

Suivi environnemental de travaux de rechargement de plage et de la renaturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent

RAPPORT FINAL

Présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec

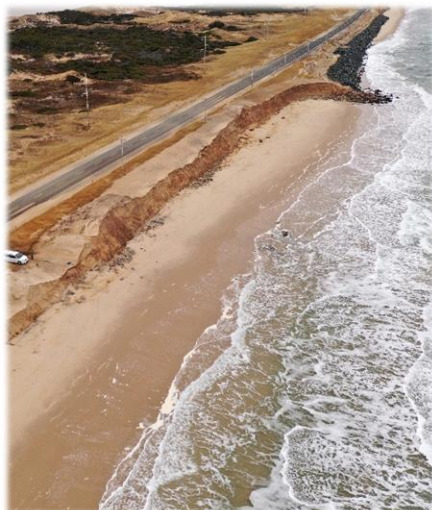
Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph.D.

Août 2020

CHAIRE DE RECHERCHE
EN GÉOSCIENCE CÔTIÈRE



Laboratoire de dynamique
et de gestion intégrée des
zones côtières | UQAR



ÉQUIPE DE RÉALISATION

Direction et recherche

Pascal Bernatchez, Ph.D., Géomorphologie côtière et télédétection
Responsable du projet
Professeur titulaire de la Chaire de recherche en géoscience côtière
Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)
Département de biologie, chimie et géographie
Université du Québec à Rimouski
Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca
Site web : ldgizc.uqar.ca

Équipe de recherche

Samuel Auger, étudiant au baccalauréat en géographie, LDGIZC, UQAR. Analyses granulométriques.

Ronan Autret, Ph.D. en géographie, chercheur postdoctoral, LDGIZC, UQAR. Levés et traitements photogrammétriques, traitements et analyses des données de vagues, analyses morphodynamiques, rédaction.

Marion Bandet, Ph.D. en *Ocean and Resources Engineering*, agente de recherche, LDGIZC, UQAR. Traitements et analyses des données de vagues.

Catherine Bruyère, B.Sc. en géographie, étudiante à la maîtrise en géographie, LDGIZC, UQAR. Équipe terrain.

Alexia Desormeaux, B.Sc. en géographie, technicienne en géographie, LDGIZC, UQAR. Équipe terrain.

Denys Dubuc, B.Sc. en géographie, auxiliaire de recherche, LDGIZC, UQAR. Équipe terrain.

Marc-Olivier Goudreault, B.Sc. en géographie, étudiant à la maîtrise en géographie, LDGIZC, UQAR. Levés terrain, traitements granulométriques et des profils de plage, analyse de l'évolution historique, rédaction

Arianne Jobin, M.Sc. en géographie, auxiliaire de recherche, LDGIZC, UQAR. Équipe terrain.

Nicholas Marion, B.Sc. en géographie, technicien en géomatique, LDGIZC, UQAR. Levés et traitements des données Lidar.

Renaud McKinnon, M.Sc. en biologie, auxiliaire de recherche, LDGIZC, UQAR.

François Savoie-Ferron, B.Sc. en développement durable et zone côtière, étudiant à la maîtrise en géographie, LDGIZC, UQAR. Levés et traitements photogrammétriques et des profils de plage. Analyse de l'évolution historique, de la morphodynamique, des données de vagues, rédaction.

Remerciements

L'équipe de recherche tient à remercier le ministère de la Sécurité publique du Québec pour le financement de ce projet de recherche dans le « Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2020 du gouvernement du Québec » [CPS 17-18-02].



Nous tenons aussi à remercier l'équipe du Parc national Forillon pour l'accès au parc et pour leur appui.

Images de la page couverture

Haut : Plage de Cap-des-Rosiers, Gaspésie, septembre 2019.

Bas gauche : Plage de Pointe-aux-Loups, Îles-de-la-Madeleine, septembre 2019.

Bas droite : Banc Larocque (Carleton-sur-Mer), Baie-des-Chaleurs, novembre 2019.

Source des trois photos : LDGIZC, UQAR

Référence complète suggérée

Savoie-Ferron, F., Goudreault, M.O., Autret, R., Bernatchez, P. et M. Bandet. 2020. Suivi environnemental de travaux de rechargement de plage et de la renaturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Rapport final. Chaire de recherche en géoscience côtière, LDGIZC, UQAR. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, août 2020, 139 p. + annexes.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	III
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES ÉQUATIONS	XIII
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 MISE EN CONTEXTE	1
1.2 OBJECTIFS	2
1.2.1 <i>Suivi de la renaturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers</i>	2
1.2.2 <i>Suivi environnemental des travaux de rechargement de plage</i>	2
2. SITES D'ÉTUDE	3
2.1 SUIVI DE LA RENATURALISATION D'UNE PLAGE COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS	3
2.1.1 <i>Contextes géographiques et géomorphologiques</i>	3
2.1.1.1 Secteur du démantèlement.....	3
2.1.1.2 Site témoin	4
2.1.1.3 Historique du démantèlement	4
2.1.2 <i>Contexte météo-océanique</i>	5
2.2 SUIVI ENVIRONNEMENTAL DE TRAVAUX DE RECHARGEMENT DE PLAGE	6
2.2.1 <i>Contextes géographiques et géomorphologiques</i>	7
2.2.1.1 Plage de l'Anse-aux-Coques	7
2.2.1.2 Banc Larocque	8
2.2.1.3 Plage Monaghan.....	9
2.2.1.4 Plage de La Martinique.....	10
2.2.1.5 Plage de Pointe-aux-Loups	11
2.2.2 <i>Contexte météo-océanique</i>	12
2.2.2.1 Plage de l'Anse-aux-Coques	12
2.2.2.2 Banc Larocque	13
2.2.2.3 Plage Monaghan.....	14
2.2.2.4 Plage de La Martinique.....	15
2.2.2.5 Plage de Pointe-aux-Loups	16
3. MÉTHODOLOGIE	18
3.1 ANALYSE HISTORIQUE DE LA DYNAMIQUE DU TRAIT DE CÔTE ET DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE PLAGE	18
3.2 SUIVI DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES.....	21
3.2.1 <i>Suivi des conditions hydrodynamiques à moyen terme (1980-2017)</i>	21
3.2.2 <i>Suivi des conditions hydrodynamiques à court terme (2016-2019)</i>	23
3.3 ANALYSE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES	24
3.3.1 <i>Caractérisation des conditions hydrodynamiques</i>	24
3.3.2 <i>Niveaux d'eau totaux</i>	24
3.4 SUIVI TOPOGRAPHIQUE.....	25
3.4.1 <i>Profils de plage</i>	25
3.4.2 <i>Topographie par Lidar</i>	26
3.4.3 <i>Topographie par photogrammétrie SfM</i>	26

3.5	ANALYSE DES DONNÉES TOPOMORPHOLOGIQUES	28
3.5.1	<i>Analyse des données vectorielles</i>	29
3.5.1.1	Variabilité pluriannuelle des profils.....	29
3.5.1.2	Bilans sédimentaires et pentes de plage	30
3.5.1.3	Largeurs de plage au niveau moyen des mers (NMM)	30
3.5.1.4	Analyse de la variabilité du trait de côte	30
3.5.2	<i>Analyse des données surfaciques</i>	30
3.6	SUIVI GRANULOMÉTRIQUE	31
4.	RÉSULTATS SECTORIELS	32
4.1	SUIVI DE LA RENATURALISATION D'UNE PLAGE COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS	32
4.1.1	<i>Évolution historique de la largeur de la plage de Cap-des-Rosiers (1963-2019)</i>	32
4.1.2	<i>Caractérisation côtière</i>	33
4.1.2.1	Conditions hydrodynamiques.....	35
4.1.3	<i>Réponse de la plage au démantèlement d'un ouvrage de défense côtière</i>	40
4.1.3.1	Perturbations anthropiques	40
4.1.3.2	Évolution annuelle.....	45
4.1.3.3	Évolution saisonnière	50
4.1.3.4	Comparaison avec le site témoin	55
4.1.4	<i>Conclusion des résultats pour le suivi de la renaturation d'une plage</i>	56
4.1.4.1	Évolution de la plage du site d'étude à travers les années.....	56
4.1.4.2	Réponse de la plage aux tempêtes.....	59
4.1.4.3	Comparaison avec le secteur témoin	60
4.2	SUIVI ENVIRONNEMENTAL DE TRAVAUX DE RECHARGEMENT DE PLAGE	61
4.2.1	<i>Anse-aux-Coques</i>	61
4.2.1.1	Caractérisation granulométrique	61
4.2.1.2	Évolution historique (1963 à 2015)	62
4.2.1.3	Évolution du secteur de la recharge de plage de septembre 2012 à septembre 2019	64
4.2.2	<i>Banc Larocque</i>	72
4.2.2.1	Caractérisation granulométrique	72
4.2.2.2	Évolution historique	72
4.2.2.3	Évolution du secteur de la recharge de plage d'août 2018 à novembre 2019	74
4.2.3	<i>Plage Monaghan</i>	82
4.2.3.1	Caractérisation granulométrique	82
4.2.3.2	Évolution historique	83
4.2.3.3	Évolution du secteur de la recharge de plage.	85
4.2.4	<i>Plage de La Martinique</i>	91
4.2.4.1	Caractérisation granulométrique	91
4.2.4.2	Évolution historique	91
4.2.4.3	Évolution du secteur de la recharge de plage de décembre 2018 à novembre 2019	93
4.2.5	<i>Plage de Pointe-aux-Loups</i>	101
4.2.5.1	Caractérisation granulométrique	101
4.2.5.2	Évolution historique	102
4.2.5.3	Évolution du secteur de la recharge de plage de décembre 2018 à novembre 2019	104
4.2.6	<i>Conclusion des résultats sectoriels pour le suivi environnemental de travaux de recharge de plage</i>	114
4.2.6.1	Anse-aux-Coques.....	114
4.2.6.2	Banc Laroque.....	116
4.2.6.3	Plage Monaghan.....	118
4.2.6.4	Plage de La Martinique.....	120
4.2.6.5	Plage de Pointe-aux-Loups	122

5. ÉVALUATION DES MÉTHODES DE RENATURALISATION ET DE RECHARGE DE PLAGES COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS	125
5.1 SUIVI DE LA RENATURALISATION D'UNE PLAGE COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS	125
5.2 SUIVI ENVIRONNEMENTAL DES TRAVAUX DE RECHARGEMENT DE PLAGE	126
5.2.1 Réponse de la plage Monaghan.....	126
5.2.2 Réponse des plages de l'Anse-aux-Coques et du banc Larocque	127
5.2.3 Réponse des plages de La Martinique et de Pointe-aux-Loups	127
6. RECOMMANDATIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE ET LE SUIVI DES RECHARGES DE PLAGES.....	129
6.1 RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES.....	129
6.2 PHASE DE CONCEPTION	130
6.2.1 Renaturalisation d'une plage	130
6.2.2 Recharge de plage.....	130
6.3 PHASE DE RÉALISATION	131
6.3.1 Renaturalisation d'une plage	131
6.3.2 Recharge de plage.....	131
6.4 SUIVI ET RÉAJUSTEMENT	132
6.4.1 Renaturalisation d'une plage et recharge de plage	132
7. CONCLUSION	134
7.1 CONSTATS GÉNÉRAUX	134
7.2 PERSPECTIVES	134
8. RÉFÉRENCES.....	136
ANNEXES	140

ANNEXE 1 – DONNÉES MARÉGRAPHIQUE DES SITES D’ÉTUDES	140
ANNEXE 2 – DATES, HEURES ET HAUTEURS D’EAU POUR LES LEVÉS	141
ANNEXE 2-1 – LEVÉS DE PROFILS DE PLAGE	141
ANNEXE 2-2 – LEVÉS TOPOGRAPHIQUES SMLT	143
ANNEXE 2-3 – LEVÉS PHOTOGRAPHIQUE DE BASSE ALTITUDE	143
ANNEXE 3 – PRÉSENTATION DES PÉRIODES D’INSTRUMENTATIONS ET DES DIFFÉRENTS RELEVÉS À CAP-DES-ROSIERS	144
ANNEXE 4 – BATHYMÉTRIE ET LOCALISATION DES STATIONS GRANULOMÉTRIQUES ET DE LA RÉCOLTE DES DONNÉES HYDRODYNAMIQUES.....	145
ANNEXE 5 – DIFFÉRENTIELS D’ÉLÉVATION REPRÉSENTANT LE SUIVI DE 2017.	146
ANNEXE 5-1 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 8 JUIN ET DU 11 JUILLET 2017.	146
ANNEXE 5-2 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 11 JUILLET ET 22 OCTOBRE 2017.....	146
ANNEXE 5-3 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 22 OCTOBRE ET 20 NOVEMBRE 2017.	147
ANNEXE 6 – DIFFÉRENTIEL D’ÉLÉVATION REPRÉSENTANT LE SUIVI DE 2018.	148
ANNEXE 6-1 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 11 AOÛT ET 8 OCTOBRE 2018.	148
ANNEXE 6-2 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 8 OCTOBRE ET 26 NOVEMBRE 2018.....	148
ANNEXE 7 – DIFFÉRENTIEL D’ÉLÉVATION REPRÉSENTANT LE SUIVI DE 2019.	149
ANNEXE 7-1 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 3 MAI ET 7 JUIN 2019.	149
ANNEXE 7-2 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 7 JUIN ET 5 JUILLET 2019.	149
ANNEXE 7-3 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 5 JUILLET ET 28 SEPTEMBRE 2019..	150
ANNEXE 8 – NOMBRE D’UTILISATEURS DE LA PLAGE DÉNOMBRÉ ENTRE LE 11 JUILLET ET 11 AOÛT 2011 ET 2018.	151
ANNEXE 9 – PROFILS DE PLAGE POUR L’ENSEMBLE DE LA PÉRIODE DE SUIVI	152
ANNEXE 9-1 – CAP-DES-ROSIERS	152
ANNEXE 9-2 – PLAGE DE L’ANSE-AUX-COQUES	152
ANNEXE 9-3 – BANC LAROCQUE	168
ANNEXE 9-4 – PLAGE MONAGHAN.....	176
ANNEXE 9-5 – PLAGE DE LA MARTINIQUE	182
ANNEXE 9-6 – PLAGE DE POINTE-AUX-LOUPS.....	190

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation du site d'étude et du site témoin à Cap-des-Rosiers.	3
Figure 2. Photographies aériennes obliques du site d'étude, partie nord à gauche, partie sud à droite.	4
Figure 3. Caractéristiques météo-océaniques du site de Cap-des-Rosiers. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), la période (C) et la direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.	5
Figure 4. Localisation des sites d'études avec suivi de recharges de plages.	6
Figure 5. Plage de l'Anse-aux-Coques en 2018 et 2019.	7
Figure 6. Recharge de la plage de l'Anse-aux-Coques.	7
Figure 7. Banc Larocque en 2018 et 2019.	8
Figure 8. Recharge de plage du banc Larocque.	8
Figure 9. Plage Monaghan en 2018 et 2019.	9
Figure 10. Recharge de la plage Monaghan.	9
Figure 11. Plage de La Martinique en 2018 et 2019.	10
Figure 12. Recharge de la plage de La Martinique.	10
Figure 13. Plage de Pointe-aux-Loups (secteur sud) en 2018 et 2019.	11
Figure 14. Recharge de la plage de Pointe-aux-Loups.	12
Figure 15. Contexte météo-océanique 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.	13
Figure 16. Contexte météo-océanique 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.	14
Figure 17. Contexte météo-océanique 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.	15
Figure 18. Contexte météo-océanique 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.	16
Figure 19. Contexte météo-océanique du secteur de 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.	17
Figure 20. Traits utilisés pour l'évolution historique du littoral selon les types de côtes. Pour le site de Cap-des-Rosiers, le pied de plage a été utilisé au lieu de la flexure.	20
Figure 21. Schéma de la méthode du DSAS (<i>Digital Shoreline Analysis System</i>). D'après Thieler <i>et al.</i> (2005).	20
Figure 22. Exemple de la méthode MobiTC.	21
Figure 23. Valeurs moyennes de la hauteur significative, période et direction des vagues calculées à partir du modèle WW3 implémenté dans le cadre du projet MODESCO.	22
Figure 24. Images d'un AWAC à gauche et de RBR à droite.	23
Figure 25. Présentation des composantes formant le niveau d'eau total (modifié de Serafin & Ruggiero, 2014).	24
Figure 26. Représentation d'un levé photogrammétrique à l'aide d'un cerf-volant (1), d'une caméra (2) et de cibles géoréférencées(3). Lors d'un relevé effectué à l'aide d'un drone, la caméra est intégrée à l'engin aéroporté.	28
Figure 27. Exemples des données photogrammétriques produites.	28
Figure 28. Représentation des trois stations granulométriques (St) par transect à Cap-des-Rosiers.	31
Figure 29. Vue oblique du site d'étude de Cap-des-Rosiers en 1927.	32
Figure 30. Analyse historique de la largeur moyenne de plage à Cap-des-Rosiers.	32

