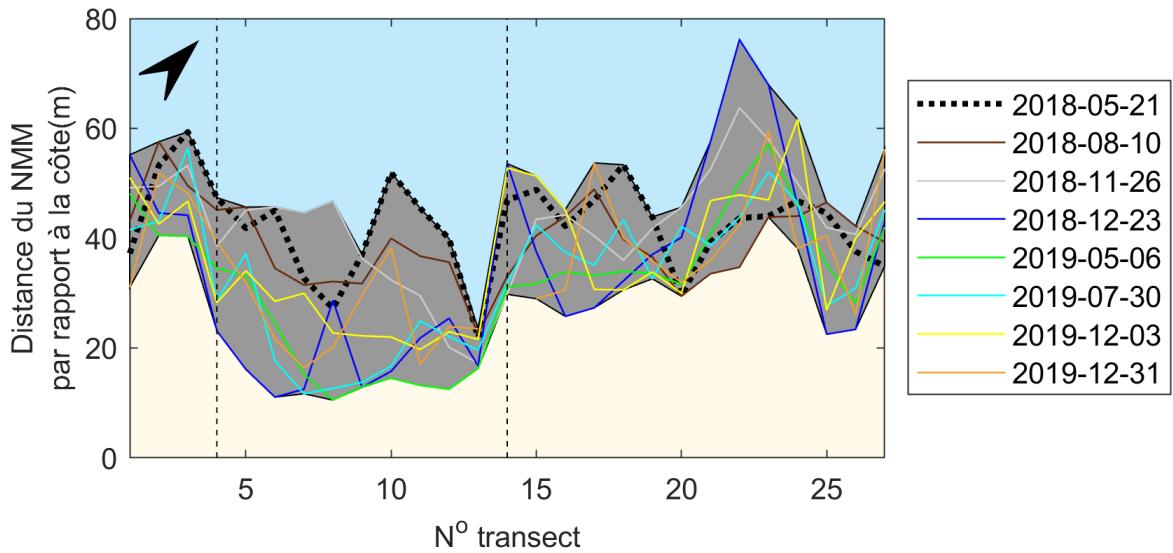


Figure 144. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de la Pointe aux Loups.

Le secteur 1 est caractérisé par une côte à tombolo dunifié sans artificialité. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -25,69 m à 17,98 m entre le 21 mai 2018 et le 31 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -5,85 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. La figure 144 indique que la largeur de plage au NMM se déplace positivement pendant l'été et négativement pendant l'automne et l'hiver. Toutefois, la tendance générale est au rétrécissement de la plage. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est négatif pour tous les profils. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 16,11 m à 59,37 m. La moyenne de ces largeurs est de 42,68 m.

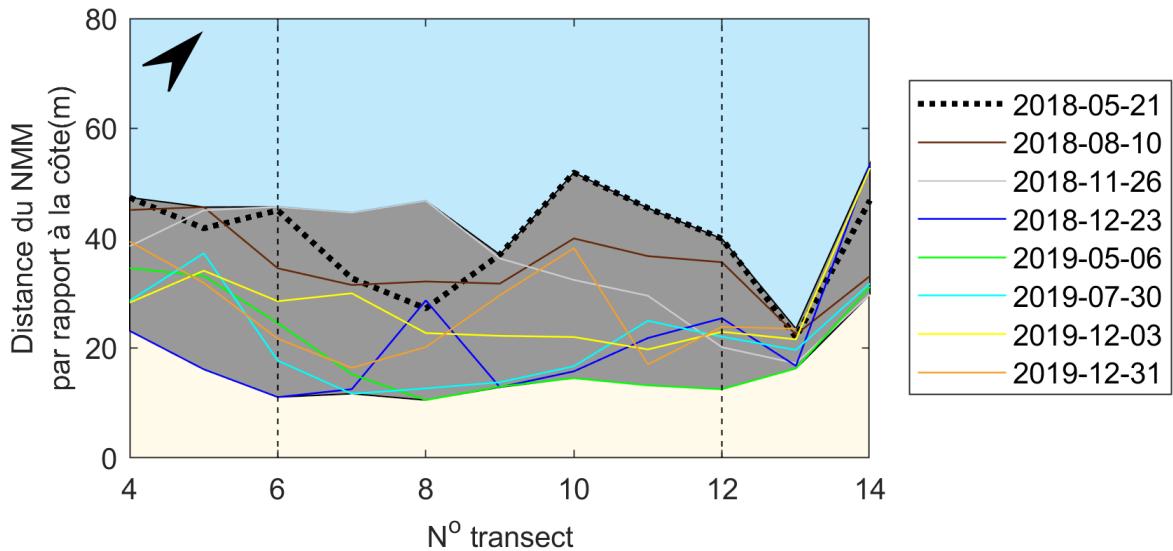


Figure 145. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge de la Pointe aux Loups.

Le secteur 2 est caractérisé par une côte à tombolo dunifié avec recharge en 2018 et enrochement en 2019. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -37,45 m à 19,61 m entre le 21 mai 2018 et le 31 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -15,75 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. La figure 145 indique que la largeur de plage au NMM se déplace positivement pendant l'été 2018 ainsi que l'été et l'automne 2019 et négativement pendant l'automne 2018. Cependant, la tendance générale est au rétrécissement de la plage. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est négatif pour tous les profils. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 10,51 m à 51,95 m. La moyenne de ces largeurs est de 26,13 m.

Le secteur 3 est caractérisé par une côte à tombolo dunifié sans recharge en 2018 et avec recharge en 2019. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -19,84 m à 26,90 m entre le 21 mai 2018 et le 31 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -4,96 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. La figure 144 indique des déplacements négatifs en 2018, puis positifs

en 2019. La tendance générale est toutefois donc au rétrécissement de la plage. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est positif pour les profils n°s 13 et 14, puis négatif pour les profils n°s 15 et 16. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 16,27 m à 73,81 m. La moyenne de ces largeurs est de 35,62 m.

Le secteur 4 est caractérisé par une côte à tombolo dunifié sans artificialité. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -22,78 m à 32,50 m entre le 21 mai 2018 et le 31 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -0,58 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. La figure 144 indique que la largeur de plage au NMM se déplace généralement de façon négative, mais que les valeurs de recul sont plus importantes à l'automne. La tendance générale est donc au rétrécissement de la plage. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est négatif pour tous les profils, à l'exception des profils n°s 17 et 27. Pour ce secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 22,51 m à 76,15 m. La moyenne de ces largeurs est de 41,72 m.

Bilans sédimentaires

La période comprise entre décembre 2018 et mai 2019 montre une forte érosion de la plage dans la partie centre-sud du secteur étudié et un remodelage anthropique du matériel sédimentaire dans la partie centre-nord du secteur. Sur les $\pm 7\,950\text{ m}^3$ de sédiments érodés, $\pm 6\,600\text{ m}^3$ ont été exportés du secteur d'étude. Seul le matériel accumulé en bord de route est resté dans le système ($\pm 1\,350\text{ m}^3$). Ces sédiments se sont déplacés vers l'épis rocheux de la partie centre-nord du secteur (figure 146).

La période suivante (mai 2019 – août 2019) a surtout été dominée par l'apport de sédiments nouveaux dans le cadre de travaux de rechargement sédimentaire. Elle présente un bilan sédimentaire positif de $\pm 3\,370\text{ m}^3$ sur un total de $\pm 10\,050\text{ m}^3$ de sédiments mobilisés (figure 147). Les $\pm 3\,340\text{ m}^3$ de sédiments érodés sont toutefois restés dans le système puisqu'ils correspondent à un remodelage des tas de sable accumulés le long de la route 199 (figure 146).

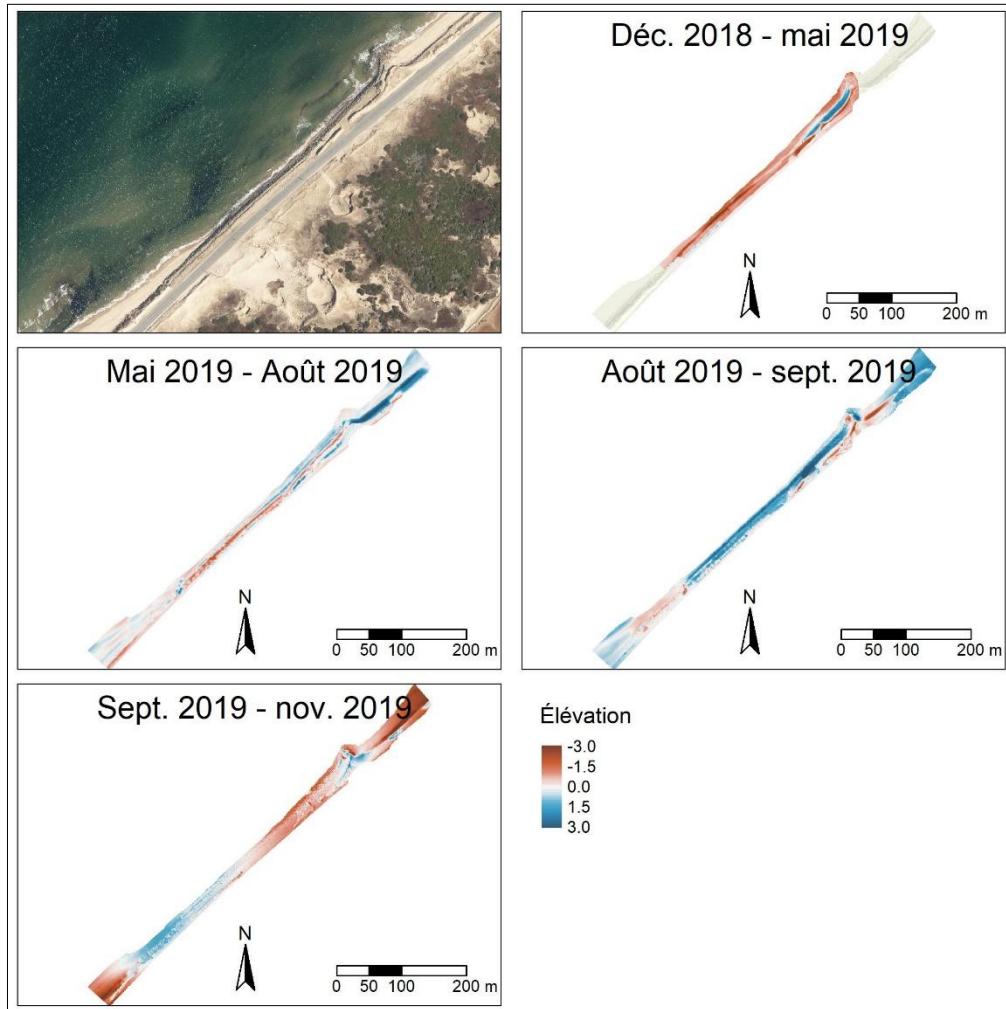


Figure 146. Différentiels d’élévations sur le secteur de la recharge de la plage de la Pointe aux Loups entre décembre 2018 et décembre 2019.

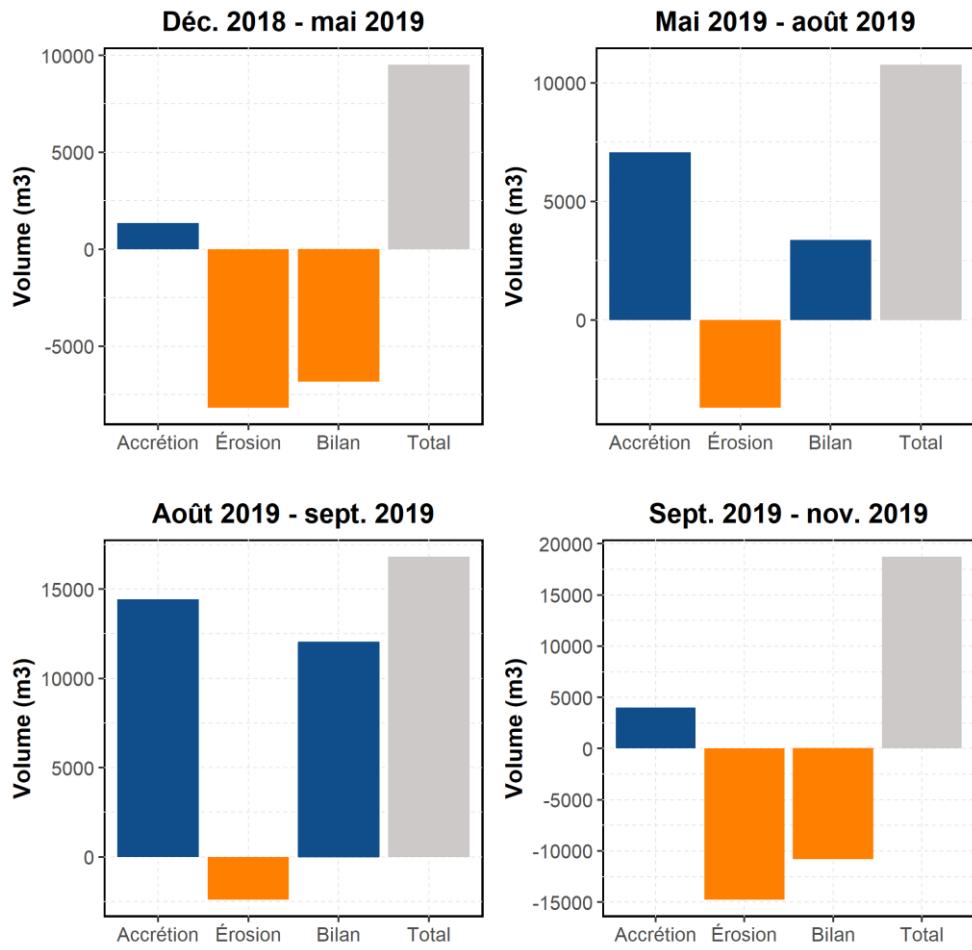


Figure 147. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage de la Pointe aux Loups entre décembre 2018 et décembre 2019.

La dernière période (août à décembre 2019) montre un bilan positif de $\pm 1\ 310\text{ m}^3$ malgré une très forte intervention anthropique. Environ $9\ 570\text{ m}^3$ de sédiments nouveaux ont été apportés pour consolider l'enrochement existant et combler les zones de fragilité causées par la tempête Dorian (figure 147). Les parties adjacentes à l'enrochement n'ont pas fait l'objet d'une intervention humaine. Les $\pm 8\ 260\text{ m}^3$ de sédiments érodés sur ces deux zones témoignent de l'impact important qu'a eu la tempête Dorian sur ce secteur.

4.5.4. Causes explicatives de l'évolution du secteur

Évolution de la plage et de la recharge au fil des années

L'évolution historique de la plage de la Pointe aux Loups indique un ralentissement des taux d'érosion pour le secteur de la recharge, alors que la cellule hydrosédimentaire subit une augmentation des taux d'érosion. Ainsi, alors que le secteur de la recharge affichait des reculs plus importants que le reste de la cellule entre 1963 et 2008, celui-ci affiche des reculs moins importants à partir de 2008, soit après la mise en place du programme de recharge. Le secteur de la recharge, qui s'érode plus rapidement que le reste de la cellule hydrosédimentaire pendant la période sans interventions, peut être considéré comme un foyer d'érosion (Kraus & Galgano, 2001). L'évolution des largeurs de plage au NMM du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 indique toutefois qu'elles diminuent de façon importante. Les largeurs ont cependant évolué de façon positive en 2019.

Tout comme le site de La Martinique, les résultats de bilans sédimentaires et de profils de plage indiquent un fonctionnement complètement artificiel de la plage. Les recharges effectuées sont facilement érodées lors des grands événements de tempête, menant à des reculs de la recharge allant jusqu'à 9 m. La mise en place d'un enrochement en 2019 sur une partie du secteur de recharge donne des résultats mitigés, certains profils affichant un exhaussement du haut estran et d'autres un abaissement. Par contre, les profils sont plus abrupts, ce qui explique la courte longueur des profils effectués en 2019. Les largeurs de plage au NMM semblent avoir augmenté en 2019, soit depuis la mise en place de l'enrochement. Cependant, il est à noter que la largeur est calculée par la distance entre l'isoligne du NMM et la ligne de rivage. Cette ligne de rivage avait été établie en fonction de la recharge mise en plage avant l'enrochement. Dans ce cas, l'enrochement est très massif et affiche une largeur de 5 à 7 m. Ainsi, de 5 à 7 m de largeur de plage sont attribuables à la largeur de l'enrochement (figure 148). De plus, il est difficile d'évaluer la réponse de la plage à l'enrochement, celui-ci étant très récent.



Figure 148. Secteur de la recharge en 2019 : au sud l'enrochement et au nord la recharge.

En 2018, le NMM et le PMSGM atteignaient la mi-hauteur de l'estran, ce qui permettait la dissipation de l'énergie des vagues avant qu'elles atteignent la recharge. Depuis 2019, ces niveaux atteignent la partie supérieure du haut estran, mais très près de l'enrochement, ce qui limite la dissipation de l'énergie.

Comparaison avec les secteurs témoins

Tout comme la plage de La Martinique, les secteurs témoins évoluent de façon sensiblement différente du secteur de la recharge. Les bilans sédimentaires indiquent que la majorité des variations de volumes se limitent strictement à la recharge. De plus, ne faisant pas l'objet de recharge, le haut du profil de ces secteurs affiche une enveloppe de mobilité beaucoup moins importante que celle des profils de recharge.

Le secteur au sud de la recharge affiche une érosion au pied de la dune, ainsi qu'un abaissement du haut estran entre 2018 et 2019. Les largeurs de plage au NMM sont aussi en

diminution entre 2018 et 2019, mais de façon moins marquée que dans le secteur de la recharge.

Le secteur nord de la recharge affiche un abaissement constant du haut estran, mais conserve un haut de plage très stable. Ainsi, la dune n'est pas érodée. Les largeurs de plage au NMM sont aussi en diminution entre 2018 et 2019, mais de façon moins marquée que dans le secteur de la recharge.

Évaluation de l'efficacité de la recharge de plage

Les objectifs de la recharge étaient de réduire l'érosion et de protéger la route 199. Les conclusions quant à l'efficacité de la recharge de plage sont très similaires à celles tirées de l'étude de la plage de La Martinique. Ces deux recharges ont été effectuées par les mêmes intervenants avec une conception très similaire. Pour ce site, la majeure partie du secteur de la recharge a toutefois été remplacé par un enrochement en 2019.

La mise en place des recharges a aussi permis de protéger les infrastructures en éloignant la route de la ligne de rivage. Plusieurs recharges ont été effectuées en prévention, avant l'arrivée de tempêtes. Toutefois, elles n'ont permis que partiellement de réduire l'érosion, les recharges étant régulièrement érodées par les tempêtes. En effet, l'évolution historique démontre que la recharge a réussi à diminuer les taux d'érosion dans le secteur de la recharge. Celui-ci affiche encore des taux d'érosion de -0,27 m/an et demeure donc problématique.

Les bilans sédimentaires et les profils de plage indiquent que les événements érosifs peuvent mener à des reculs ponctuels de la recharge allant jusqu'à 9 m. Tout comme pour la recharge de La Martinique, la pente est de $\pm 1:2$ et la granulométrie est plutôt fine. Ces facteurs rendent donc la recharge très sensible à l'érosion (Raudkivi & Dette, 2002; van Rijn, 2011). Dans ce cas toutefois, les sédiments ne s'accumulent pas sur le bas estran et semblent plutôt complètement sortir du secteur de la recharge lors des tempêtes.

Tout comme pour La Martinique, de grandes quantités de sable ont dû être déversées sur la plage, souvent plus d'une fois par année. La façon dont les recharges ont été mises en place témoigne aussi de l'urgence de protéger la route à l'approche de tempêtes. Aucun plan, devis

ou étude de la durabilité de la recharge n'ont été entrepris, résultant en une recharge qui protège des tempêtes, mais qui résiste très peu de temps. Peu d'information est disponible sur l'état initial des recharges et les recommandations demeurent les mêmes que pour le secteur de La Martinique. Ainsi, afin d'assurer l'efficacité du programme de recharges, il serait recommandé d'effectuer une étude de faisabilité en respectant les critères de conception de la recharge recommandés dans la littérature, notamment en ce qui concerne la pente et la granulométrie. Il serait aussi important de rendre disponible cette information, notamment par le biais de plans et devis. De plus, un suivi concerté entre les équipes de planification et d'exécution des travaux serait souhaitable. Le site de la Pointe aux Loups comporte cependant une particularité, soit la mise en place d'un enrochement en 2019. Un an de suivi n'est pas suffisant pour en tirer des conclusions, mais le suivi devrait être continué afin d'évaluer l'effet de l'enrochement sur la dynamique de la plage.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5.1 LE CONTEXTE DES RECHARGES AU QUÉBEC

5.1.1. L'environnement côtier des recharges

La plupart des études portant sur les recharges de plage ont été effectuées aux États-Unis et en Europe. Les contextes hydrodynamiques, géographiques, géologiques et géomorphologiques du Québec étant différents, il est important de définir les considérations environnementales du Québec qui pourraient affecter l'efficacité des recharges.

Contexte météo-océanique

La côte est de l'Amérique est caractérisée par une importante saisonnalité qui mène à une augmentation du nombre de tempêtes entre octobre et avril, avec un maximum de tempêtes au mois de janvier (Davis et al., 1993; Hirsch et al., 2001). Les données de vagues présentées dans les sections 2.1.2, 2.2.2, 2.3.2 et 2.4.2 abondent également dans ce sens, avec une augmentation des \bar{H}_s moyennes d'entre septembre à janvier et septembre à mai selon le site pour la période 1980 – 2015. La saisonnalité du climat de vagues est également présente sur les autres plages du monde. Bien que la période où l'augmentation des tempêtes se fait sentir puisse varier, beaucoup d'auteurs réfèrent à une saison des tempêtes ou aux tempêtes d'hiver (Davis et al., 1993; Fox & Davis Jr., 1978; Haerens et al., 2012; Hirsch et al., 2001; Hoskins & Hodges, 2002; Jackson et al., 2010; Nam et al., 2015; Rangel-Buitrago & Anfuso, 2011; Roberts et al., 2015; Splinter et al., 2017; Sweet & Zervas, 2011). Ainsi, l'augmentation du nombre et de l'intensité des tempêtes pendant l'hiver n'est pas propre au Québec et fait donc également partie du contexte dans lequel s'inscrivent les études sur les recharges ailleurs dans le monde.

La présence de glace au Québec vient toutefois modifier l'impact que ces tempêtes ont sur la côte. En effet, la présence ou l'absence de glace de mer et d'un pied de glace modifie l'impact des vagues sur la côte. D'une part, la formation d'un pied de glace permet de bloquer les vagues pendant les tempêtes d'hiver (BaMasoud & Byrne, 2012; Bogorodskii et al., 2010;

Corriveau et al., 2018a; Forbes et al., 2002, 2004; Forbes & Taylor, 1994a; Moign, 1976). Celui-ci peut aussi causer de l'érosion à sa base, réfléchissant les vagues comme une structure rigide, (Bernatchez & Dubois, 2004; Forbes et al., 2002) et emprisonner et retirer des sédiments de la plage lors de sa désintégration (BaMasoud & Byrne, 2012; Bernatchez & Dubois, 2004; Moign, 1976; Ogorodov, 2003a; Ogorodov et al., 2005). D'autre part, la glace de mer modifie la capacité des vagues à atteindre la côte. Dans un cas où la glace de mer est présente sur une grande surface, elle empêchera la propagation de vagues générées par le vent (BaMasoud & Byrne, 2012; Corriveau et al., 2018a; Forbes et al., 2004; Ogorodov, 2003a) 2018a; Forbes et al., 2004; Ogorodov, 2003a). Cette même glace pourra aussi atténuer l'énergie des vagues générées plus au large, alors que les vagues perdront exponentiellement de l'énergie à mesure que celles-ci se propagent dans la glace de mer (Corriveau et al., 2018b; Forbes & Taylor, 1994b; Ogorodov, 2003b). Ainsi, la relation entre les vagues et la glace, ainsi que la réduction anticipée du couvert de glace (Corriveau et al., 2018b; Senneville et al., 2014) doit être prise en compte dans la conception des recharges, ces paramètres ayant un impact direct sur l'évolution côtière.

Contextes géographiques, géomorphologiques et géologiques

Les caractéristiques géographiques, géomorphologiques et géologiques propres au Québec peuvent influencer la planification des recharges. Certaines particularités peuvent en effet faire varier certaines méthodes de mise en place des recharges.

Dans la planification des recharges, la profondeur de fermeture est souvent importante, car elle définit la profondeur jusqu'à laquelle le profil de la recharge devrait s'équilibrer (Dean, 2002; Willson et al., 2017). D'ailleurs, la norme aux États-Unis est de recharger le profil jusqu'à la profondeur de fermeture (Brutsché et al., 2015). Dans leur étude sur les foyers d'érosion, Kraus & Galgano (2001) affirment que du matériel de recharge placé irrégulièrement au-delà de la profondeur de fermeture peut engendrer des foyers d'érosion sur le secteur. La réfraction des vagues sur les courbes bathymétriques irrégulières de l'avant-plage aura tendance à créer des schémas de convergence et de divergence dans la déformation des vagues, créant des zones différentes d'érosion et d'accumulation. La réalité est toutefois

très différente au Québec, beaucoup de côtes étant munies d'un bas estran meuble, d'un bas estran rocheux ou d'une batture (Arsenault et al., 2021). Pour ces côtes, la profondeur de fermeture se trouve souvent beaucoup trop loin de la côte pour justifier une recharge allant jusqu'à celle-ci. À Pointe-aux-Outardes par exemple, là où une recharge a eu lieu en 2021, la batture atteint jusqu'à 2,5 km (Bernatchez, 2003). Dans ce cas, la profondeur de fermeture se situe donc à plus de 2,5 km de la plage. Ainsi, il n'est pas envisageable d'effectuer les recharges systématiquement jusqu'à la profondeur de fermeture au Québec.

L'hiver affecte aussi la planification des projets de recharge. Elle limite la fenêtre de temps disponible pour la mise en place des recharges, mais surtout elle ajoute les processus cryogéniques aux processus d'érosion déjà présents sur les côtes des climats plus chauds. Ces processus englobent l'ensemble des processus liés au gel-dégel et sont particulièrement efficaces sur les falaises et les plateformes rocheuses (Bernatchez & Dubois, 2004).

D'autres caractéristiques comme la lithologie ainsi que la nature des dépôts sédimentaires de la cellule hydrosédimentaire sont à prendre en compte pour la mise en place des recharges. Chaque projet s'inscrit dans des contextes géographiques, géomorphologiques et géologiques différents qui doivent être évalués afin d'effectuer le meilleur projet possible.

5.1.2. Conception des recharges

Les méthodes de conception des recharges effectuées au Québec jusqu'à maintenant ont été assez différencierées selon le site d'étude. Alors que certaines méthodes se rapprochent de celles vues dans la littérature, d'autres relèvent davantage de l'essai-erreur. Certaines caractéristiques de conception de recharge seront comparées et discutées dans cette section.

Plans, devis et modélisation

Parmi les recharges étudiées, seule la recharge de l'Anse-aux-Coques à fait l'objet de plans, de devis et de modélisation. La recharge du Banc Larocque a toutefois fait l'objet d'un plan sommaire et de suggestions par rapport à la granulométrie du site. La recharge de la plage Monaghan a également fait l'objet d'un plan sommaire. Les recharges effectuées à la plage de La Martinique et de la Pointe aux Loups ont été effectuées sans plans, devis et modélisation, avec les sédiments disponibles.

La littérature recommande toutefois de bien planifier les projets de recharges en prenant en compte les facteurs environnementaux liés aux sites d'étude et la modélisation des projets de recharges (Campbell & Benedet, 2006; Gourlay et al., 2004; Hamm et al., 2002; National Research Council, 1995).

Volume des recharges

Le volume des recharges effectuées au Québec est très différent des volumes présents dans la littérature. Les volumes des recharges présentées dans cette étude étaient de 10 700 m³ pour l'Anse-aux-Coques (20,19 m³/m), 15 000 m³ pour le banc Larocque (57,50 m³/m), 8 750 m³ pour la plus volumineuse recharge de La Martinique (21,34 m³/m) et de 7 500 m³ pour la plus volumineuse recharge de la Pointe aux Loups (17,05 m³/m). Le volume de la recharge de la plage Monaghan n'est pas connu, mais selon les dimensions à un volume maximal de 2 000 m³ (40,00 m³/m).

Ainsi, selon Campbell et Benedet (2006), ces recharges sont tous à volume faible, étant de moins de 200 m³/m. Par contre, cette catégorisation est basée sur des recharges aux États-Unis qui se trouvent souvent dans des milieux beaucoup plus énergétiques, étant directement exposés aux vagues de l'Atlantique ou du golfe du Mexique. Van Rijn (2011) pour sa part, classifie les volumes de recharge nécessaires selon l'énergie des côtes. Selon lui, les volumes de recharges par unité de longueur sont généralement de 10 – 30 m³/m pour les côtes à faible énergie, de 30 – 75 m³/m pour les côtes à énergie modérée et de 75 – 150 m³/m pour les côtes à grande énergie. Ainsi, les volumes des recharges évaluées se situent dans les volumes pour les côtes à énergie faible et modérée de Van Rijn (2011), ce qui correspond davantage aux conditions côtières de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent (Otros, 1982).

Granulométrie et pente

La grande majorité des études sur les recharges de plages portent sur des plages de sable (Benedet et al., 2004; Campbell & Benedet, 2006; Luo et al., 2016; Pinto & Silveira, 2018; Stauble, 2005). En effet, 94,8% des études sur les recharges portent sur des plages de sable, et seulement 4,6% de graviers (cailloux et galets) (Sauvé, 2022). 95% des sédiments de recharges provenant de sites d'emprunts situés au large (Dean, 2002), il est prévisible que la

plupart des sédiments utilisés soient du sable. Les recharges avec gravier sont toutefois de plus en plus fréquentes (López et al., 2018). Au Québec, la grande majorité des sédiments utilisés pour les projets de recharges proviennent de dépôts sédimentaires terrestres. À notre connaissance, seules les recharges de La Martinique et de la Pointe aux Loups ont utilisé des sédiments de dragage.

Les mers postglaciaires de la dernière glaciation ont laissé sur le territoire québécois une grande quantité de dépôts de surface exploitables d'une granulométrie allant des argiles aux blocs (Brazeau, 1993; Catto et al., 2020). Ces dépôts constituent une source très intéressante pour les bancs d'emprunts des recharges par leur variabilité granulométrique et, parfois, leur accessibilité. En effet, certains de ces dépôts sont déjà exploités où se trouvent près de routes existantes. Cette possibilité explique en partie l'utilisation de matériel plus grossier au Québec, comme pour les recharges de l'Anse-aux-Coques et du Banc Larocque.

La littérature recommande des pentes douces pour les recharges, notamment Van Rijn (2011) avec une pente maximale de 1:20. Bien que cela ait pour avantage de maintenir une plage dissipative, la pente devrait aussi être évaluée pour les plages de sédiments grossiers, celles-ci ayant généralement une pente plus abrupte que les plages de sable.

5.2 ÉVALUATION DES MÉTHODES DE RECHARGE DE PLAGE COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS

Les conclusions des résultats sectoriels du suivi environnemental des travaux de recharge de plage permettent de distinguer trois types de réponses pour les cinq sites étudiés. L'évaluation des méthodes de recharges de plage sera donc présentée en trois parties : 1) la réponse de la plage Monaghan ; 2) la réponse des plages de L'Anse-aux-Coques et du banc Larocque ; 3) la réponse des plages de La Martinique et de la Pointe aux Loups.

5.2.1. Réponse de la plage Monaghan

La recharge de la plage Monaghan a été effectuée en août 2000. Le suivi que nous avons effectué a débuté en 2018, soit 18 ans plus tard. Comme les résultats le montrent, le secteur est largement en accumulation depuis la mise en place de la recharge. Toutefois, le secteur indique une accumulation beaucoup plus marquée depuis 2018, qui est causée par la

migration vers la côte des barres sableuses plutôt que par la recharge. La migration des barres sableuses vers la côte peut mener à l’accolement de la première barre à la plage, processus qui entraîne un apport sédimentaire important et la formation d’une berme sur la plage (Cohn et al., 2017; Hine, 1979; Jensen et al., 2009; Masselink et al., 2006; Phillips et al., 2017; Turner et al., 2016). Cet accolement se produit généralement pendant des périodes où les conditions météo sont calmes ou pendant des périodes post-tempêtes où les sédiments transportés vers le large reviennent à la côte. Le secteur des plages à Sept-Îles, où se situe la plage Monaghan, est caractérisé par une migration des barres sableuses due à deux principaux facteurs. D’une part, la rivière Moisie, située à l’est de la plage Monaghan, est non harnachée ce qui amène une grande quantité de sédiments au système côtier. La forte dérive littorale du secteur permet de transporter ces sédiments vers la zone à l’étude. D’autre part, de petits cours d’eau permettent la formation de flèches sur la plage en maintenant des chenaux temporaires, créant une migration des sédiments de la plage vers le bas de plage. Alors que de nouvelles barres sableuses s’accoleront sur les flèches de plage, le processus se répète engendrant une progradation de la côte (Bernatchez & Fraser, 2012). Il est ainsi difficile de tirer des conclusions claires sur l’efficacité de la recharge, cette accumulation étant principalement due à la migration des barres sableuses et pouvant être due à de nombreux autres facteurs, tels que les changements dans les forçages de vagues, des courants, des vents, de la bathymétrie et de la granulométrie (de Souza & Ângulo, 2003; Pender & Karunaratna, 2013; Seelig, 1983).

Des profils de plages ont toutefois été effectués en 2000 et en 2001 afin d’assurer le suivi de la recharge, mais nous n’avons pas eu accès à ces données. La firme Argus inc. (2001) fait état de quelques résultats dans son rapport final du projet de recharge, à la suite de laquelle, la plage et l’avant-plage se sont engrangées. La firme a toutefois constaté que l’érosion s’était poursuivie à l’ouest de la recharge. Argus en a conclu que la recharge a réussi à freiner l’érosion sur le secteur visé, quoiqu’il y aurait eu une forte érosion au cours de l’automne 2001. Pour ce qui est des profils de 2018-2019, ils indiquent aussi une hauteur du haut de plage plus importante devant la recharge que de part et d’autre de celle-ci, ce qui peut contribuer à limiter l’effet des tempêtes.