Figure 31. Évolution de la largeur de plage en 1927, 2011 et 2019, soit respectivement, avant la construction de la route, suivant la mise en place d'infrastructures de protection et après le démantèlement de la route et de ses infrastructures.	33
Figure 32. Analyse de la largeur de plage du secteur d'étude avant et après le démantèlement de l'enrochement et de la route de Cap-des-Rosiers. Le transect n° 0 représente le phare et le transect n° 40 représente le quai de Cap-des-Rosiers.	33
Figure 33. Proportion des tailles granulométriques sur les sites d'étude et témoin à Cap-des-Rosiers le 10 octobre 2018.	34
Figure 34. Proportion de gravier, de sable et de silt dans les différents échantillons granulométriques récoltés à Cap-des-Rosiers. Les stations (St1) correspondent au haut de plage, les stations (St3) correspondent au bas de plage.	35
Figure 35. Roses des vagues représentant la hauteur significative (Hs) et la période pic (Tp) des vagues de Cap-des-Rosiers mesurée avec l'AWAC du 21 novembre 2017 au 18 novembre 2019.	36
Figure 36. Représentation d'ondes de vague le 14 novembre 2018 à partir de la caméra située dans le phare (à gauche) et de la caméra AXIS (à droite). Il est à noter que les vagues illustrées ont été générées par des vents du NO au large, mais sont possiblement diffractées et arrivent à la côte d'une direction NE.	37
Figure 37. Caractérisation du climat de vague au large de Cap-des-Rosiers.	37
Figure 38. Comparaison du flux d'énergie (à gauche) et de la hauteur significative des vagues (à droite) à 5 m de profondeur entre le site d'étude et le site témoin à Cap-des-Rosiers. La hauteur significative au large a été mesurée à l'aide de l'AWAC.	38
Figure 39. Niveaux d'eau totaux de 2016 à 2019 à Cap-des-Rosiers. Les triangles rouges représentent les événements de franchissement où le niveau d'eau total a dépassé 3,5 m. Ce seuil a été déterminé à l'aide des différents levés morphologiques et confirmé à l'aide des images de la caméra vidéo AXIS. Il est à noter que l'axe des Y de la figure de l'année 2016 est différent des autres.	39
Figure 40. Images avant et pendant l'événement de franchissement (14 décembre et 30 décembre 2016). N.B. La photo de droite a été enregistrée trois heures précédant l'atteinte maximale du niveau d'eau total.	39
Figure 41. Description des interventions ayant été effectuées sur la plage.	40
Figure 42. Exemple de plan de reprofilage de plage produit par la firme de génie WSP Inc.	41
Figure 43. Exemple d'interventions sur le site d'étude de Cap-des-Rosiers. La première photo représente des travaux de démantèlement le 28 octobre 2016. La deuxième photo représente un reprofilage du cordon le 13 octobre 2017. La troisième photo présente une recharge de plage le 12 décembre 2018.	41
Figure 44. Différentiel d'élévation entre le 8 juillet et le 12 décembre 2016, soit avant et après la phase principale des travaux de démantèlement. Les variations de volume sont représentées en mètre cube.	42
Figure 45. Photos obliques prises avant et après le démantèlement (14 septembre 2010 et 26 septembre 2017).	42
Figure 46. Évolution des profils avant et après le démantèlement.	43
Figure 47. Différentiel d'élévation représentant l'évolution annuelle. Créé à partir des MNT du 12 décembre 2016 et du 11 juillet 2017.	44
Figure 48. Représentation d'une des brèches et de lobes de débordement. L'image du haut est un différentiel d'élévation du 12 décembre 2016 au 8 juin 2017. L'image du bas est une orthophotographie créée à partir du levé photogrammétrique du 11 août 2018.	44
Figure 49. Colonne de gauche : Représentation des profils no 4, 9, 12, 17, 21, 25 et 32 du site d'étude. Les traits en gris correspondent aux profils mesurés suivant le démantèlement, le trait en noir correspond au profil moyen de 2011 à 2016, le trait en rouge représente le profil moyen de 2019. Colonne de droite : Représentation du bilan sédimentaire des profils n° 4, 9, 12, 17, 21, 25 et 32	

du site d'étude. Le trait rouge pointillé correspond au début des travaux de démantèlement. Seules les valeurs d'un coefficient de corrélation de Pearson inférieur à 0,01 sont affichées.	46
Figure 50. Évolution annuelle des profils moyens n° 9, 17 et 21 localisés au site d'étude à Cap-des-Rosiers.	47
Figure 51. Bilans sédimentaires de la plage de Cap-des-Rosiers issus des différentiels de MNT des 12 décembre 2016, 11 juillet 2017, 11 août 2018 et 5 juillet 2019. Pour chaque graphique, de droite à gauche, la première barre correspond au volume de sédiments érodés, la deuxième barre correspond au volume de sédiments déposés, la troisième barre montre la somme des sédiments mobilisés (érosion + accrétion) et la quatrième barre correspond au bilan sédimentaire (érosion - accrétion). Le détail des différentiels est représenté dans les figure 47, figure 52 et figure 53.	47
Figure 52. Différentiel d'élévation représentant l'évolution annuelle. Créé à partir des MNT du 11 juillet 2017 et 11 août 2018.	48
Figure 53. Différentiel d'élévation représentant l'évolution annuelle. Créé à partir des MNT du 11 août 2018 et du 5 juillet 2019.	48
Figure 54. Évolution et variabilité du trait de côte sur le site d'étude à partir des profils moyens. Dans le graphique du haut, le trait de 2014 correspond à la période précédant le démantèlement. Le trait de 2016 correspond à la période suivant le démantèlement.	49
Figure 55. Bilans sédimentaires représentant l'évolution saisonnière de 2017 du site d'étude à Cap-des-Rosiers. Les bilans ont été créés à partir des différentiels de MNT du 8 juin, du 11 juillet, du 22 octobre et du 20 novembre 2017. Les différentiels sont disponibles en annexe.	50
Figure 56. Évolution des profils n° 9, 17 et 21 en 2017 localisés sur site d'étude à Cap-des-Rosiers.	51
Figure 57. Évolution des profils n° 9, 17 et 21 en 2018 localisés sur le site d'étude à Cap-des-Rosiers.	52
Figure 58. Bilans sédimentaires représentant l'évolution saisonnière de 2018 du site d'étude à Cap-des-Rosiers. Les bilans ont été créés à partir des différentiels de MNT du 11 août, du 8 octobre et du 26 novembre 2018. Les différentiels sont disponibles en annexe.	52
Figure 59. Suivi de l'évolution de la recharge de plage du 19 septembre 2018 à partir des profils de plage.	53
Figure 60. Bilans sédimentaires représentant l'évolution saisonnière de 2019 du site d'étude à Cap-des-Rosiers. Les bilans ont été créés à partir des différentiels de MNT du 3 mai, du 7 juin, du 5 juillet et du 28 septembre 2019. Les différentiels sont disponibles en annexe.	54
Figure 61. Évolution des profils n° 9, 17 et 21 en 2019 localisés sur le site d'étude à Cap-des-Rosiers.	54
Figure 62. Évolution du bilan sédimentaire des sites d'étude et témoin de Cap-des-Rosiers créée à partir des profils de plage. Le trait vertical gris représente le début des travaux de démantèlement.	55
Figure 63. Évolution des pentes moyennes de plage des sites d'étude et témoin de Cap-des-Rosiers créée à partir des profils de plage. Le trait vertical gris représente le début des travaux de démantèlement.	56
Figure 64. Photo du talus d'érosion prise lors de la campagne de terrain du 8 juin 2017.	57
Figure 65. Photos illustrant les modifications du profil n° 9 avant et après le reprofilage mécanique du 19 octobre et suivant la tempête du 30 octobre, enregistrées respectivement les 11 octobre, 28 octobre et 1 ^{er} novembre 2017.	58
Figure 66. Suivi de l'évolution de la recharge de plage du 19 septembre 2018 à partir des différentiels d'élévation. La recharge correspond à la zone bleue située du profils n° 19 au n° 22 dans le différentiel du haut (août 2018 à oct. 2018).	58
Figure 67. Carence en substrat fin ($D_{50} = 2,5 - 6,5$ mm) sur le profil n° 30 à gauche en comparaison avec le profil n° 9 à droite le 28 septembre 2019.	60
Figure 68. Représentation d'événements de franchissement sur le cordon lors de la tempête du 25 novembre 2019. Réalisé à partir de l'orthophotographie créée lors du levé de drone du 26 novembre 2019.	60
Figure 69. Photos de la plage, du site d'étude à gauche et du site témoin à droite, prises le 28 septembre 2019.	61
Figure 70. Distribution granulométrique de l'Anse-aux-Coques.	62
Figure 71. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de l'Anse-aux-Coques.	63

Figure 72. 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 73. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019.	65
Figure 74. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019.	66
Figure 75. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 1 du 13 juin 2017 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	67
Figure 76. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 1 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	67
Figure 77. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 13 du 13 juin 2017 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	68
Figure 78. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 13 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	68
Figure 79. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 5 du 13 juin 2017 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	69
Figure 80. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 5 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	69
Figure 81. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 13 juin 2017 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	70
Figure 82. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.	70
Figure 83. Distances du niveau moyen des mers par rapport à la ligne de rivage à l'Anse-aux-Coques.....	71
Figure 84. Distribution granulométrique du banc Larocque	72
Figure 85. Évolution historique des cellules hydrosédimentaires du barachois de Carleton et de la baie de Cascapédia (1963-2018).....	73
Figure 86. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge du banc Larocque.	74
Figure 87. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge du banc Larocque entre août 2018 et novembre 2019.	75
Figure 88. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge du banc Larocque entre août 2018 et novembre 2019.	76
Figure 89. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 14 juin 2018 au 11 décembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.	77
Figure 90. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.	77
Figure 91. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 14 juin 2018 au 11 décembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.	78
Figure 92. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 19 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.	78
Figure 93. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 14 du 14 juin 2018 au 11 décembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.	79
Figure 94. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 14 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.	79
Figure 95. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 16 du 14 juin 2018 au 11 décembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.	80
Figure 96. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 16 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.	80
Figure 97. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur du banc Laroque.	81
Figure 98. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge du banc Laroque	81

Figure 99. Distribution granulométrique de la plage Monaghan	83
Figure 100. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de la Boule (1965-2017).	84
Figure 101. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de la plage Monaghan.	85
Figure 102. 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.	86
Figure 103. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 4 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.	86
Figure 104. 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.	87
Figure 105. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 11 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.	87
Figure 106. 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.	88
Figure 107. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 6 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.	88
Figure 108. 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.	89
Figure 109. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 8 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.	89
Figure 110. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de la plage Monaghan	90
Figure 111. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers de la recharge de la plage Monaghan ...	90
Figure 112. Distribution granulométrique de la plage de La Martinique	91
Figure 113. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance (1963-2019).	92
Figure 114. 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.	93
Figure 115. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage de La Martinique entre décembre 2018 et décembre 2019.	94
Figure 116. 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).	95
Figure 117. 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.	96
Figure 118. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 16 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	96
Figure 119. 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.	97
Figure 120. Enveloppe et profil moyen du profil n° 25 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	97
Figure 121. 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.	98
Figure 122. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 19 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	98
Figure 123. 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.	99
Figure 124. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 21 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.	99
Figure 125. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de La Martinique	101
Figure 126. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge de La Martinique	101

Figure 127. Distribution granulométrique de Pointe-aux-Loups	102
Figure 128. Évolution historique de la ligne de rivage de la cellule hydrosédimentaire de la Pointe-aux-Loups (1963-2019)	103
Figure 129. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de Pointe-aux-Loups.	104
Figure 130. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge de la plage de Pointe-aux-Loups entre décembre 2018 et décembre 2019.	105
Figure 131. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage de Pointe-aux-Loups entre décembre 2018 et décembre 2019.	105
Figure 132. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 4 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	106
Figure 133. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 4 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	107
Figure 134. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	107
Figure 135. Enveloppe et profil moyen du profil n° 19 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	108
Figure 136. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 6 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	108
Figure 137. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 6 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	109
Figure 138. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	110
Figure 139. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	110
Figure 140. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 12 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups.	111
Figure 141. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 12 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	111
Figure 142. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 14 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	112
Figure 143. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 14 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.	112
Figure 144. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de Pointe-aux-Loups. .	113
Figure 145. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge de Pointe-aux-Loups.	113
Figure 146. Plage de l'Anse-aux-Coques en 2014 (pendant les travaux de recharge) et en 2019.	115
Figure 147. Recharge du banc Larocque en août 2019. Une microfalaise se dessine sur l'ensemble de la recharge.	117
Figure 148. Sédiments du haut estran de la plage du banc Larocque	118
Figure 149. Plage Monaghan en août 2019	119
Figure 150. Photo oblique de la recharge en 2000, après la mise en place de la recharge.	120
Figure 151. Recharge de La Martinique avant et après la tempête Dorian.	121
Figure 152. Secteur de la recharge en 2019 : au sud l'enrochement et au nord, la recharge.	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Historique de l’anthropisation du littoral entre le phare et le quai de Cap-des-Rosiers (Source : WSP, 2015).	5
Tableau 2.	Photographies aériennes utilisées pour l’ensemble des sites d’études.....	19
Tableau 3.	Taux d’évolution de la cellule hydrosédimentaire de l’Anse-aux-Coques (m/an).	62
Tableau 4.	Taux d’évolution de la ligne de rivage des cellules hydrosédimentaires du barachois de Carleton et de la baie de Cascapédia (m/an).	73
Tableau 5.	Taux d’évolution de la ligne de rivage de la cellule hydrosédimentaire de la baie de la Boule (m/an).	83
Tableau 6.	Taux d’évolution de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance (m/an).	92
Tableau 7.	Taux d’évolution de la ligne de rivage de la cellule hydrosédimentaire de la Pointe-aux-Loups (m/an)	102

LISTE DES ÉQUATIONS

Équation 1.	$F = \rho g 264 \pi H s^2 T$	24
Équation 2.	$\langle \eta \rangle = 0,0055(HOL0)^{0,5\beta}$	25
Équation 3.	$R2\% = 1,06(0,0055HOL00,5\beta + 0,32(HOL0\beta)^{0,52})$	25

1. INTRODUCTION

1.1 MISE EN CONTEXTE

Le présent rapport présente les travaux menés dans le cadre du *Projet de suivi environnemental de travaux de rechargement de plage et de la renaturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent*. Ce projet visait à évaluer les mesures de gestion de l'érosion côtière par des méthodes dites « douces », qui ont été entreprises sur certains secteurs côtiers du Québec maritime, notamment par le ministère de la Sécurité publique (MSP) avec des projets de recharges de plage à Sainte-Luce (2014) et à Percé (2017). Il s'articulait en deux axes de travail : (i) le développement d'un protocole de suivi lors de la mise en place d'une recharge sédimentaire d'une plage, et (ii) l'évaluation de la capacité d'une plage à retrouver son profil d'équilibre à la suite du démantèlement d'un enrochement. Ce travail s'inscrit dans un contexte où il y a une volonté, notamment au MSP, de trouver d'autres solutions que les ouvrages de protection rigides qui sont généralement mis en place pour lutter contre les aléas côtiers sur les côtes du Québec maritime. Le protocole servira aussi aux exigences de suivi du ministère de l'Environnement et de la lutte aux changements climatiques (MELCC), ainsi qu'à Pêches et Océans Canada (MPO) lors des autorisations environnementales. Les résultats du suivi pourront aussi permettre d'ajuster le concept de recharge ou de proposer de nouvelles mesures d'atténuation.

Les environnements côtiers du Québec maritime présentent en effet une forte exposition à l'aléa d'érosion côtière. Si les taux annuels moyens de recul du trait de côte étaient de l'ordre de 0,5 à 2 m sur les côtes meubles entre 1963 et 2004, certains secteurs font maintenant face à des valeurs de retrait beaucoup plus importantes, pouvant atteindre jusqu'à 7,5 m par année (Bernatchez & Dubois, 2004). Pour répondre aux problématiques posées par cet aléa, de nombreux ouvrages de protection côtière ont été implantés en bordure des côtes du Québec maritime. En 2017, près de 387 km des côtes de l'Est du Québec étaient artificialisées par ces ouvrages de protection, avec des taux d'artificialisation atteignant respectivement 20,9 % et 21,4 % au Bas-Saint-Laurent et en Gaspésie (Bernatchez et al., 2020). Ces ouvrages ont souvent été implantés en urgence, dans un contexte de concertation limitée et sans égards aux types de côtes et aux dynamiques qui leur sont propres (Pranzini *et al.*, 2015).

Historiquement, au Québec, ce sont surtout des infrastructures rigides, telles que les enrochements, les murets, les brise-lames et les épis, qui ont été implantées (Bernatchez & Fraser, 2012a ; Castelle *et al.*, 2009a). Quoique ces ouvrages permettent de stabiliser certains types de côtes, notamment les falaises, leur efficacité n'a pas été démontrée dans la majorité des cas où ils ont été utilisés. Lors de la tempête du 6 décembre 2010, plus de 70 % des ouvrages de protection côtière des MRC de La Mitis et de La Matanie ont été endommagés et des reculs de plus de 10 m ont été mesurés derrière les ouvrages qui ont été submergés ou qui ont cédé (Quintin *et al.*, 2013). En de nombreux endroits, ils ont aussi été identifiés comme la cause d'effets indésirables sur les systèmes littoraux, notamment une réduction de la largeur des plages et un abaissement des plages (Bernatchez et al., 2012 ; Bernatchez et al., 2011 ; Castelle *et al.*, 2009a ; Cooper & McKenna, 2008 ; Defeo *et al.*, 2009). Face à ce constat, la communauté scientifique recommande une considération accrue des dynamiques et des processus côtiers naturels dans la prise de décision en matière de stratégies de protection côtière (Cooper et al., 2020). Les méthodes douces de protection côtière sont notamment mises de l'avant comme une alternative plus pertinente dans la lutte contre l'aléa d'érosion côtière dans certains types de systèmes côtiers. Celles-ci peuvent s'avérer efficaces pour limiter l'érosion côtière sans entraîner des conséquences négatives sur les dynamiques hydrosédimentaires des milieux côtiers (Bachand & Comtois, 2016 ; Benedet *et al.*, 2007 ; Brown *et al.*, 2016). Malgré un recours à ces méthodes de plus en plus fréquent au niveau mondial (Hamm *et al.*, 2002), elles restent encore très peu utilisées au Québec (Bachand & Comtois, 2016).

Par exemple, sur le secteur de Cap-des-Rosiers dans le Parc national Forillon, en Gaspésie, la problématique de réduction de la largeur de plage et de franchissement à répétition des ouvrages de protection, lors d'épisodes de fortes tempêtes, a conduit Parcs Canada à démanteler un enrochement de plus d'un kilomètre en 2016 (Didier, Bernatchez, Marion, & Drejza, 2018). Parallèlement à ce démantèlement, plusieurs plages ont fait l'objet de recharges sédimentaires entre 2000 et 2019.

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 b ; 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 caractérisées par une érosion modérée et persistante (Dean, 2002). L'efficacité de recharges de plage concernant de gros volumes sédimentaires et visant à lutter contre une érosion chronique sur des littoraux à forts enjeux n'a pas encore été évaluée à l'échelle du Québec maritime.

1.2 OBJECTIFS

Ce rapport présente le protocole méthodologique mis en œuvre et les résultats obtenus dans le cadre du projet de suivi environnemental de travaux de rechargement de plage et de la renaturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, dont les objectifs étaient déclinés en deux grands volets décrits ci-dessous. Le rapport inclut également des recommandations formulées à la lumière des résultats obtenus.

1.2.1 Suivi de la renaturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers

Les objectifs du suivi de la renaturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers consistaient à : **1)** évaluer la réponse géomorphologique de la plage à la suite du démantèlement d'ouvrages de protection ; **2)** quantifier les effets des conditions hydrodynamiques sur la variabilité saisonnière et annuelle de la géomorphologie d'une plage de gravier naturelle et d'une plage de gravier anthropisée.

1.2.2 Suivi environnemental des travaux de rechargement de plage

Les objectifs pour le suivi environnemental des travaux de rechargement de plage consistaient à : **1)** reconstituer l'évolution morphosédimentaire et hydrodynamique des cinq sites à l'étude, à partir de l'évolution historique et des données récoltées en 2018-2019 ; **2)** évaluer l'efficacité de chacune des recharges de plage à réduire l'érosion côtière.