La firme Argus inc. (2001) émet également des recommandations à la fin de son rapport, notamment la poursuite du suivi de la recharge et des travaux de végétalisation en haut de plage, la documentation des événements qui provoquent une érosion marquée et l'analyse statistique des événements climatiques. Aucune de ces recommandations ne semble avoir été suivie. Si elles l'avaient été, il serait possible d'effectuer une meilleure analyse de l'efficacité de la recharge à long terme. Outre que ceci soulève l'importance de suivre les recommandations des analystes, cela soulève aussi des enjeux de gestion des risques côtiers par les décideurs.

Finalement la recharge semble avoir été en partie efficace, concordant avec la période d'augmentation de l'avancement de la ligne de rivage et permettant d'élever le haut de plage. La longue période sans données limite toutefois l'analyse de cette efficacité.

5.2.2. Réponse des plages de l'Anse-aux-Coques et du banc Larocque

Les recharges de l'Anse-aux-Coques et du banc Larocque sont les deux seules recharges ayant fait l'objet de plans et devis de conception, ainsi que de l'établissement d'un état initial de la plage. Le site de l'Anse-aux-Coques a toutefois fait l'objet d'un état de référence et d'une analyse de conception beaucoup plus élaborée à partir de données topographiques, granulométriques et hydrodynamiques (Bernatchez, Cormier, et al., 2017; Ropars, 2013). La recharge de l'Anse-aux-Coques a également fait l'objet d'un suivi jusqu'en 2016 (Bernatchez, Cormier, et al., 2017). La recharge du banc Larocque a fait l'objet d'un état de référence granulométrique uniquement, mais d'aucun suivi à la suite de la recharge (Pesca environnement, 2011).

Ces deux recharges, s'étant avérées les plus efficaces et ayant réussi à atteindre leurs objectifs respectifs, démontrent que la recharge de plage peut être une solution bien adaptée aux aléas côtiers de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. L'étude de ces deux sites, particulièrement l'Anse-aux-Coques, soulève aussi l'importance d'effectuer une analyse de l'état de référence et des conditions environnementales dans la planification des travaux de recharges. Ces étapes, accompagnées d'un suivi, facilitent grandement l'analyse de l'efficacité des travaux et permettent, au besoin, d'ajuster les travaux de rechargements futurs. Les recharges de

plage devraient d'ailleurs être vues comme des modèles à bonifier par essai-erreur, avec l'aide des données d'instrumentation post-recharge (Campbell & Benedet, 2006; Hamm et al., 2002).

Bien qu'efficaces, les recharges sur ces deux sites sont toutefois accompagnées d'infrastructures rigides. Dans le cas de Sainte-Luce, le muret pourrait avoir un effet négatif sur le projet de recharge. En effet, comme de hauts niveaux d'eau peuvent l'atteindre lors d'événements hydrodynamiques importants, le muret peut favoriser l'abaissement de la plage et la réduction de la largeur de la plage (Castelle et al., 2009; Cooper & Mckenna, 2008; Defeo et al., 2009), ce qui irait à l'encontre des efforts poursuivis. Cet effet sur la recharge de l'Anse-aux-Coques est d'ailleurs documenté lors de la tempête du 16 novembre 2016 dans le rapport de Bernatchez et al. (2017). La recharge de Carleton pourrait aussi être affectée par l'enrochement situé en amont du courant de dérive principale. Dans ce cas, l'effet de bout pourrait nuire à la recharge et avoir un impact sur plusieurs dizaines de mètres après l'enrochement (Balaji et al., 2017; Kraus & McDougal, 1996). Bien que cet effet n'ait pas été directement mesuré sur le site, cet effet est largement documenté et les données montrent que la plage s'élargit en s'éloignant de l'enrochement.

5.2.3. Réponse des plages de La Martinique et de la Pointe aux Loups

Les recharges de La Martinique et de la Pointe aux Loups sont toutes deux de conception très similaire. Les données de profils et les MNT indiquent qu'elles sont situées en haut de plage et ont une pente très abrupte. Ces deux recharges sont aussi effectuées à partir de sable de dragage de taille similaire à celui de la plage. Dans les deux cas, aucune analyse de l'état de référence et des conditions environnementales n'a été prise en compte dans la conception des recharges. De plus, aucun plan ni devis n'ont été effectués. Ces recharges ont principalement été effectuées en urgence pour protéger les infrastructures routières à l'approche des tempêtes.

Ces projets ont partiellement répondu aux objectifs, en ce sens que l'érosion du secteur a été réduite et que les infrastructures ont été protégées, mais ces recharges sont régulièrement érodées par les tempêtes. Ainsi, les recharges ont permis de réduire le recul de la ligne de

rivage et de protéger la route 199, mais elles ne peuvent pas être considérées efficaces puisqu'elles nécessitent des interventions constantes. Comme souligné par Bernatchez et al. (2010), l'érosion de la plage de la Pointe aux Loups et de La Martinique est fortement influencée par les événements de tempête. Sachant cela, les recharges effectuées devraient être adaptées aux conditions de tempêtes des Îles-de-la-Madeleine, ce qui les rendrait plus durables.

Une recharge très similaire avait été effectuée sur l'île de Sylt, en Allemagne, en 1985 (Hamm et al., 2002). Cette recharge, qui consistait en une berme élevée et peu large sur une côte dunaire, s'est érodée prématûrément dès les premiers mois de la recharge. Les importantes pertes sédimentaires ont été attribuées à la forme de la recharge, trop hautes et pas assez larges, mais les conceptions de recharges subséquentes ont été adaptées pour tenir compte de ces résultats (Hamm et al., 2002).

À l'instar de ce qui a été observé sur l'île de Sylt, les recharges futures des plages de La Martinique et de la Pointe aux Loups pourraient être réajustées afin de favoriser davantage la dissipation de l'énergie des vagues et d'améliorer la durée de vie de ces ouvrages. Ces recharges sont aussi accompagnées d'infrastructures rigides à proximité, ce qui peut entraîner un effet de bout occasionné sur les recharges (Balaji et al., 2017; Jolicoeur & O'Carroll, 2007; Kraus & McDougal, 1996). L'effet de bout sur les recharges de la Pointe aux Loups et de La Martinique est d'ailleurs documenté dans par Bernatchez et al. (2010). Les données de cette étude montrent également que la plage s'élargit en s'éloignant de l'enrochement. L'analyse des largeurs de plage dans cette étude et dans Bernatchez et al. (2010) montrent aussi que les plages sont beaucoup plus étroites pour les secteurs avec enrochement que les secteurs non artificialisés ou avec recharge. Ainsi, les secteurs avec enrochement sont plus susceptibles d'être affectés par les événements de tempête.

L'analyse de ces recharges soulève l'importance d'élaborer les critères de conception de travaux de rechargement de plage en fonction des analyses environnementales locales et de la littérature. Les recharges effectuées sur ces deux sites gagneraient en efficacité si leur conception était réévaluée en fonction des données topographiques, granulométriques et

hydrodynamiques présentées dans ce rapport. Depuis près de 30 ans, des recommandations pour une vision plus à long terme des interventions et pour limiter l'utilisation des infrastructures rigides de ces secteurs ont été émises (Grenier, 1993; Jolicoeur & O'Carroll, 2007; T.D.A (Groupe conseil), 1998). Or, aujourd'hui des infrastructures rigides se construisent encore et la gestion de l'érosion est encore faite dans une perspective à court terme, notamment avec des recharges qui agissent comme tampons contre les tempêtes et ne sont pas conçues pour résister à long terme aux aléas côtiers. La prise en compte de ces recommandations bénéficierait grandement à la protection de ces secteurs.

5.3 RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE ET LE SUIVI DES RECHARGES DE PLAGES

5.3.1. Recommandations générales

Les recharges de plage devraient être effectuées lorsque les processus d'érosion sont bien compris, que les incertitudes dans la conception et la prédition de l'évolution sont prises en compte et qu'une planification et conception selon les normes d'ingénierie est effectuée (National Research Council, 1995). De plus, les projets de recharge doivent être effectués en fonction de la problématique locale et être planifiés en conséquence de celle-ci. Ainsi, la conception sera différente selon qu'il s'agit d'une réponse à un débalancement sédimentaire à court terme, d'un budget sédimentaire négatif à long terme ou de la montée du niveau marin (Cooke et al., 2012). En outre, selon Hamm et al. (2002), les recharges peuvent être effectuées afin d'améliorer la stabilité côtière, d'améliorer la protection côtière ou d'augmenter la largeur de la plage. Les paramètres de la conception varieront donc également en fonction de ces différents objectifs.

La méthodologie à employer pour la mise en place des recharges de plage selon le National Research Council (1995) est la suivante.

- Établir les objectifs du projet et sa prolongation à long terme;
- Établir une méthode d'évaluation claire et quantifiable;
- Établir et maintenir une instrumentation efficace qui supporte la gestion, la conception et l'exécution des recharges subséquentes;

- Développer et maintenir un programme de sensibilisation du public;
- Tenir compte des incertitudes dans le design, des prédictions et de la continuité du projet.

De plus, bien que les considérations économiques et écologiques soient importantes, la combinaison de l'efficacité réelle et de l'efficacité perçue par le public est souvent l'enjeu le plus important (Hamm et al., 2002). La sensibilisation et l'éducation sont d'ailleurs des éléments clés pour l'acceptabilité des projets, et ce autant de la part des scientifiques envers les intervenants que des intervenants envers les scientifiques (Nordstrom, 2005). Ainsi, des campagnes d'éducation et de sensibilisation du public et des intervenants devraient être mises en place.

La collaboration de diverses disciplines qui apportent toutes les connaissances et l'expérience scientifique, d'ingénierie, économique, sociale et de gouvernance disponible facilitent la conception et la réalisation de projets de recharges réussis (National Research Council, 1995; Nordstrom, 2005; Nordstrom et al., 2000). La collaboration entre les compagnies privées, les scientifiques et les instances gouvernementales facilitent aussi la mise en place, la réalisation et l'évaluation des travaux de rechargement de plage. D'ailleurs, selon Peterson et Bishop (2005) une approche nationale coordonnée pour évaluer les changements environnementaux suite au dragage et aux recharges pourrait faciliter la mise en place de procédés plus efficaces, augmenterait la compréhension et l'atténuation des impacts environnementaux de l'ingénierie douce et minimiserait la répétition d'études spécifiques dispendieuses.

5.3.2. Phase de conception

À la lumière de nos résultats et de la littérature, les recommandations pour la phase de conception sont les suivantes.

- Réaliser une analyse de l'état initial du site en incluant au minimum les aspects suivants : la topographie et la granulométrie du site de recharge et d'un site témoin adjacent, les conditions hydrodynamiques à court et à moyen terme, les taux d'érosion historiques, la présence de foyers d'érosions et la présence d'autres infrastructures de protection à proximité. Les résultats montrent que les sites de recharge ayant le mieux

fonctionné sont ceux ayant fait l'objet d'une analyse de l'état initial. De plus, ces recommandations sont en accord avec la littérature (Campbell & Benedet, 2006; Gourlay et al., 2004; Hamm et al., 2002; National Research Council, 1995).

- Considérer les différents types de recharges en fonction de leur emplacement, soit : les recharges de dunes, les recharges de berme (subaériennes), les recharges de profil ou intertidales (subaériennes et submergées) et les recharges d'avant-plages ou de barres d'avant-plage (submergées) (Campbell & Benedet, 2006; Gourlay et al., 2004).
- Effectuer la modélisation de l'évolution du projet de recharge parallèlement et perpendiculairement à la côte en tenant compte, entre autres, de la diffusion des sédiments, du profil d'équilibre de la plage et de la granulométrie (Dean, 1991, 2002; van Rijn, 2011).
- Rédiger des plans et devis en tenant compte de l'analyse de l'état initial et de la modélisation. Une analyse coût-avantage permettrait aussi d'évaluer si la conception présentée est l'option la plus avantageuse (Boyer Villemaire et al., 2016; Campbell & Benedet, 2006; National Research Council, 1995). De plus, une analyse multicritère permettrait aussi de tenir compte des facteurs économiques, géomorphologiques, environnementaux et sociaux (Sauvé et al., 2022).
- Adapter la conception des recharges en fonction des besoins des usagers, de la praticité de l'ingénierie et des considérations écologiques. Les modifications effectuées pour accommoder les groupes d'intérêts devraient aussi être évaluées afin de comprendre pourquoi les projets ne semblent pas optimaux d'un point de vue environnemental et améliorer la coordination des projets (Nordstrom, 2005).
- Dans la mesure du possible, éviter la mise en place d'infrastructures rigides telles que les murs et enrochements en amont de la dérive littorale des recharges. L'effet de bout est bien documenté dans la littérature (Balaji et al., 2017; Bernatchez & Fraser, 2012; Kraus & McDougal, 1996) et les résultats du banc Larocque et de La Martinique indiquent de façon claire une augmentation des largeurs de plage à mesure que l'on s'éloigne de l'enrochement .

- Bien analyser l'effet de la pente de la recharge sur la dissipation de l'énergie et le maintien des sédiments de recharge sur le secteur d'intervention. La pente élevée des recharges effectuées à La Martinique et à la Pointe aux Loups limite fort probablement l'efficacité des ouvrages.

5.3.3. Phase de réalisation

À la lumière de nos résultats et de la littérature, les recommandations pour la phase de réalisation sont les suivantes.

- Effectuer les recharges en fonction de la saisonnalité du transport sédimentaire et de la variation des profils de plage (Davison et al., 1992; Sorensen et al., 1989; Stauble & Holem, 1991). Au Québec, les recharges devraient être effectuées au printemps ou à l'été, la plupart des tempêtes ayant lieu à l'automne et à l'hiver (Danard et al., 2003).
- Effectuer la recharge de façon concertée avec les équipes de recherche, de suivi et de conception, afin d'assurer le respect des plans de conception, des recommandations et la prise de données sur l'état initial de la recharge.
- Considérer prendre les sédiments sur un lieu d'emprunt terrestre ou marin et rendre accessible l'information sur la provenance des sédiments et leurs caractéristiques granulométriques. Aussi, tenir compte de la fraction de sédiments fins et tenter de choisir un lieu d'emprunt qui en contient peu (Dean, 2002).
- Considérer et évaluer les effets du dragage de sédiments, lorsque ceux-ci sont de source marine. La présence de biote sur le site d'emprunt ou d'éléments archéologiques doit être évaluée, afin d'éviter leur destruction (Dean, 2002). Ensuite, les sites d'emprunts peuvent avoir des effets négatifs sur les plages adjacentes en agissant comme trappe à sédiments ou en transformant les vagues, notamment en modifiant les processus de réfraction, de diffraction, de réflexion et de dissipation (Dean, 2002).
- Évaluer et documenter les effets des différentes méthodes de dragage sur le biote et sur la transformation des vagues. L'option considérée la moins dommageable devrait

être choisie. Les bénéfices de différentes méthodes de dragages ont été évoqués, mais peu sont documentés (Nordstrom, 2005).

- Considérer l'utilisation de sable déjà dragué pour le passage de navires. Cette collaboration peut s'avérer bénéfique pour les organisations ayant dragué le sable et celles qui gèrent les projets de recharge en partageant les coûts. Toutefois, les caractéristiques granulométriques doivent être prises en compte, car une incompatibilité du sédiment peut avoir des effets négatifs sur le biote et sur l'efficacité du projet (Dean, 2002; Nordstrom, 2005).
- Évaluer les effets biologiques sur les espèces présentes sur les plages. En effet, les plages sableuses représentent un habitat productif et unique qui supporte plusieurs espèces (Peterson & Bishop, 2005).
- Effectuer un suivi à long terme de la réponse biologique et géomorphologique du milieu. Peu d'études s'y intéressent, menant à des biais quant aux impacts positifs et négatifs de la mise en plage de recharges de plages (Nordstrom, 2005; Peterson & Bishop, 2005).

5.3.4. Suivi et réajustements

À la lumière de nos résultats et de la littérature, les recommandations pour la phase de suivi et réajustements sont les suivantes.

- Effectuer un suivi post-intervention sur chaque renaturalisation et recharge afin d'en évaluer l'efficacité et de réajuster la conception du projet en fonction de son évolution. Dans les méthodes douces d'ingénierie, l'approche préventive est favorisée, ce qui mène à l'implantation de programme d'analyses et d'instrumentation à long terme. Les études à long terme fournissent plus d'information sur l'efficacité du schéma de recharge qu'une étude détaillée locale (Hamm et al., 2002). Les coûts du suivi à long terme devraient aussi être inclus dans les estimations initiales et les fonds mis de côté pour assurer la viabilité des projets (Nordstrom, 2005). Dans cette étude, la mise en place d'un protocole de suivi avant,

pendant et immédiatement après la recharge aurait faciliter l'analyse de l'efficacité des travaux.

- Considérer les données d'instrumentation post-recharge pour raffiner les besoins de recharge ou autres interventions et calibrer les prédictions (Campbell & Benedet, 2006). La conception de la maintenance devrait être adaptée au fil du temps pour refléter l'information et la compréhension obtenues par le suivi, afin de s'assurer que les objectifs du projet sont atteints, que des mesures d'atténuation et de compensation sont mises en place et que les coûts de suivi inutiles sont évités (Michel et al., 2001).
- Considérer que les pertes de sédiments peuvent être bénéfiques pour les plages adjacentes. La documentation de ces effets pourrait changer la conception des recharges comme une opération locale vers une stratégie complète de restauration environnementale (Nordstrom, 2005).
- Prendre en compte l'apport des différents intervenants qui influencent les politiques des projets de renaturalisation et de recharge de plage. Leur contribution et influence est rarement reflétée dans les rapports techniques, qui se concentrent sur les impacts de la mise en place du projet (Nordstrom, 2005).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les résultats ont montré que les recharges peuvent constituer une méthode de protection efficace contre les aléas côtiers. Les différents sites étudiés ont évolué de façons très différentes, mettant en lumière certaines méthodes plus efficaces. De plus, l'analyse des résultats a soulevé certaines lacunes dans la conception des recharges de plages. Les recommandations énoncées proposent une marche à suivre afin d'améliorer l'efficacité des recharges au Québec.

Les sites de l'Anse-aux-Coques et du banc Larocque ont démontré leur efficacité. Les sites maintiennent une largeur de plage au NMM et au PMSGM qui permet de limiter l'effet des vagues, en dissipant leur énergie. Le site de la plage Monaghan semble indiquer une certaine efficacité par l'évolution historique et l'élévation du haut de plage. Toutefois, la longue période sans données et l'intervention d'autres processus d'accumulation sédimentaire limitent l'interprétation des résultats. Les sites de La Martinique et de la Pointe aux Loups indiquent que ces recharges ont permis de limiter le recul de la ligne de rivage et de protéger la route 199 contre les tempêtes. Cependant, les recharges s'érodent régulièrement et doivent être reconstruites. Dans ces deux cas, la conception des recharges ne semble pas adéquate. La majorité des sites indiquent aussi la présence d'infrastructures rigides à proximité qui peuvent avoir une influence négative sur les efforts de recharges réalisés sur les sites d'étude. Dans tous les cas, les recharges répondent au moins partiellement à leurs objectifs. Par contre, une uniformisation des méthodes de conception, de réalisation et de suivi serait bénéfique pour la protection des côtes au Québec.

Les méthodes douces de protection sont plutôt récentes au Québec et le manque de coordination entre les différents projets et entre les différents intervenants en témoigne. Plusieurs projets de recharge ont été effectués, avec plusieurs méthodes d'interventions différentes. Cette étude révèle un manque de documentation sur la conception et la réalisation de ces projets et très peu de suivi à court et à long terme. L'application des recommandations proposées dans ce mémoire permettrait d'améliorer l'étude de l'efficacité de tels projets et de bonifier ceux qui seront réalisés dans le futur. Il serait aussi important de continuer de

renforcer les liens entre les ministères, les firmes de génie et les groupes de recherche pour la mise en place et le suivi efficace des recharges de plage en favorisant le partage de connaissances et de données. Les résultats ont aussi démontré que les projets ayant le mieux fonctionné sont ceux ayant fait l'objet d'une analyse de conception plus détaillée.

Depuis le début de cette étude, plusieurs autres recharges ont été effectuées au Québec ou sont en cours de réalisation (Percé, 2017; Port-Cartier, 2019; Tadoussac, 2021; Isle-aux-Coudres, 2021; Pointe-aux-outardes, 2021; La Grave, 2022; Cap-aux-Meules, 2022). Ces projets sont généralement d'envergure beaucoup plus grande que les projets analysés dans ce mémoire. L'étude réalisée ici pourra servir de base pour le suivi de ces recharges et des recharges à venir. Il sera important de suivre l'évolution de ces nouveaux projets également. Le Québec en est toujours à ses premiers projets de recharges et l'évaluation d'une grande quantité de projets permettra de comprendre comment les particularités environnementales du Québec affectent l'évolution des projets de recharge et permettra d'améliorer les recharges futures.

Une quantité importante de données a aussi été récoltée dans le cadre de ce projet. D'autres analyses à partir de ces données pourraient permettre de mieux comprendre l'évolution à long terme du système côtier et des recharges de plages. Deux autres campagnes d'échantillonnages ont été effectuées en 2019 sur les sites de recharges. Des analyses statistiques sur plus d'une campagne d'échantillonnage permettraient d'étudier le déplacement des sédiments. Des analyses statistiques des profils de plages et de la position de la ligne de rivage permettraient aussi de révéler les patrons de variations à court et à long terme. À partir des données de profils et des données de vagues, des analyses de corrélation pourraient être effectuées afin d'identifier les événements hydrodynamiques responsables de l'évolution des recharges de plage. Il serait aussi intéressant d'effectuer une étude sur les perceptions des populations locales autour des travaux de rechargement de plage et de mettre en place des efforts de vulgarisation scientifique afin de bien expliquer une méthode qui est encore méconnue du public.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adriaanse, L. A., & Coosen, J. (1991). Beach and dune nourishment and environmental aspects. *Coastal Engineering*. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(91\)90056-M](https://doi.org/10.1016/0378-3839(91)90056-M)
- Alcock, F. J. (1935). *Géologie de la région de la Baie de Chaleur*. JO Patenaude.
- Anders, F. J., & Hansen, M. (1990). *Beach and borrow site sediment investigation for a beach nourishment at Ocean City, Maryland*.
- Argus inc. (2001). Protection et restauration du littoral de Sept-Îles: Projets pilotes - Suivi. Dans *Rapport remis à la ville de Sept-Îles*.
- Arsenault, E., Drezja, S., Friesinger, S., Blain, M., Savoie-Ferron, F., Houde-Poirier, M., Faser, C., Marie, G., & Bernatchez, P. (2021). Cartographie des types de côtes du Québec maritime Rapport méthodologique. *Chaire de Recherche En Géoscience Côtière, Laboratoire de Dynamique et de Gestion Intégrée Des Zones Côtières, Université Du Québec à Rimouski. Rapport Remis Au Ministère de l'Environnement et de La Lutte Contre Les Changements Climatiques, Septembre 2021*, 74p. <https://ldgizc.uqar.ca>
- Bachand, É., & Comtois, S. (2016). Recharge en sable et revégétalisation de 2 plages de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec. *Le Naturaliste Canadien*, 140(2), 105–112.
- Balaji, R., Sathish Kumar, S., & Misra, A. (2017). Understanding the effects of seawall construction using a combination of analytical modelling and remote sensing techniques: Case study of Fansa, Gujarat, India. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*, 8(3), 153–160.

- BaMasoud, A., & Byrne, M.-L. (2012). The impact of low ice cover on shoreline recession: A case study from Western Point Pelee, Canada. *Geomorphology*, 173, 141–148.
- Bandet, M., Caulet, C., Beaudry, J., Didier, D., Dubuc, D., Marion, N., McKinnon, R., Paul-Hus, C., Caveen, J., Sévigny, C., Senneville, S., Dumont, D., & Bernatchez, P. (2020). Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MoDESCo). Dans *Phase III: Rapport Final. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, novembre 2020, 259 p.*
- Bayram, A., Larson, M., & Hanson, H. (2007). A new formula for the total longshore sediment transport rate. *Coastal Engineering*, 54(9), 700–710. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.04.001>
- Benedet, L., Finkl, C. W., Campbell, T., & Klein, A. (2004). Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 839–861. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.012>
- Benedet, L., Finkl, C. W., & Hartog, W. M. (2007). Processes controlling development of erosional hot spots on a beach nourishment project. *Journal of Coastal Research*, 33–48.
- Bernatchez, P. (2003). *Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes: Synthèse, processus, causes et perspectives.* Université Laval.
- Bernatchez, P., Arsenault, E., Lambert, A., Bismuth, E., Didier, D., Senneville, S., & Dumont, D. (2017). Programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtière dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MODESCO). Dans *Phase II: Rapport Final. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du*

Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la sécurité publique du Québec, mars 2017, 172p + annexe.

Bernatchez, P., Cormier, L., Van-Wiertz, S., & Marion, N. (2017). Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers (2014-2016) : rapport final. Dans *Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport technique remis à la municipalité de Sainte-Luce, Juin 2017, 111 pages.*

Bernatchez, P., & Dubois, J.-M. (2004). Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie Physique et Quaternaire*, 1, 45–71.

Bernatchez, P., & Fraser, C. (2012). Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Québec, Canada. *Journal of Coastal Research*, 285, 1550–1566. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-10-00189.1>

Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S., & Morissette, A. (2008). Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. *Laboratoire de Dynamique et de Gestion Intégrée Des Zones Côtières, Université Du Québec à Rimouski. Rapport de Recherche Remis Au Consortium OURANOS et Au FACC*, 256. http://www.ouranos.ca/media/publication/145_Bernatchezetal2008.pdf

Bernatchez, P., Fraser, C., Lefaivre, D., & Dugas, S. (2011). Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. *Ocean and Coastal Management*, 54(8), 621–632. <https://doi.org/10.1016/j.ocemano.2011.06.001>

Bernatchez, P., Toubal, T., Van-Wiertz, S., Drejza, S., & Friesinger, S. (2010). *Caractérisation sédimentologique et géomorphologique des unités hydrosédimentaires de la Baie de plaisance et de Pointe-aux-Loups, route 199, îles-de-la-Madeleine.*

Bérubé, D., & Thibault, J. J. (1996). *Géomorphologie littorale du détroit de Northumberland, sud-est du Nouveau-Brunswick*. Ressources naturelles et énergie, Ressources minières et énergie.

Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology: An Introduction* (Second edi). Wiley.
<https://doi.org/10.1029/01eo00219>

Bird, E., & Lewis, N. (2014). *Beach renourishment*. Springer.

Birkemeier, W. A. (1985). Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 111(3), 598–602.

Bitan, M., & Zviely, D. (2020). Sand Beach Nourishment: Experience from the Mediterranean Coast of Israel. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 273.

Blott, S. J., & Pye, K. (2001). GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11), 1237–1248.

Blott, S. J., & Pye, K. (2004). Morphological and Sedimentological Changes on an Artificially Nourished Beach, Lincolnshire, UK. *Journal of Coastal Research*, 20, 214–233.

Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 214, 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>

Bodge, K. R. (1992). Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression. *Journal of Coastal Research*, 47–55.

Bogorodskii, P. v, Marchenko, A. v, Pnyushkov, A. v, & Ogorodov, S. A. (2010). Formation of fast ice and its influence on the coastal zone of the Arctic seas. *Oceanology*, 50(3), 317–326.

Bostock, H. S. (1970). *Physiographic subdivisions of Canada*. Geological Survey of Canada, Department fo Energy, Mines and Resources.

- Boyer Villemaire, U., Circé, M., da Silva, L., Desjarlais, C., & Morneau, F. (2016). Rapport synthèse de l'analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière au Québec et dans les provinces atlantiques. *Ouranos*, 36 pages et annexes.
- Boyer Villemaire, U., St-Onge, G., Bernatchez, P., Lajeunesse, P., & Labrie, J. (2013). High-resolution multiproxy records of sedimentological changes induced by dams in the Sept-Îles area (Gulf of St. Lawrence, Canada). *Marine Geology*, 338, 17–29.
- Brazeau, A. (1993). *Généralités sur l'inventaire des ressources en granulats au Québec*. Le Secteur, Ministere de l'energie et des ressources.
- Brisebois, D. (1981). *Lithostratigraphie des strates permo-carbonifères, de l'archipel des Iles de la Madeleine*. Direction générale des énergies conventionnelles.
- Brown, J. M., Phelps, J. J. C., Barkwith, A., Hurst, M. D., Ellis, M. A., & Plater, A. J. (2016). The effectiveness of beach mega-nourishment, assessed over three management epochs. *Journal of Environmental Management*, 184, 400–408. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.090>
- Brutsché, K. E., Wang, P., Rosati, J. D., & Beck, T. M. (2015). Evolution of a Swash Zone Berm Nourishment and Influence of Berm Elevation on the Performance of Beach-Nearshore Nourishments along Perdido Key , Evolution of a Swash Zone Berm Nourishment and Influence of Berm Elevation on the Performance of Beach-. *Journal of Coastal Research*, 31(4), 964–977. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00087.1>
- Bruun, P. (1954). *Coast erosion and the development of beach profiles* (Vol. 44). US Beach Erosion Board.
- Campbell, T., & Benedet, L. (2006). Beach nourishment magnitudes and trends in the U.S. *Journal of Coastal Research*, 2006(39), 57–64. http://www.cerf-jcr.org/index.php?option=com_content&view=article&id=543:beach-nourishment-magnitudes-and-trends-in-the-us-thomas-j-campbell-and-lindino-benedet&catid=31:ics-2004-proceedingsbrazil&Itemid=90

- Castelle, B., Turner, I. L., Bertin, X., & Tomlinson, R. (2009). Beach nourishments at Coolangatta Bay over the period 1987-2005: Impacts and lessons. *Coastal Engineering*, 56(9), 940–950. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.05.005>
- Catto, N., Kovanen, D. J., & Slaymaker, O. (2020). Quaternary Glacial, Glacimarine and Glaciocustrine History. In *Landscapes and Landforms of Eastern Canada* (pp. 49–77). Springer.
- CERC. (1984). *Shore Protection Manual*.
- CHELRDC. (2007). Shore protection assesment, Beach Nourishment, How Beach Nourishment projects work. *Coastal and Hydraulics Laboratory*, 9.
- CIRIA, CUR, & CETMEF. (2007). *The Rock Manual. The Use of Rock in Hydraulic Engineering (2nd edition)*. C683, CIRIA, London.
- Cohn, N., Ruggiero, P., de Vries, S., & García-Medina, G. (2017). Beach growth driven by intertidal sandbar welding. *Proceedings of Coastal Dynamics*, 12–16.
- Collins, M. B., & Balson, P. S. (2007). Coastal and shelf sediment transport: an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 274(1), 1–5.
- Cooke, B. C., Jones, A. R., Goodwin, I. D., & Bishop, M. J. (2012). Nourishment practices on Australian sandy beaches: A review. *Journal of Environmental Management*, 113, 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.09.025>
- Cooper, J. A. G., & Mckenna, J. (2008). Working with natural processes : the challenge for coastal protection strategies. *The Geographical Journal*, 174(4), 315–331.
- Corriveau, M., Bernatchez, P., Belzile, M., & Senneville, S. (2018a). Influence de la réduction du couvert de glace sur l'érosion côtière en bordure des infrastructures routières de l'est du Québec dans un contexte de changements climatiques. *Rimouski*, 1–614.
- Corriveau, M., Bernatchez, P., Belzile, M., & Senneville, S. (2018b). Influence de la réduction du couvert de glace sur l'érosion côtière en bordure des infrastructures

routières de l'est du Québec dans un contexte de changements climatiques. *Rimouski*, 1–614.

Daigle, R. J. (éditeur). (2006). Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick: Rapport de projet. In *Environnement Canada, 644 p. (Chapitre 4.5 : Érosion des côtes ; O'Carroll, S., Bérubé, D., Forbes, D.L., Hanson, A.L., Jolicoeur, S. et Fréchette, A., p. 342-423)*.

Danard, M., Munro, A., & Murty, T. (2003). Storm surge hazard in Canada. *Natural Hazards*, 28(2–3), 407–434.

Davidson-Arnott, R. (2010). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Cambridge University Press.

Davison, A. T., Nicholls, R. J., & Leatherman, S. P. (1992). Beach Nourishment as a Coastal Management Tool: An Annotated Bibliography on Developments Associated with the Artificial Nourishment of Beaches Beach Nourishment as a Coastal Management Tool: Bibliography on Developments Associated with the Nourishment of. *Journal of Coastal Research*, 8(4), 984–1022.
<http://www.jstor.org/stable/4298052> <http://www.jstor.org/stable/4298052>

Davis, R. E., Demme, G., & Dolan, R. (1993). Synoptic climatology of Atlantic coast north-easters. *International Journal of Climatology*, 13(2), 171–189.

Dean, R. G. (1975). Compatibility of borrow material for beach fills. In *Coastal Engineering 1974* (pp. 1319–1333).

Dean, R. G. (1977). *Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf coasts*. Department of Civil Engineering and College of Marine Studies, University of

Dean, R. G. (1987). Coastal sediment processes, toward engineering solutions. *Coastal Sediments' 87, Specialty Conference on Advances in Understanding of Coastal Sediment Processes, ASCE, New Orleans, LA, 1987*, 1, 1–24.

Dean, R. G. (1991). Equilibrium Beach Profiles: Principles and Applications. *Journal of Coastal Research*, 7(1), 53–84.

- Dean, R. G. (2002). *Beach nourishment: theory and practice* (Vol. 18). World Scientific Publishing Company.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2002). Coastal processes with engineering applications cambridge university press. *New York*.
- Defeo, O., McLachlan, A., Schoeman, D. S., Schlacher, T. A., Dugan, J., Jones, A., Lastra, M., & Scapini, F. (2009). Threats to sandy beach ecosystems: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.022>
- de Jongh, L. (2017). *Initial morphological evolution of a mega nourishment: The Hondsbossche Dunes one year after construction*.
- Delft Hydraulics Laboratory. (1987). *Manual on artificial beach nourishment: Vol. Report No* (Rijkswaterstaat, The delft hydraulics Laboratory Centre for Civil Engineering Research, Codes and Specifications, Ed.).
- Deltas. (2021). *3D/2D modelling suite for integral water solutions: Delft3D*. 710.
- de Schipper, M. A., Ludka, B. C., Raubenheimer, B., Luijendijk, A. P., & Schlacher, T. A. (2020). Beach nourishment has complex implications for the future of sandy shores. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1–15.
- de Souza, M. C., & Ângulo, R. J. (2003). Decadal and inter-annual variations of shoreline and beach volumes in Itapoá (Santa Catarina, Brazil). *Journal of Coastal Research*, 202–208.
- Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R., & Van-Wierst, S. (2015). Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 3(3), 560–590. <https://doi.org/10.3390/jmse3030560>
- Dionne, J.-C. (2002). État des connaissances sur la ligne de rivage Micmac de JW Goldthwait (estuaire du Saint-Laurent). *Géographie Physique et Quaternaire*, 56(1), 97–121.

- Dionne, J.-C. (2009). *Aspects géomorphologiques de la batture à blocs entre Sainte-Luce-sur-Mer et Sainte-Flavie, côte sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent*. Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke.
- Diouf Simon, Bérubé, D., & Robichaud André. (2021). Impacts des structures rigides de protection sur la côte néo-brunswickoise de la baie des Chaleurs au Canada. *VertigO*, 21(2), 1–26. [https://doi.org/https://doi.org/10.4000/vertigo.32393](https://doi.org/10.4000/vertigo.32393)
- Dolan, R., Hayden, B. P., May, P., & May, S. (1980). The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48(4), 22–29.
- Dredge, L. A. (1983). *Surficial geology of the Sept-Îles area, Quebec north shore* (Vol. 408). Geological Survey of Canada.
- Dredge, L. A., Mott, R. J., & Grant, D. R. (1992). Quaternary stratigraphy, paleoecology, and glacial geology, Îles de la Madeleine, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29(9), 1981–1996.
- Dubois, J.-M. (1979). *Environnements quaternaires et évolution postglaciaire d'une zone côtière en émersion en bordure sud du bouclier canadien: la moyenne côte nord du Saint-Laurent, Québec*. University of ottawa.
- Dubois, J.-M. (1992). Le paysage naturel et son évolution. *Infogéographes*, 1, 41–49.
- Elko, N. A., Holman, R. A., & Gelfenbaum, G. (2005). Quantifying the rapid evolution of a nourishment project with video imagery. *Journal of Coastal Research*, 633–645.
- Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carboneau, P. E. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), 421–430.
- Forbes, D. L., Manson, G. K., Chagnon, R., Solomon, S. M., van der Sanden, J. J., & Lynds, T. L. (2002). Nearshore ice and climate change in the southern Gulf of St. Lawrence. *Ice in the Environment. Proceedings 16th IAHR International Symposium on Ice*, 344–351.

- Forbes, D. L., Parkes, G. S., Manson, G. K., & Ketch, L. A. (2004). Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, 210(1–4), 169–204.
- Forbes, D. L., & Taylor, R. B. (1994a). Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts. *Progress in Physical Geography*, 18(1), 59–89.
- Forbes, D. L., & Taylor, R. B. (1994b). Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts. *Progress in Physical Geography*, 18(1), 59–89.
- Fox, W. T., & Davis Jr., R. A. (1978). Seasonal variation in beach erosion and sedimentation on the Oregon coast. *Geological Society of America Bulletin*, 89(10), 1541–1549.
- Fraser, C., Bernatchez, P., Dugas, S., & Drejza, S. (2012). Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC de Bonaventure. *Chaire de Recherche En Géoscience Côtière, Laboratoire de Dynamique et de Gestion Intégrée Des Zones Côtières, Université Du Québec à Rimouski. Rapport Remis Au Ministère de La Sécurité Publique Du Québec*.
- GENIVAR. (2012). Analyse de solutions en érosion côtière à L’Anse-aux-Coques, Sainte-Luce. *Rapport de GENIVAR Inc. à La Municipalité de Sainte-Luce. 131 p. et Annexes*.
- Gosselin, C. (1988). Géologie de la région de Maria. *Ministère de l’Énergie et Des Ressources, Québec, Rapport ET*, 1–87.
- Gourlay, M. R., Harper, B. A., Cox, R. J., Stone, P. B., & Webb, T. (2004). *Coastal Engineering Guidelines for working with the Australian coast in an ecologically sustainable way*.
- Grenier, A. (1993). *Évolution littorale récente et impact des structures artificielles aux îles de la Madeleine, golfe du Saint-Laurent, Québec*.
- Grenier, A., & Dubois, J.-M. (1992). L’évolution des côtes aux Îles-de-la-Madeleine. *Info Géo Graphes*, 1, 59–64.

- Haerens, P., Bolle, A., Trouw, K., & Houthuys, R. (2012). Definition of storm thresholds for significant morphological change of the sandy beaches along the Belgian coastline. *Geomorphology*, 143, 104–117.
- Hallermeier, R. J. (1978). Uses for a calculated limit depth to beach erosion. Dans *Coastal Engineering 1978* (pp. 1493–1512).
- Hallermeier, R. J. (1981). A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4, 253–277.
- Hamm, L., Capobianco, M., Dette, H. H., Lechuga, A., Spanhoff, R., & Stive, M. J. F. (2002). A summary of European experience with shore nourishment. *Coastal Engineering*, 47(2), 237–264.
- Hands, E. B., & Allison, M. C. (1991). Mound migration in deeper water and methods of categorizing active and stable depths. *Coastal Sediments*, 1985–1999.
- Hétu, B. (1998). La déglaciation de la région de Rimouski, Bas-Saint-Laurent (Québec): indices d'une récurrence glaciaire dans la mer de Goldthwait entre 12 400 et 12 000 BP. *Géographie Physique et Quaternaire*, 52(3), 325–347.
- Hétu, B., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., & Fraser, C. (2006). *Déglaciation et évolution du niveau marin relatif dans la région de Carleton, Gaspésie méridionale*. 32(2), 9–10.
- Hétu, B., Rémillard, A. M., Bernatchez, P., & St-Onge, G. (2020). Landforms and Landscapes of the Magdalen Islands: The Role of Geology and Climate. Dans *Landscapes and Landforms of Eastern Canada* (pp. 431–451). Springer.
- Hine, A. C. (1979). Mechanisms of berm development and resulting beach growth along a barrier spit complex. *Sedimentology*, 26(3), 333–351.
- Hirsch, M. E., Degaetano, A. T., & Colucci, S. J. (2001). An East Coast winter storm climatology. *Journal of Climate*, 14(5), 882–899.
- Holman, R. A., Lalejini, D. M., Edwards, K., & Veeramony, J. (2014). A parametric model for barred equilibrium beach profiles. *Coastal Engineering*, 90, 85–94.

- Hoskins, B. J., & Hodges, K. I. (2002). New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(6), 1041–1061.
- Inman, D. L., & Bagnold, R. A. (1963). *Littoral processes. The Sea, Vol. 3*. Wiley-Interscience, New York.
- Inman, D. L., Elwany, M. H. S., & Jenkins, S. A. (1993). Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 98(C10), 18181–18199.
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. E. B. Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, A. N. L. M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, & and L. L. W. S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, Eds.). Cambridge University Press.
- Jackson, N. L., Nordstrom, K. F., Saini, S., & Smith, D. R. (2010). Effects of nourishment on the form and function of an estuarine beach. *Ecological Engineering*, 36, 1709–1718. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.07.016>
- Jafari, N. H., Harris, B. D., & Stark, T. D. (2019). Settlement of the Caminada Headlands Beach and Dune Nourishment in Coastal Louisiana. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(12), 5019013.
- Jensen, S. G., Aagaard, T., Baldock, T. E., Kroon, A., & Hughes, M. (2009). Berm formation and dynamics on a gently sloping beach; the effect of water level and swash overtopping. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(11), 1533–1546.
- Jolicoeur, S., & O'Carroll, S. (2007). Sandy barriers, climate change and long-term planning of strategic coastal infrastructures, Îles-de-la-Madeleine, Gulf of St. Lawrence (Québec, Canada). *Landscape and Urban Planning*, 81(4), 287–298.
- Joyce, H. M., Hardy, R. J., Warburton, J., & Large, A. R. G. (2018). Sediment continuity through the upland sediment cascade: geomorphic response of an upland river to an

extreme flood event. *Geomorphology*, 317, 45–61.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.05.002>

Kamphuis, J. W. (1991). Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 117(6), 624–640.

Kana, T. W., & Mohan, R. K. (1998). Analysis of nourished profile stability following the fifth Hunting Island (SC) beach nourishment project. *Coastal Engineering*, 33, 117–136.

Kirkwood, D. (1989). Géologie structurale de la région de Percé. *Ministère de l'Énergie et Des Ressources, Québec, ET*, 17–87.

Kobayashi, N. (2016). Coastal sediment transport modeling for engineering applications. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 142(6), 3116001.

Kobayashi, N., Buck, M., Payo, A., & Johnson, B. D. (2009). Berm and dune erosion during a storm. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 135(1), 1–10.

Komar, P. D. (1977). Selective longshore transport rates of different grain-size fractions within a beach. *Journal of Sedimentary Research*, 47(4), 1444–1453.

Komar, P. D., & McDougal, W. G. (1994). The analysis of exponential beach profiles. *Journal of Coastal Research*, 59–69.

Kraus, N. C., & Galgano, F. A. (2001). *Beach erosional hot spots: types, causes, and solutions*. Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note CHETN-II-44, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg (2001).

Kraus, N. C., & McDougal, W. G. (1996). The effects of seawalls on the beach: Part I, an updated literature review. *Journal of Coastal Research*, 691–701.

Krumbein, W. C. (1957). A Method for Specification on Sand for Beach Fill Evaluation. TM 102. *US Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board*.

- Krumbein, W. C., & James, W. R. (1965). *A lognormal size distribution model for estimating stability of beach fill material* (Issue 16). US Army Coastal Engineering Research Center.
- Kunte, P. D., Alagarsamy, R., & Hursthouse, A. S. (2013). Sediment fluxes and the littoral drift along northeast Andhra Pradesh Coast, India: estimation by remote sensing. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(6), 5177–5192.
- Kunte, P. D., & Wagle, B. G. (1993). Remote Sensing Approach to Determine Net Shore Drift Direction: A Case Study along the Central East Coast of India. *Journal of Coastal Research*, 9(3), 663–672.
- Landry, B., Beaulieu, J., Gauthier, M., Lucotte, M., Moingt, S., Occhietti, S., Pinti, D. L., & Quirion, M. (2013). *Notions de géologie*. Groupe Modulo inc.
- Larson, M., Hanson, H., & Kraus, N. C. (1997). Analytical solutions of one-line model for shoreline change near coastal structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 123(4), 180–191.
- Lebuis, J., & David, P. (1977). La stratigraphie et les événements du Quaternaire de la partie occidentale de la Gaspésie, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 31(3–4), 275–296.
- Lindeberg, T. (2012). *Scale invariant feature transform*.
- López, I., Aragonés, L., Villacampa, Y., & Navarro-González, F. J. (2018). Gravel beaches nourishment: Modelling the equilibrium beach profile. *Science of the Total Environment*, 619–620, 772–783. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.156>
- Luo, S., Liu, Y., Jin, R., Zhang, J., & Wei, W. (2016). A guide to coastal management: Benefits and lessons learned of beach nourishment practices in China over the past two decades. *Ocean and Coastal Management*, 134, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.10.011>

- Martino, S., & Amos, C. L. (2015). Valuation of the ecosystem services of beach nourishment in decision-making: The case study of Tarquinia Lido, Italy. *Ocean and Coastal Management*, 111, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.03.012>
- Masselink, G., Kroon, A., & Davidson-Arnott, R. G. D. (2006). Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings—a review. *Geomorphology*, 73(1–2), 33–49.
- Masselink, G., & Short, A. D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: a conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*, 785–800.
- Matias, A., Ferreira, Ó., Dias, J. A., & Vila-Concejo, A. (2004). Development of indices for the evaluation of dune recovery techniques. *Coastal Engineering*, 51(3), 261–276.
- McLaren, P. (1981). An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Research*, 51(2), 611–624.
- McLellan, T. N., & Kraus, N. C. (1991). Design guidance for nearshore berm construction. *Coastal Sediments*, 2000–2011.
- Michel, J., Nairn, R., Johnson, J. A., & Hardin, D. (2001). Development and design of biological and physical monitoring protocols to evaluate the long-term impacts of offshore dredging operations on the marine environment. *Contract*, 14–35, 1–31051.
- Moign, A. (1976). L'action des glaces flottantes sur le littoral et les fonds marins du Spitsberg central et nord-occidental. *La Revue de Géographie de Montréal*, 30(1–2), 51–64.
- Moore, B. D. (1982). Beach profile evolution in response to changes in water level and wave height. *MSc Thesis, University of Delaware*.
- Morton, R. A., Miller, T., & Moore, L. (2005). Historical shoreline changes along the US Gulf of Mexico: a summary of recent shoreline comparisons and analyses. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 704–709.

- Nam, C. F. H., Aston, J. A. D., Eckley, I. A., & Killick, R. (2015). The uncertainty of storm season changes: quantifying the uncertainty of autocovariance changepoints. *Technometrics*, 57(2), 194–206.
- National Research Council. (1995). *Beach Nourishment and Protection*.
<https://doi.org/10.17226/4984>
- Nicholls, R. J. (1995). Coastal megacities and climate change. *GeoJournal*, 37(3), 369–379.
<https://doi.org/10.1007/BF00814018>
- Nordstrom, K. F. (2005). Beach nourishment and coastal habitats: research needs to improve compatibility. *Restoration Ecology*, 13(1), 215–222.
- Nordstrom, K. F., Lampe, R., & Vandemark, L. M. (2000). Reestablishing naturally functioning dunes on developed coasts. *Environmental Management*, 25(1), 37–51.
- Nordstrom, K. F., McCluskey, J. M., & Rosen, P. S. (1986). *Aeolian processes and dune characteristics of a developed shoreline: Westhampton Beach, New York*.
- Oertel, G. F. (2005). Coasts, Coastlines, Shores, and Shorelines. Dans M. L. Schwartz (Ed.), *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 323–327). Springer Netherlands.
https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_94
- Ogorodov, S. A. (2003a). The Role of Sea Ice in the Coastal Zone Dynamics of the Arctic Seas. *Water Resources*, 30(5).
- Ogorodov, S. A. (2003b). The Role of Sea Ice in the Coastal Zone Dynamics of the Arctic Seas. *Water Resources*, 30(5).
- Ogorodov, S. A., Kamalov, A. M., Zubakin, G. K., & Gudoshnikov, Y. P. (2005). The role of sea ice in coastal and bottom dynamics in the Pechora Sea. *Geo-Marine Letters*, 25(2), 146–152.
- Ojeda, E., Ruessink, B. G., & Guillen, J. (2008). Morphodynamic response of a two-barred beach to a shoreface nourishment. *Coastal Engineering*, 55(12), 1185–1196.
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.05.006>

- Otvos, E. G. (1982). Low-energy coast. *Beaches and Coastal Geology*, 522.
- Papanicolaou, A. (Thanos) N., Elhakeem, M., Krallis, G., Prakash, S., & Edinger, J. (2008). Sediment transport modeling review—current and future developments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 1–14.
- Pelnard-Considère, R. (1956). Essai de theorie de l'evolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. *Journées de l'hydraulique*, 4(1), 289–298.
- Pender, D., & Karunaratna, H. (2013). A statistical-process based approach for modelling beach profile variability. *Coastal Engineering*, 81, 19–29.
- Pesca environnement. (2011). *Recharge de plage et aménagement de la berge, avenue du phare - ADDENDA 1*.
- Peterson, C. H., & Bishop, M. J. (2005). Assessing the environmental impacts of beach nourishment. *Bioscience*, 55(10), 887–896.
- Peulvast, J. P., Bouchard, M., Jolicoeur, S., Pierre, G., & Schroeder, J. (1996). Palaeolandforms and morphotectonic evolution around the Baie des Chaleurs (eastern Canada). *Geomorphology*, 16(1 SPEC. ISS.), 5–32. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00082-G](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00082-G)
- Phillips, M. S., Harley, M. D., Turner, I. L., Splinter, K. D., & Cox, R. J. (2017). Shoreline recovery on wave-dominated sandy coastlines: the role of sandbar morphodynamics and nearshore wave parameters. *Marine Geology*, 385, 146–159.
- Pinto, C. A., & Silveira, T. (2018). *Beach nourishment practice along the Portuguese coastline : Framework and review (1950-2017)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12655.89767>
- Pranzini, E., Anfuso, G., & Muñoz-Perez, J. J. (2018). A probabilistic approach to borrow sediment selection in beach nourishment projects. *Coastal Engineering*, 139, 32–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.05.001>

- Radermacher, M., de Schipper, M. A., Price, T. D., & Huisman, B. J. A. (2018). Behaviour of subtidal sandbars in response to nourishments. *Geomorphology*, 313, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.04.005>
- Rangel-Buitrago, N., & Anfuso, G. (2011). Morphological changes at Levante Beach (Cadiz, SW Spain) associated with storm events during the 2009–2010 winter season. *Journal of Coastal Research*, 1886–1890.
- Raudkivi, A. J., & Dette, H. H. (2002). Reduction of sand demand for shore protection. *Coastal Engineering*, 45(3–4), 239–259. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00036-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00036-4)
- Rémillard, A. M., Buylaert, J. P., Murray, A. S., St-Onge, G., Bernatchez, P., & Hétu, B. (2015). Quartz OSL dating of late Holocene beach ridges from the Magdalen Islands (Quebec, Canada). *Quaternary Geochronology*, 30, 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.03.013>
- Rémillard, A. M., St-Onge, G., Bernatchez, P., Hétu, B., Buylaert, J., Murray, A. S., & Vigneault, B. (2016). Chronology and stratigraphy of the Magdalen Islands archipelago from the last glaciation to the early Holocene: new insights into the glacial and sea-level history of eastern Canada. *Boreas*, 45(4), 604–628.
- Richer-Laflèche, M. (2017). *Caractérisations géophysique et géotechnique de la partie profonde de la plage de Ste-Luce-sur-Mer*.
- Roberts, K. J., Colle, B. A., Georgas, N., & Munch, S. B. (2015). A regression-based approach for cool-season storm surge predictions along the New York–New Jersey coast. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54(8), 1773–1791.
- Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., & Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11), 1133–1152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>
- Ropars, Y. (2013). *Protection de la berge : Sainte-Luce, Québec*.

- Sauvé, P. (2022). Identification et développement d'ouvrages de protection côtière pour augmenter la résilience des communautés côtières dans un contexte de changements climatiques. Dans *Journal of Educational Technology & Society* (Vol. 10, Issue 3). Université du Québec à Rimouski.
- Sauvé, P., Bernatchez, P., & Glaus, M. (2022). Multicriteria decision analysis to assist in the selection of coastal defence measures: Involving coastal managers and professionals in the identification and weighting of criteria. *Frontiers in Marine Science*, 9, 845348.
- Seelig, W. N. (1983). Understanding beach erosion and accretion. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 109(4), 490–494.
- Senneville, S., St-Onge Drouin, G., dumont, D., Bihan-Poudec, A.-C., Belemaalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S., & Villeneuve, R. (2014). *Rapport final: Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques*. 384.
- Shahan, T. A. (2018). *Morphologic evolution and alongshore variability of two beach nourishment projects in Southeast FL, USA*. Florida Atlantic University.
- Simard, M. (1986). *Géologie et évaluation du potentiel minéral de la région de Carleton*. Gouvernement du Québec, Direction générale de l'exploration géologique et
- Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40(2), 247–275.
- Sorensen, R. M., Douglass, S. L., & Weggel, J. R. (1989). Results from the Atlantic City, NJ beach nourishment monitoring program. Dans *Coastal Engineering 1988* (pp. 2806–2817).
- Splinter, K. D., Turner, I. L., Reinhardt, M., & Ruessink, G. (2017). Rapid adjustment of shoreline behavior to changing seasonality of storms: observations and modelling at an open-coast beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(8), 1186–1194.
- Stauble, D. K. (2005). *A review of the role of grain size in beach nourishment projects*.

- Stauble, D. K. (2007). Assessing beach fill compatibility through project performance evaluation. Dans *Coastal Sediments' 07* (pp. 2418–2431).
- Stauble, D. K., & Holem, G. W. (1991). Long term assessment of beach nourishment project performance. *Coastal Zone'91*, 510–524.
- Stive, M. J. F., de Schipper, M. A., Luijendijk, A. P., Aarninkhof, S. G. J., van Gelder-Maas, C., van Thiel De Vries, J. S. M., de Vries, S., Henriquez, M., Marx, S., & Ranasinghe, R. (2013). A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: The sand engine. *Journal of Coastal Research*, 29(5), 1001–1008. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00070.1>
- Stronkhorst, J., Huisman, B., Giardino, A., Santinelli, G., & Santos, F. D. (2018). Sand nourishment strategies to mitigate coastal erosion and sea level rise at the coasts of Holland (The Netherlands) and Aveiro (Portugal) in the 21st century. *Ocean and Coastal Management*, 156, 266–276. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.017>
- Sweet, W. v., & Zervas, C. (2011). Cool-season sea level anomalies and storm surges along the US East Coast: Climatology and comparison with the 2009/10 El Niño. *Monthly Weather Review*, 139(7), 2290–2299.
- Syvitski, J. (1992). Marine geology of Baie des Chaleurs. *Géographie Physique et Quaternaire*, 46(3), 331–348.
- T.D.A (Groupe conseil). (1998). *Faisabilité technique et environnementale, protection de la Route 199*.
- Thom, B. G., & Hall, W. (1991). Behaviour of beach profiles during accretion and erosion dominated periods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16(2), 113–127.
- Tolman, H. L. (2014). the WAVEWATCH III Development Group: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18. *Technical Note, Environmental Modeling Center, National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, College Park, MD*.

- Tonk, A., & Masselink, G. (2005). Evaluation of Longshore Transport Equations with OBS Sensors, Streamer Traps, and Fluorescent Tracer. *Journal of Coastal Research*, 215(1970), 915–931. <https://doi.org/10.2112/04-0209.1>
- Tremblay, M., Vigneault, B., Delâitre, F., Chatagnier, H., & Chouinard, M.-P. (2014). *Rapport d'analyse environnementale de la demande de soustraction de la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement du projet de recharge de plage de Sainte-Luce-sur-Mer sur le territoire de la municipalité de Sainte-Luce.*
- Turner, I. L., Harley, M. D., Short, A. D., Simmons, J. A., Bracs, M. A., Phillips, M. S., & Splinter, K. D. (2016). A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia. *Scientific Data*, 3, 1–13. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.24>
- Udden, J. A. (1914). Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25(1), 655–744.
- van der Wal, D. (1998). The impact of the grain-size distribution of nourishment sand on aeolian sand transport. *Journal of Coastal Research*, 620–631.
- van der Wal, D. (2004). Beach-dune interactions in nourishment areas along the Dutch coast. *Journal of Coastal Research*, 20(1 (201)), 317–325.
- van Duin, M. J. P., Wiersma, N. R., Walstra, D. J. R., van Rijn, L. C., & Stive, M. J. F. (2004). Nourishing the shoreface: Observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 813–837. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.011>
- van Rijn, L. C. (2011). Coastal erosion and control. *Ocean and Coastal Management*, 54(12), 867–887. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004>
- van Rijn, L. C. (2014a). A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle. *Coastal Engineering*, 90, 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.04.008>

van Rijn, L. C. (2014b). *Beach Nourishment*. <https://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Beachnourishment2014.pdf>

Van-Wiertz, S., Bernatchez, P., & Larouche, C. (2017). Suivi topographique côtier au moyen d'un système LiDAR mobile terrestre: exemple d'une recharge sédimentaire de plage. *GEOMATICA*, 71(4), 194–212.

Veillette, J. J., & Cloutier, M. (1993). *Géologie des formations en surface, Gaspésie, Québec*. Commission géologique du Canada.

Verhagen, H. J. (1992). Method for artificial beach nourishment. Dans *Coastal Engineering 1992* (pp. 2474–2485).

Verhagen, H. J. (1996). Analysis of beach nourishment schemes. *Journal of Coastal Research*, 179–185.

Wang, P., Elko, N. A., & Roberts, T. M. (2009). Profile equilibration and longshore spreading associated with beach nourishment: A case study along west-central Florida coast. *Coastal Dynamics*, 73, 1–13.

Weggel, J. R. (1996). A primer on monitoring beach nourishment projects. *Oceanographic Literature Review*, 3(43), 317.

Wentworth, C. K. (1922). The Wentworth scale of grain size for sediments. *J Geol*, 30, 381.

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). ‘Structure-from-Motion’photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.

Willson, K., Thomson, G., Briggs, T. R., Elko, N., & Miller, J. (2017). Beach nourishment profile equilibration: What to expect after sand is placed on a beach. *Shore & Beach*, 85(2), 49–51.

WSP. (2015). Étude de faisabilité pour l’élaboration des plans d'avant-projet préliminaire pour la stabilisation de la plage et de la côte pour les secteurs de la Martinique et de

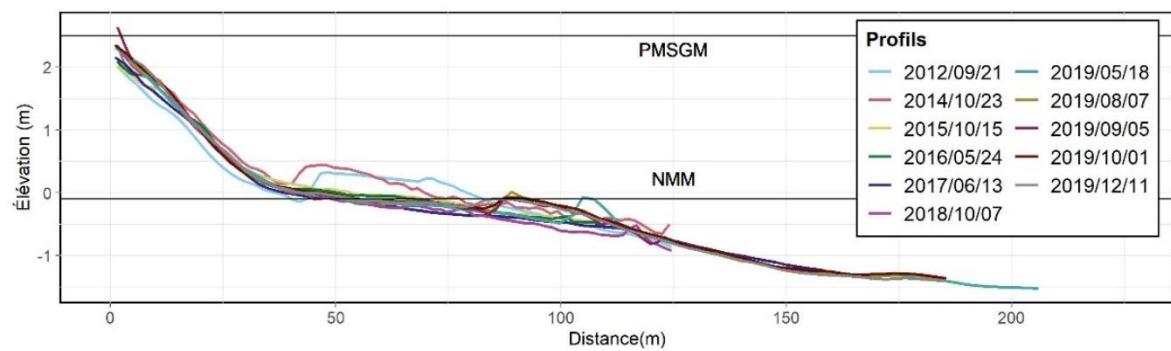
Pointe-aux-Loups dans l'axe de la route 199, Îles-de-la Madeleine - Tome 1 : Description. Dans *Rapport de WSP Canada Inc. au ministère des Transports Québec*.

Zawadzka, E. (1997). Coastal zone dynamics during artificial nourishment. Dans *Coastal Engineering 1996* (pp. 2955–2968).