2. SITES D'ÉTUDE

2.1 SUIVI DE LA RENATURALISATION D'UNE PLAGE COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS

2.1.1 Contextes géographiques et géomorphologiques

2.1.1.1 Secteur du démantèlement

Le site d'étude est localisé dans la Ville de Gaspé, au nord-est de la péninsule gaspésienne. La plage de Cap-des-Rosiers est localisée entre le phare de Cap-des-Rosiers et le quai de la pointe Whalen (figure 1 et figure 2). D'une longueur d'environ 1,9 km, la plage est orientée ESE (112,5° N) et est définie comme une plage à gravier mixte ($D_{50} = 9,5$ mm). La partie nord du site d'étude est constituée d'un cordon littoral bordant des milieux humides et d'une terrasse de plage en friche. La partie sud du site d'étude est bordée par une terrasse de plage composée de friches et de forêts. La plage de la partie sud est caractérisée par la présence d'affleurements rocheux et de nombreux blocs.

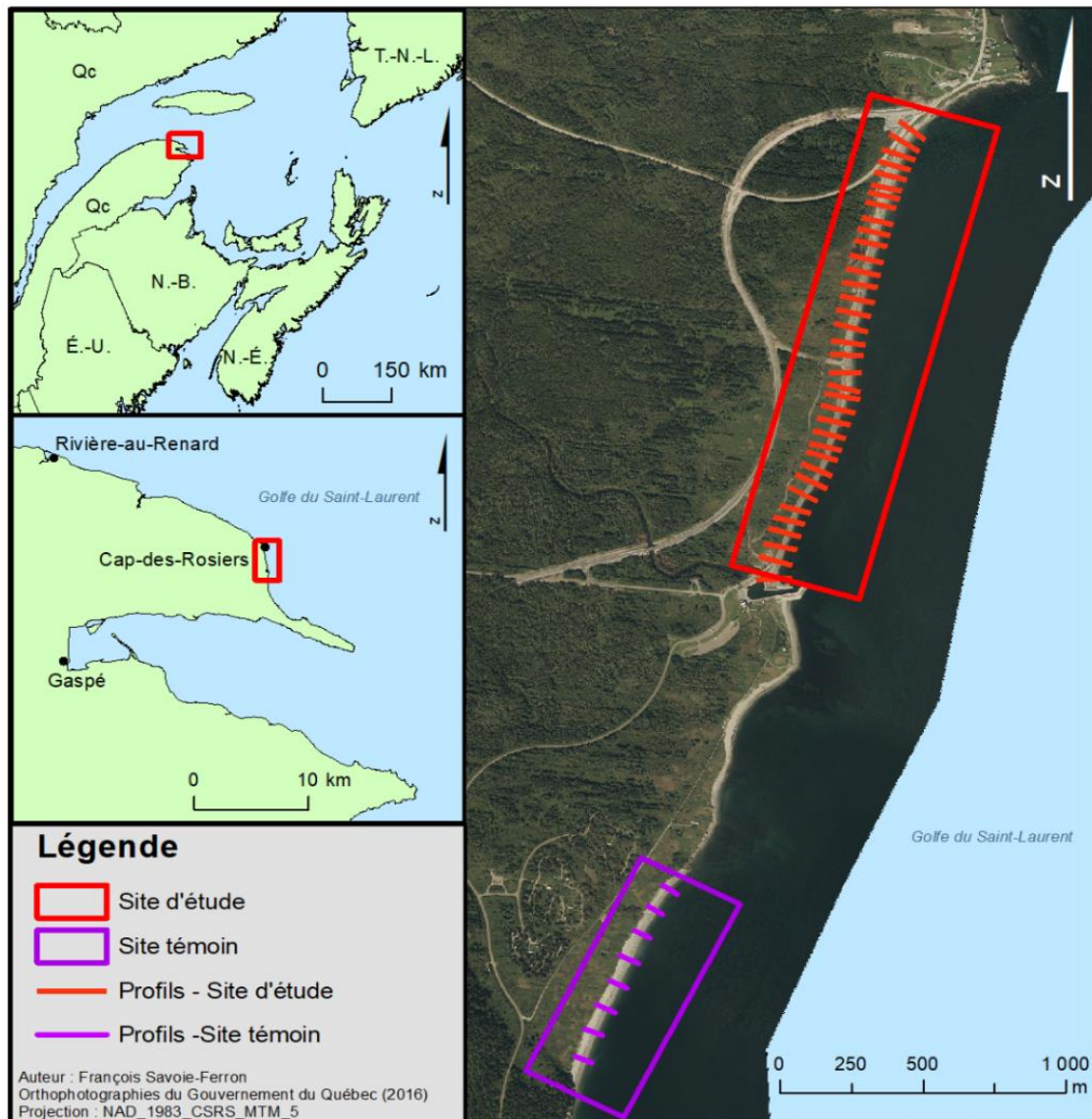


Figure 1. Localisation du site d'étude et du site témoin à Cap-des-Rosiers.

2.1.1.2 Site témoin

La plage du site témoin est située à environ 1,5 km au sud du site d'étude et n'a subi aucune intervention anthropique. Définie comme une plage de gravier mixte ($D_{50} = 16,6$ mm), la granulométrie y est plus grossière que sur le site d'étude. Longue d'environ 900 m, elle est bordée d'une falaise taillée dans des dépôts meubles et possède la même orientation et exposition aux vagues que le site d'étude (figure 1).



Figure 2. Photographies aériennes obliques du site d'étude, partie nord à gauche, partie sud à droite.

2.1.1.3 Historique du démantèlement

À Cap-des-Rosiers, la route publique avait été construite sur une terrasse de plage à la fin des années 1920 pour rejoindre le quai au centre du village. Dans les années 1960, l'élargissement de la route a été accompagné de la construction d'ouvrages de protection côtière, qui ont été étendus à la totalité de la route vers 1980. Ces perturbations ont entraîné une perte de la capacité de la plage à atténuer les vagues, ce qui a favorisé le franchissement de la route lors de tempêtes. La route et ses ouvrages sont fréquemment endommagés, allant ponctuellement jusqu'à l'arrachement par la mer, ce qui entraîne des coûts d'entretien s'élevant à environ 50 000 \$ par année (Parc national du Canada Forillon, 2010). Dans ce contexte, Parcs Canada a décidé, en 2010, de fermer la route du Banc et de relocaliser un segment de la route 132 sur une nouvelle route construite vers l'intérieur des terres. Le Parc national Forillon décida en 2011 de démanteler la route et l'enrochement sur un tronçon de 150 m au nord du secteur d'étude dans un but de restauration écologique. Dans une seconde phase opérée à partir de l'automne 2016, la route et ses ouvrages de protection ont été démantelés en entier, créant l'opportunité d'évaluer la réponse d'un système côtier auparavant fortement anthropisée au démantèlement d'un ouvrage de protection côtière (tableau 1).

Tableau 1. Historique de l’anthropisation du littoral entre le phare et le quai de Cap-des-Rosiers (Source : WSP, 2015).

Date	Interventions
Pré-1900	Mise en place d’un chemin sur le haut de plage
Vers 1927	Construction d’une route publique protégée par des caissons de bois remplis de pierres
1960	Construction d’un mur de bois entre le havre et le phare
Vers 1965	Construction d’un talus d’enrochement au nord de la route
1980	Enrochement définitif
1993	Construction d’un mur de béton
2010-2011	Reconfiguration du tracé de la portion nord de la route et retrait de 150 m d’enrochement
2016	Début des travaux de démantèlement de la route et de ses ouvrages de protection

2.1.2 Contexte météo-océanique

La plage de Cap-des-Rosiers est exposée à des vagues d’est à sud et de nord-nord-ouest (figure 3). Ces deux orientations correspondent respectivement aux vagues générées dans le golfe du Saint-Laurent avec un fetch de 250 à 400 km et dans le détroit d’Hougue au débouché de l’estuaire du Saint-Laurent avec un fetch de 70 à 150 km.

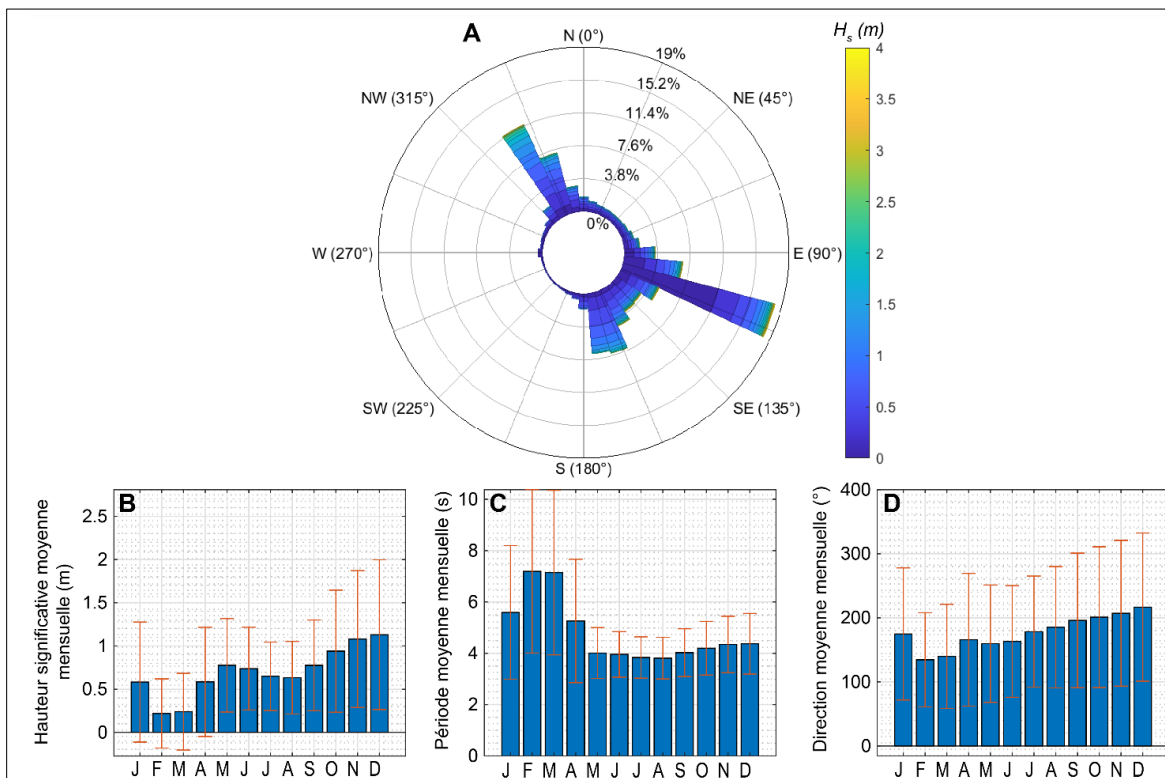


Figure 3. Caractéristiques météo-océaniques du site de Cap-des-Rosiers. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), la période (C) et la direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

La hauteur significative moyenne des vagues varie entre 0,2 m et 1,15 m au cours de l'année. Elle est caractérisée par une nette modulation saisonnière avec des \bar{H}_s moyens plus faibles en hiver, notamment au cours des mois de février et mars, lorsque la couverture de glace est la plus importante et, dans une moindre mesure, en été du fait d'une baisse de l'activité cyclonique durant cette période. Les valeurs les plus fortes sont observées pendant les mois d'octobre, novembre et décembre quand l'activité cyclonique s'intensifie. Les forts écarts-types des \bar{H}_s moyens montrent que les conditions peuvent être extrêmement contrastées d'une année à l'autre. Ce contraste est particulièrement fort au printemps ($1 \leq \sigma \leq 1,2$ m) et en automne ($1,5 \leq \sigma \leq 1,75$ m). La période moyenne des vagues varie entre 3,9 et 7,3 s. Elle est plus grande pendant les mois d'hiver, mais reste modérée du fait la longueur limitée des fetchs, et est également caractérisée par des écarts-types importants qui témoignent d'une grande variabilité interannuelle ($1,8 \leq \sigma \leq 6,3$ s).

La marée à Cap-des-Rosiers est de type mixte semi-diurne d'amplitude mésotidale. Le marnage moyen y est de 1,3 m tandis que les marnages des plus grandes marées de vive-eau et des plus petites marées de morte-eau y sont respectivement de 2,2 m et 0,4 m (station de référence n° 2330 de Rivière-au-Renard).

Le site du démantèlement et le site témoin présentent la même exposition aux agents de forçages météorologiques marins.

2.2 SUIVI ENVIRONNEMENTAL DE TRAVAUX DE RECHARGEMENT DE PLAGE

Le suivi des recharges de plage est actuellement réalisé sur cinq sites répartis sur les côtes de l'estuaire 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 Pointe-aux-Loups aux Îles-de-la-Madeleine (figure 4). Les caractéristiques de chacun des sites sont présentées dans les sections 2.1.1 et 2.2.2.

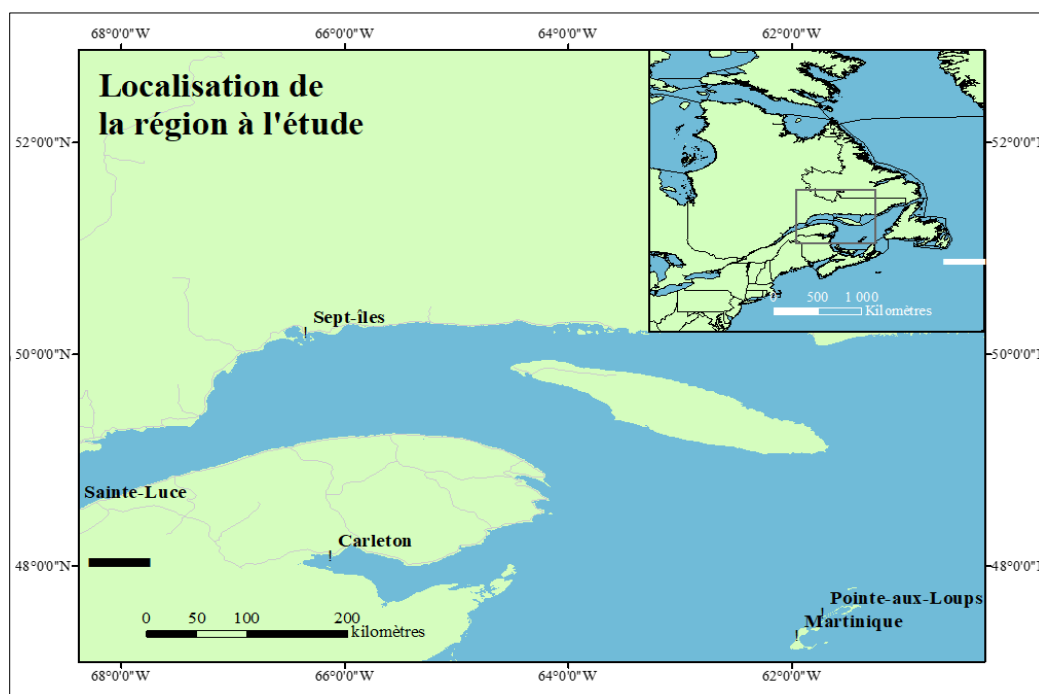


Figure 4. Localisation des sites d'études avec suivi de recharges de plages.

2.2.1 Contextes géographiques et géomorphologiques

2.2.1.1 Plage de l'Anse-aux-Coques

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 plage, ce site a fait l'objet d'une recharge de plage en octobre 2014, financée par le Programme général d'indemnisation et d'aide financière lors de sinistres réels ou imminents du MSP. 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-Wiersts *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 16 214 m³ de matériaux a donc été déversé sur la plage de Sainte-Luce entre 2014 et 2019.



Figure 5. Plage de l'Anse-aux-Coques en 2018 et 2019.

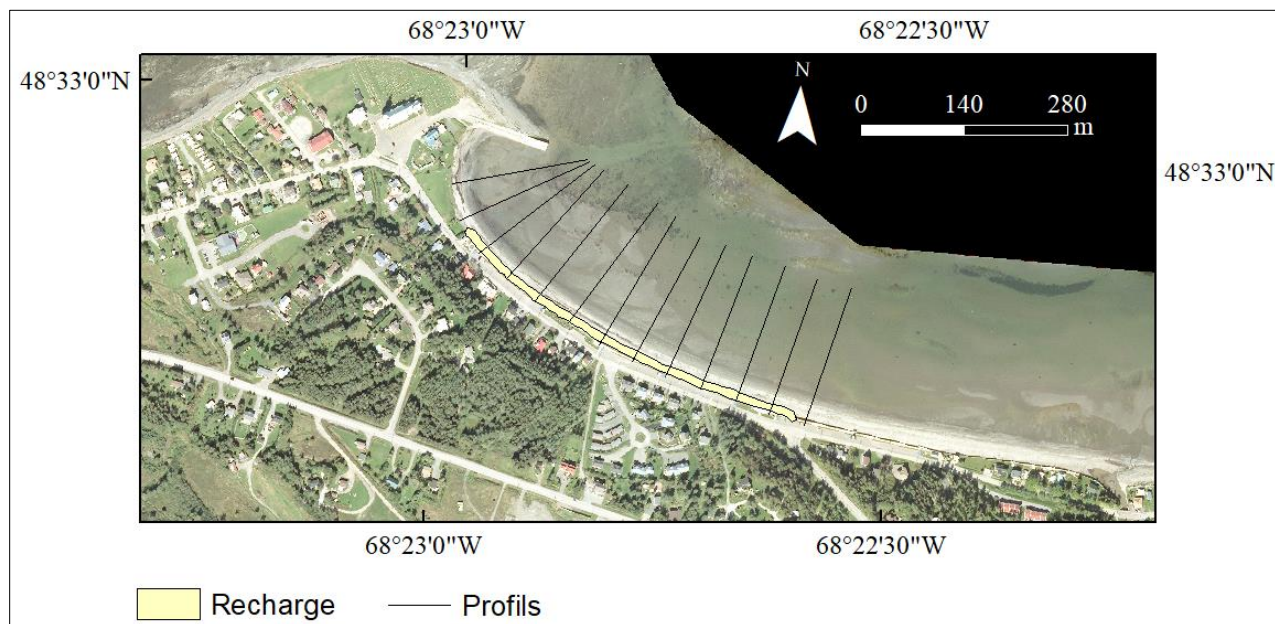


Figure 6. Recharge de la plage de l'Anse-aux-Coques.

2.2.1.2 Banc Larocque

Le banc Larocque est localisé à Carleton-sur-Mer, dans la région Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine (figure 7). 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. 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 7 et figure 8). 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 (Bernatchez et al., 2012).



Figure 7. Banc Larocque en 2018 et 2019

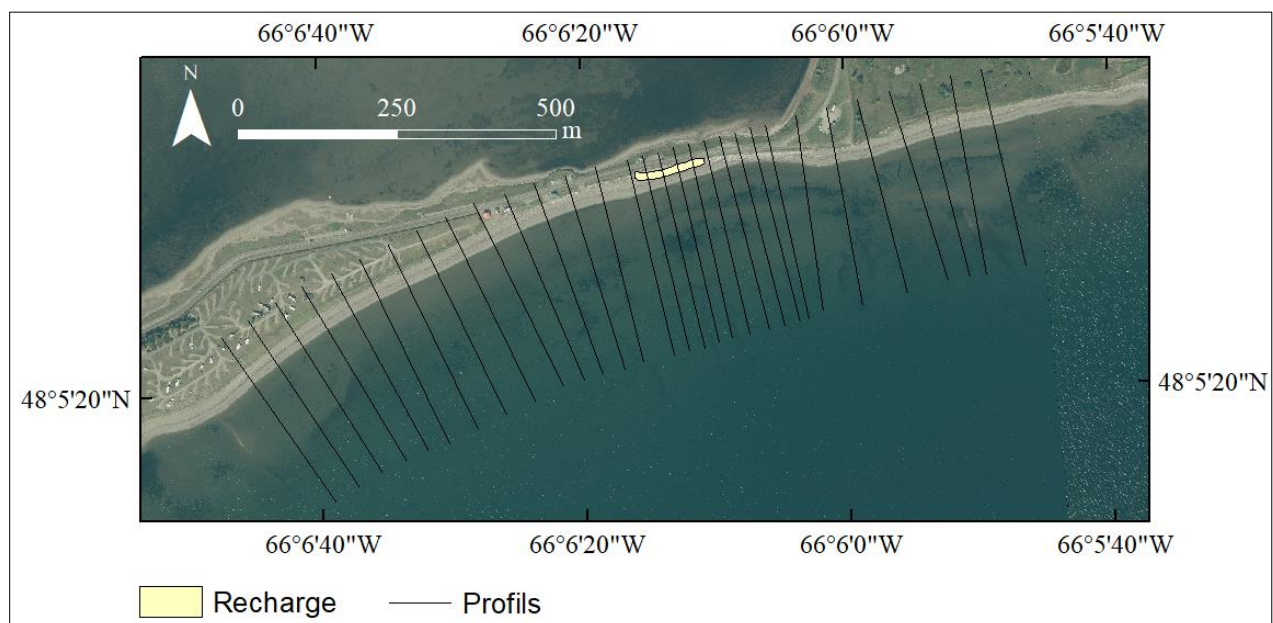


Figure 8. Recharge de plage du banc Larocque.

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 8), 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.

2.2.1.3 Plage Monaghan

La plage Monaghan est localisée dans la municipalité Sept-Îles dans la région de la Côte-Nord (figure 9). Le site à l'étude est fortement exposé aux aléas d'érosion et de submersion côtières (Bernatchez *et al.*, 2008). La côte à terrasse de plage est constituée d'un estran sableux, avec barres sableuses sur le bas estran (figure 9).



Figure 9. Plage Monaghan en 2018 et 2019

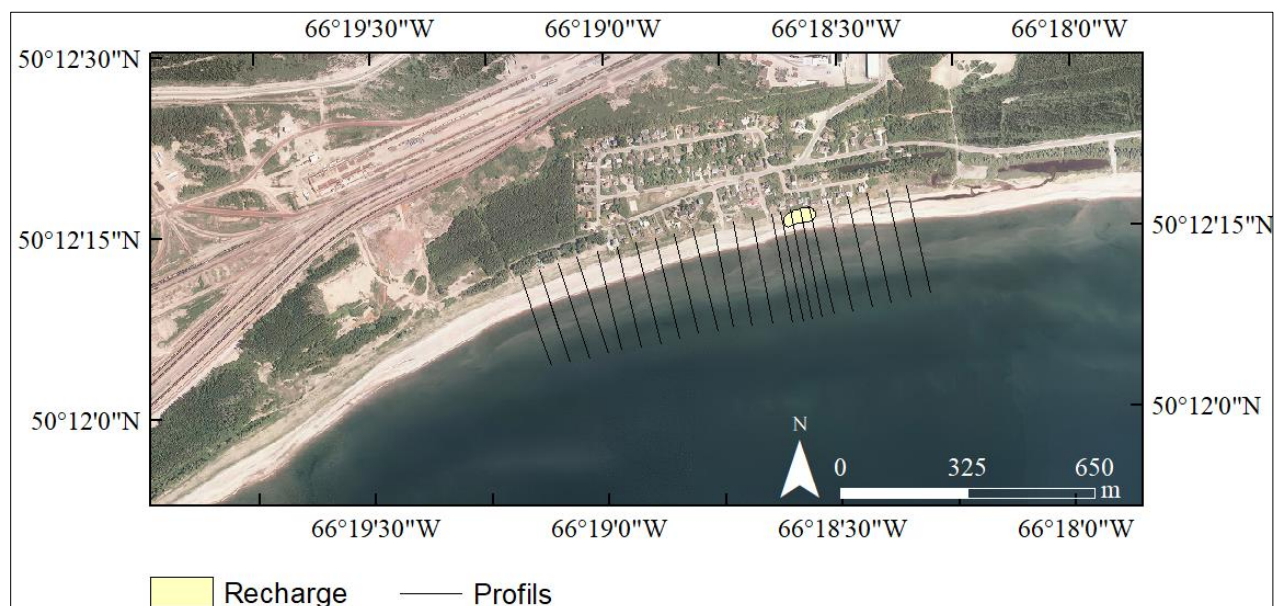


Figure 10. Recharge de la plage Monaghan.

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, une recharge de plage a été mise en place en août 2000 (figure 10). 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). L'objectif de cette recharge était principalement de limiter l'effet des tempêtes sur la côte.

2.2.1.4 Plage de La Martinique

La plage de La Martinique est située au nord de la baie de Plaisance aux Îles-de-la-Madeleine (figure 11). 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 11). Il y a aussi présence de barres sableuses sur le bas estran.



Figure 11. Plage de La Martinique en 2018 et 2019

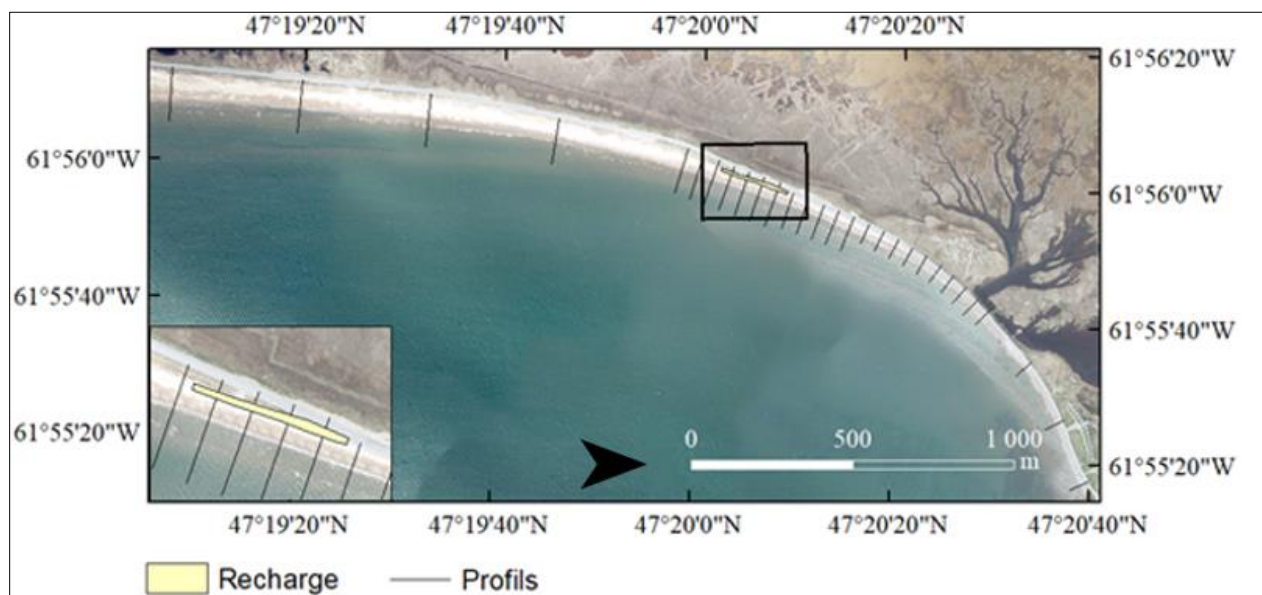


Figure 12. Recharge de la plage de La Martinique.

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 2007, des recharges sont effectuées sur le haut de plage et le haut estran¹ (figure 12). 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 rechargement 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. L'objectif de cette recharge était de réduire l'érosion et de protéger les infrastructures routières.

2.2.1.5 Plage de Pointe-aux-Loups

La recharge de 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 13). Celle-ci se situe aussi sur une côte à tombolo dunifié active avec présence de barres sableuses (figure 13).



Figure 13. Plage de Pointe-aux-Loups (secteur sud) en 2018 et 2019.

Les principaux phénomènes à l'origine du recul du trait de côte sont les fortes tempêtes soufflant de l'ouest et du nord (Bernatchez *et al.*, 2010). 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'épi¹ (WSP, 2015). En 2019, le secteur d'intervention est d'une longueur d'environ 800 m, dont 360 m d'enrochement (figure 14). 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 réduire l'érosion, ainsi que de protéger les infrastructures. De mai à septembre 2019, un enrochement est construit sur le secteur sud de Pointe-aux-Loups, remplaçant la recharge (figure 13), tandis qu'une recharge est implantée sur le secteur nord auparavant sans recharge.

¹ Pour les Îles-de-la-Madeleine, le portrait complet des interventions n'est pas encore disponible. Ces informations seront disponibles au cours de l'année 2020 auprès du MELCC.

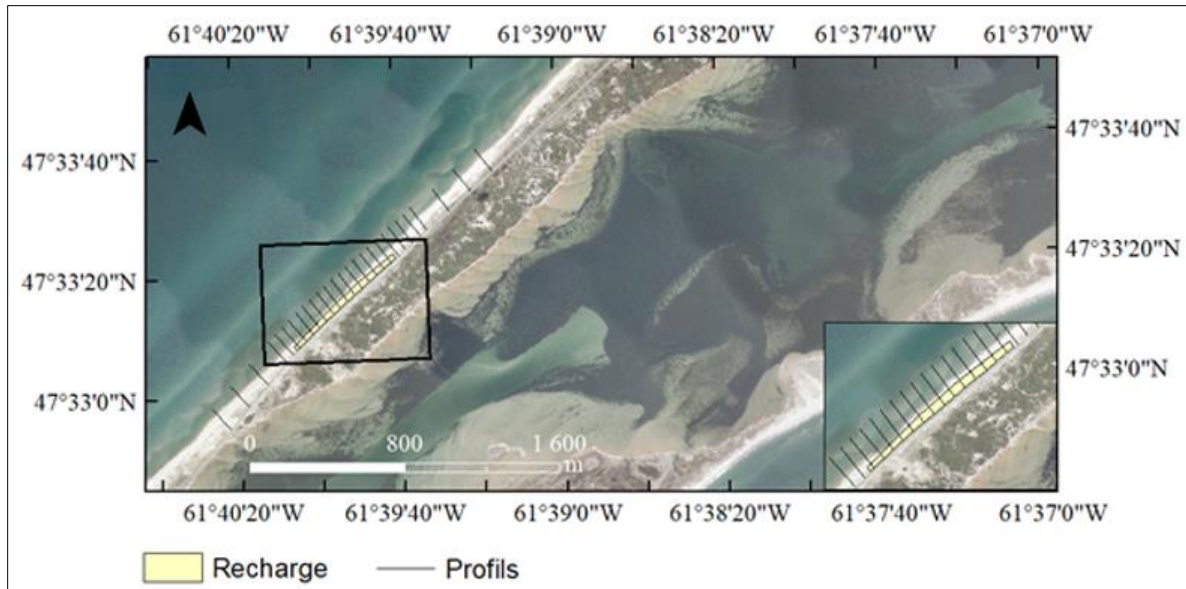


Figure 14. Recharge de la plage de Pointe-aux-Loups.

2.2.2 Contexte météo-océanique

2.2.2.1 Plage de l'Anse-aux-Coques

La plage de l'Anse-aux-Coques est exposée aux vagues du nord-est et d'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 15).

La marée y est de type semi-diurne d'amplitude macrotidale. 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).

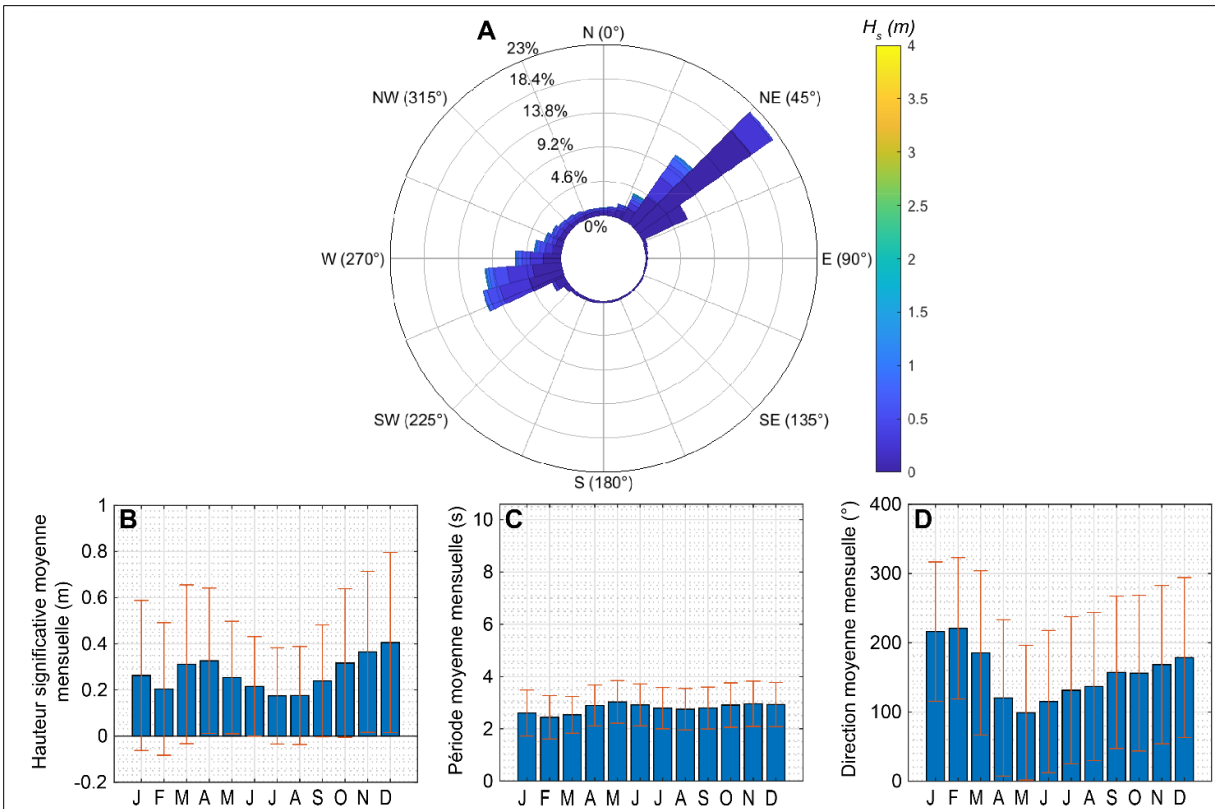


Figure 15. Contexte météo-océanique du secteur de l'Anse-aux-Coques. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

2.2.2.2 Banc Larocque

Le banc Larocque est exposé aux vagues d'est à est-sud-est. Cette particularité tient à sa position en fond de 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 16).

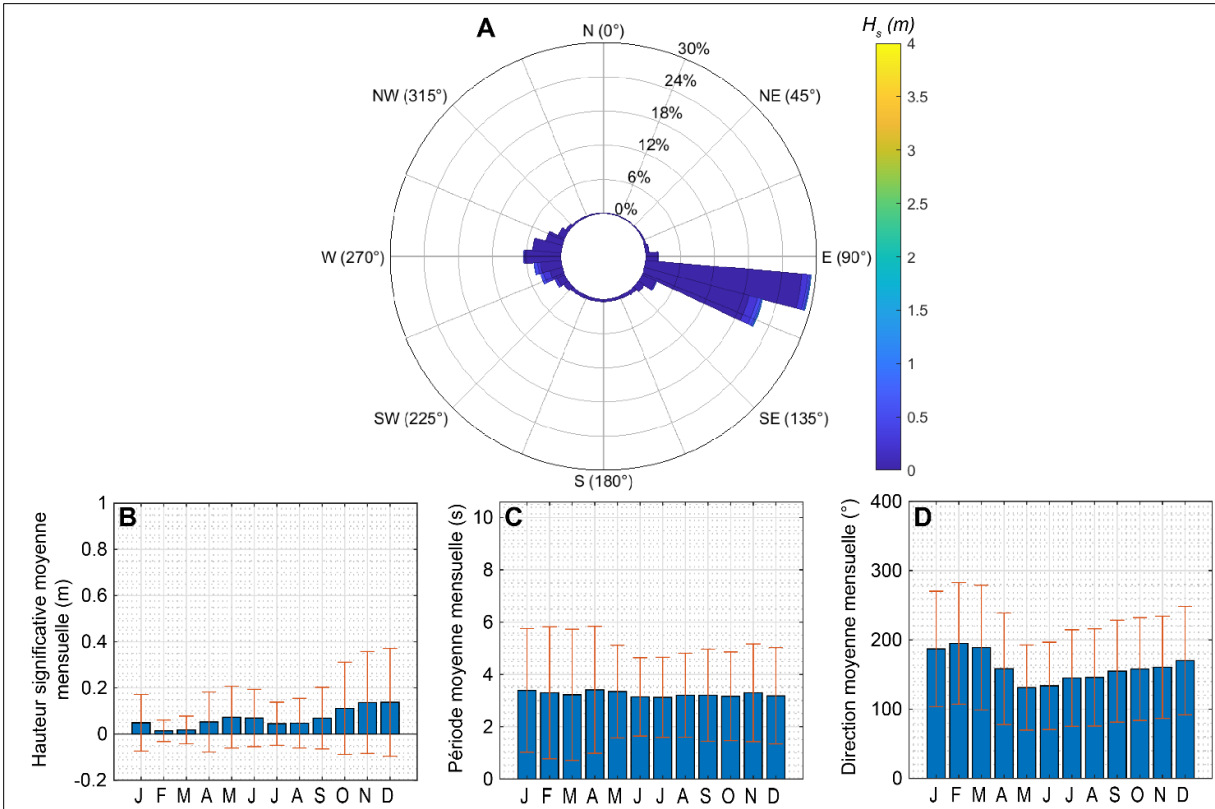


Figure 16. Contexte météo-océanique du secteur du banc Larocque. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

La marée y est de type mixte semi-diurne d'amplitude 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).

2.2.2.3 Plage Monaghan

La plage de Monaghan est exposée aux vagues 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 17).