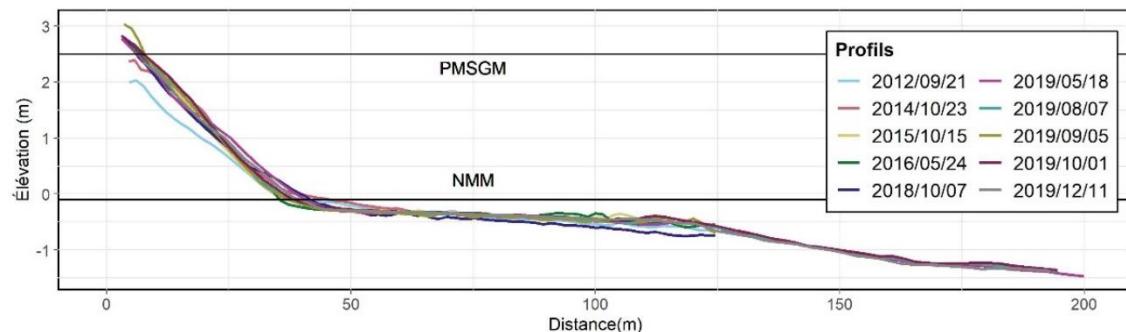
ANNEXES

Annexe 1 – Ensemble des profils de l’Anse-aux-Coques

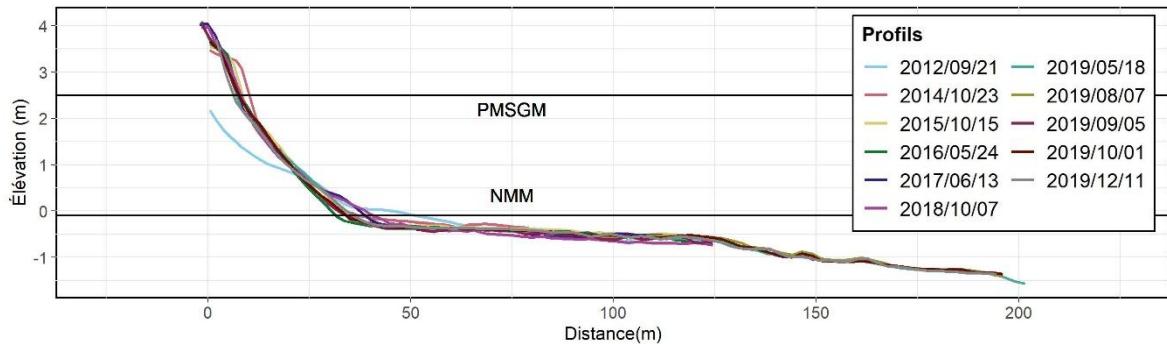
Profil 1



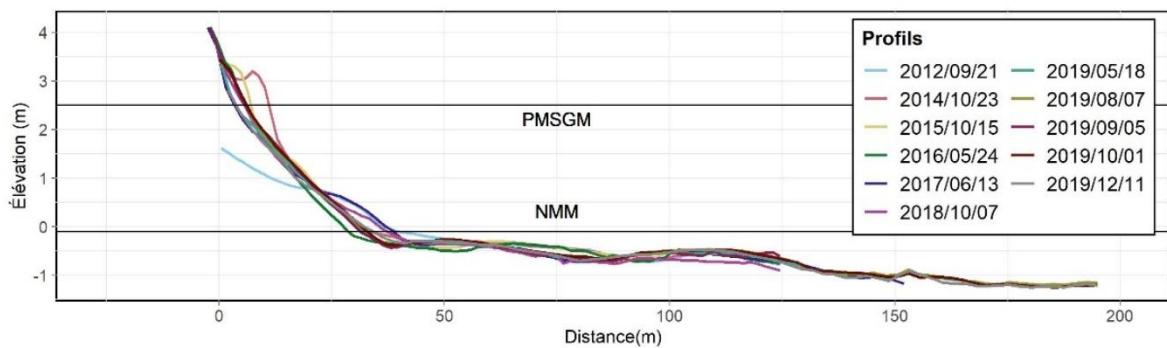
Profil 2



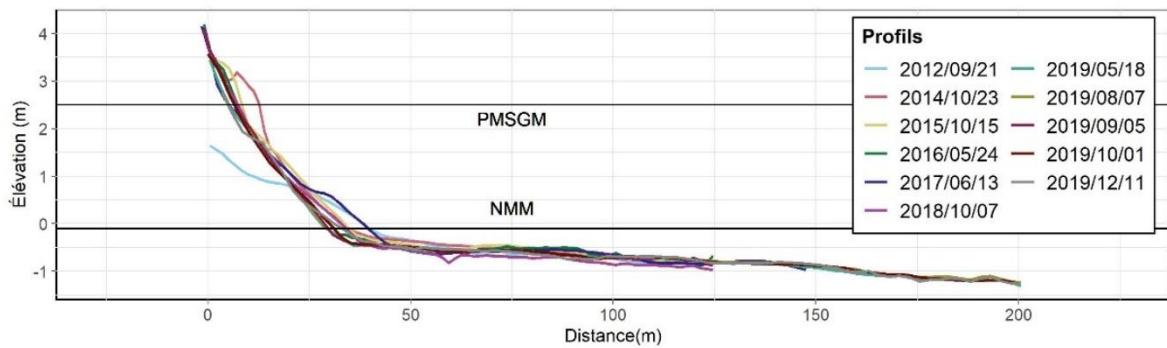
Profil 3



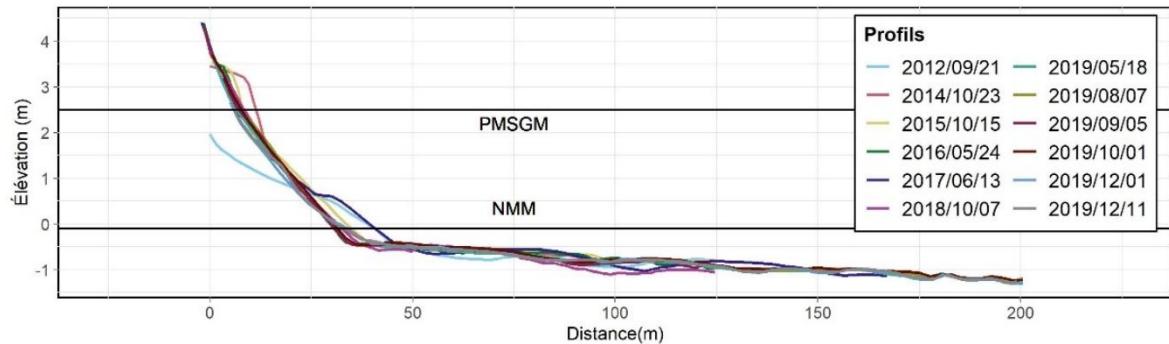
Profil 4



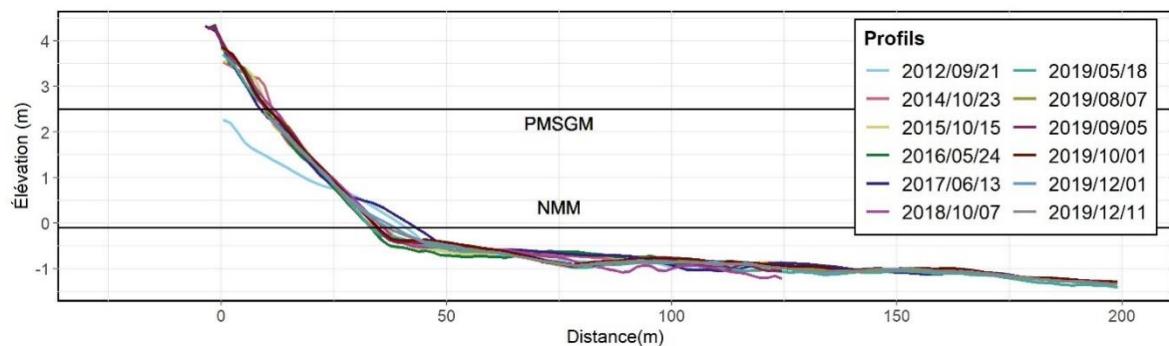
Profil 5



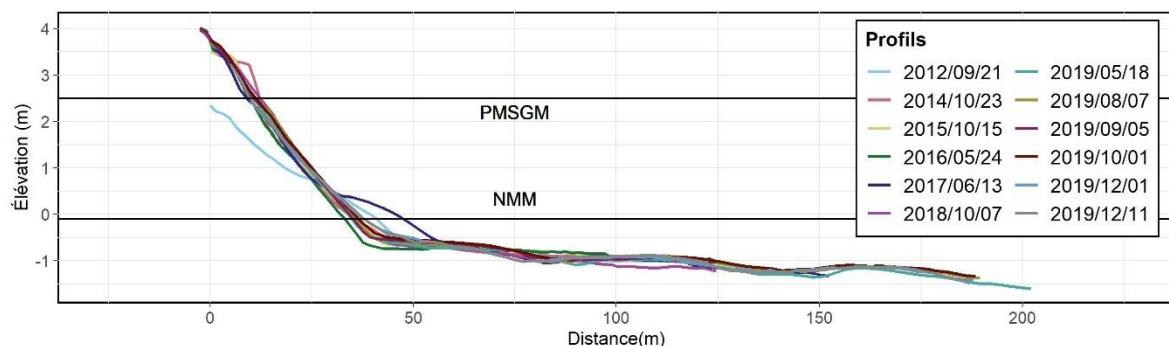
Profil 6



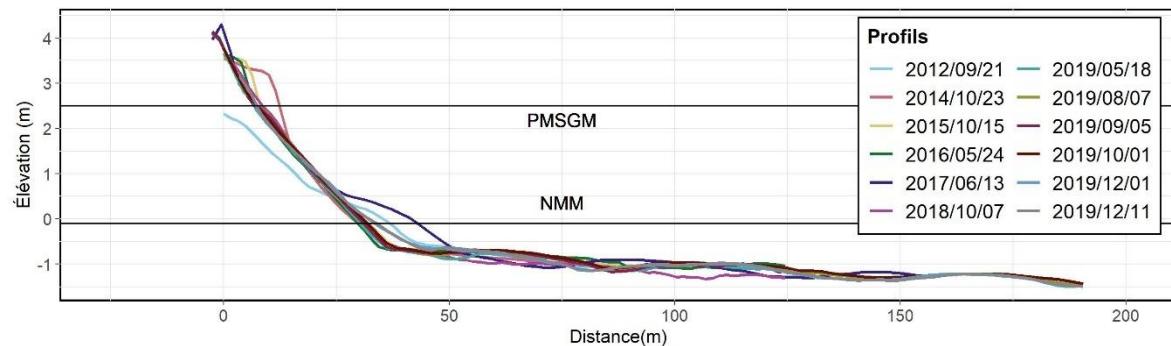
Profil 7



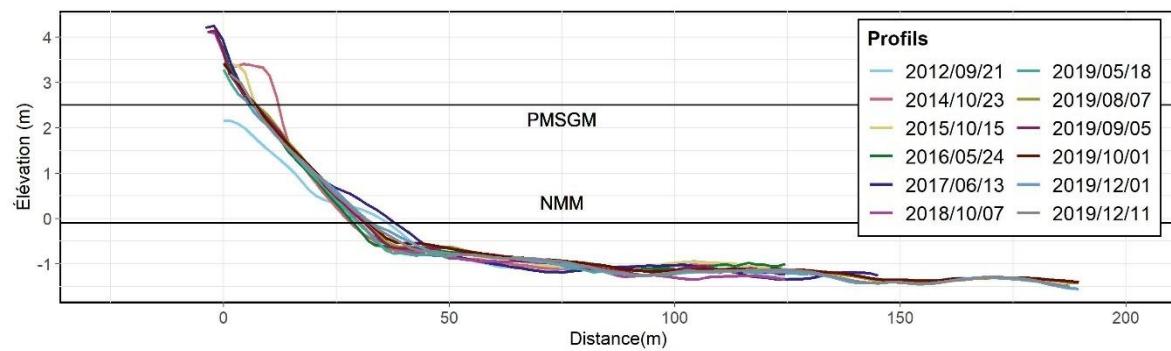
Profil 8



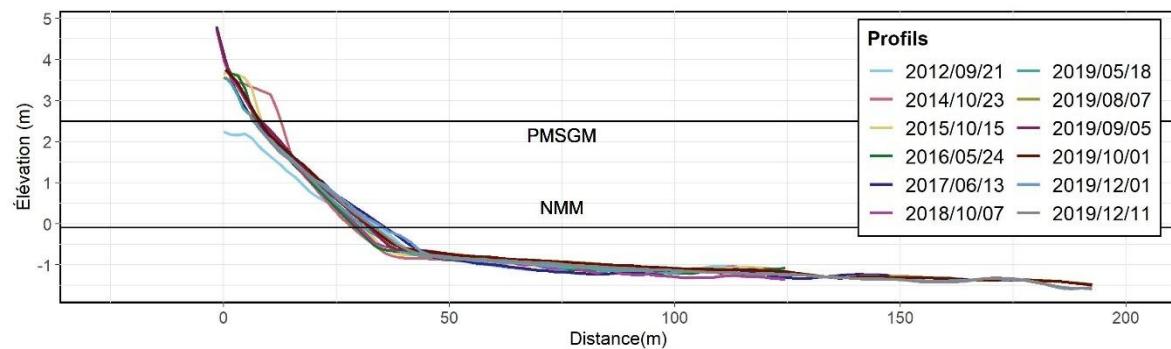
Profil 9



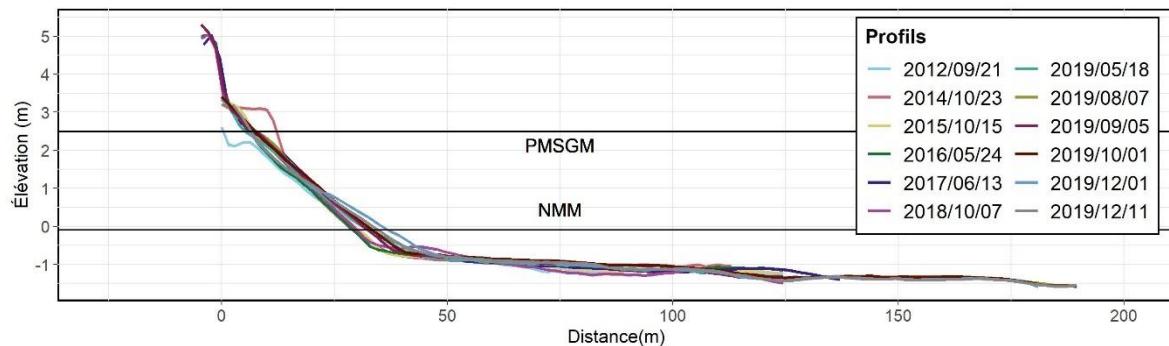
Profil 10



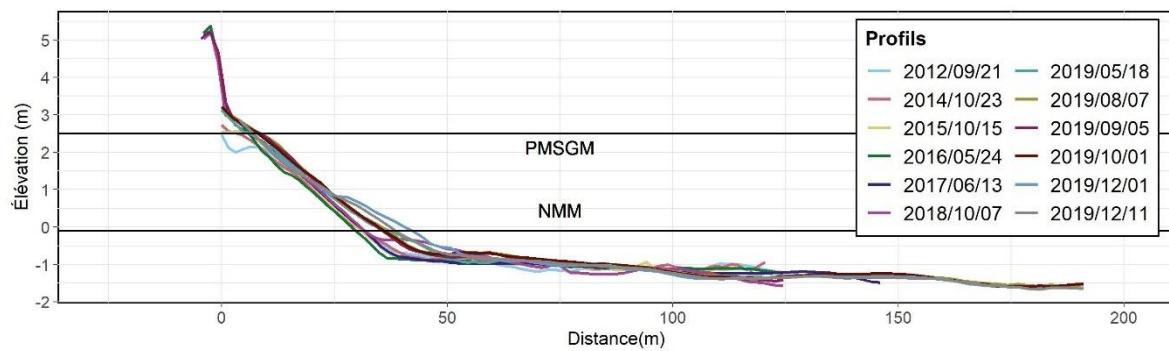
Profil 11



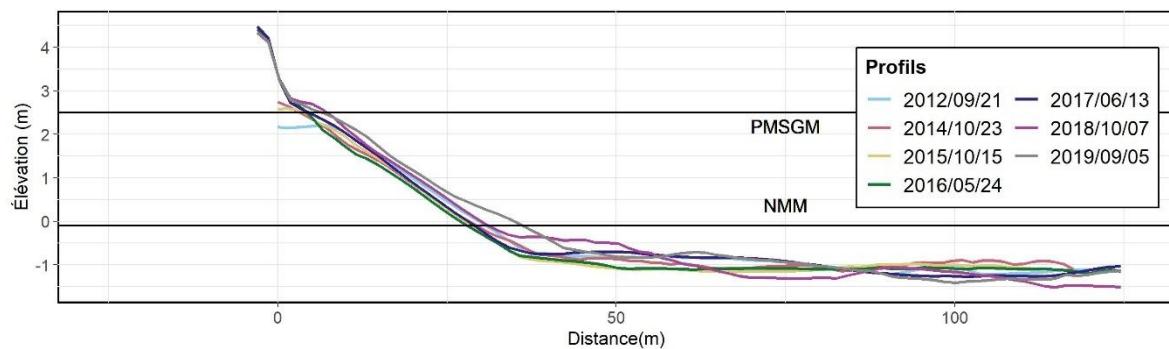
Profil 12



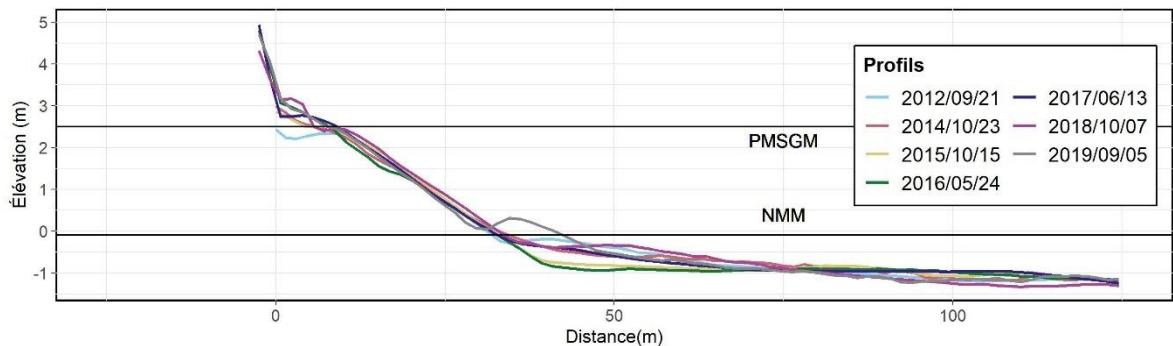
Profil 13



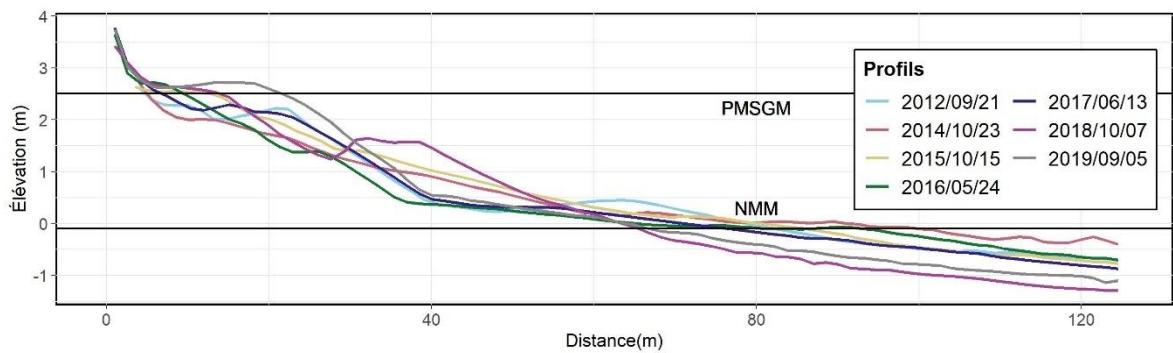
Profil 14



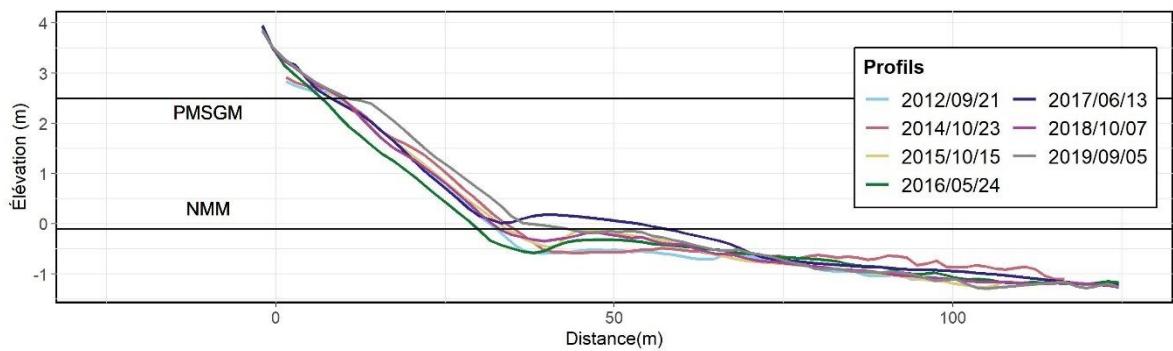
Profil 15



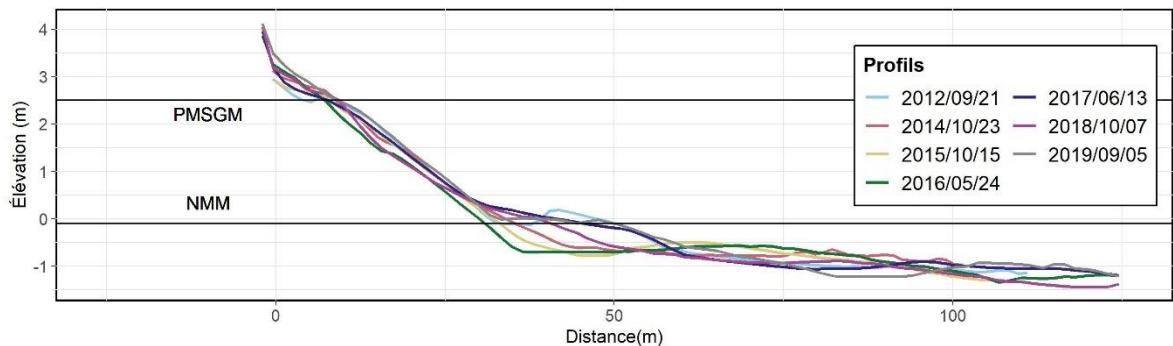
Profil 16



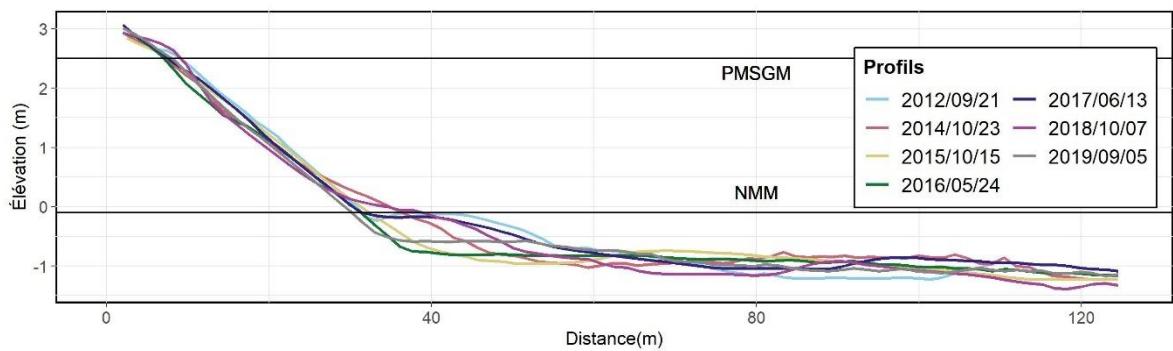
Profil 17



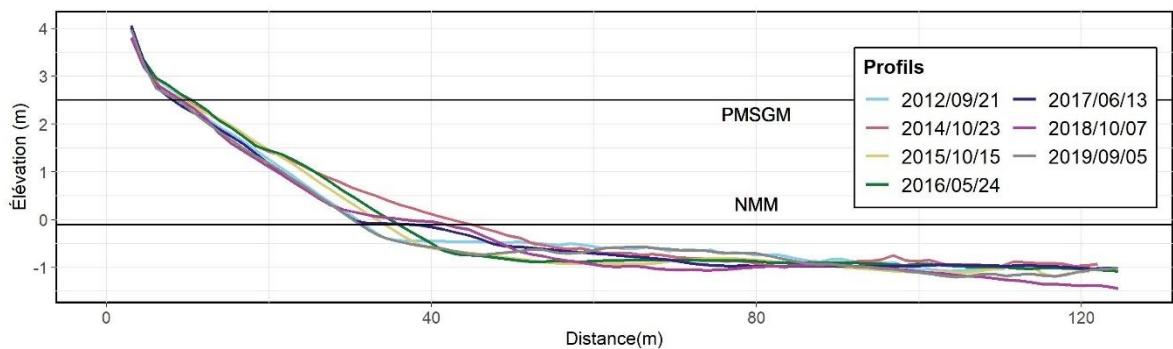
Profil 18



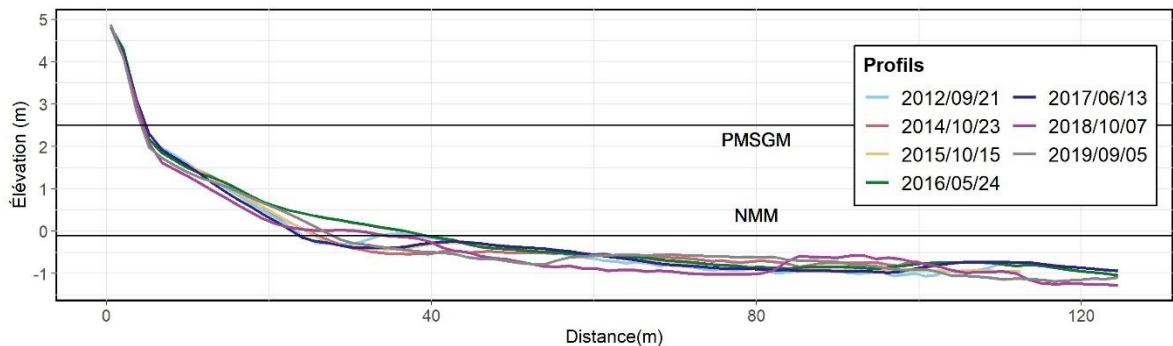
Profil 19



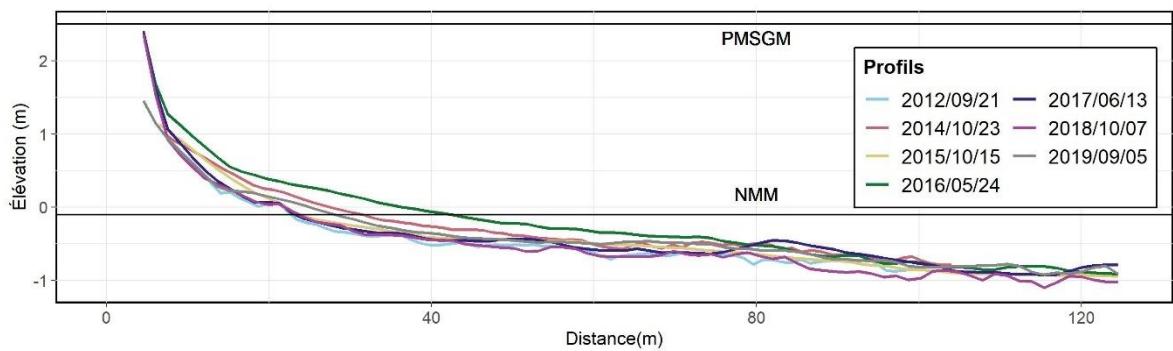
Profil 20



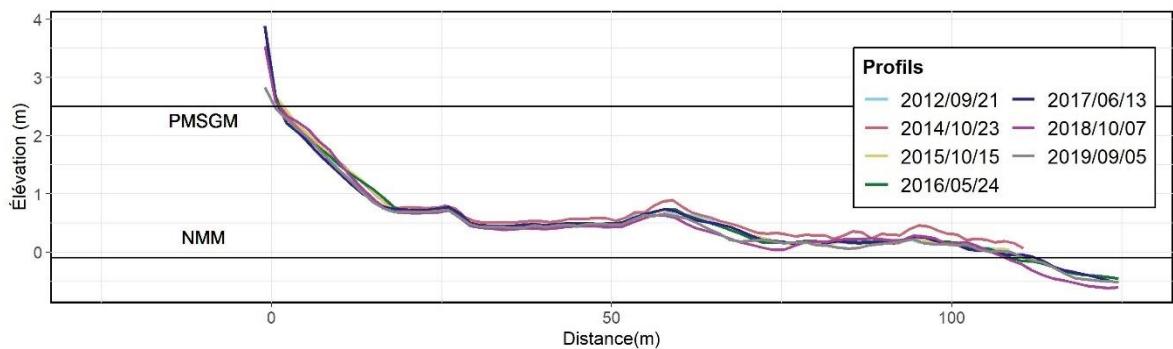
Profil 21



Profil 22

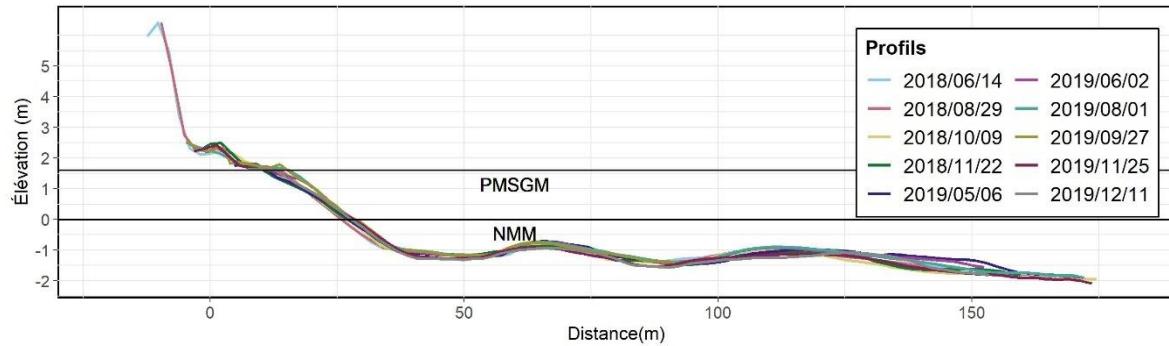


Profil 23

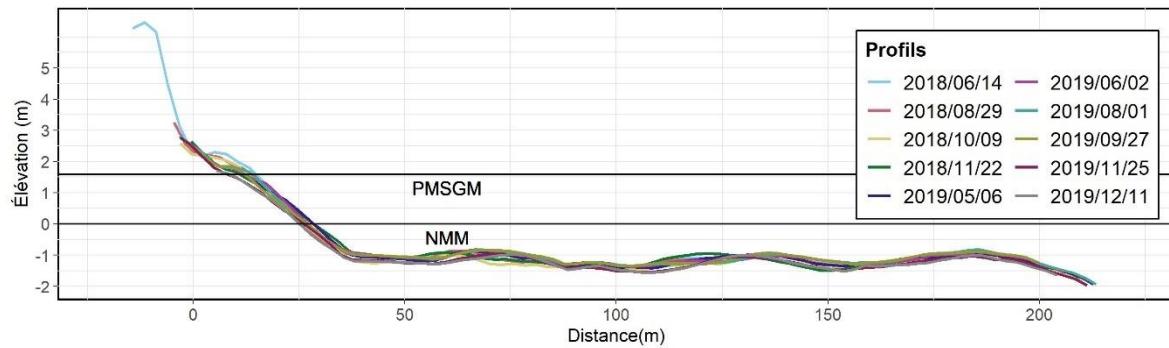


Annexe 2 – Ensemble des profils du banc Larocque

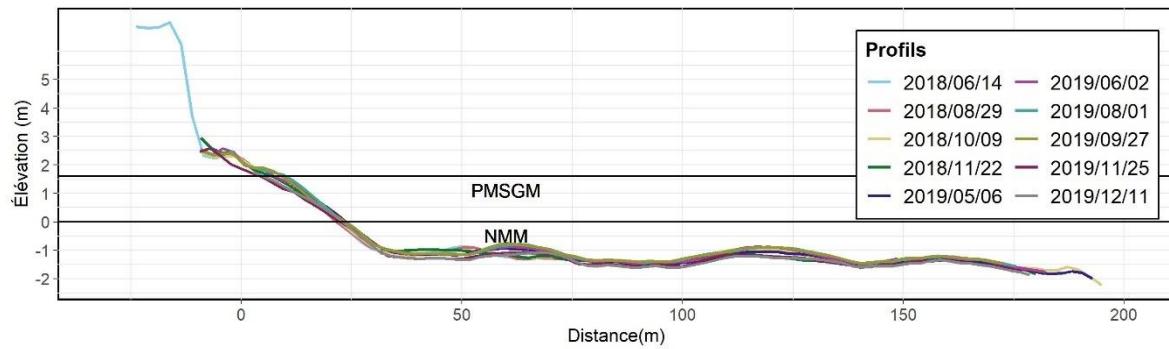
Profil 1



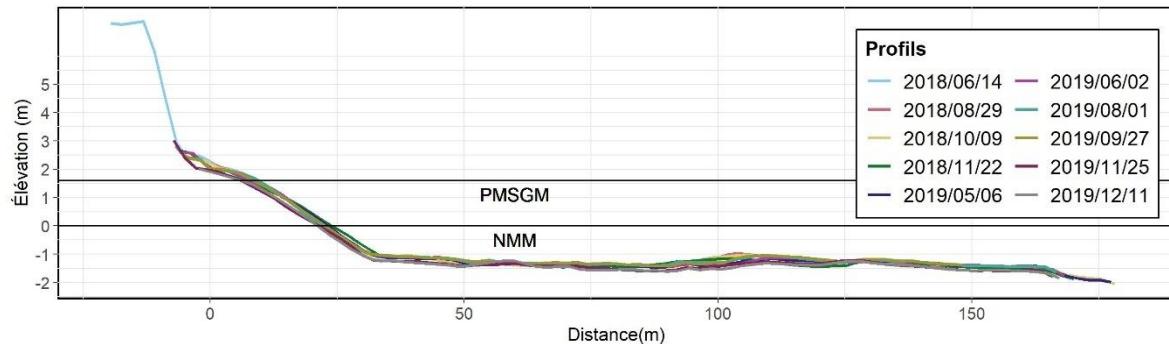