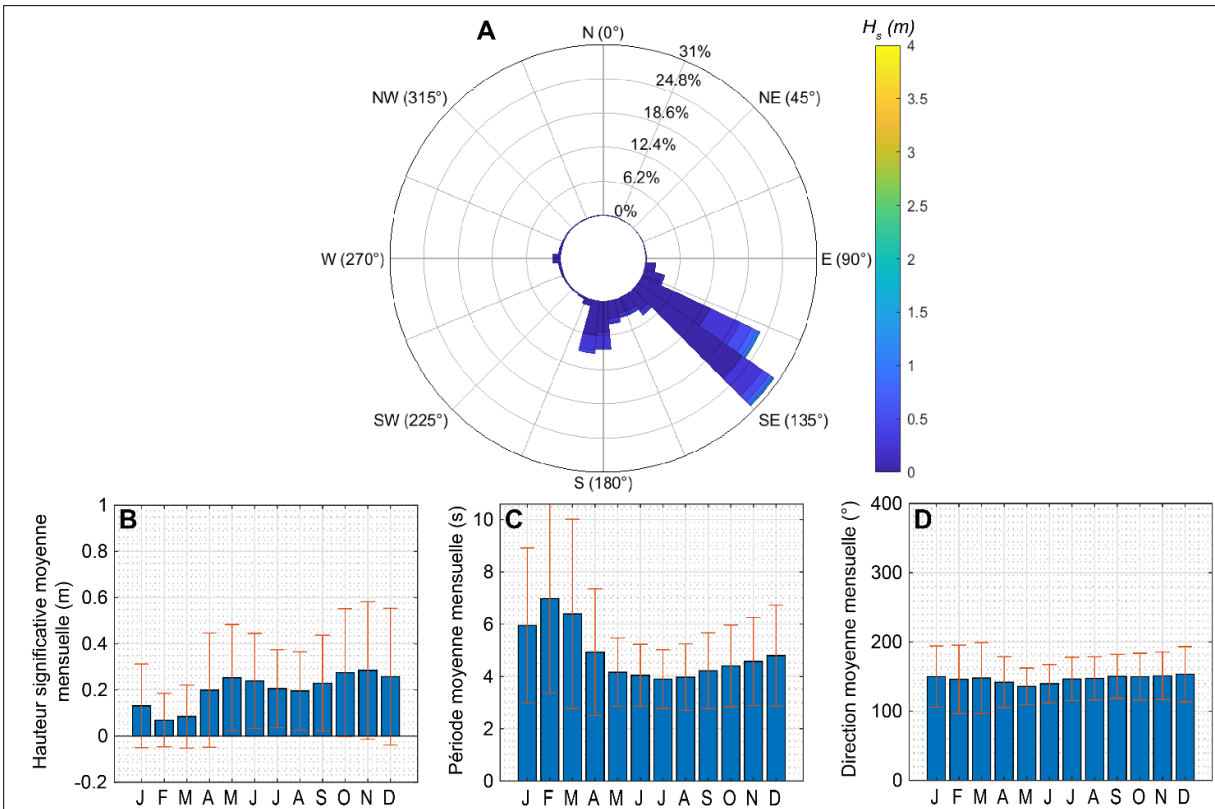


Figure 17. Contexte météo-océanique du secteur de la plage Monaghan. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

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).

2.2.2.4 Plage de La Martinique

La plage de La Martinique fait majoritairement face à des vagues des secteurs 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 18).

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).

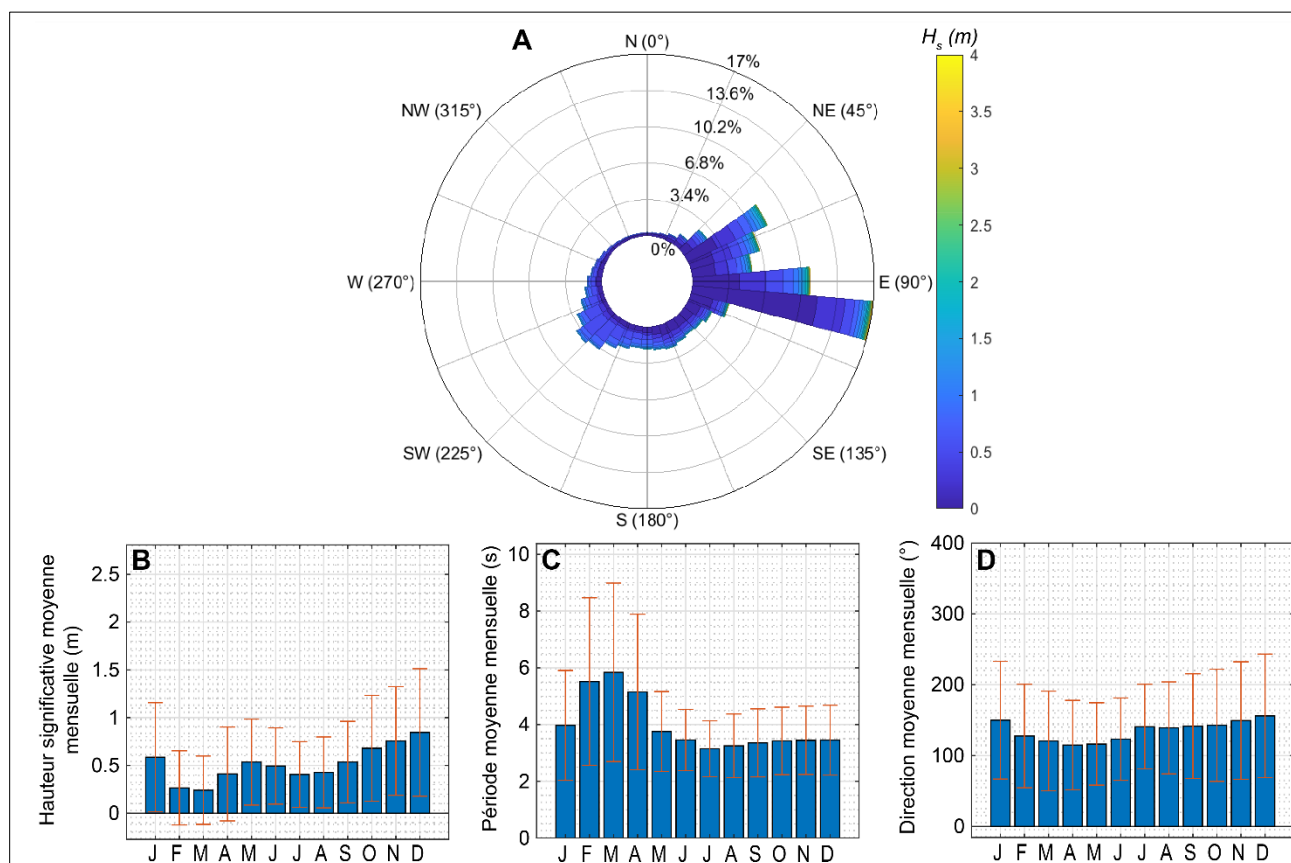


Figure 18. Contexte météo-océanique du secteur de la plage de La Martinique. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

2.2.2.5 Plage de Pointe-aux-Loups

La plage de 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, incluant les 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 toutefois modérée, de l'ordre de 4 à 6 s selon les mois de l'année (figure 19).

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 Pointe-aux-Loups).

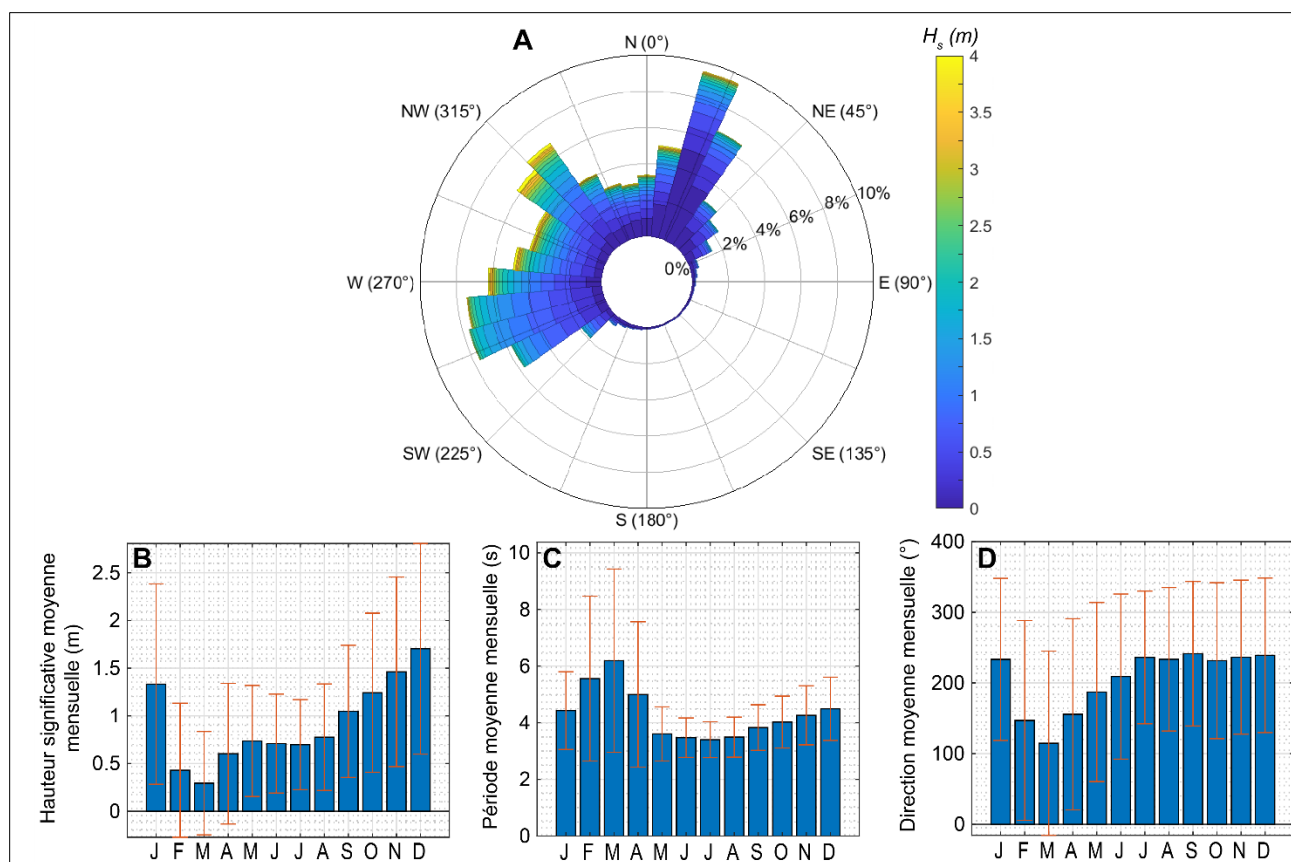


Figure 19. Contexte météo-océanique du secteur de Pointe-aux-Loups. Rose des houles (A) et diagrammes des valeurs mensuelles moyennes de la hauteur significative (B), période (C) et direction des vagues (D) calculées à partir de données modélisées sur la période 1980-2015.

3. MÉTHODOLOGIE

Le suivi environnemental des travaux de rechargement de plage et de la renaturalisation d'une plage vise à interpréter la réponse des environnements côtiers à ces types 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 côtières des sites d'études avant la mise en place du suivi morphodynamique et hydrodynamique. Dans un second temps, un protocole de suivi des morphodynamiques actuelles a été mis en place. Il repose sur l'acquisition quasi continue de paramètres environnementaux *in situ* (états de mers au large et à la côte, conditions atmosphériques) et la collecte de données sédimentologiques et topomorphologiques ponctuelles (granulométrie, profils de plages, modèles numériques de terrains). Cette partie présente les matériels et méthodes que nous avons utilisés dans le cadre de ce travail.

3.1 ANALYSE HISTORIQUE DE LA DYNAMIQUE DU TRAIT DE CÔTE ET DE L'ÉVOLUTION DE LA LARGEUR DE PLAGE

L'analyse historique de la dynamique du trait de côte 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.

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 ou le trait de côte peuvent être définis comme l'interface physique entre le domaine terrestre et le domaine marin (Dolan *et al.*, 1980). Toutefois, leur 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).

Au LDGIZC, la ligne de rivage et le trait de côte sont deux termes distincts qui dépendent de l'indicateur choisi pour l'évolution côtière. Chaque segment de côte possède normalement 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 *et al.*, 2012). 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 *et al.*, 2012). 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 du rapport, le terme « ligne de rivage » sera utilisé tout au long du rapport pour faire référence à la ligne de rivage et au trait de côte selon l'utilisation courante du LDGIZC. Le terme trait de côte utilisé dans le rapport correspond à une ligne parallèle au rivage et sera défini préalablement.

Sur le secteur de Cap-des-Rosiers, l'analyse de l'évolution de la largeur de plage a été réalisée avec l'outil DSAS (Digital Shoreline Analysis System) fonctionnant sous le logiciel ArcGIS 10.6 d'ESRI (Himmelstoss *et*

al., 2018). La ligne de rivage et le pied de plage ont été numérisés à partir des photos aériennes (figure 20). Une ligne de référence correspondant à l'orientation moyenne de la ligne de rivage pour l'ensemble des années a été générée à l'aide de l'outil DSAS. Des transects perpendiculaires à la ligne de référence ont ensuite été générés à intervalles de 50 m. Sur chacun de ces transects et pour chaque période, la largeur de la plage, soit la distance entre la ligne de rivage et le pied de plage a été calculée (figure 21).

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

Année	Date	Résolution spatiale	Type	Site(s)
1963	1963-09-03	63 cm	Noir et blanc	Cap-des-Rosiers
1981	1981-08-18	13 cm	Couleur	Cap-des-Rosiers
1986	1986-07-28	63 cm	Infrarouge	Cap-des-Rosiers
1993	1993-07-26	63 cm	Infrarouge	Cap-des-Rosiers
2004	2004-07-26	63 cm	Noir et blanc	Cap-des-Rosiers
2009	2009-09-17	20 cm	Couleur	Cap-des-Rosiers
2016	2016-09-16	30 cm	Couleur	Cap-des-Rosiers
2019	2019-09-28	5 cm	Couleur	Cap-des-Rosiers

1963	1963-07-23	21 cm	Noir et blanc	Anse-aux-Coques
1976	1976-08-03	60 cm	Noir et blanc	Anse-aux-Coques
1993	1993-08-07	25 cm	Infrarouge	Anse-aux-Coques
2009	2009-09-17	21 cm	Couleur	Anse-aux-Coques
2012	2012-05-28	20 cm	Couleur	Anse-aux-Coques
2015	na	30 cm	Couleur	Anse-aux-Coques

1963	1963-07-23	21 cm	Noir et blanc	Banc Larocque
1974	1974-08-12	77 cm	Noir et blanc	Banc Larocque
2004	2004-07-26	70 cm	Noir et blanc	Banc Larocque
2007	na	1 m	Lidar	Banc Larocque
2018	2018-09-16	30 cm	Couleur	Banc Larocque

1965	na	76 cm	Noir et blanc	Plage Monaghan
1979	1979-07-06	83 cm	Noir et blanc	Plage Monaghan
1996	1996-10-11	63 cm	Noir et blanc	Plage Monaghan
2001	2001-09-07	1,69 m	Noir et blanc	Plage Monaghan
2009	na	20 cm	Couleur	Plage Monaghan
2017	2017-07-22	30 cm	Couleur	Plage Monaghan

1963	1963-08-20	67 cm	Noir et blanc	Îles-de-la-Madeleine
1983	1983-06-30	42 cm	Noir et blanc	Îles-de-la-Madeleine
2008	na	14 - 28 cm	Lidar	Îles-de-la-Madeleine
2015	2015-06-08	20 cm	Couleur	Îles-de-la-Madeleine
2019	2019-05-13	20 cm	Couleur	Îles-de-la-Madeleine

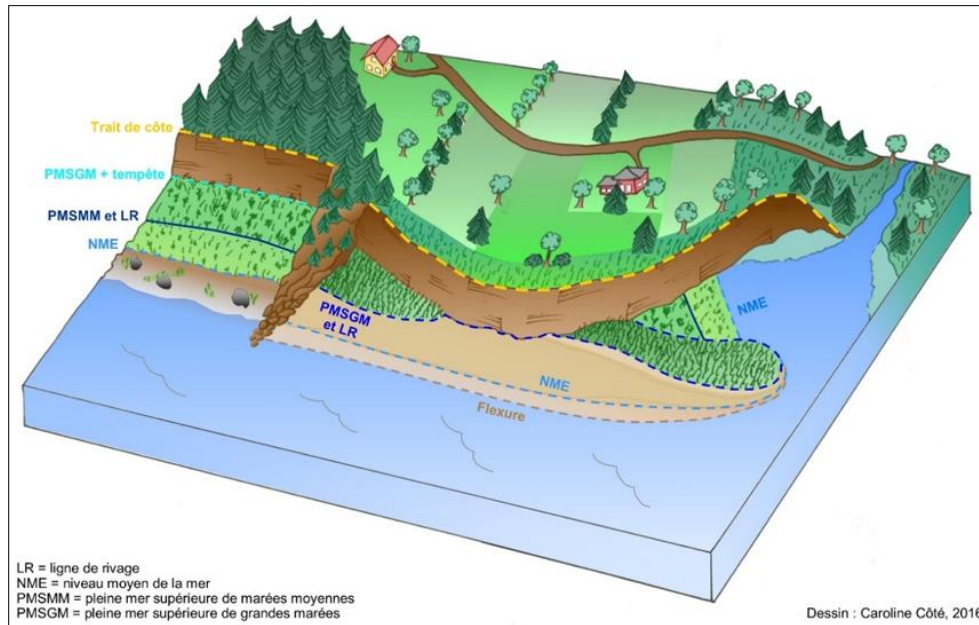


Figure 20. Traits utilisés pour l'évolution historique du littoral selon les types de côtes. Pour le site de Cap-des-Rosiers, le pied de plage a été utilisé au lieu de la flexure.

Sur les sites de l'Anse-aux-Coques, du banc Laroque, de Monaghan, de La Martinique et de Pointe-aux-Loups, 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 22) pour l'ensemble de la cellule hydrosédimentaire de chaque site. Le reste de la procédure est semblable à la description présentée dans le paragraphe précédent, à l'exception du calcul des largeurs de plages qui n'a pas été effectué.

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. Ces taux d'évolution sont exprimés en m/an. Les taux calculés sur des secteurs comportant de l'artificialité n'ont pas été pris en compte.