Profil 2



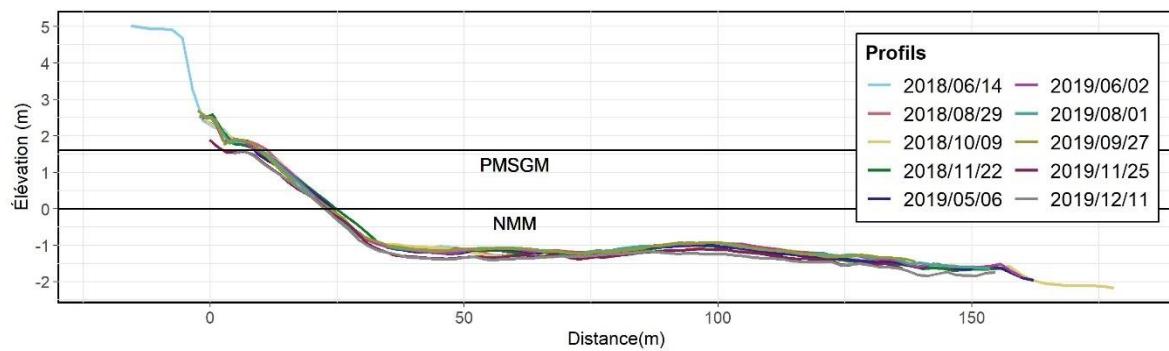
Profil 3



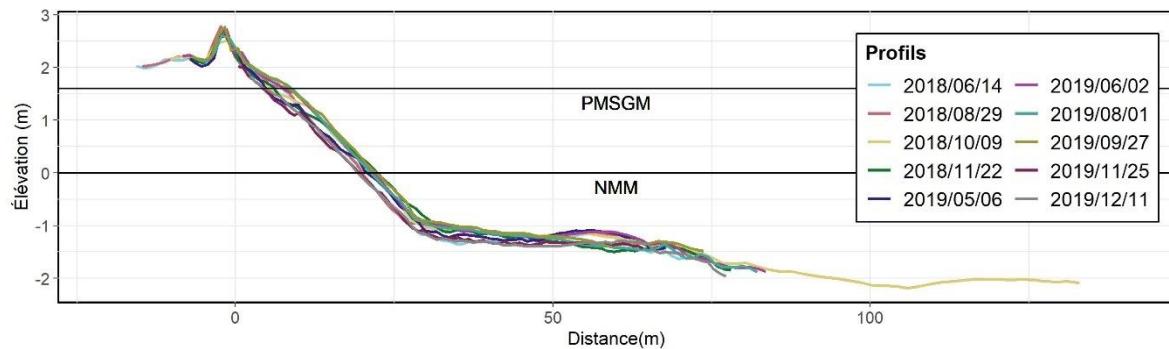
Profil 4



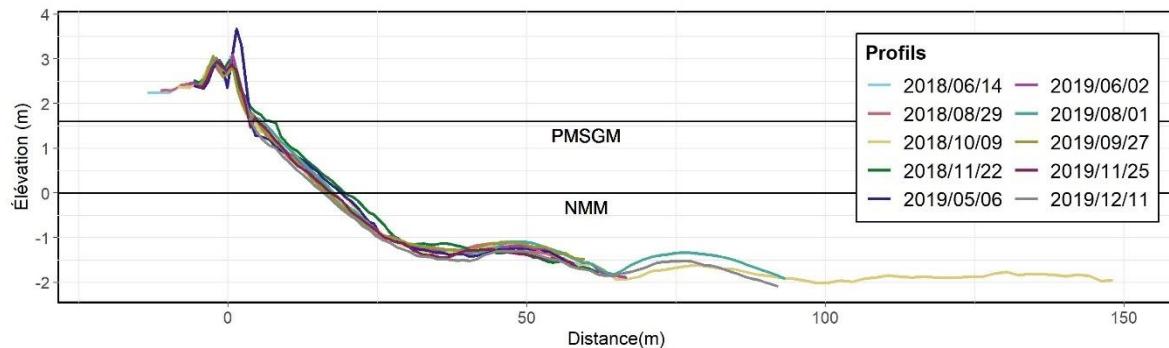
Profil 5



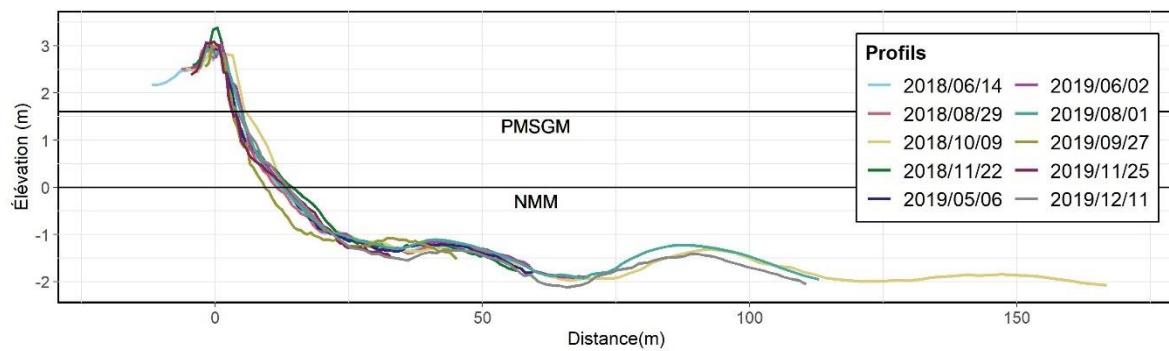
Profil 6



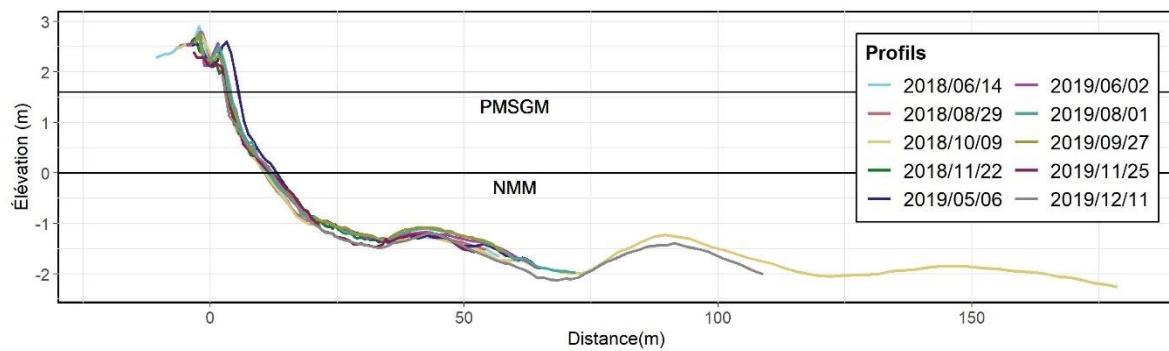
Profil 7



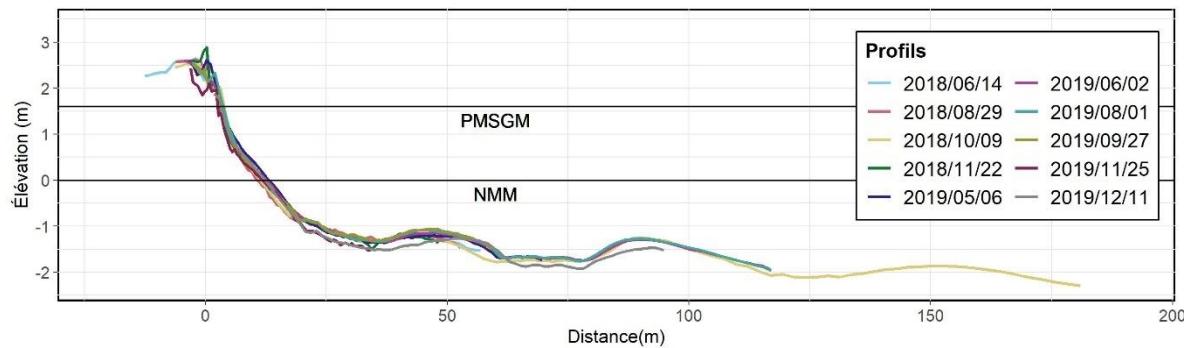
Profil 8



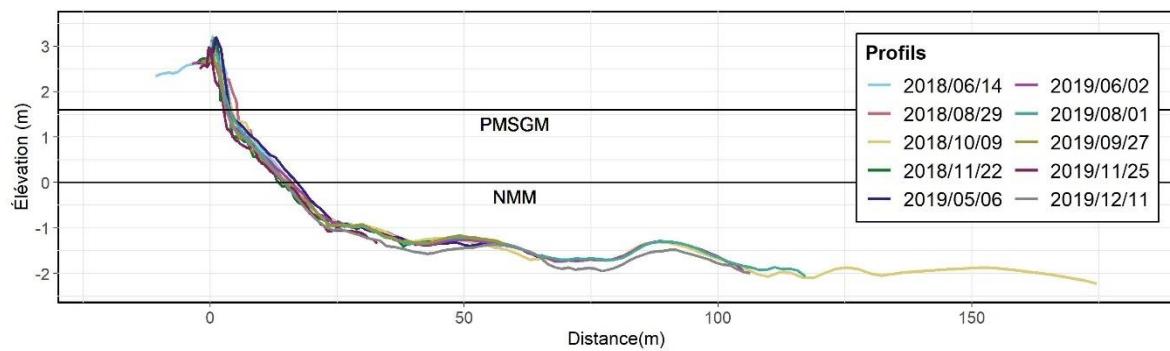
Profil 9



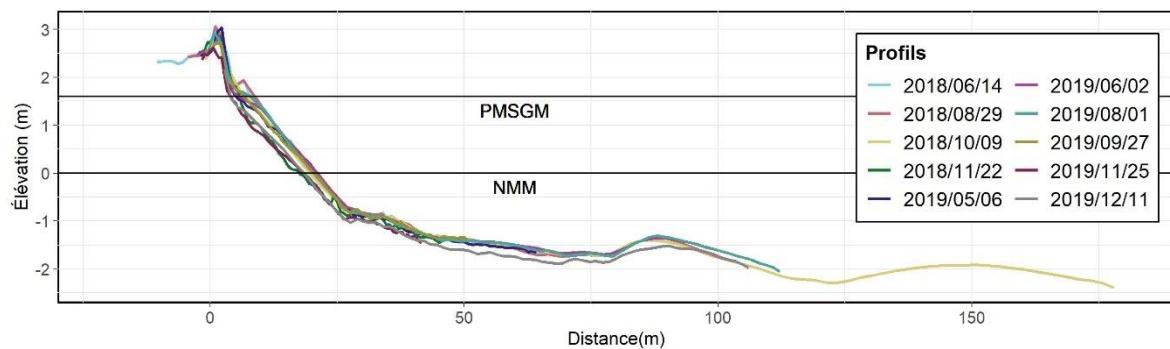
Profil 10



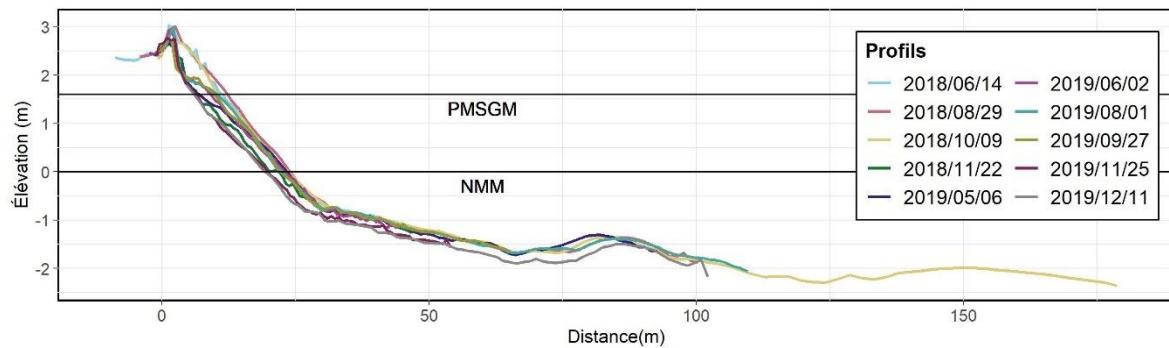
Profil 11



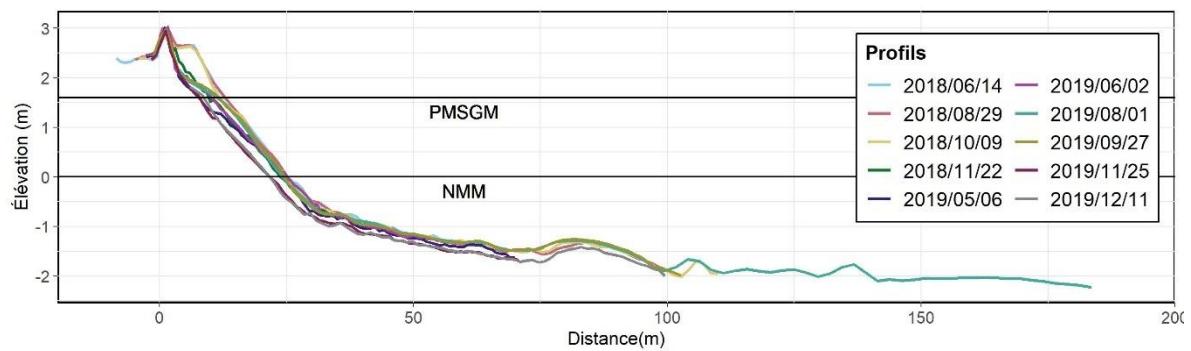
Profil 12



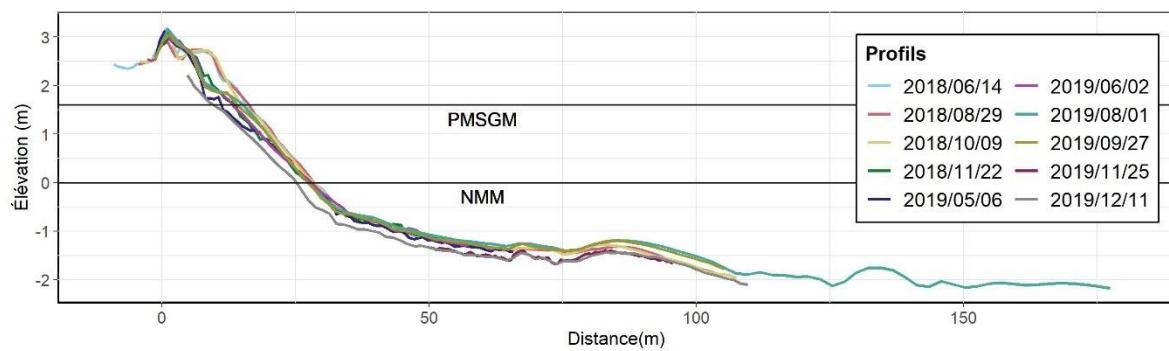
Profil 13



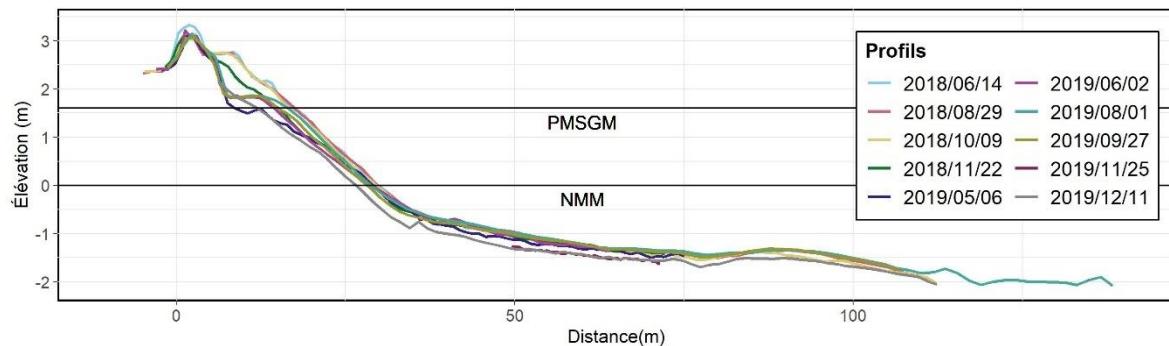
Profil 14



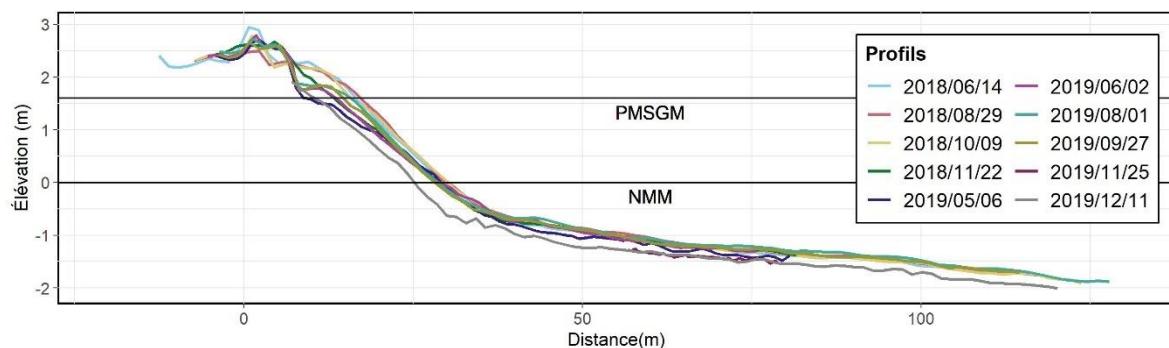
Profil 15



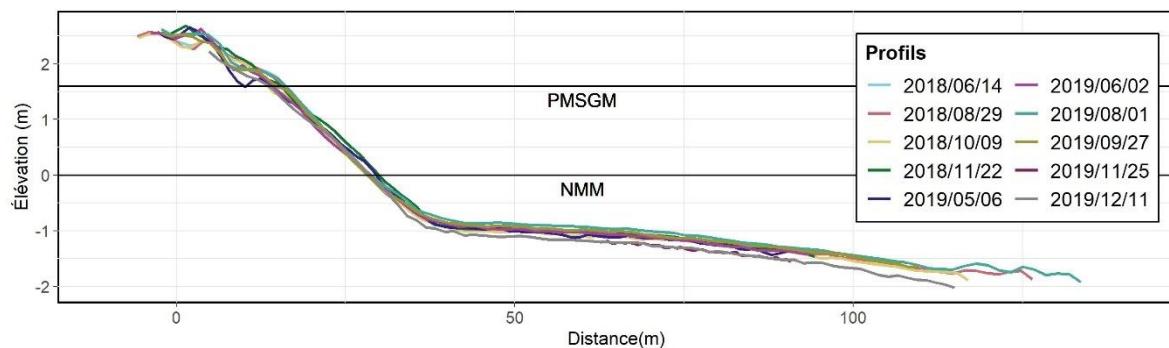
Profil 16



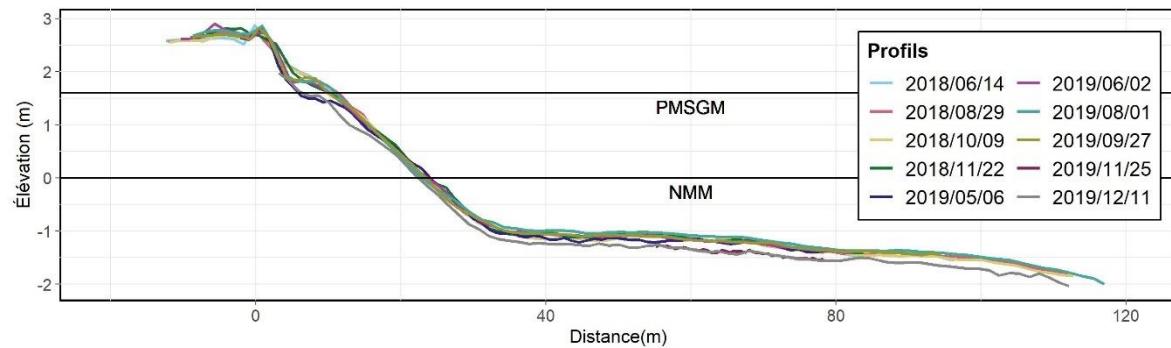
Profil 17



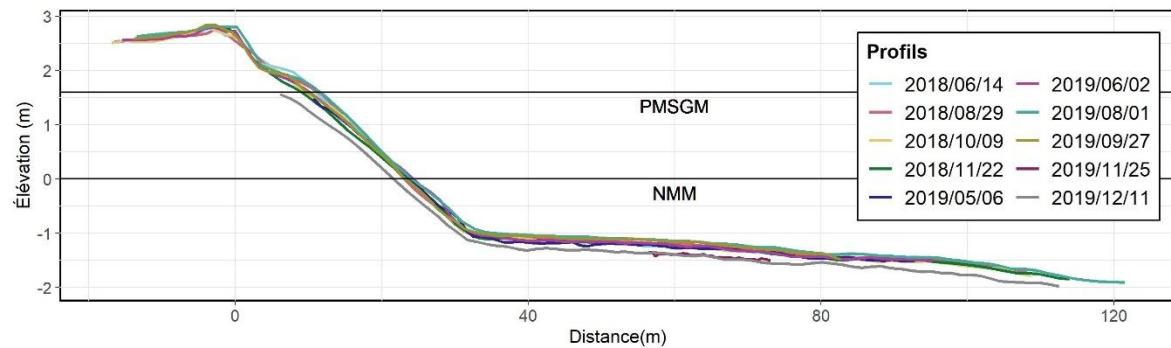
Profil 18



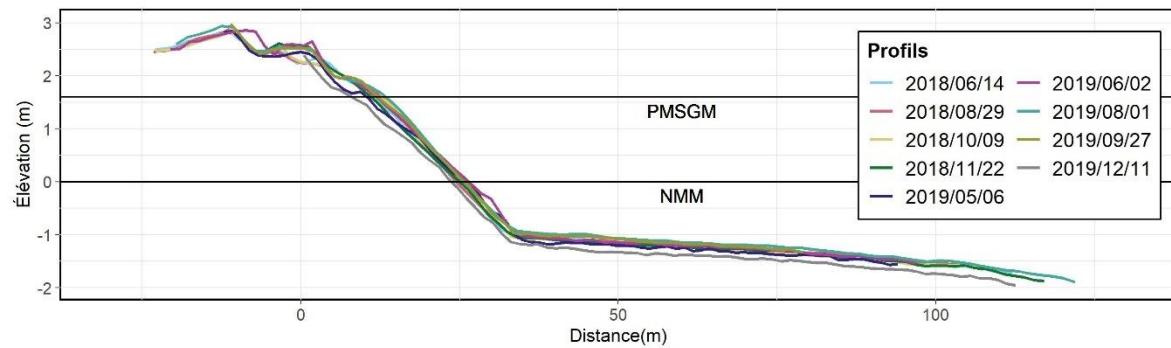
Profil 19



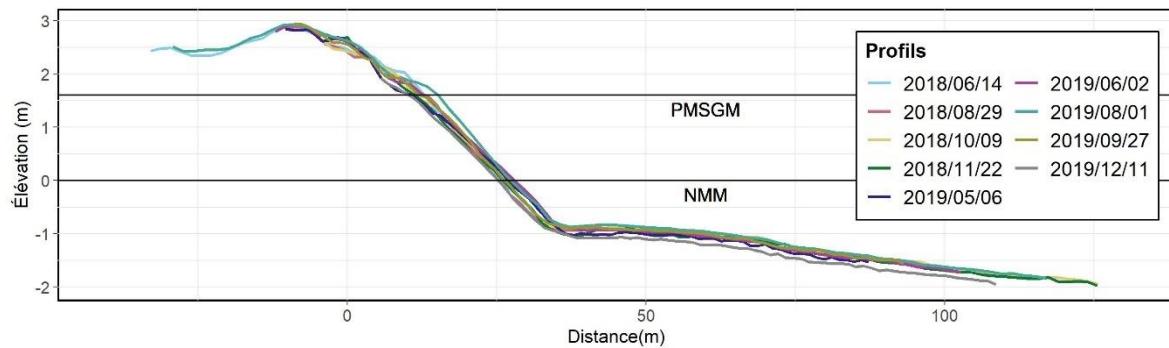
Profil 20



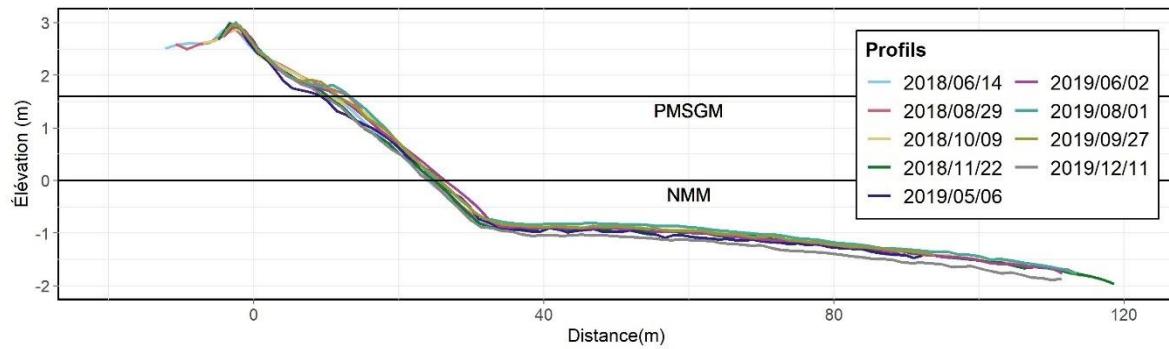
Profil 21



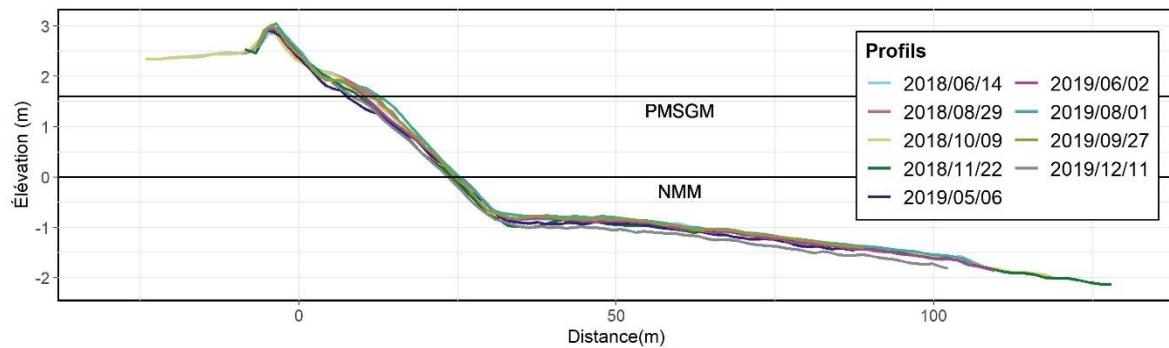
Profil 22



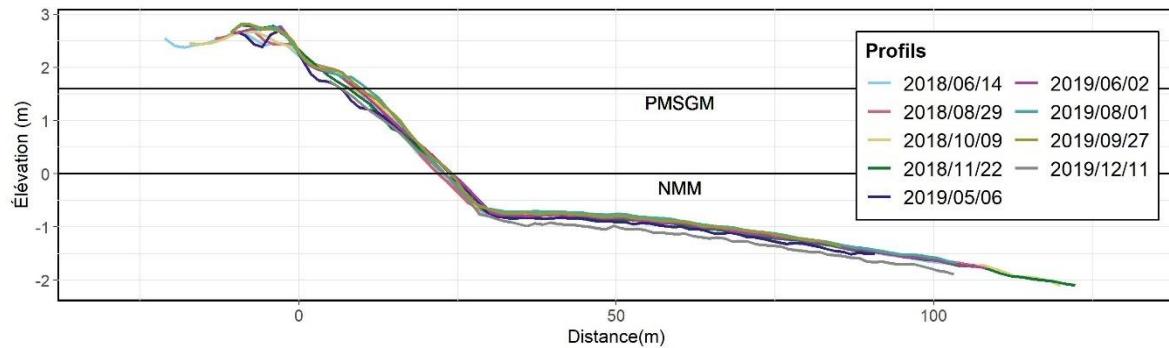
Profil 23



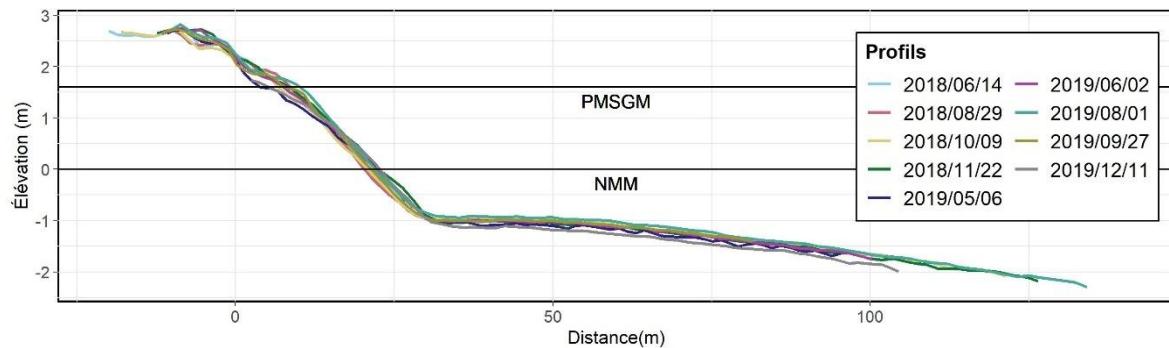
Profil 24



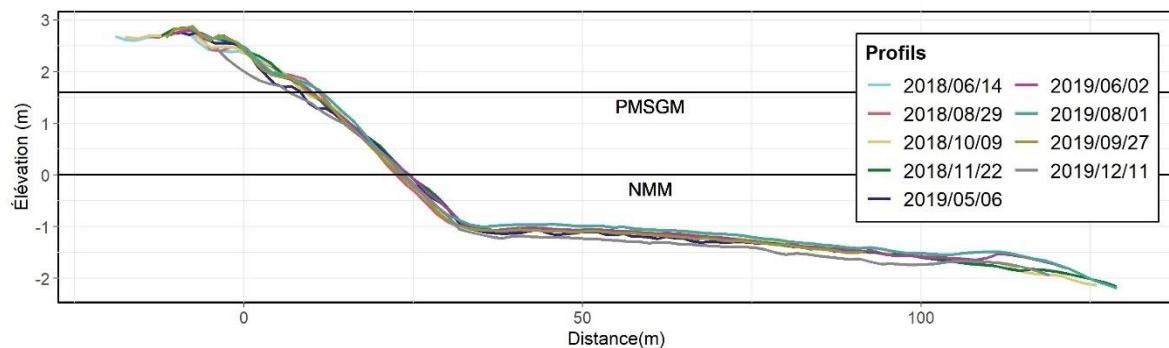
Profil 25



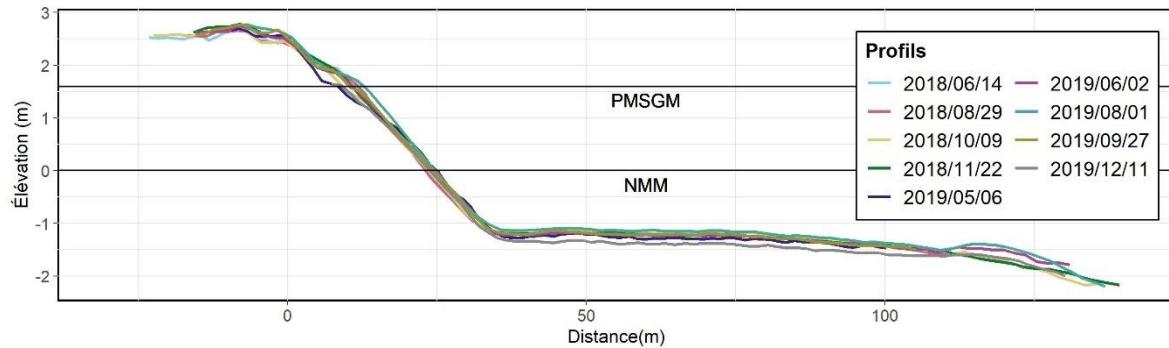
Profil 26



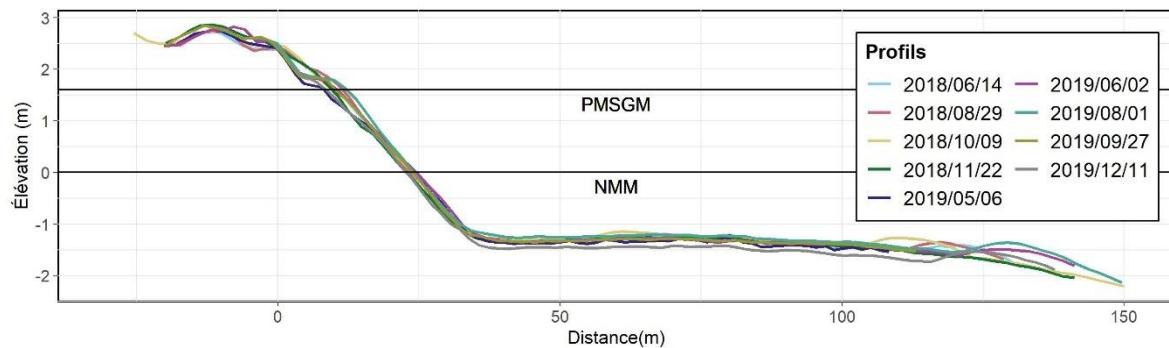
Profil 27



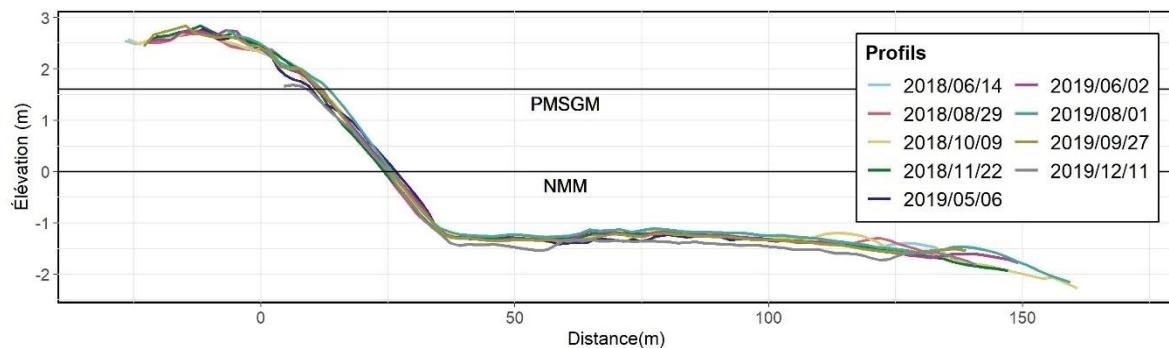
Profil 28



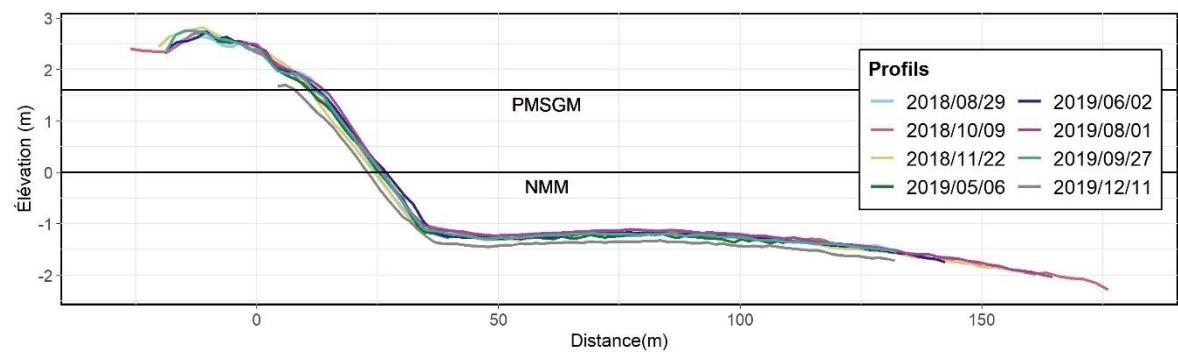
Profil 29



Profil 30

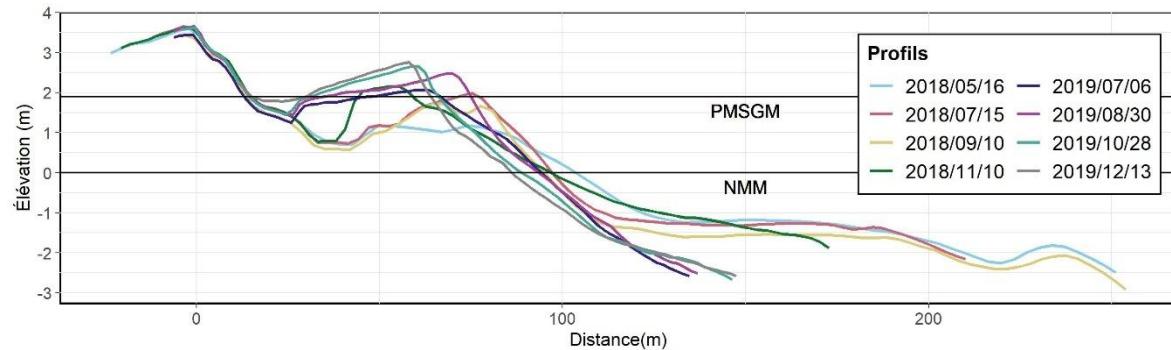


Profil 31

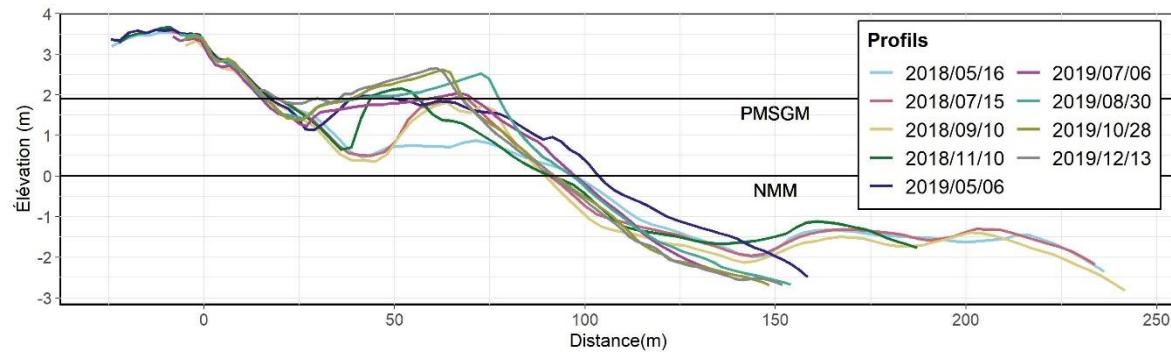


Annexe 3 – Ensemble des profils de la plage Monaghan

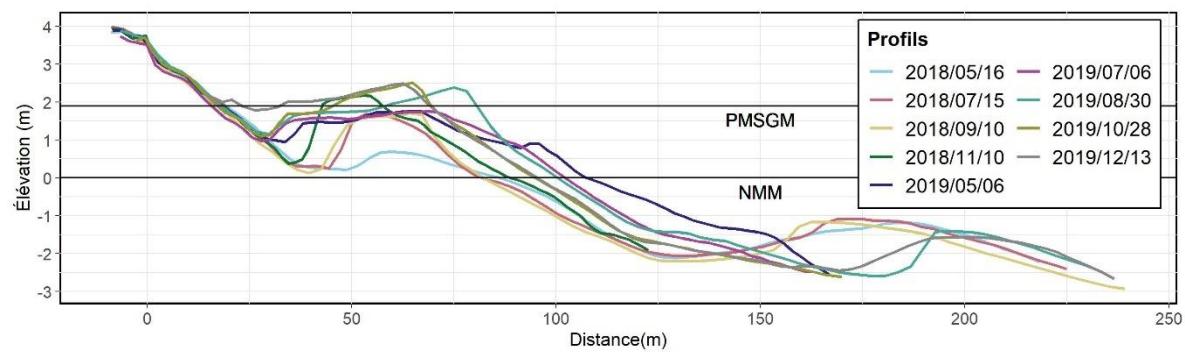
Profil 1



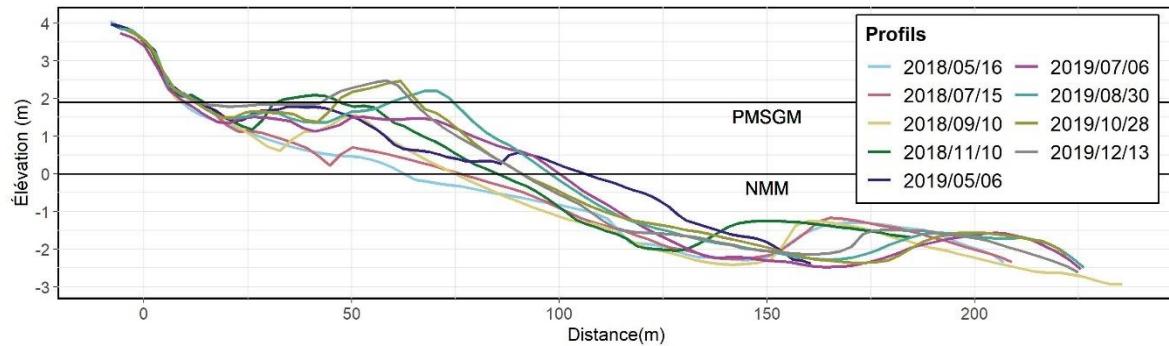
Profil 2



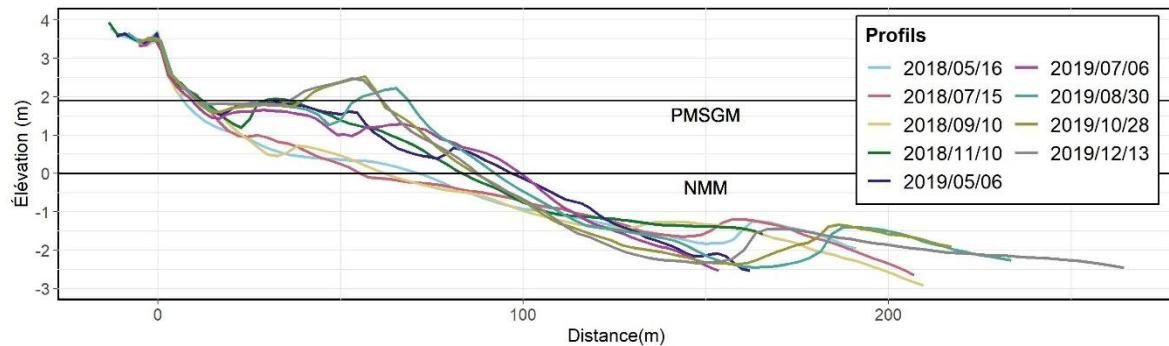
Profil 3



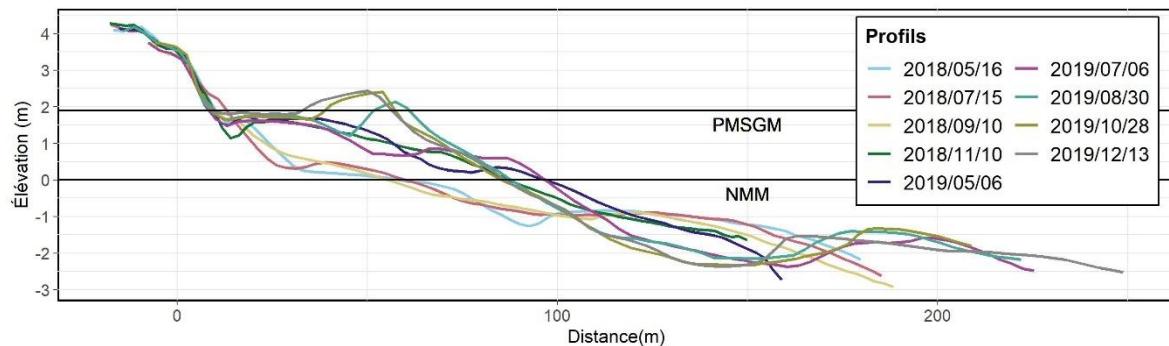
Profil 4



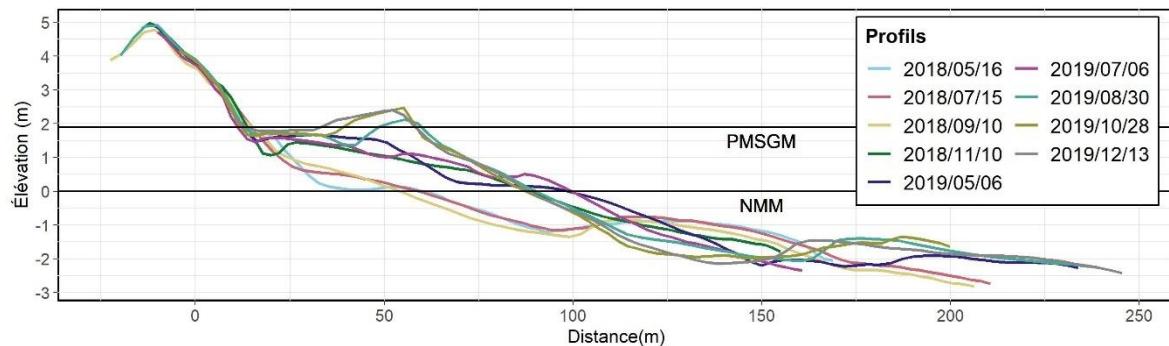
Profil 5



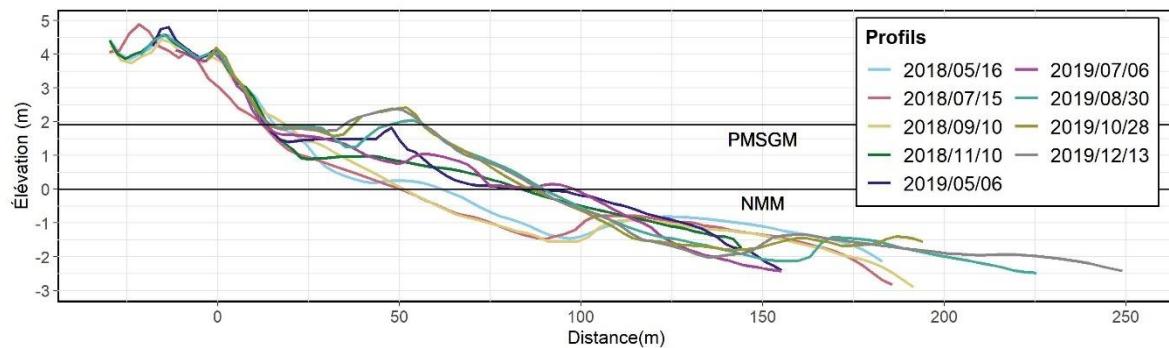
Profil 6



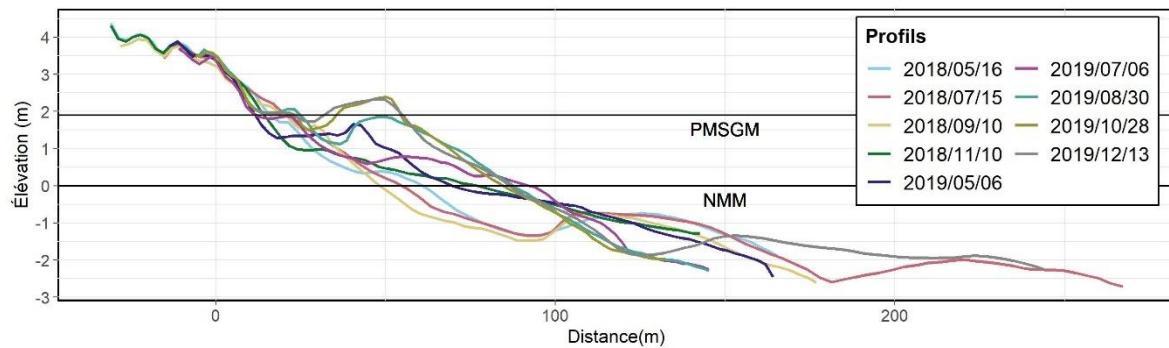
Profil 7



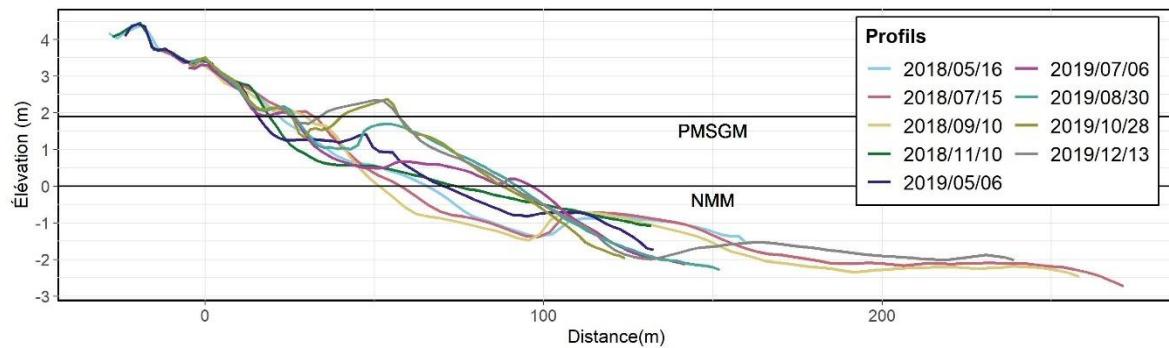
Profil 8



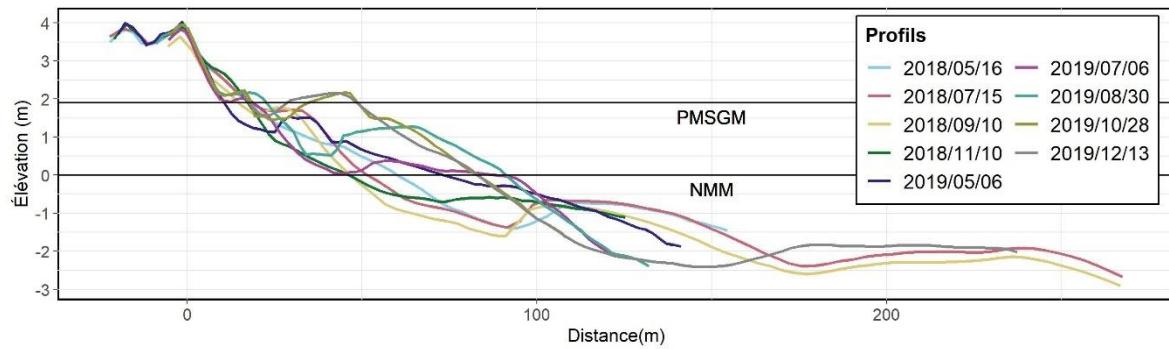
Profil 9



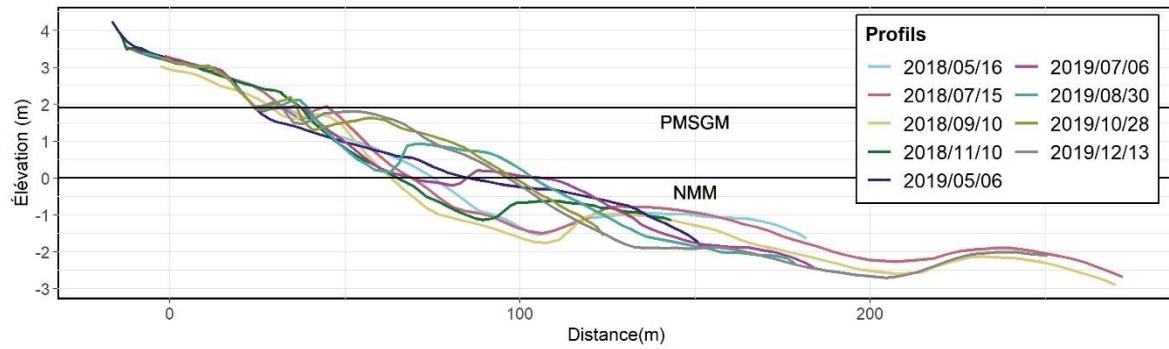
Profil 10



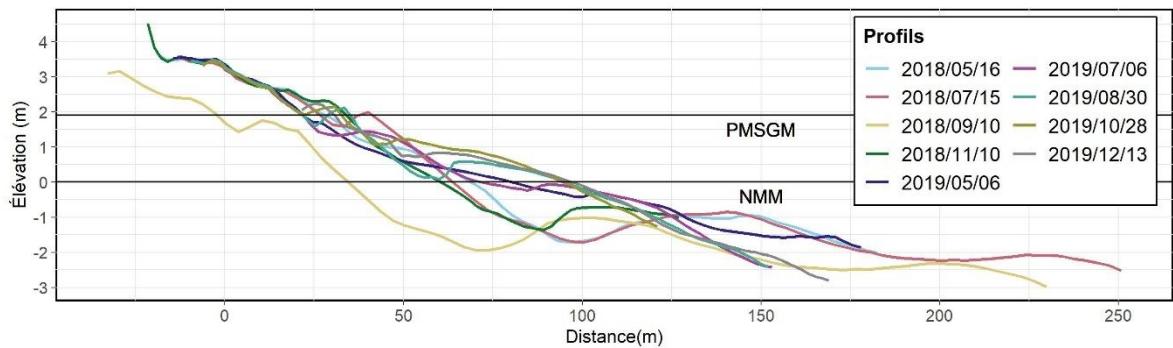
Profil 11



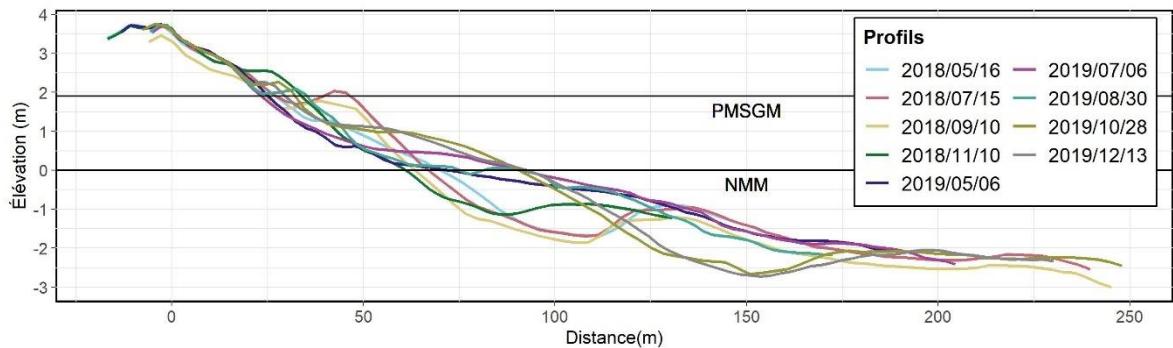
Profil 12



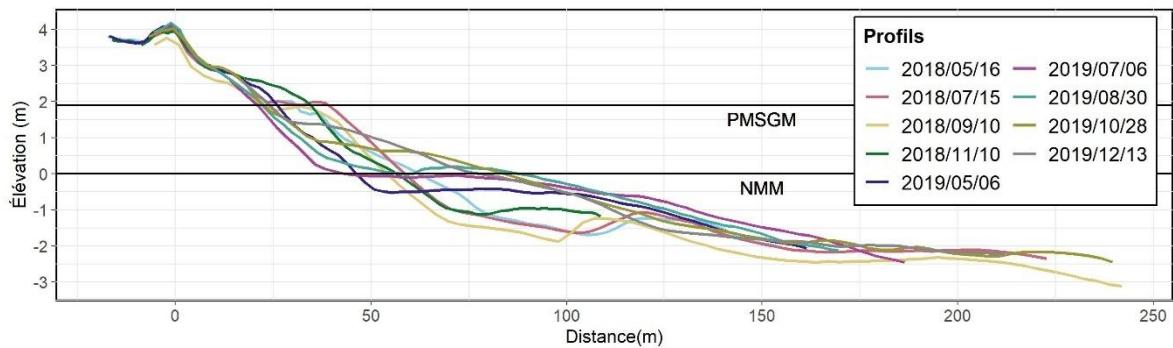
Profil 13



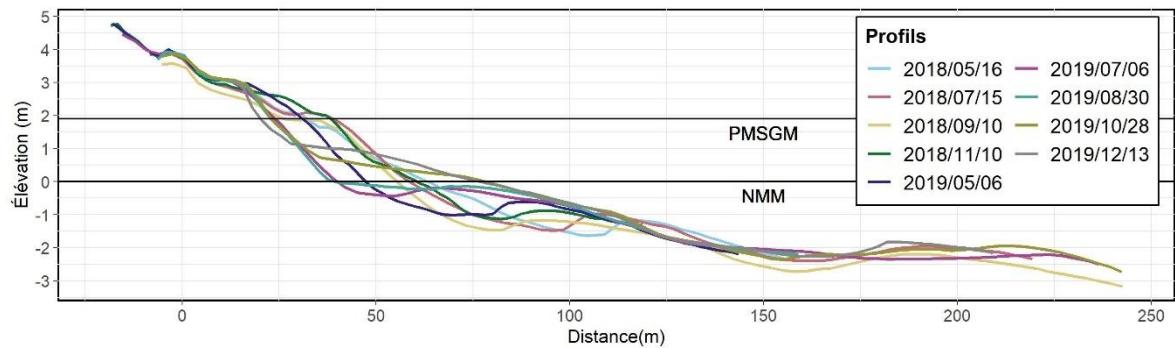
Profil 14



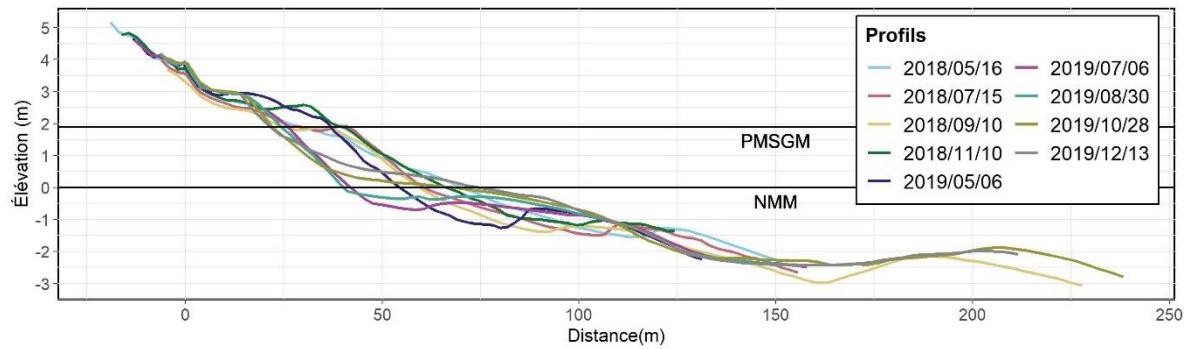
Profil 15



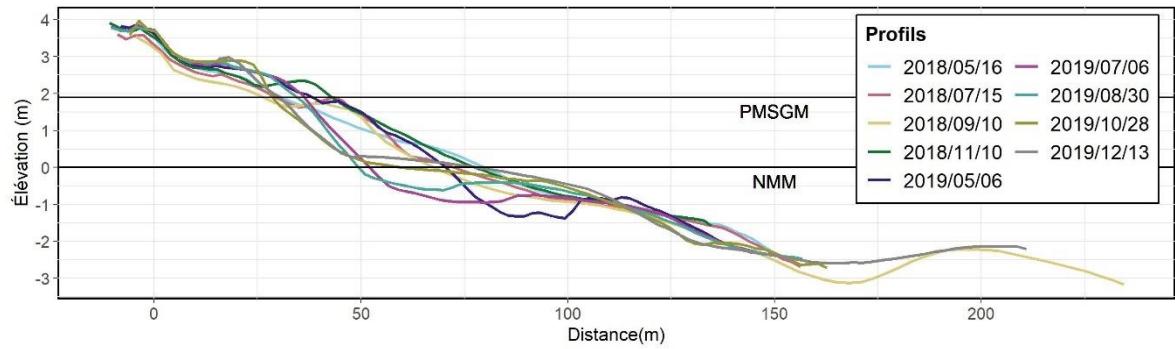
Profil 16



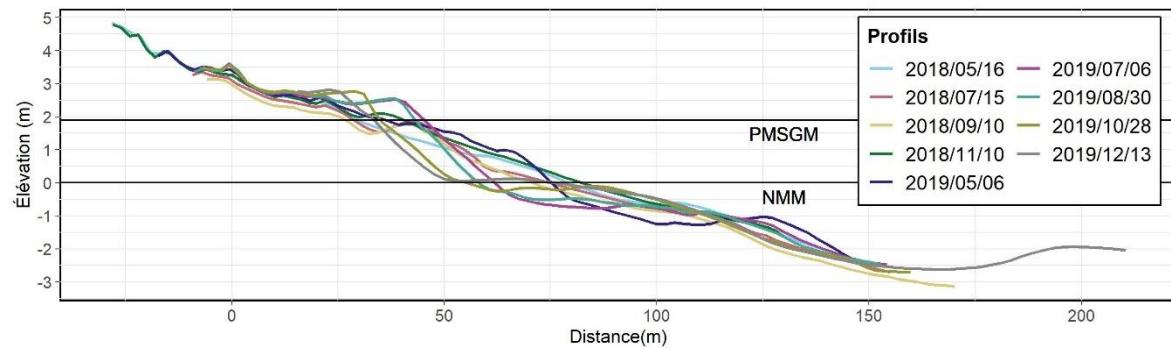
Profil 17



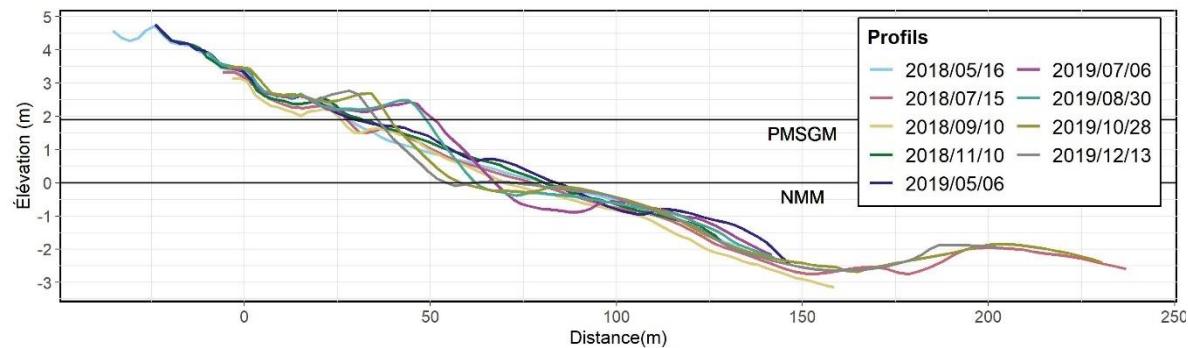
Profil 18



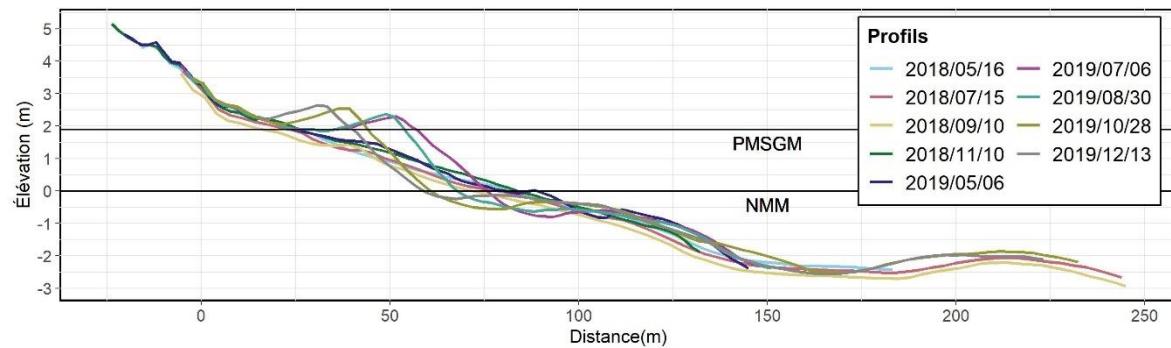
Profil 19



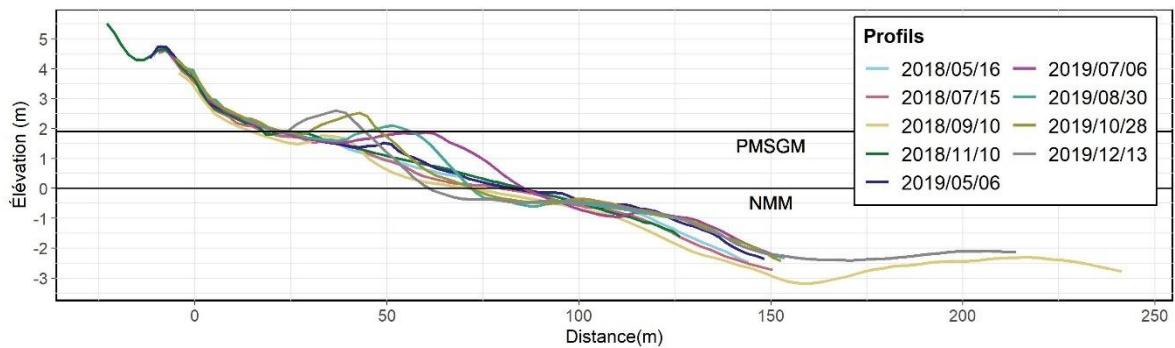
Profil 20



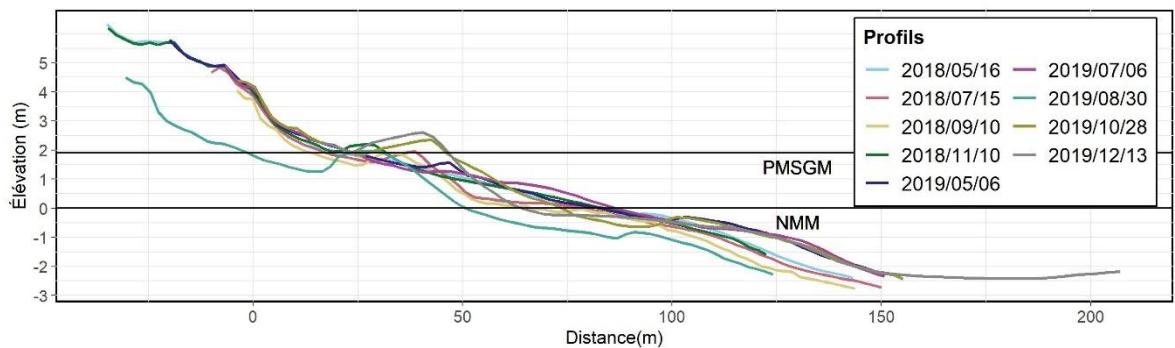
Profil 21



Profil 22

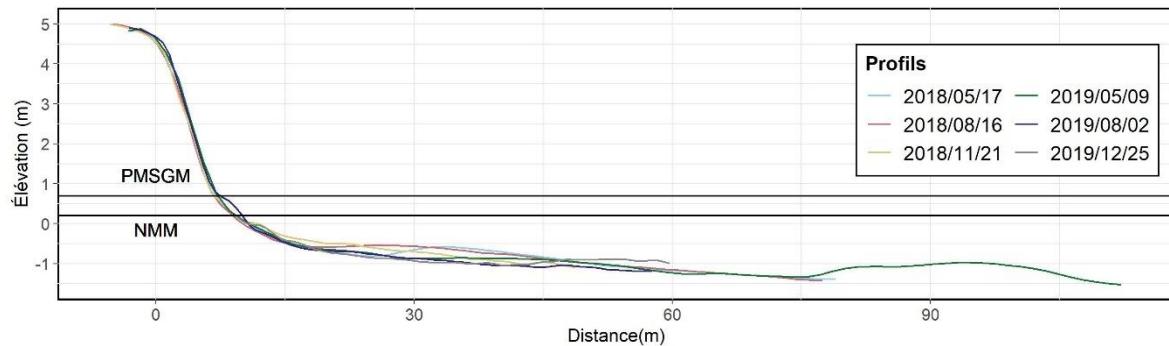


Profil 23

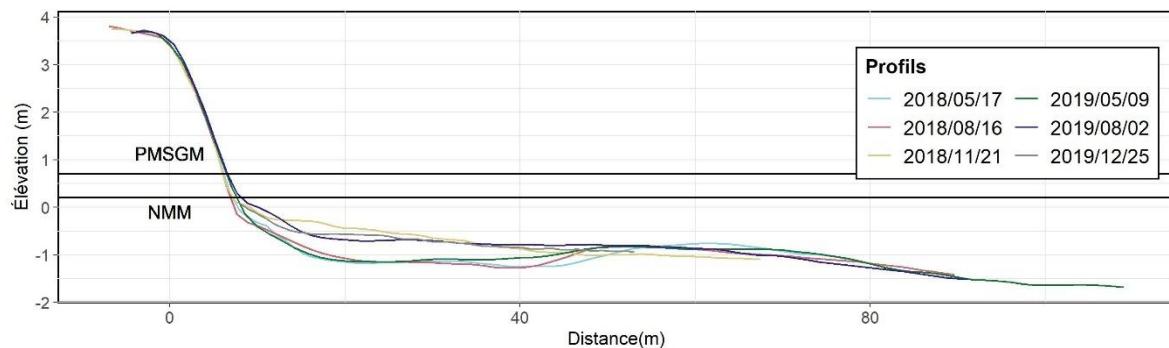


Annexe 4 – Ensemble des profils de la plage de La Martinique

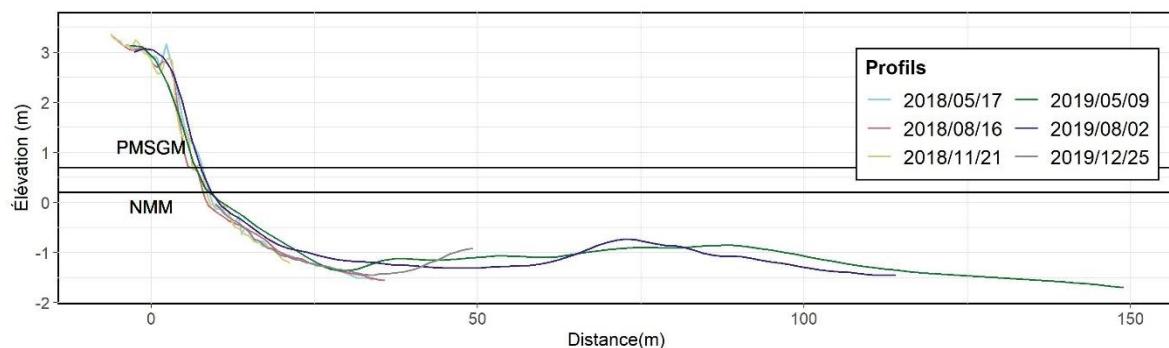