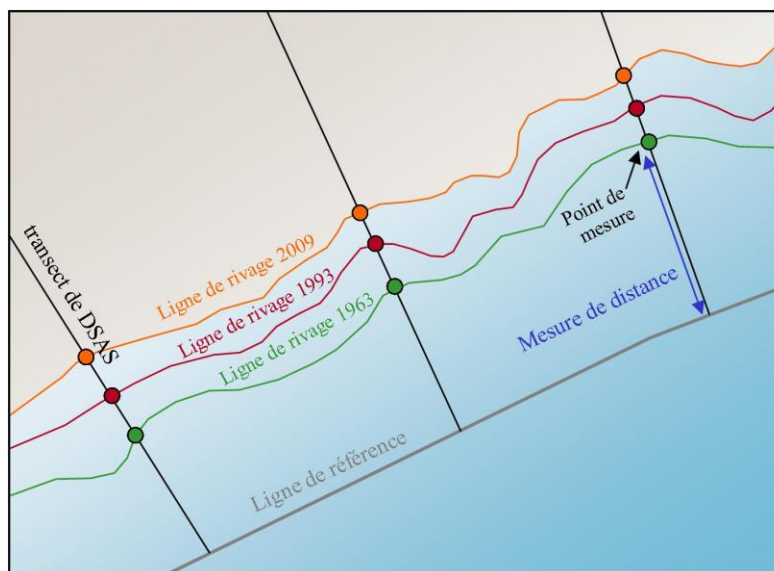


Figure 21. Schéma de la méthode du DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*). D'après Thieler et al. (2005).



Figure 22. Exemple de la méthode MobITC.

3.2 SUIVI DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

3.2.1 Suivi des conditions hydrodynamiques à moyen terme (1980-2017)

Le suivi des états de mers à moyen terme repose sur les données de vagues produites dans le cadre du programme de mesure et de modélisation de la morphodynamique de l'érosion et de la submersion côtières dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (MODESCO phases I, II et III) (Bernatchez et al., 2017, 2019). Trente-sept ans de simulations de vagues (1980-2017) pour le Saint-Laurent ont été effectués à une résolution de 5 km à partir du modèle de vague Wavewatch III sur la grappe de calcul haute performance « Mingan » de l'UQAR. Ces données régionales ont permis d'analyser la variabilité temporelle des climats de vagues pour chaque site d'étude (figure 23).

Les séries de données pour la période 1980-2017 ont été extraites sur des nœuds localisés à proximité immédiate des sites, à des profondeurs de 20 à 40 m. Les points d'extractions sont localisés sur la figure 23, dont les cartes donnent également un aperçu de l'exposition des sites d'étude aux vagues par rapport à l'exposition générale des côtes de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent.

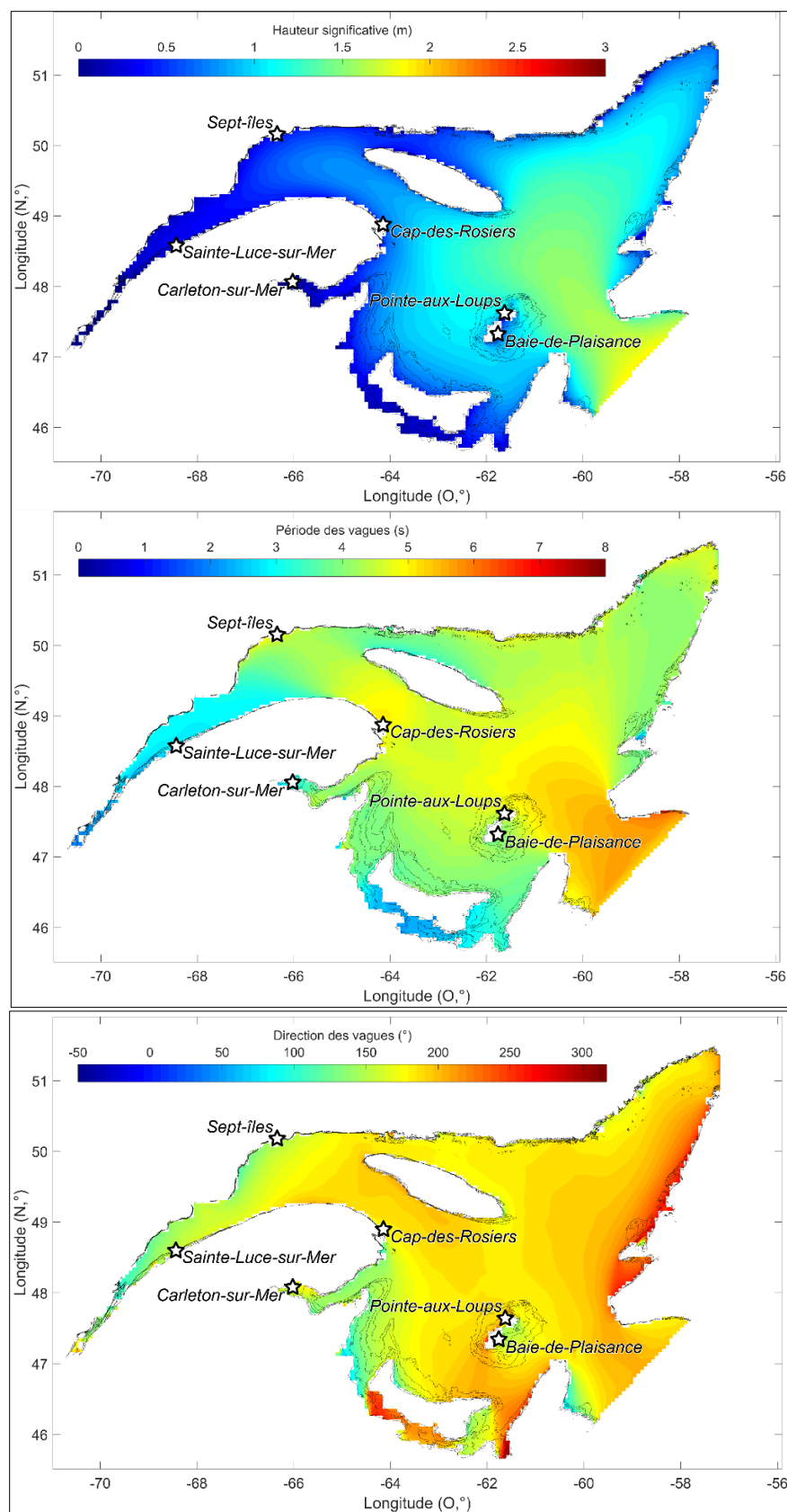


Figure 23. Valeurs moyennes de la hauteur significative, période et direction des vagues calculées à partir du modèle WW3 implémenté dans le cadre du projet MODESCO.

3.2.2 Suivi des conditions hydrodynamiques à court terme (2016-2019)

Le suivi des états de mers à court terme est basé sur les données mesurées à partir de capteurs de pression de type RBR installés sur les estrans des sites et des profileurs de courants à effet doppler acoustique (ADCP) de type AWAC installés au large des sites (figure 24).

L'AWAC est un profileur de courant muni d'un capteur de houle directionnel. Cet appareil permet de mesurer les différents types de houles ainsi que la vitesse et la direction du courant sur l'ensemble de la colonne d'eau, de 1 m à partir du fond jusqu'à la surface. Les AWAC utilisés dans cette étude sont des modèles à 1 MHz de la marque Nortek. Ils peuvent fonctionner en autonomie complète, en étant connectés à un réseau filaire côtier ou encore sans fil par les ondes cellulaires. Ce modèle d'AWAC est muni de la fonction AST (*Acoustic Surface Tracking*). L'AST mesure la surface grâce à l'écho du faisceau central de l'appareil. Cette fonction permet à l'appareil d'effectuer une mesure précise de tous les types de houle. Lors des déploiements hivernaux, ces appareils sont capables de détecter l'interface entre la glace et l'eau et de mesurer les différentes épaisseurs de glace. Les appareils sont généralement déployés en mode autonome et sont alimentés à l'aide de quatre batteries alcalines de 13,5 V d'une capacité de 540 Wh chacune. Ces quatre batteries confèrent une autonomie d'environ 6 mois à l'appareil, cependant cette période peut varier selon la programmation attribuée lors du déploiement. Cet instrument peut mesurer les courants à une profondeur maximale de 30 m avec des cellules de mesure qui peuvent aller de 0,25 m à 4 m. Les mesures de vagues peuvent être réalisées à partir du fond jusqu'à un maximum de 35 m de profondeur avec un taux d'échantillonnage de 2 Hz. En ce qui concerne la mesure des vagues, l'AWAC possède une précision de l'ordre de 1 cm.

Les capteurs de pression utilisés dans cette étude sont les modèles Dfast6 et Dwave de la compagnie RBR. Ils peuvent fonctionner selon trois types de régimes d'échantillonnage : en mode continu, en mode moyenne ou en mode rafale. L'enregistrement des mesures peut se faire de manière périodique ou continue selon la fréquence choisie (généralement entre 1 Hz et 6 Hz). Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué les mesures à une fréquence de 4 Hz pour optimiser l'autonomie des batteries tout en permettant l'échantillonnage des vagues dont la période est supérieure ou égale à une seconde (1 s). Sur les estrans rocheux, les capteurs sont installés sur une plaque en acier inoxydable 316 fixée sur des tiges filetées ancrées dans le substrat à l'aide d'ancrage mécanique (figure 24). Sur les estrans meubles, les capteurs sont fixés sur des supports à pas de vis en acier inoxydable 316 vissés dans le substrat. Ils peuvent également être installés sur un support lesté dans la zone infralittorale.

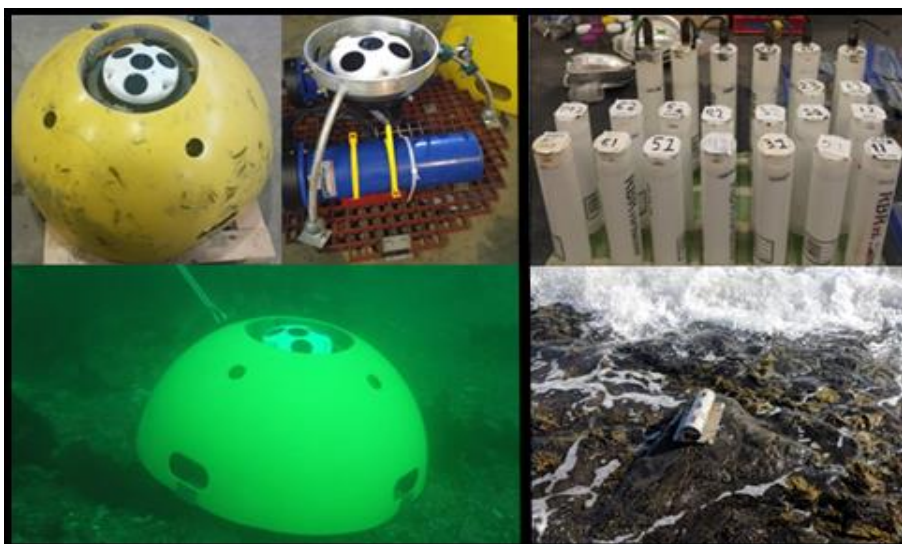


Figure 24. Images d'un AWAC à gauche et de RBR à droite.

3.3 ANALYSE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

3.3.1 Caractérisation des conditions hydrodynamiques

La caractérisation du climat de vague au large durant la période entre 1980 et 2017 a été réalisée à partir des données de vagues modélisées (WW3). Les données d'AWAC de Cap-des-Rosiers, de La Martinique et de Pointe-aux-Loups mesurées de fin 2017 à fin 2019 ont quant à elles été utilisées pour représenter les états de mer pendant la période du suivi à haute résolution (profils de plage et topographie de surface à haute résolution).

L'analyse du flux d'énergie au large a été effectuée pour étudier le régime énergétique des sites à l'étude. Il permet de quantifier la décharge énergétique induite par le déferlement des vagues à la côte à partir de la hauteur et de la période des vagues mesurées au large. Le flux d'énergie a été calculé tel que :

$$F = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T \quad (\text{Équation 1})$$

où F est exprimé en $(kW/(m^3 \cdot s))$, $\rho = 1.025 \text{ kg}/m^3$ et représente la densité de l'eau de mer, g représente l'accélération gravitationnelle (9,81 m/s), H_s correspond à la hauteur significative de vague et T représente la période de vague.

À Cap-des-Rosiers, la comparaison des conditions de vagues a été effectuée entre le site d'étude et le site témoin. Pour ce faire, les données de deux RBR situés à 5 m de profondeur dans la zone infralittorale de chaque site ont été utilisées (annexe 4). La hauteur significative des vagues a été comparée du 22 juin au 18 novembre 2019.

3.3.2 Niveaux d'eau totaux

À Cap-des-Rosiers, les niveaux d'eau totaux (NET) ont été calculés entre avril 2016 et décembre 2019. Le NET correspond au niveau maximum atteint par la mer à la côte. Il constitue la somme de la marée astronomique, des composantes non astronomiques de la marée, du setup et du jet de rive (figure 25). Les composantes non astronomiques de marée comprennent, entre autres, les variations verticales induites par les effets du baromètre inverse.

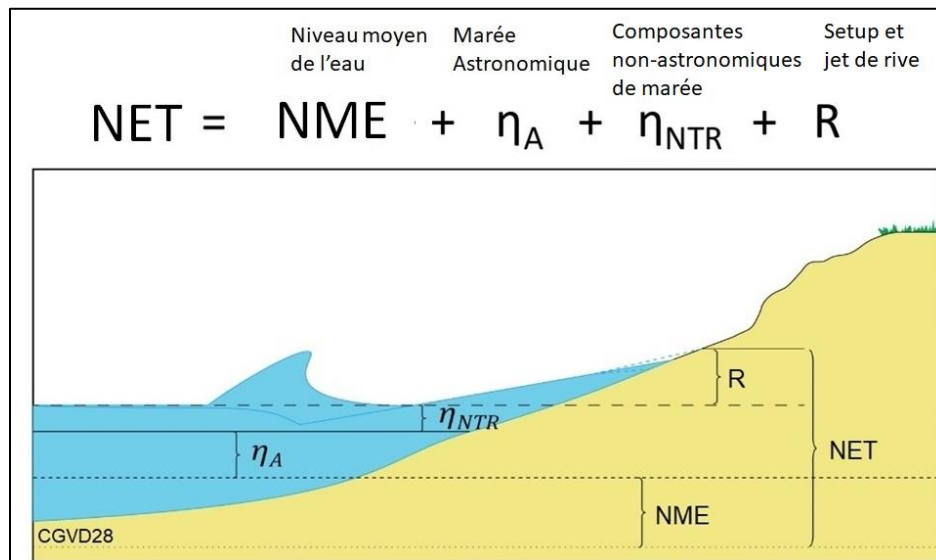


Figure 25. Présentation des composantes formant le niveau d'eau total (modifié de Serafin & Ruggiero, 2014).

Le niveau marin moyen, la marée astronomique et les composantes non astronomiques des changements d'élévation du plan d'eau ont été calculés à partir des capteurs RBR et des données de la station marégraphique de Rivière-au-Renard, située à 21 km au NO du site d'étude. Le jet de rive et le setup sont calculés à partir des équations 2 et 3. Ces formules empiriques ont été spécifiquement développées pour les environnements côtiers du Québec maritime (Didier *et al.*, 2020). La paramétrisation de ces équations a été effectuée à partir des données de jet de rive obtenues entre autres à l'aide de la caméra AXIS installée sur le site de Cap-des-Rosiers (Didier *et al.*, 2017).

L'élévation du setup ($\langle \eta \rangle$) a été calculée tel que :

$$\langle \eta \rangle = 0.0055 \frac{(H_0 L_0)^{0.5}}{\beta} \quad (\text{Équation 2})$$

où l'élévation du setup ($\langle \eta \rangle$) est exprimée en mètre par rapport au datum CGVD28. H_0 correspond à la hauteur significative des vagues au large, L_0 correspond à la période significative des vagues au large et β représente la pente de l'estran.

Le jet de rive ($R_{2\%}$) comprend le setup et représente l'élévation maximale atteinte par 2 % des jets de rive sur une période d'échantillonnage donnée. Il a été calculé tel que

$$R_{2\%} = 1.06(0.0055 \frac{(H_0 L_0)^{0.5}}{\beta} + \frac{0.32(H_0 L_0 \beta)^{0.5}}{2}) \quad (\text{Équation 3})$$

où l'élévation du jet de rive ($R_{2\%}$) est exprimée en mètre par rapport au datum CGVD28. H_0 correspond à la hauteur significative des vagues au large, L_0 correspond à la période significative des vagues au large et β représente la pente de l'estran.

3.4 SUIVI TOPOMORPHOLOGIQUE

Le suivi topomorphologique des six sites a été réalisé entre juin 2018 et novembre 2019. Sur plusieurs sites, des données préexistantes collectées dans le cadre de projets antérieurs menés par le LDGIZC ont été utilisées pour étendre l'analyse des dynamiques morphosédimentaires. Au total, 16 levés lidar, 21 levés photogrammétriques et 72 levés de profils de plages ont permis de quantifier les bilans sédimentaires et la variabilité morphologique de l'ensemble des sites suivis à une échelle saisonnière pluriannuelle.

3.4.1 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. 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 points géoréférencés 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 à intervalles de 50 cm le long de profils d'orientation radiale à la ligne de rivage. Ces profils recoupent perpendiculairement 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), le type de substrat (sédiments grossiers, moyens ou fins) et les paramètres morphologiques (position du pied de la terrasse de plage, de la falaise ou de l'ouvrage de défense, 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 d'inventaire sur les mêmes profils.

Pour l'ensemble des sites d'études, 72 levés ont été réalisés entre le 19 avril 2011 et le 31 décembre 2019. Les informations relatives aux relevés des profils de plages sont détaillées dans l'annexe 2-1.

3.4.2 Topographie par Lidar

Des données topographiques des plages ont été acquises avec le système mobile de Lidar terrestre (SMLT) du LDGIZC. Cet appareil, 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, est installé sur un véhicule tout terrain de type côte à côte. Il permet l'acquisition rapide et précise de nuages de points topographiques à très haute définition.

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. Le capteur est positionné avec un angle de tangage de 17,58°, un angle de lacet de 157,28° et un angle de roulis quasi nul de -0,31° afin de maximiser la plage de balayage qui est de 360°. La hauteur d'acquisition correspond à la hauteur approximative du balayeur par rapport au sol, soit environ 2 m. 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. Elle est installée à un angle de 90,8° en lacet et de -2,8° en roulis du côté arrière droit du véhicule. Sa vitesse est programmée pour acquérir une trame à tous les 3 m. 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 fabricant Applanix. Ce système est composé du récepteur GPS, de deux antennes GPS Trimble Zephyr model 2, d'une centrale inertielle (IMU) et d'un instrument de mesure de distance (DMI). Les données GPS brutes sont enregistrées par l'appareil et sont corrigées par post-traitement à partir de données enregistrées par un récepteur de base statique positionné sur un point géodésique connu.