Profil 1



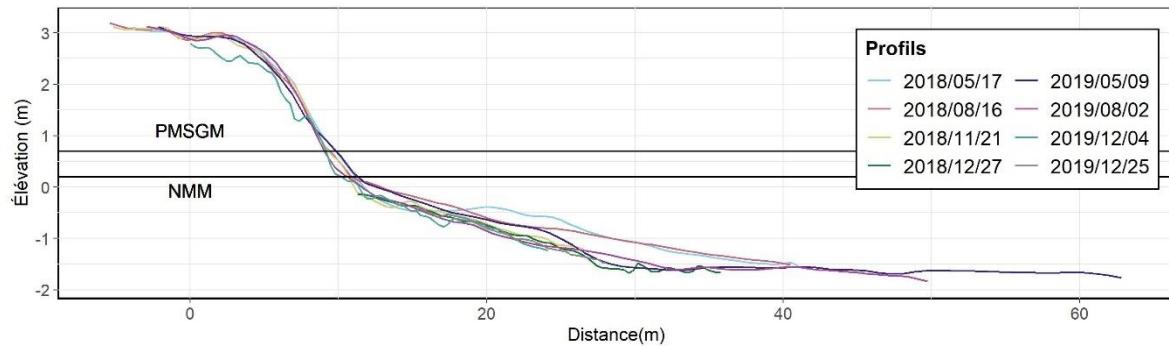
Profil 2



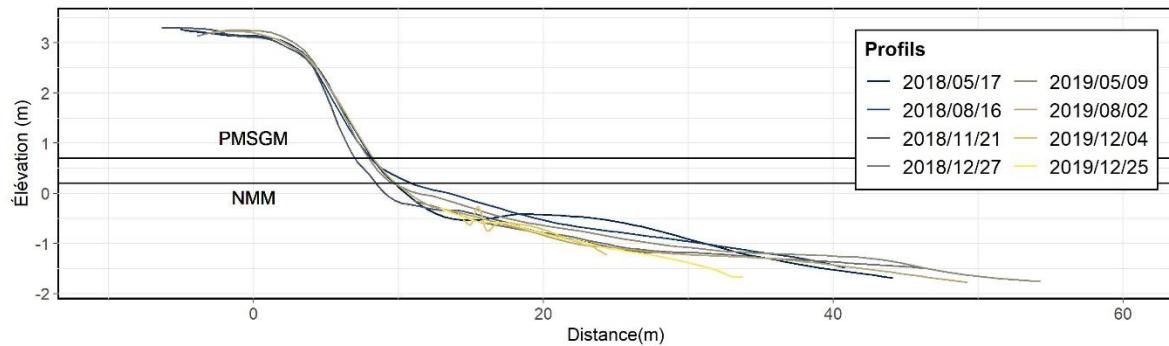
Profil 3



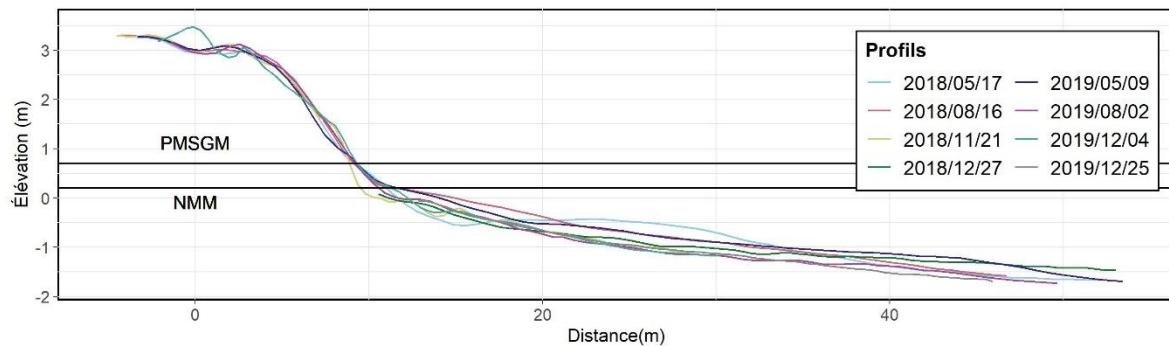
Profil 4



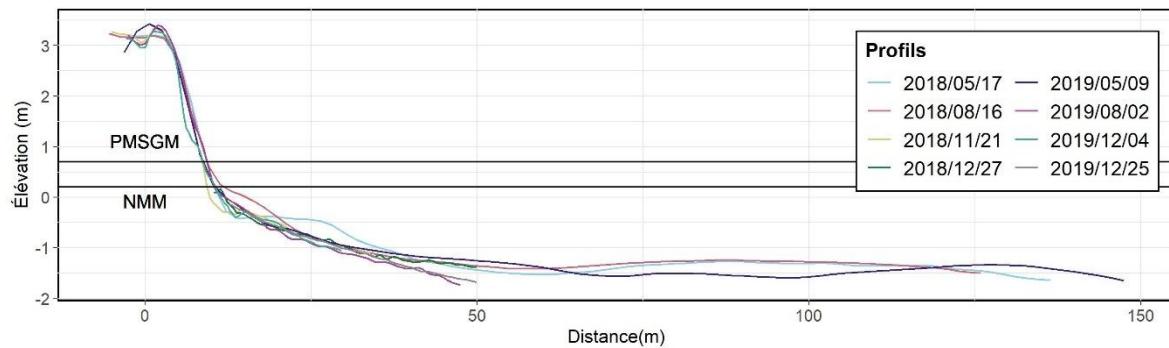
Profil 5



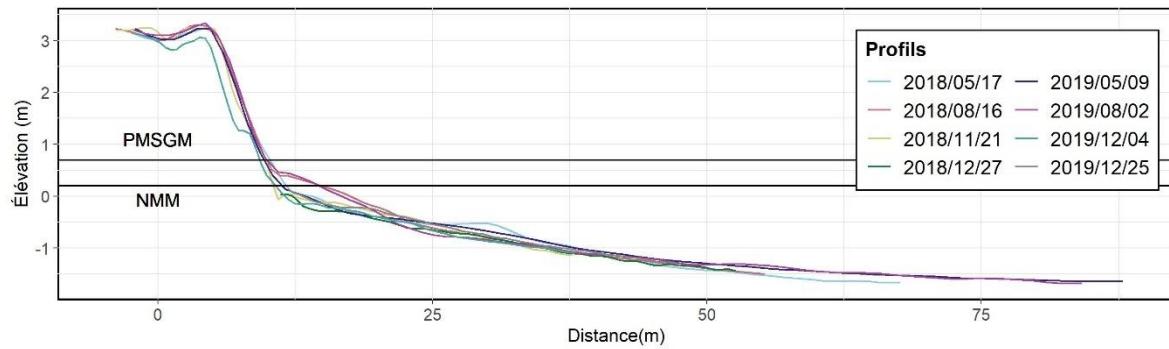
Profil 6



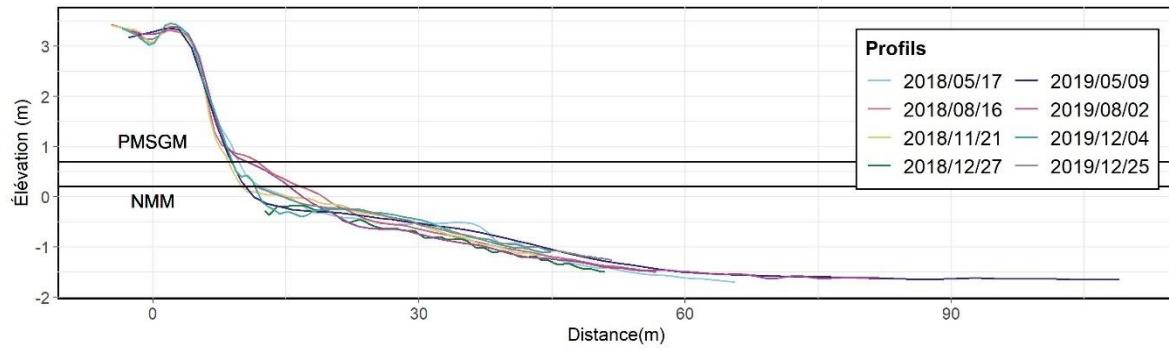
Profil 7



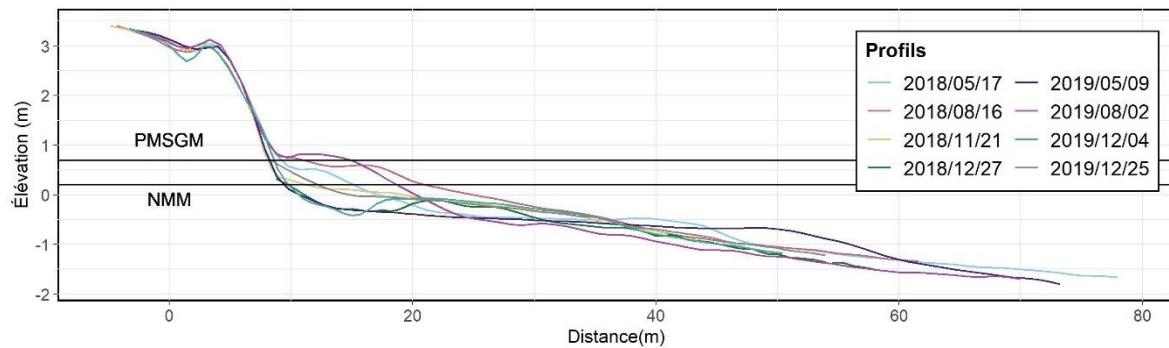
Profil 8



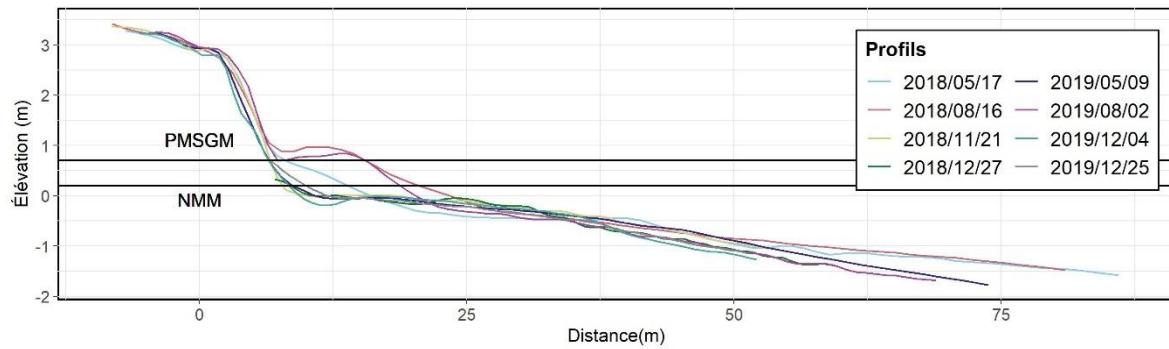
Profil 9



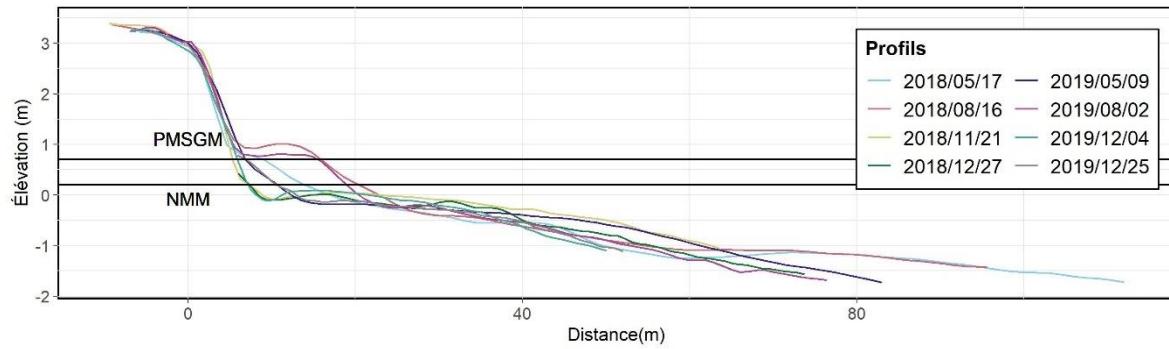
Profil 10



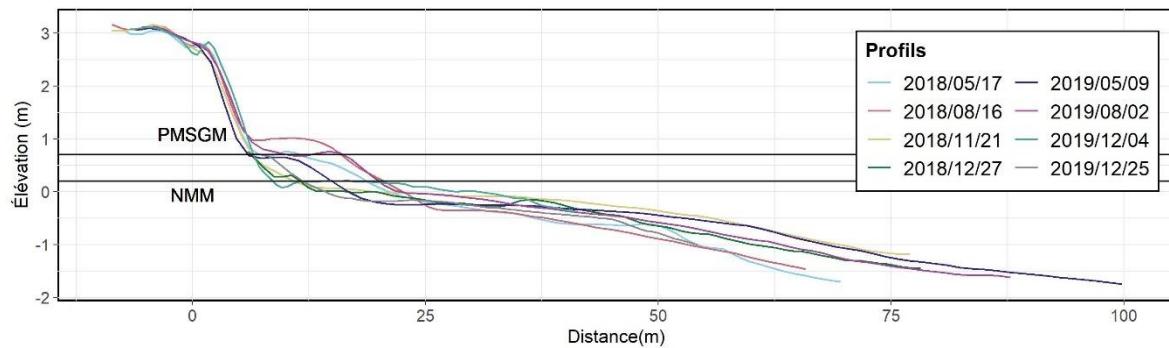
Profil 11



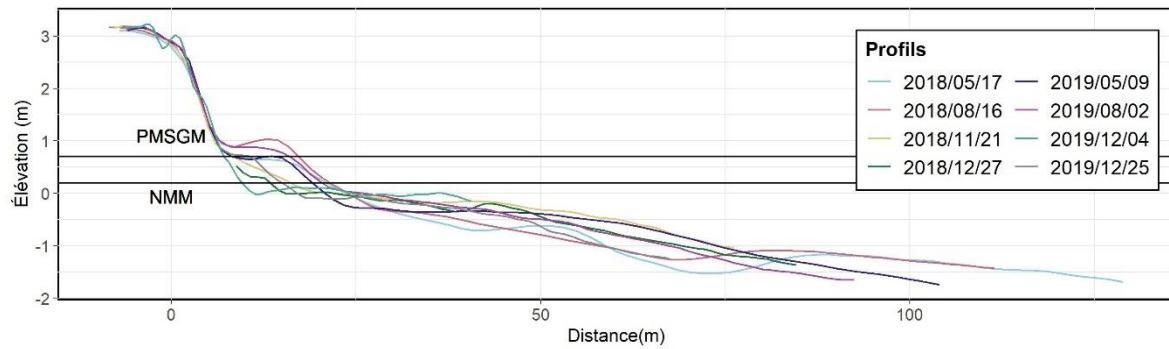
Profil 12



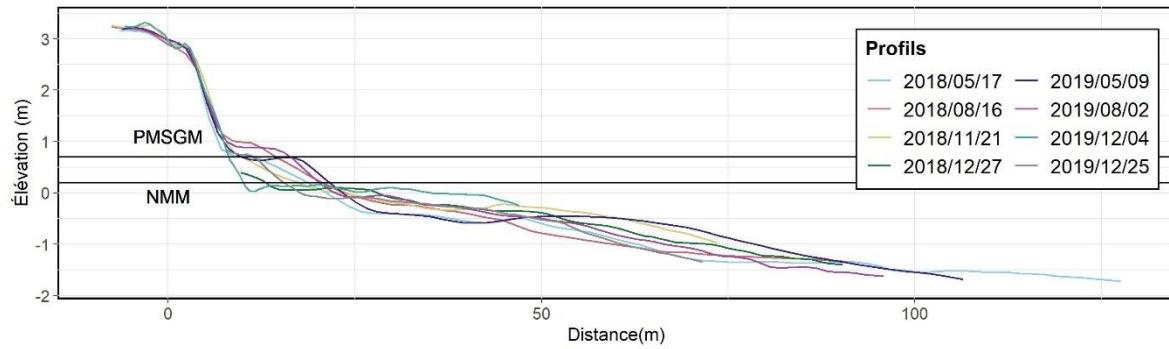
Profil 13



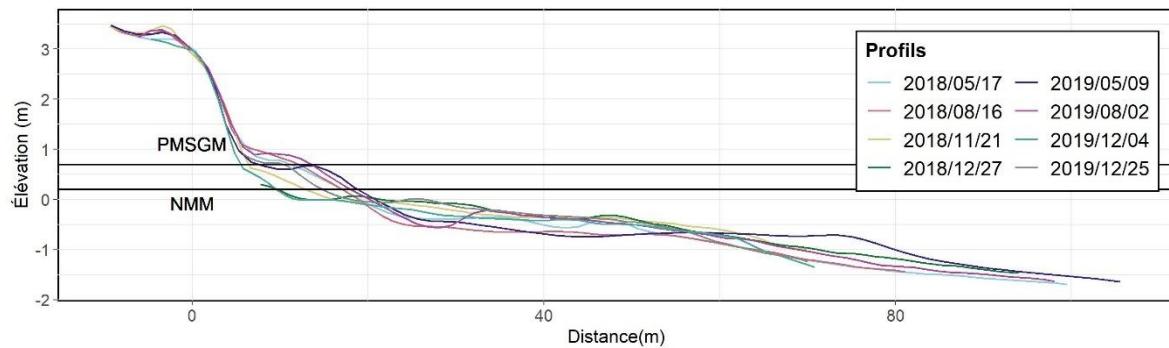
Profil 14



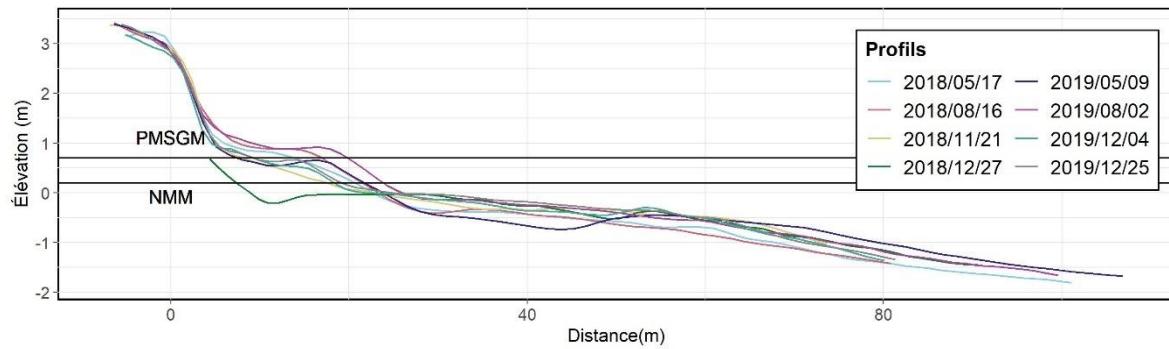
Profil 15



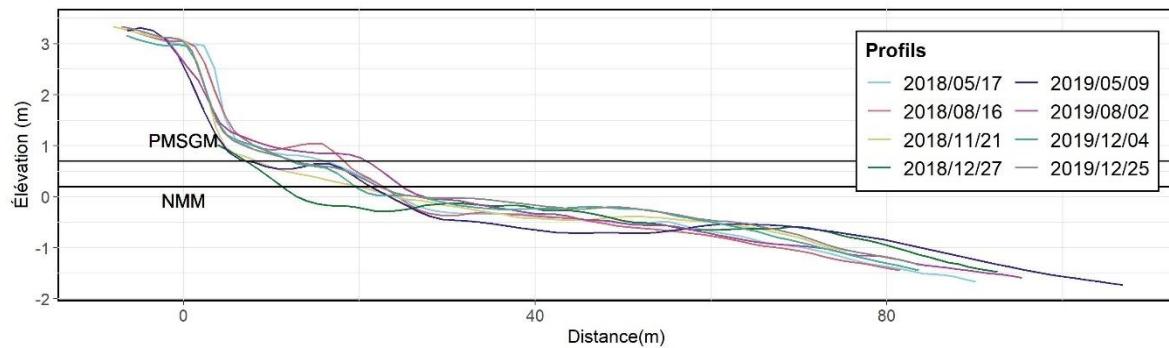
Profil 16



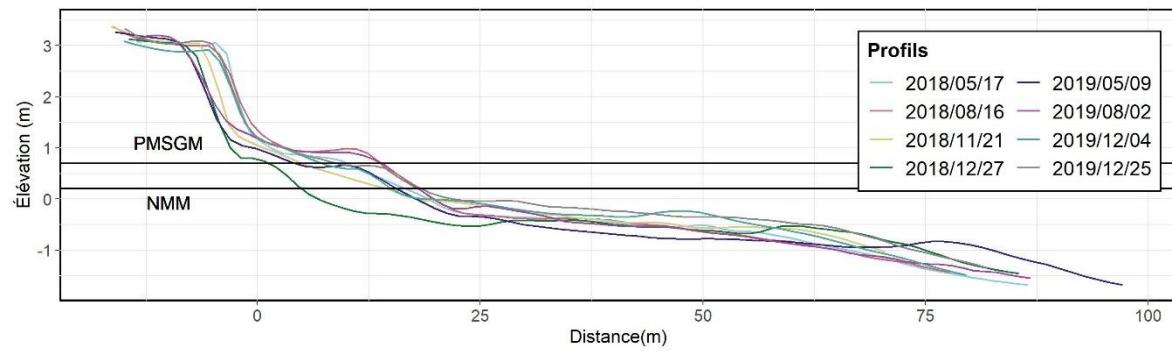
Profil 17



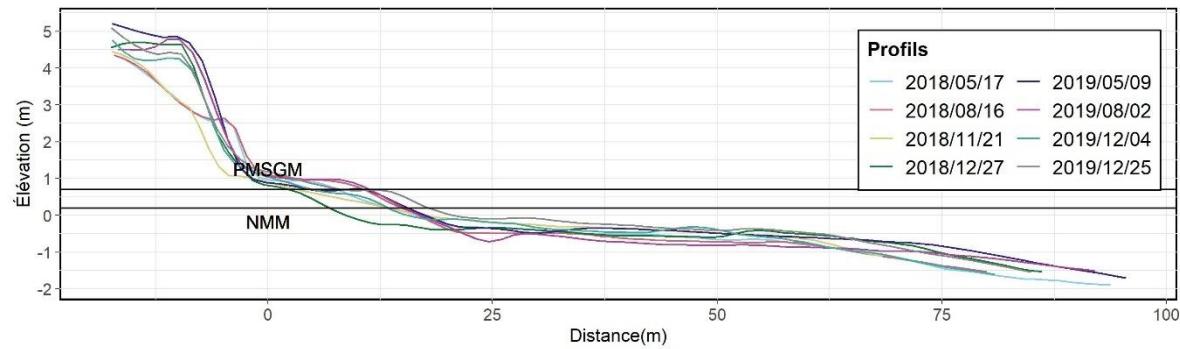
Profil 18



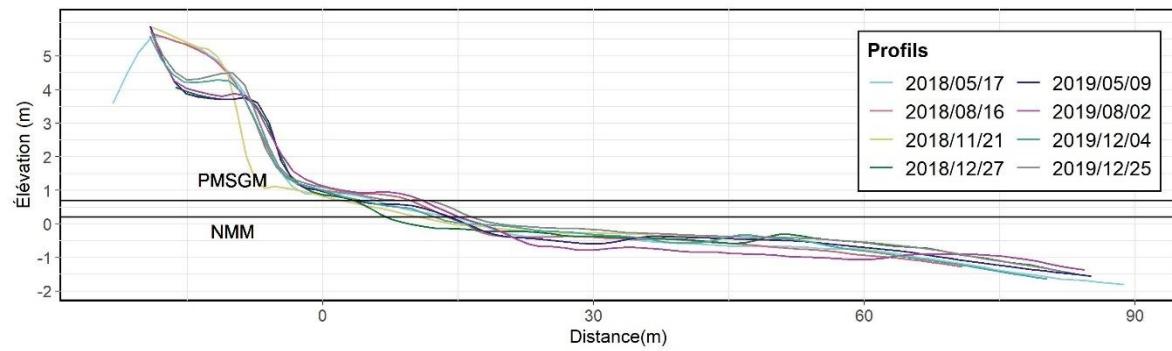
Profil 19



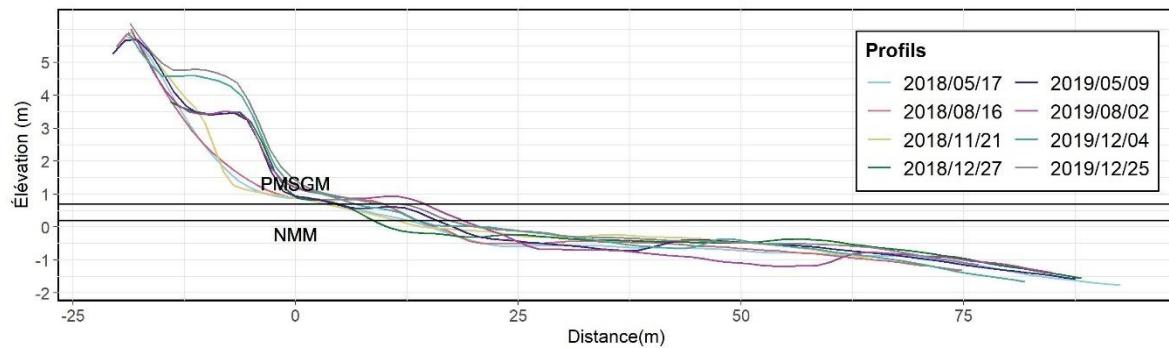
Profil 20



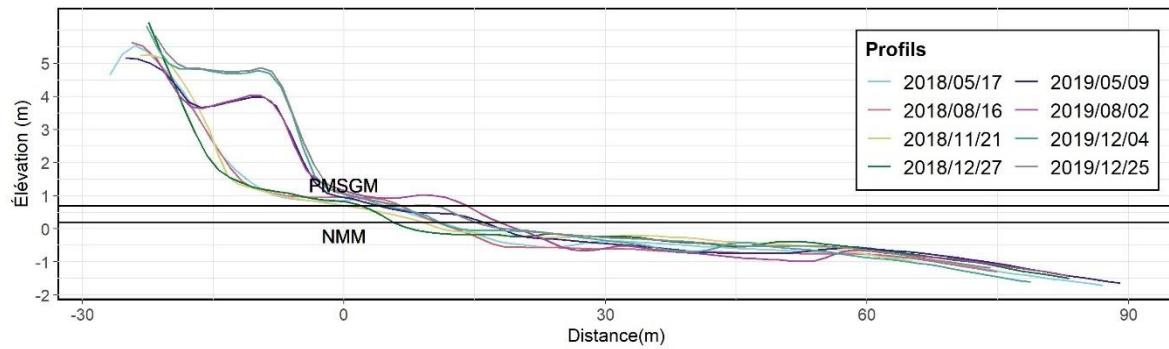
Profil 21



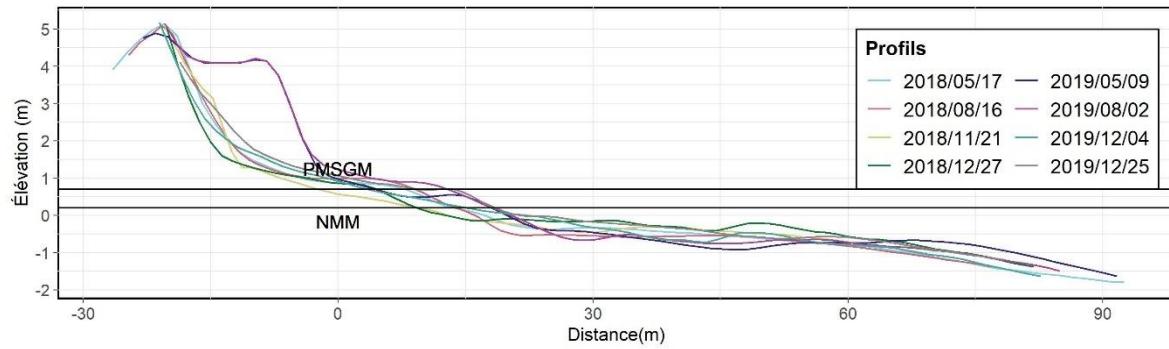
Profil 22



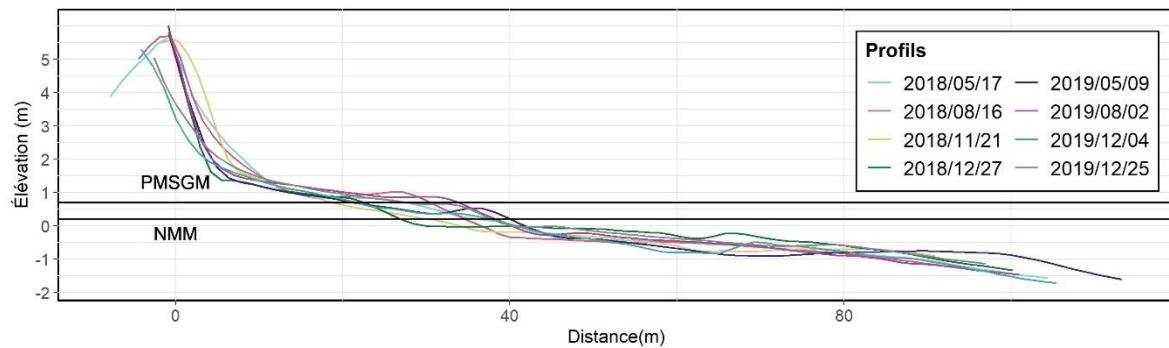
Profil 23



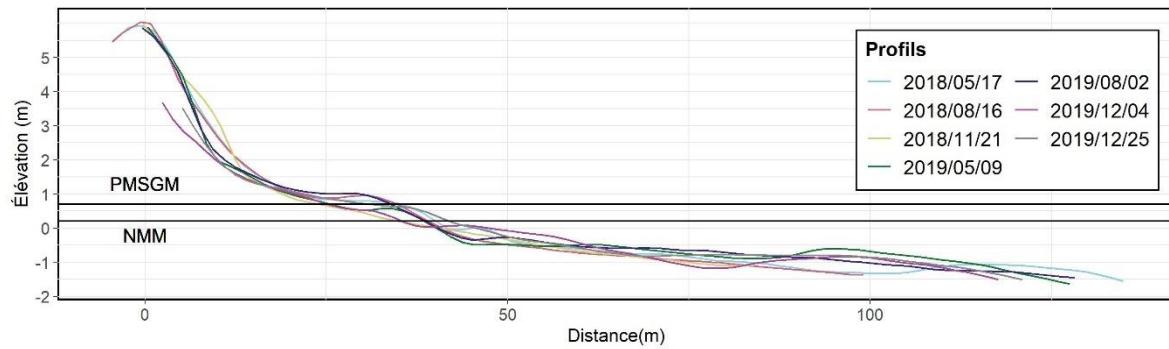
Profil 24



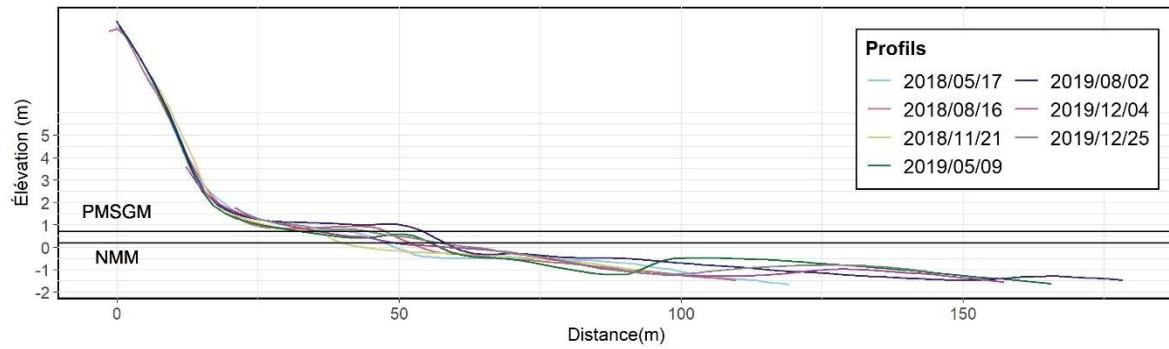
Profil 25



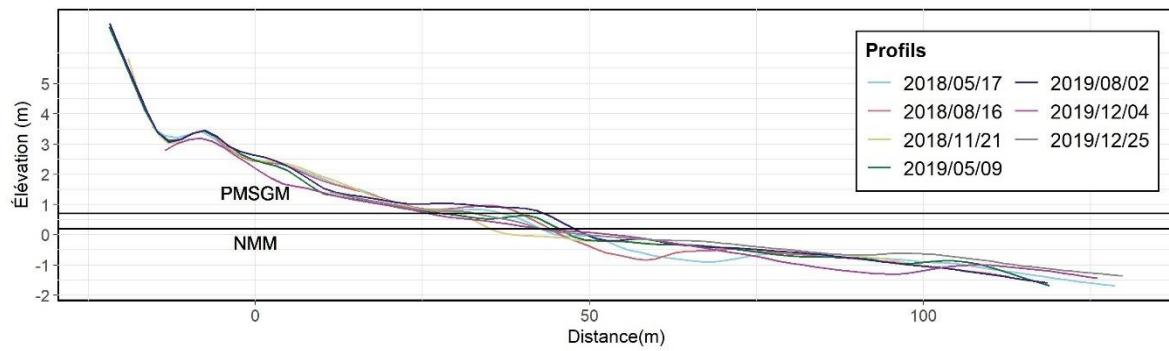
Profil 26



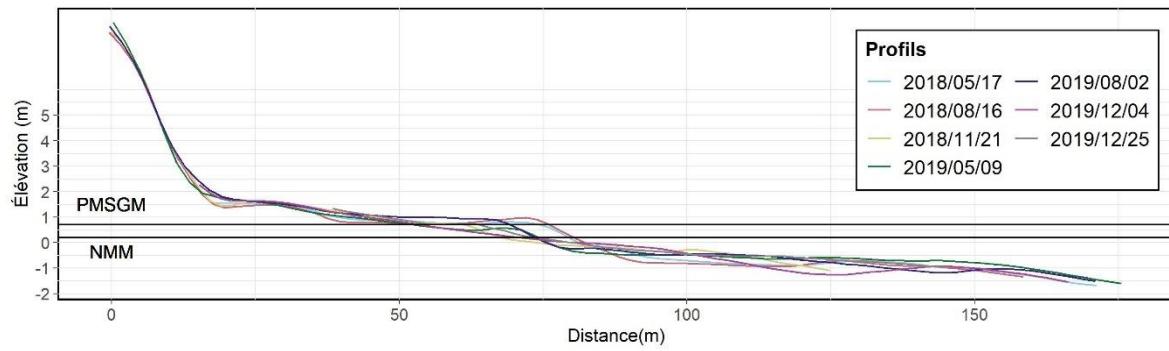
Profil 27



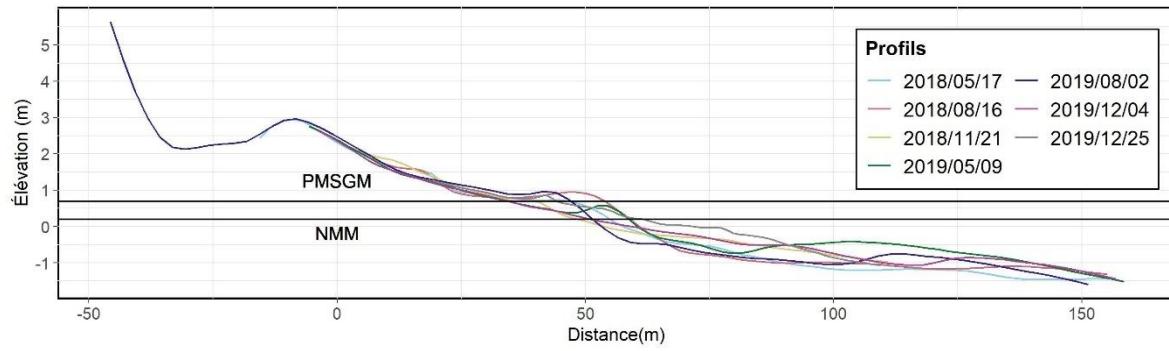
Profil 28



Profil 29