En plus de ce dispositif de positionnement à haute précision, des points de contrôle ont été installés lors des levés Lidar 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. Préalablement à cette étape de validation, les données brutes ont été post-traitées à partir du logiciel LP360. Plusieurs algorithmes de classification semi-automatisée ont été utilisés pour filtrer le bruit induit par la végétation, les infrastructures anthropiques et les mauvaises conditions atmosphériques (ex. les bancs, les lampadaires, les cabanes saisonnières, etc. Les infrastructures de type murets et enrochements ont été conservées). La qualité de ces tâches a été évaluée par un opérateur qui s'est également chargé de finaliser le post-traitement en supprimant manuellement le bruit résiduel. Suite à cette étape, les modèles numériques de terrain (MNT) d'une définition de 5 cm ont été exportés.

Les informations relatives aux dates, heures et hauteurs d'eau durant les relevés topographiques réalisés avec le SMLT sont détaillées dans l'annexe 2-2.

3.4.3 Topographie par photogrammétrie SfM

La topographie par photogrammétrie SfM repose sur l'utilisation d'images aériennes de basse altitude pour la reconstruction de nuages de points topographiques à très haute résolution. Le terme SfM vient de *Structure from Motion*, qui est une technique dérivée de la photogrammétrie classique visant à simplifier et à standardiser la reconstitution de surfaces 3D à partir d'images 2D. Elle propose une plus grande automatisation dans les phases de calcul des paramètres externes de la caméra et de détection des points homologues sur chaque photographie (algorithmes SIFT). Elle permet également de reconnaître des caractéristiques conjuguées dans une même image et/ou dans plusieurs images aux échelles et aux points de vue sensiblement différents. Ce procédé est par exemple très utile dans le cadre de photographies aériennes acquises par un cerf-volant ou un ballon d'hélium.

Les images aériennes de basse altitude traitées par SfM ont indifféremment été collectées à l'aide de cerfs-volants, de ballons d'hélium (caméra Ricoh GR2) ou de drones (caméras des drones DJI Mavic 2 Pro et Phantom 4 RTK). Quel que soit l'outil utilisé, le protocole d'acquisition des images a reposé sur les deux étapes suivantes.

- La mise en place d'un réseau de points de contrôle (figure 26-3). Appelés GCPs (*Ground Control Points*), ils ont été disposés au sol de manière homogène sur l'ensemble de la superficie des sites d'étude. Selon la taille des sites, l'utilisation de 10 à 25 GCPs a été nécessaire. Les positions X, Y et Z des GCPs ont été mesurées avec des GPS-différentiels (selon la même méthode que celle présentée dans la section 3.3.1, la durée et le nombre d'enregistrements ont simplement été augmentés). Une fois leurs positions mesurées, les GCPs ont été laissés en place durant toute la durée des survols.
- La collecte des images lors des survols des sites (figure 26-2). Les images ont été collectées de manière à obtenir un fort recouvrement latéral (> 70 %) et frontal (> 80 %) entre elles. Ce résultat a été obtenu 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 grâce à la paramétrisation des survols dans les cas où les images ont été collectées à l'aide de drones. Pour chaque survol, les appareils de prise de vue ont été réglés en mode priorité à la vitesse d'obturation avec la sélection d'une valeur adaptée aux conditions météorologiques (dépendante de la luminosité, mais aussi du vent pour les levés cerfs-volants et ballons d'hélium). Ce mode permet d'éviter le flou induit par les mouvements de la caméra tout en laissant à l'appareil une gestion autonome des autres paramètres.

Le traitement des images par photogrammétrie SfM (figure 27) a ensuite été réalisé en laboratoire à l'aide d'un supercalculateur (double processeur Intel® Xeon® Gold 6128 6 CPU, 3,7 GHz, totalisant 24 threads, 128 Go de mémoire vive, 3 cartes graphiques Quadro P5000 à 16 Go de mémoire vive dédiée aux tâches de calcul) 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 pour ne pas nuire à 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 seillant le 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 clairssemés tout en améliorant l'alignement des caméras et la géométrie des nuages de points clairssemés. Ces derniers ont ensuite été densifiés pour obtenir une définition de ± 1000 points/m². De la même manière que pour les nuages de points Lidar, la végétation et les bâtiments ont été filtrés pour ne garder que la topographie de surface. Selon la superficie des secteurs à l'étude, 15 à 20 h ont été nécessaires au traitement de chaque survol, à l'issue duquel un MNS d'une définition de 5 cm et une orthophotographie d'une définition de $\pm 1,5$ cm ont été exportés.

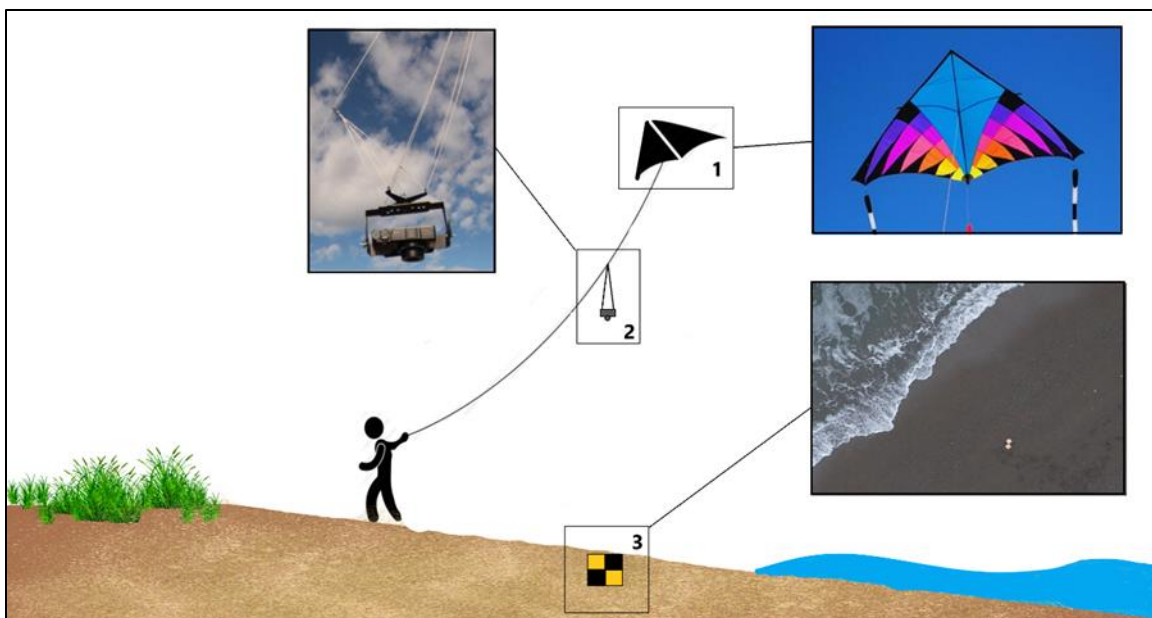


Figure 26. Représentation d'un levé photogrammétrique à l'aide d'un cerf-volant (1), d'une caméra (2) et de cibles géoréférencées(3). Lors d'un relevé effectué à l'aide d'un drone, la caméra est intégrée à l'engin aéroporté.

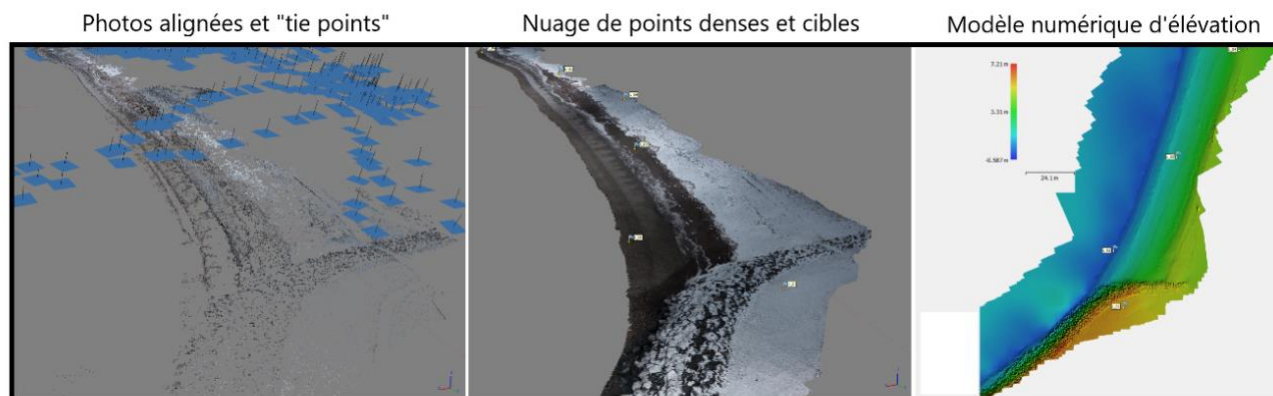


Figure 27. Exemples des données photogrammétriques produites.

Toutes les informations relatives aux relevés topographiques réalisés à partir des photographies aériennes de basse altitude sont détaillées dans l'annexe 3.4.3.

3.5 ANALYSE 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. À Cap-des-Rosiers, ces données ont été utilisées en effectuant des analyses pluriannuelles (2011-2019) à l'aide des profils de plage en plus d'analyse saisonnière (2016-2019) à l'aide de l'ensemble des données topomorphologiques.

3.5.1 Analyse des données vectorielles

3.5.1.1 Variabilité pluriannuelle des profils

À Cap-des-Rosiers, l'analyse de la variation du profil de plage a été effectuée à partir des profils n° 4, 9, 12, 17, 21, 25 et 32. La position des profils est illustrée dans les différentes figures, dont la figure 41. Les profils n° 9, 17 et 21 ont été détaillés annuellement, car ils ont été mesurés depuis 2011 et représentent trois environnements différents présents sur le site d'étude. Le profil n° 9 est situé sur le cordon protégeant le marais, le profil n° 17 est adossé contre une terrasse de plage et le profil n° 21 possède une plateforme rocheuse en avant-plage.

Pour le suivi environnemental des travaux de rechargement de plage, l'analyse des profils se fait à partir de 22 profils répartis sur les 5 sites d'études. 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 de la recharge. Ces profils permettent d'analyser l'évolution du même secteur sans recharge.

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° 1, 5, 9 et 13. La position des profils est illustrée sur la figure 6. Les profils n° 1 et 13 sont situés de part et d'autre de la recharge. Les profils n° 5 et 9 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 le banc Larocque, l'analyse de la variation du profil de plage a été effectuée à partir des profils n° 9, 13, 16 et 19. La position des profils est illustrée sur la figure 8. Les profils n° 9 et 19 sont situés de part et d'autre de la recharge. Les profils n° 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° 4, 6, 8 et 11. La position des profils est illustrée sur la figure 10. Les profils n° 4 et 11 sont situés de part et d'autre de la recharge. Les profils n° 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° 16, 19, 21 et 25. La position des profils est illustrée sur la figure 12. Les profils n° 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° 19 et 25 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 Pointe-aux-Loups, l'analyse de la variation du profil de plage a été effectuée à partir des profils n° 4, 6, 9, 12, 14 et 19. La position des profils est illustrée sur la figure 14. Les profils n° 4 et 19 sont situés de part et d'autre de la recharge. Un plus grand nombre de profils est analysé à 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° 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. Toutefois, en juillet 2019, le secteur nord du site de Pointe-aux-Loups sur lequel se situe le profil n° 14 a été rechargé.

3.5.1.2 Bilans sédimentaires et pentes de plage

Sur le site de Cap-des-Rosiers, les profils de plage ont été utilisés pour calculer des bilans sédimentaires et des pentes moyennes de plage. Pour le site d'étude, les profils n° 26, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35 et 36 n'ont pas été utilisés. Ces profils présentent trop d'incertitudes liées à la présence d'affleurements rocheux et de blocs. Lors de l'acquisition de données à l'aide du DGPS, ces obstacles rendent difficile l'enregistrement de points et entraînent une trop grande variabilité entre les différents relevés. L'ensemble des profils du site témoin ont été utilisés.

Pour générer les bilans sédimentaires, les volumes des profils ont été calculés entre la ligne de rivage et l'élévation de -0,6 m qui correspond au niveau de basse mer inférieure de marée moyenne (BMIMM). Le volume de chaque profil a ensuite été extrapolé entre les différents profils pour calculer le volume de la plage. Par la suite, pour pouvoir comparer les bilans sédimentaires des sites d'étude et témoin, ces volumes ont été divisés par la longueur des plages respectives. Les volumes sont exprimés en m³/m linéaire de plage.

La moyenne des pentes a été effectuée en utilisant la pente du haut estran, soit entre la BMIMM de -0,6 et 3,2 m (CGVD28) ou la base d'infrastructure de protection. Ces élévations permettent de calculer la pente sur l'ensemble des profils à Cap-des-Rosiers.

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

Sur les sites de l'Anse-aux-Coques, du banc Larocque, de la plage Monaghan, de La Martinique et de Pointe-aux-Loups, les largeurs de plages au NMM ont été calculées pour la période 2018-2019. L'ensemble des profils ont été utilisés afin de générer une isoligne pour chaque date de levé au NMM correspondant à chaque site. Ces niveaux sont indiqués sur les figures de profils des sections 4.2.1.3, 4.2.2.3, 4.2.3.2, 4.2.4.3 et 4.2.5.3. À noter que pour le banc Larocque, le levé du 22 novembre 2018 n'a pas été utilisé, certains des profils étant inutilisables en l'état.

La distance 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. Chaque secteur a été divisé en sous-secteurs pour mieux évaluer 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.

3.5.1.4 Analyse de la variabilité du trait de côte

Pour Cap-des-Rosiers, l'analyse de la variabilité du trait de côte est effectuée à partir des profils moyens du site d'étude. Pour cette analyse, le trait de côte correspond à l'élévation de 1,45 m (CGVD28) représentant le 90^e percentile des NET de 2016 à 2019. Cette élévation est située à 0,15 cm au-dessus de la PMSGM. La distance entre le trait de côte et un point de référence situé en arrière-plage a été calculée pour chaque profil. La variabilité du trait de côte a ensuite été calculée pour la période avant et après le démantèlement ainsi que pour l'ensemble de la période d'étude.

3.5.2 Analyse 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.

3.6 SUIVI GRANULOMÉTRIQUE

À Cap-des-Rosiers, une campagne granulométrique a été réalisée le 10 octobre 2018. Le plan d'échantillonnage a été composé de transects d'une distance d'environ 200 m linéaires de plage. Le nom des transects correspond au profil de plage sur lequel les échantillons ont été récoltés. Les positions des stations sont identifiées à l'annexe 4. Sur chaque transect, trois stations ont été échantillonnées. Une station en haut de plage, une station à mi-estran et une station en bas de plage (figure 28). Au total, 24 échantillons ont été analysés sur le site d'étude et 9 échantillons sur le site témoin.

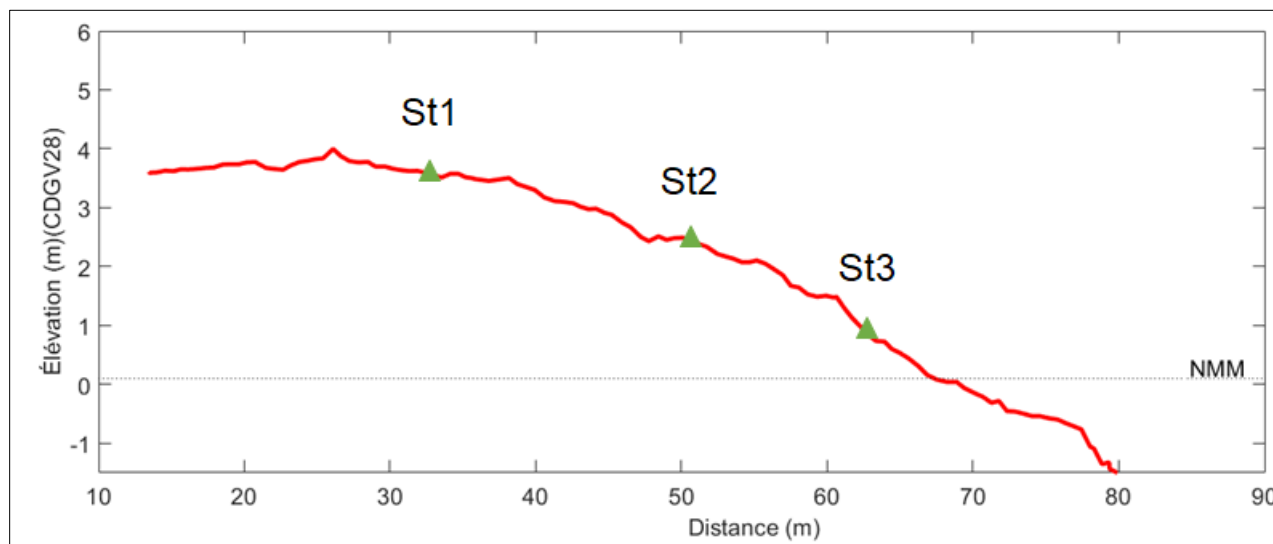


Figure 28. Représentation des trois stations granulométriques (St) par transect à Cap-des-Rosiers.

Pour les sites de recharges, une campagne d'échantillonnage a été réalisée pour chacun des sites. Au total, 209 échantillons ont été récoltés et analysés. Pour les sites du banc Larocque, de Monaghan, de La Martinique et de Pointe-aux-Loups, 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. 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 et al., 2017).

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 masse obtenue pour chaque fraction granulométrique a été intégrée dans le logiciel GRADISTAT V8 afin d'obtenir les statistiques de chaque échantillon.

Une seule campagne d'échantillonnage étant présentée dans ce rapport, l'analyse granulométrique est essentiellement descriptive. 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 la nomenclature de Blott et Pye, qui est l'échelle implémentée par défaut dans le logiciel GRADISTAT (Blott & Pye, 2001).

4. RÉSULTATS SECTORIELS

4.1 SUIVI DE LA RENATURALISATION D'UNE PLAGE COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS

4.1.1 Évolution historique de la largeur de la plage de Cap-des-Rosiers (1963-2019)

Avant la construction de la route et des ouvrages de protection, la plage de Cap-des-Rosiers était relativement large. Sur une photo aérienne oblique historique de 1927, nous avons évalué la largeur de plage entre 30 et 50 m (figure 29).



Figure 29. Vue oblique du site d'étude de Cap-des-Rosiers en 1927.

L'analyse historique des photos aériennes montre que la largeur moyenne du site d'étude connaît une diminution constante passant de 33,6 m en 1963 à 14,5 m en 2009. Lors de cette période, la largeur moyenne du site témoin est restée stable avec une moyenne de 49,1 m. Après le démantèlement, la largeur moyenne du site d'étude est passée de 15,3 m en 2016 à 51,2 m en 2019, soit une valeur légèrement supérieure à la moyenne du site témoin (figure 30). L'écart-type du site d'étude est toujours plus élevé en raison de la présence de plateforme rocheuse au sud. Les variations de la largeur de plage sont représentées dans la figure 31, qui illustre le site d'étude sans infrastructure de protection, avec des infrastructures et après leur démantèlement.