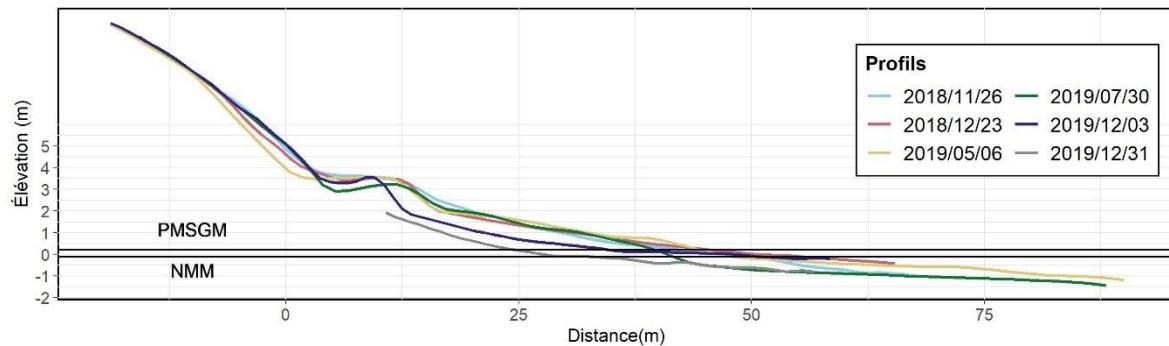


Profil 30

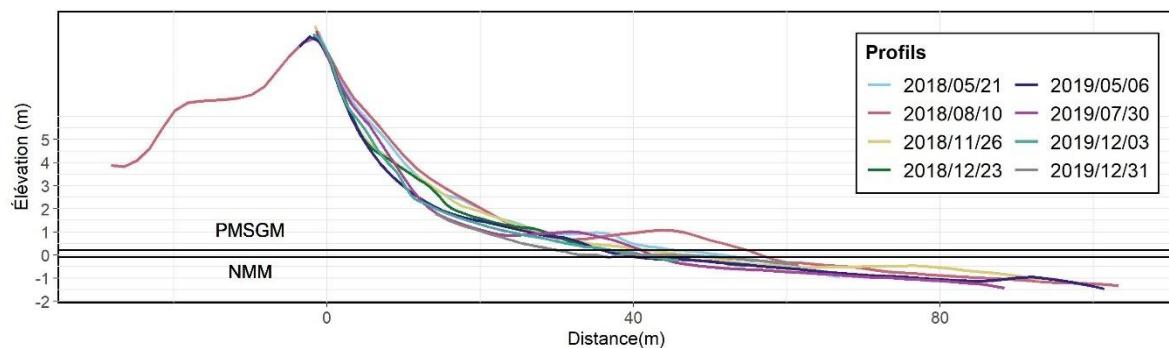


Annexe 5 – Ensemble des profils de la plage de la Pointe aux Loups

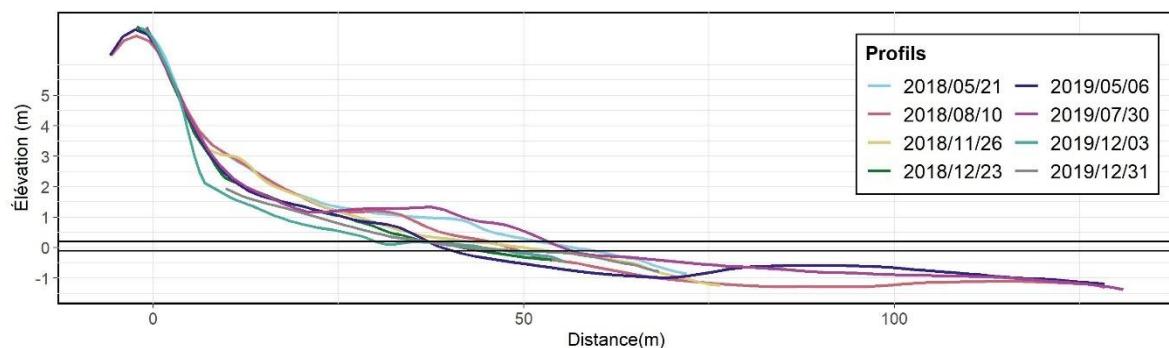
Profil 1



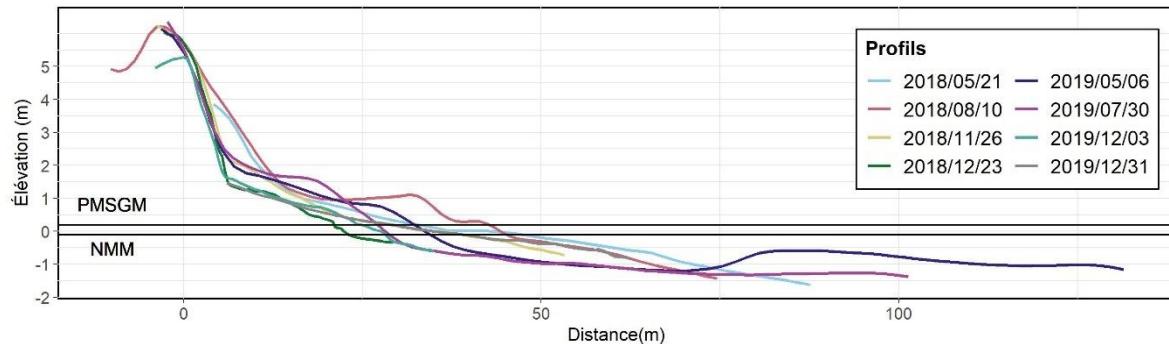
Profil 2



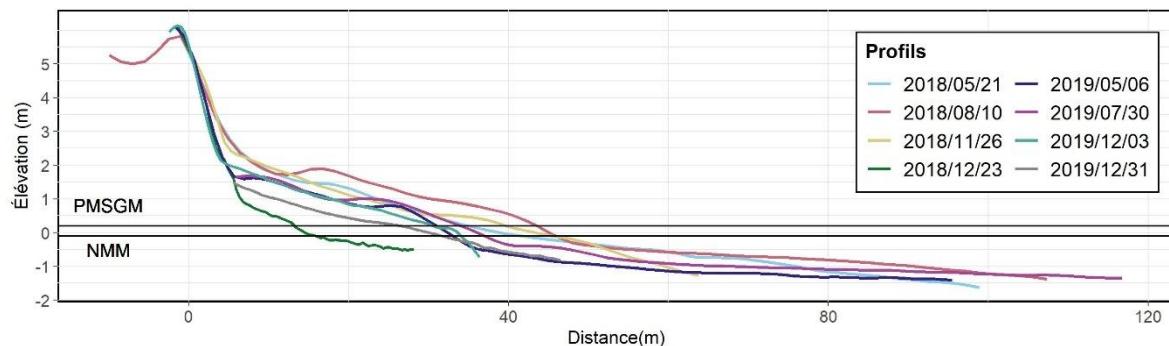
Profil 3



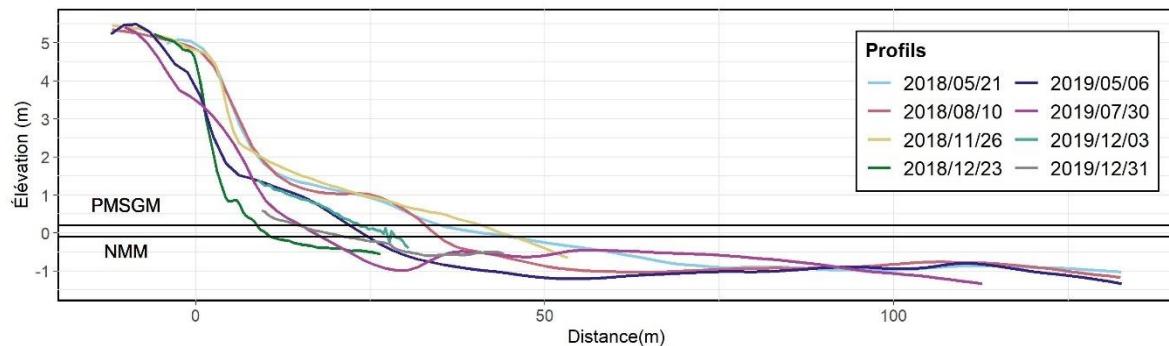
Profil 4



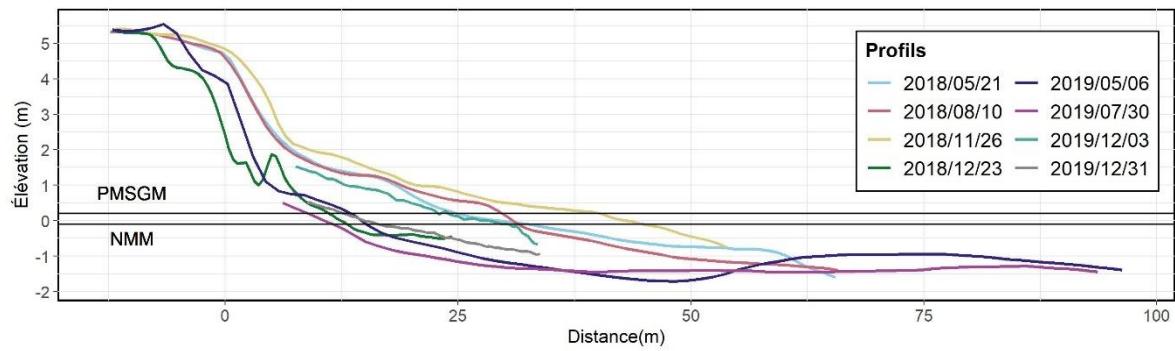
Profil 5



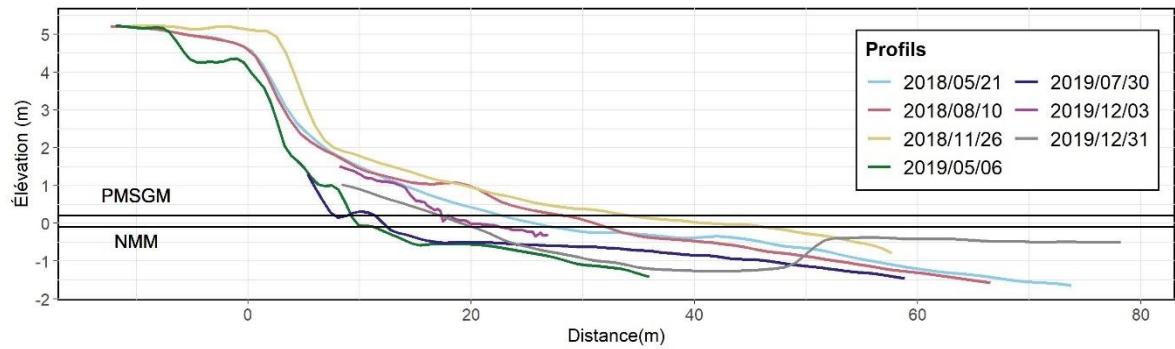
Profil 6



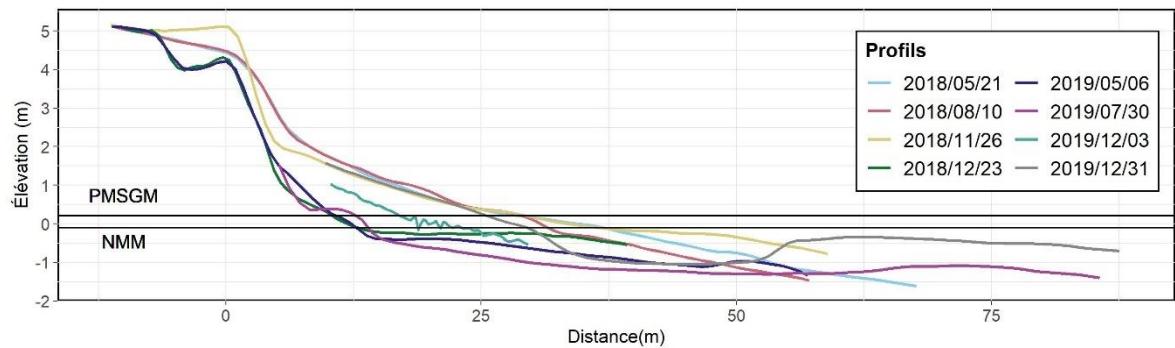
Profil 7



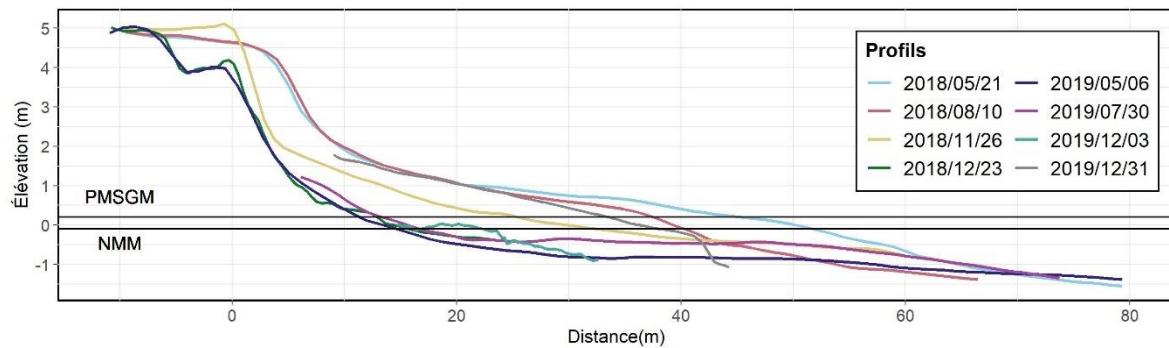
Profil 8



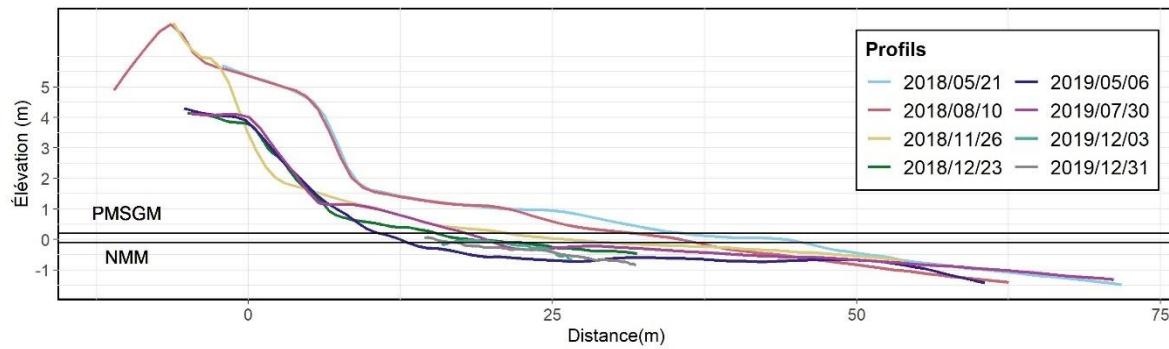
Profil 9



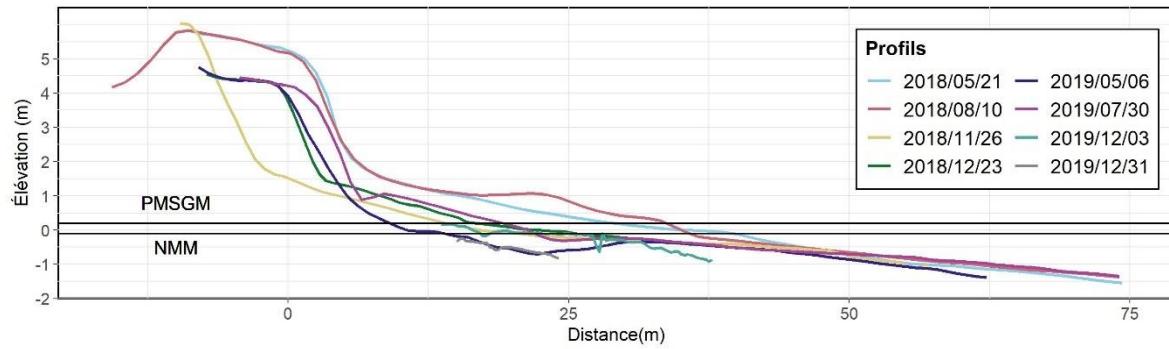
Profil 10



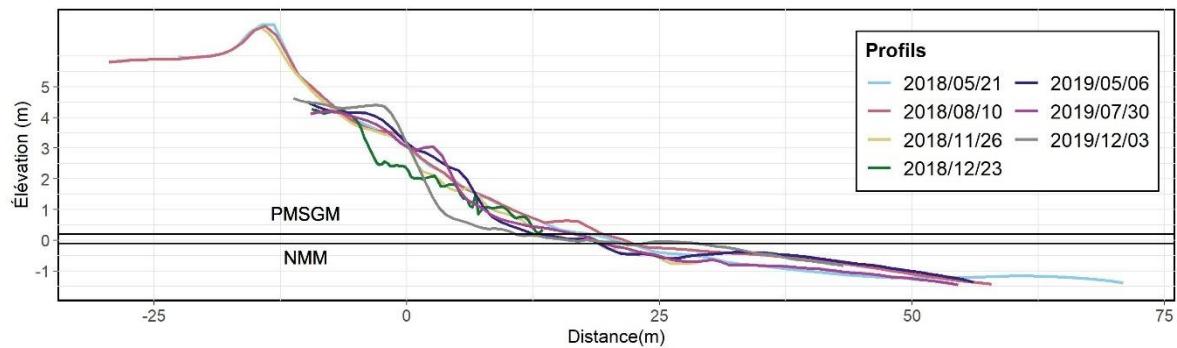
Profil 11



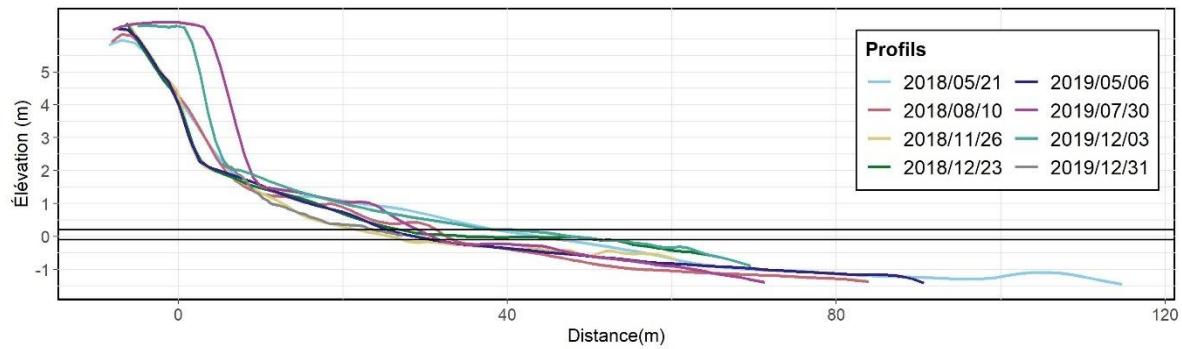
Profil 12



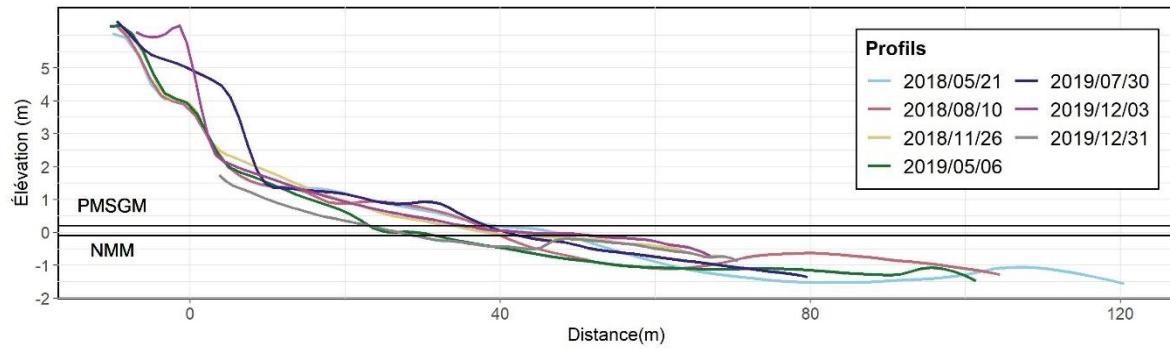
Profil 13



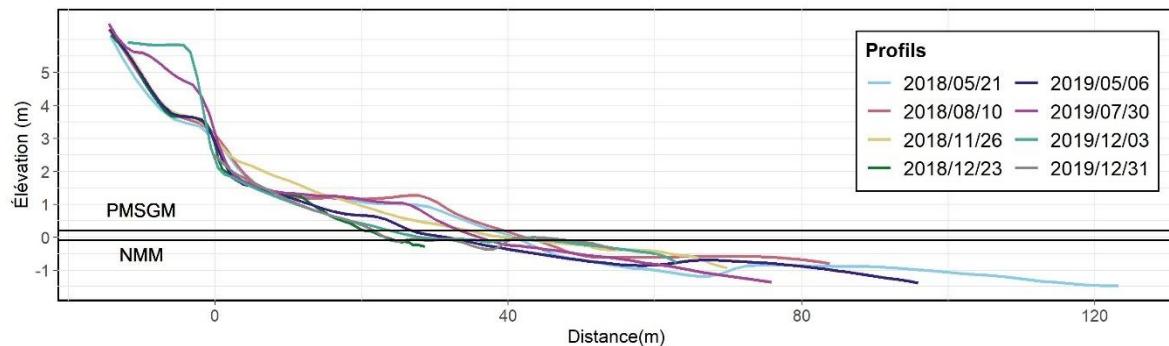
Profil 14



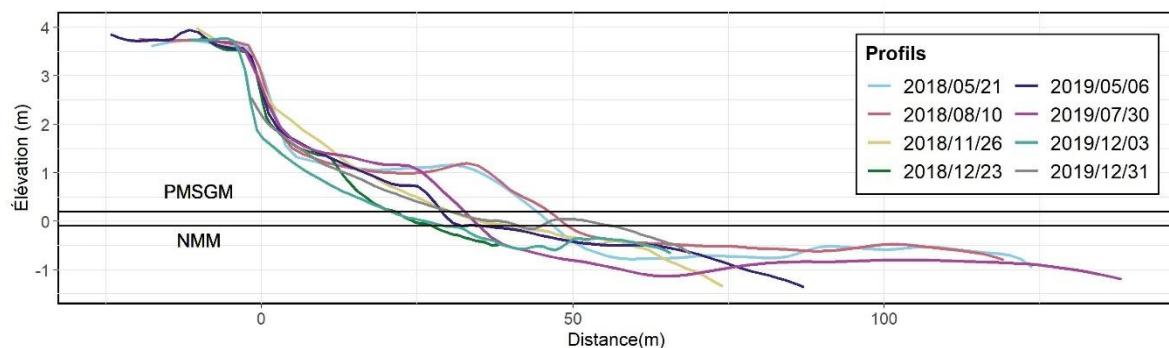
Profil 15



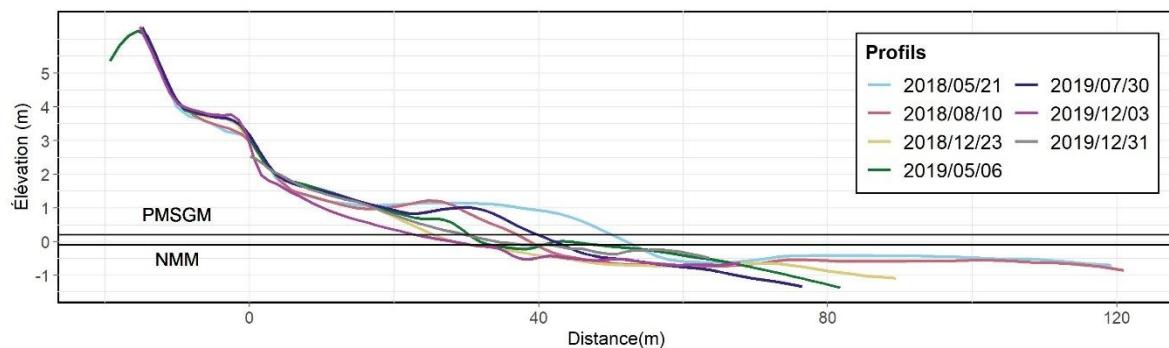
Profil 16



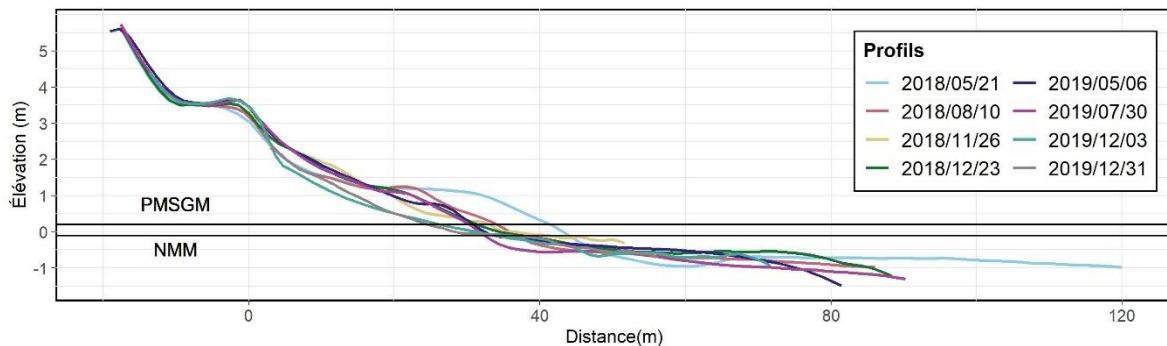
Profil 17



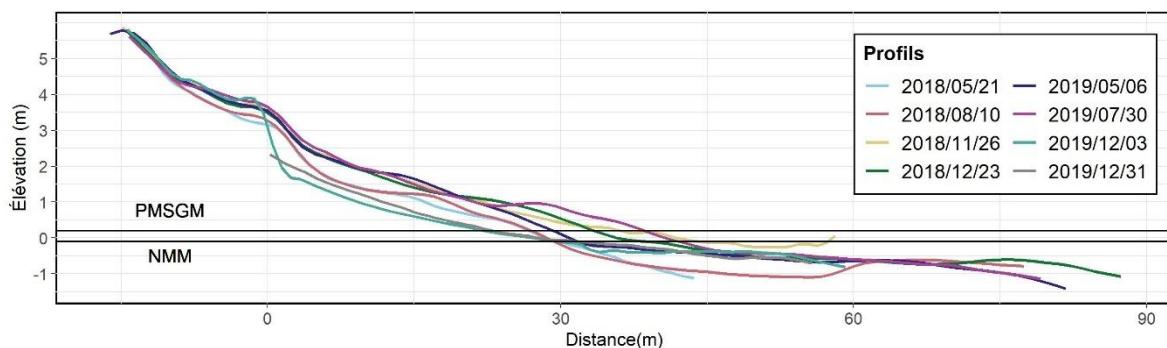
Profil 18



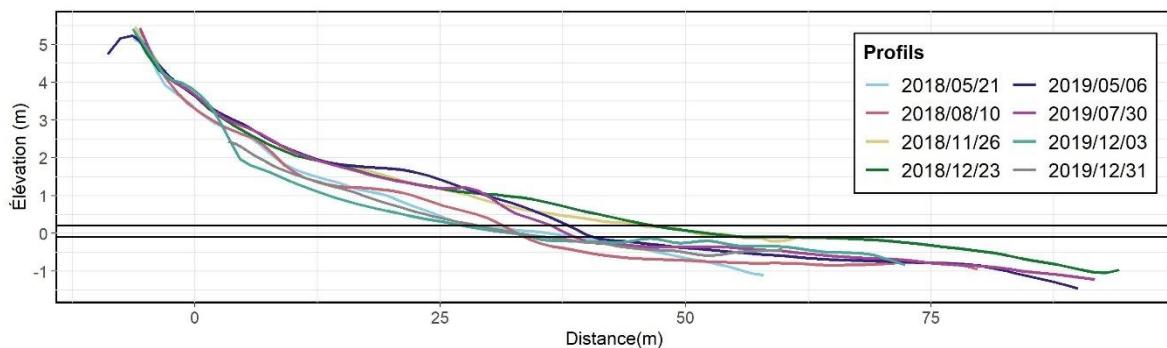
Profil 19



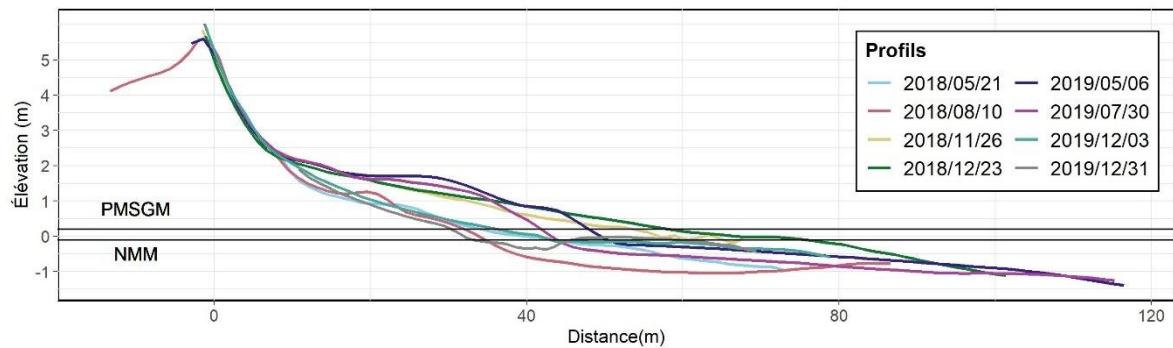
Profil 20



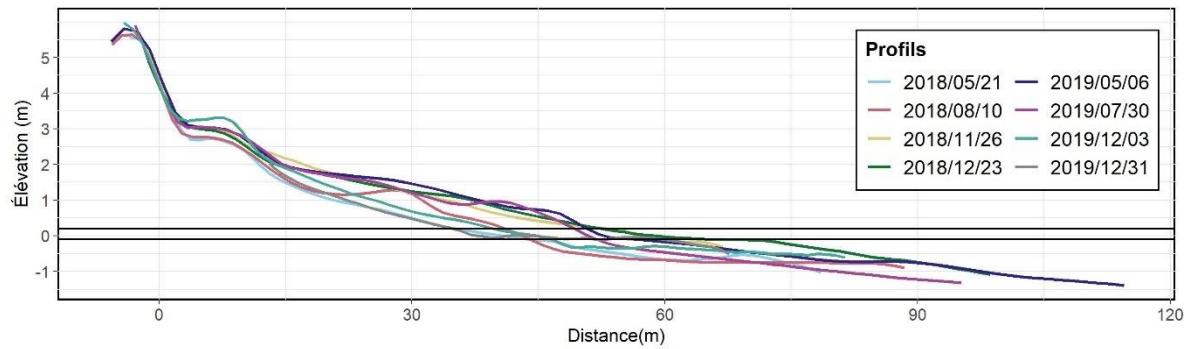
Profil 21



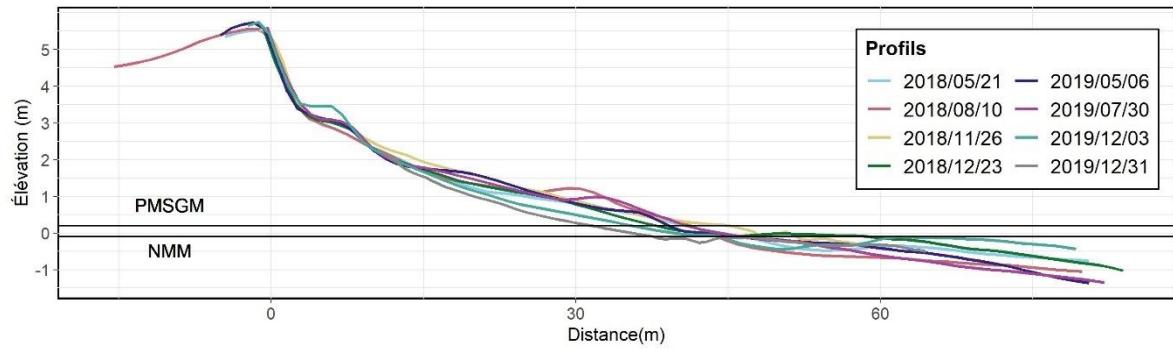
Profil 22



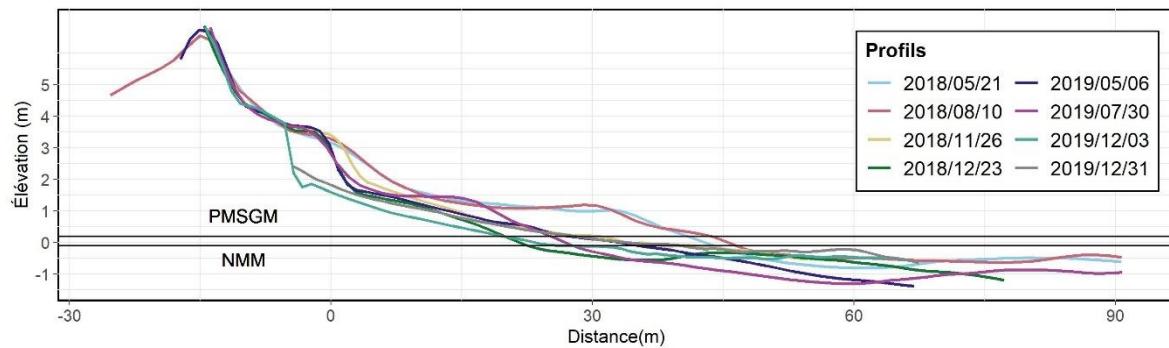
Profil 23



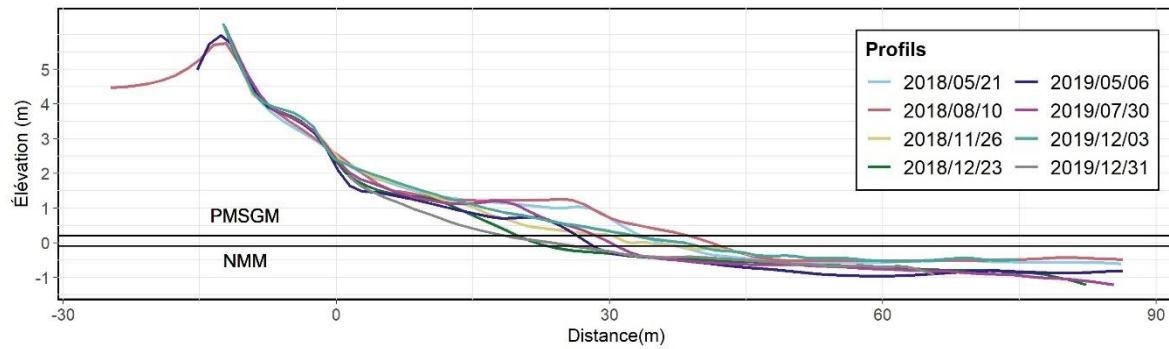
Profil 24



Profil 25



Profil 26



Profil 27