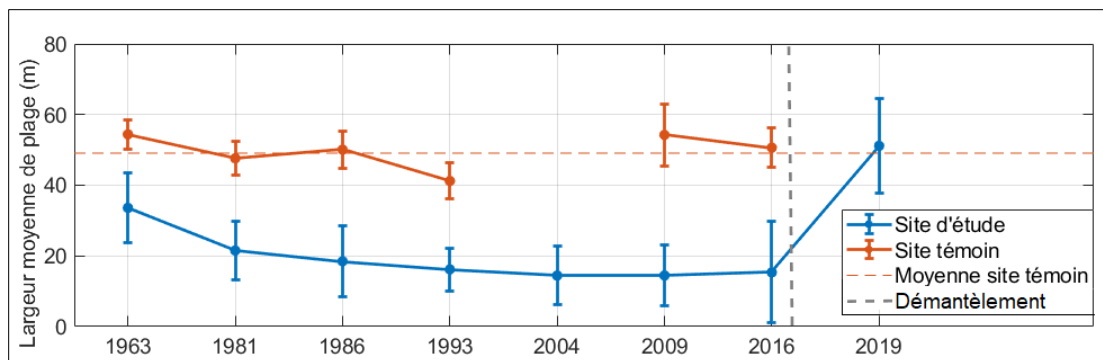


Figure 30. Analyse historique de la largeur moyenne de plage à Cap-des-Rosiers.

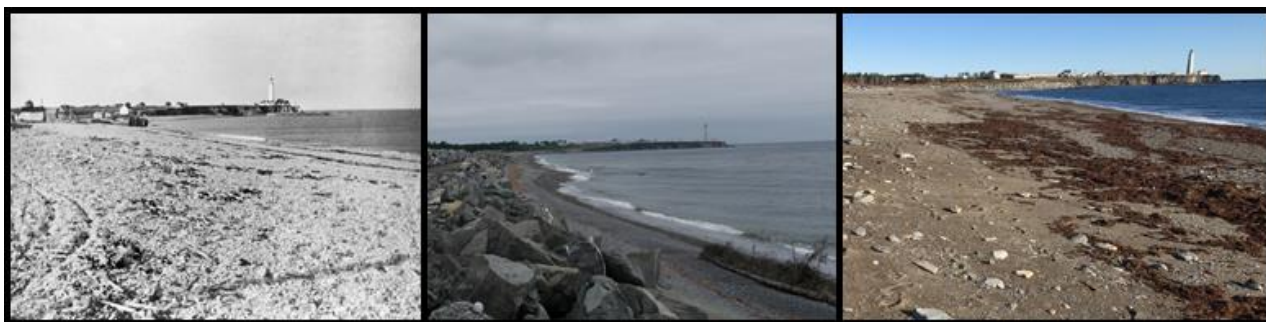


Figure 31. Évolution de la largeur de plage en 1927, 2011 et 2019, soit respectivement, avant la construction de la route, suivant la mise en place d'infrastructures de protection et après le démantèlement de la route et de ses infrastructures.

En comparant la largeur de la plage sur le site d'étude avant et après le démantèlement, on observe une augmentation de la largeur sur la majorité des transects, pouvant atteindre 49 m. La variabilité de la largeur de plage de certains transects est demeurée faible. Les transects n° 7 à 9 correspondent à une section d'enrochement ayant été préalablement démantelée en 2011 et le transect n° 35 correspond à la construction d'un enrochement près de l'épi du quai (figure 32). Il est à noter que le premier démantèlement a entraîné une augmentation de 40 m de la largeur de plage sur les transects n° 7 à 9 en 2011.

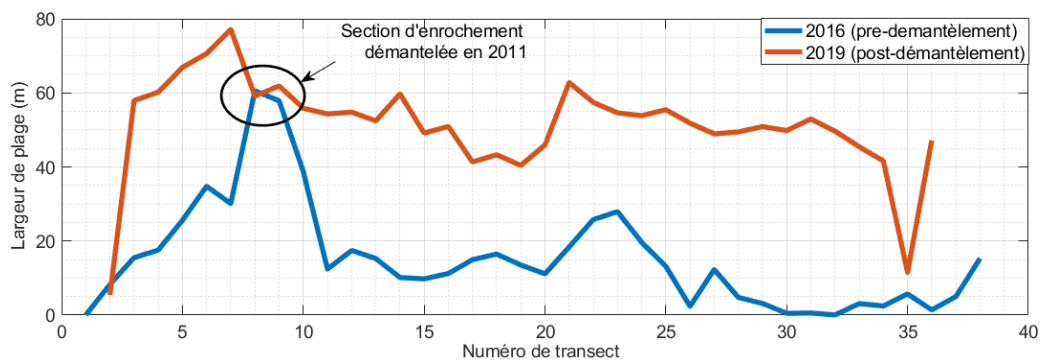


Figure 32. Analyse de la largeur de plage du secteur d'étude avant et après le démantèlement de l'enrochement et de la route de Cap-des-Rosiers. Le transect n° 0 représente le phare et le transect n° 40 représente le quai de Cap-des-Rosiers.

4.1.2 Caractérisation côtière

Les résultats de la campagne granulométrique démontrent que le site d'étude ($D_{50} = 9,5$ mm) possède une granulométrie plus fine que le site témoin ($D_{50} = 15,6$ mm). Le site d'étude possède une proportion plus faible de matériel grossier ($> 30\,000\ \mu\text{m}$) en plus d'une plus grande proportion de matériel compris entre 500 et 7000 μm que sur le site témoin (figure 33).

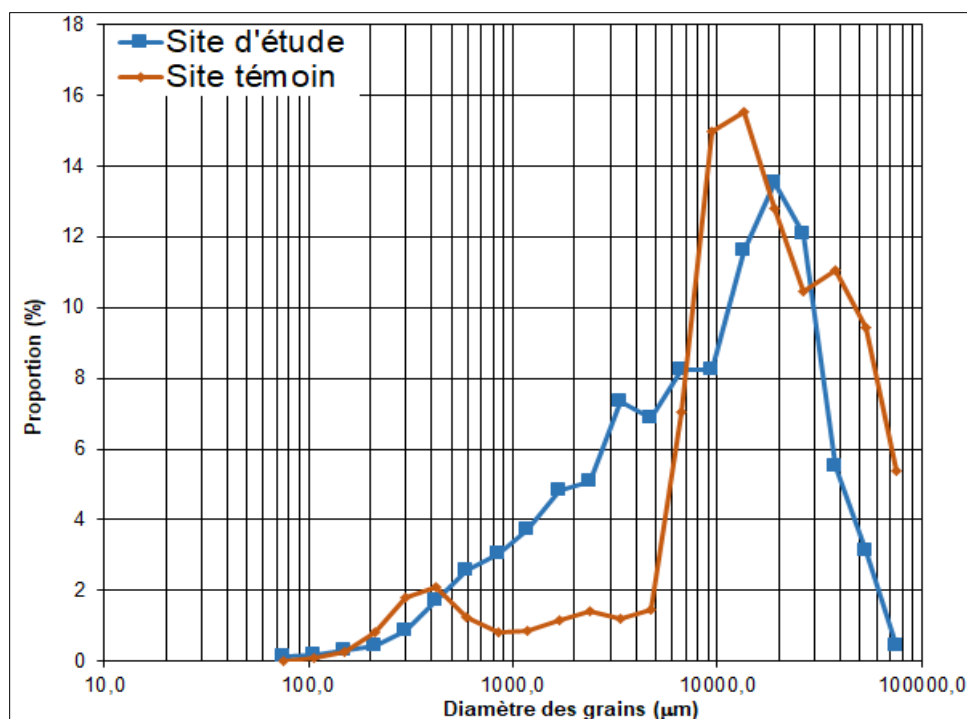


Figure 33. Proportion des tailles granulométriques sur les sites d'étude et témoin à Cap-des-Rosiers le 10 octobre 2018.

Lors de la campagne granulométrique, on remarque la présence de sable sur l'ensemble de la plage du site d'étude, mais seulement en bas de plage (St3) sur le site témoin. On remarque également la présence de silt uniquement sur le site d'étude et majoritairement en haut de plage sur les transects pr22 et pr26 (figure 34). Une grande proportion de silt dans les échantillons est expliquée par une recharge effectuée dans cette zone le 19 septembre 2018. Le sédiment de la recharge provient des travaux de dragage effectués dans le quai de Cap-des-Rosiers, lequel contenait entre 3,1 et 5 % de silt (Parcs Canada, communication personnelle).

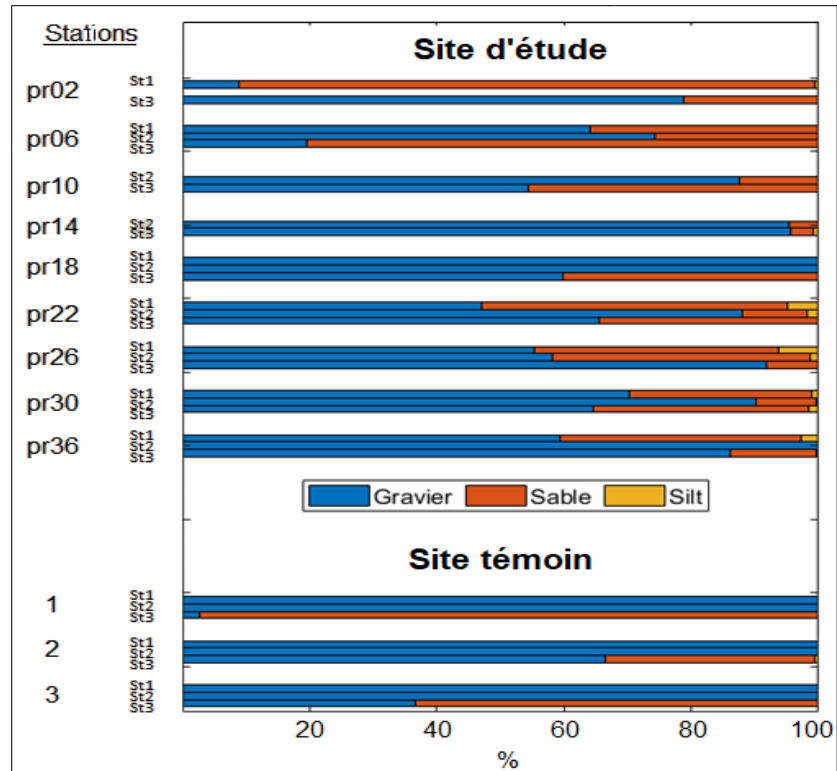


Figure 34. Proportion de gravier, de sable et de silt dans les différents échantillons granulométriques récoltés à Cap-des-Rosiers. Les stations (St1) correspondent au haut de plage, les stations (St3) correspondent au bas de plage.

4.1.2.1 Conditions hydrodynamiques

Selon l'analyse des conditions hydrodynamiques enregistrées à partir de l'AWAC qui représente le climat de vague entre novembre 2017 et 2019 au large de Cap-des-Rosiers, les vagues les plus énergétiques proviennent de l'ESE-SE ($112,5^{\circ}$ N à 145° N). Ces vagues sont également les plus fréquentes et représentent 34 % des vagues enregistrées. Ces vagues provenant du golfe du Saint-Laurent ont atteint plus de 3 m avec des périodes de plus de 10 s. Les vagues du NNE-NE ($22,5^{\circ}$ N à 45° N) sont la deuxième constituante la plus importante représentant 21 % des vagues enregistrées et ont atteint jusqu'à une hauteur significative de 2 m (figure 35).

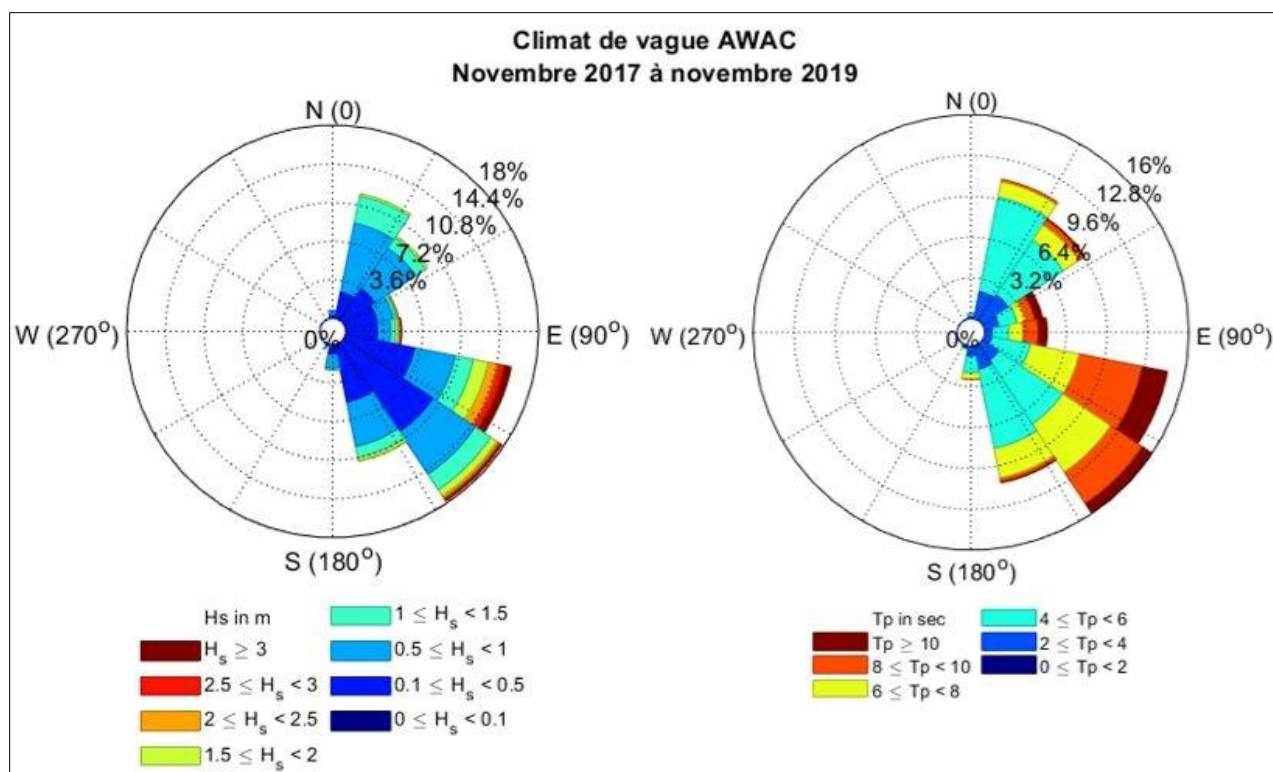


Figure 35. Roses des vagues représentant la hauteur significative (H_s) et la période pic (T_p) des vagues de Cap-des-Rosiers mesurée avec l'AWAC du 21 novembre 2017 au 18 novembre 2019.

En comparant les données de l'AWAC à celles du point modélisé WW3, on observe une différence concernant la deuxième constituante de vague la plus importante qui est du NNE-NE ($22,5^\circ$ N à 45° N) à l'AWAC et du NNO (325° N à 335° N) au point WW3 (figure 35). Nous suggérons que cette différence est reliée à la position de l'AWAC qui se trouve plus près des côtes (annexe 4). Les vagues provenant du NNO au large sont ainsi diffractées vers le site d'étude et enregistrées comme NNE-NE par l'AWAC. Dans ce cas, les données directionnelles de vague à l'AWAC représentent davantage les conditions sur le site d'étude et celles de WW3 les conditions au large. Cette hypothèse est soutenue par la direction des vagues à la côte illustrée dans les images de la caméra AXIS et de celle du phare de Cap-des-Rosiers, le 14 novembre 2018, où l'AWAC mesurait des vagues du NE (36° N) et WW3 modélisait des vagues du NNO (332° N) (figure 36). Il est ainsi indispensable d'utiliser des appareils de mesure hydrodynamique *in situ* pour bien interpréter les dynamiques hydrosédimentaires d'un site d'étude.

Le régime énergétique des vagues sur le site de Cap-des-Rosiers est exprimé par le cumulatif du flux d'énergie produit par un front d'onde de vague par année (figure 37). Avec un cumulatif moyen de $7,42 \times 10^7$ kW/($m^3 \cdot s$) pour la période de 1980 à 2019, la période d'étude de 2011 à 2019 présente un climat de vague plus énergétique avec une moyenne de $8,91$ kW/($m^3 \cdot s$). Seuls les cumulatifs du flux d'énergie de l'année 2015 et 2019 sont inférieurs à la moyenne.



Figure 36. Représentation d'ondes de vague le 14 novembre 2018 à partir de la caméra située dans le phare (à gauche) et de la caméra AXIS (à droite). Il est à noter que les vagues illustrées ont été générées par des vents du NO au large, mais sont possiblement diffractées et arrivent à la côte d'une direction NE.

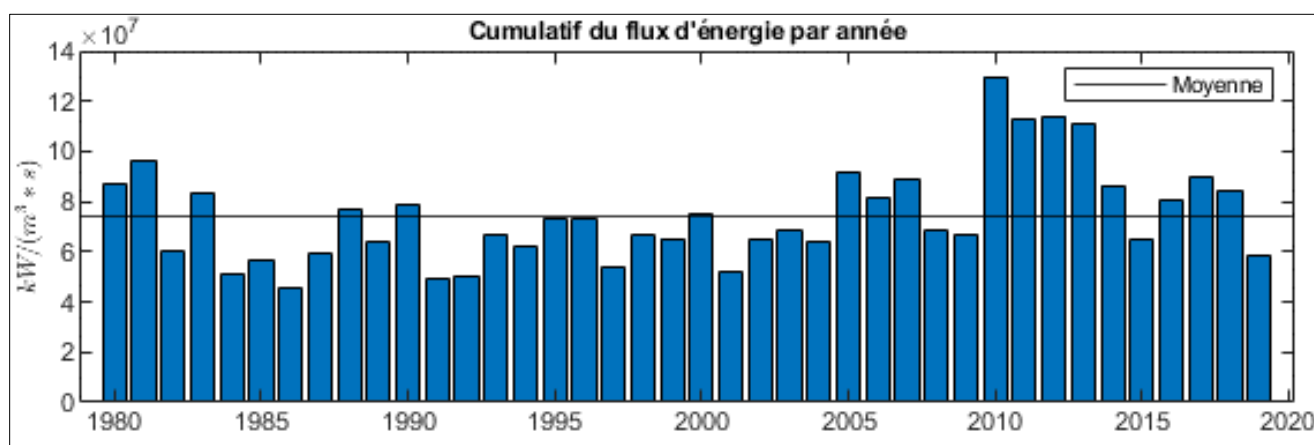


Figure 37. Caractérisation du climat de vague au large de Cap-des-Rosiers.

On observe un régime de vagues plus énergétique sur le site témoin que sur le site d'étude (figure 38). L'énergie des vagues est plus élevée sur le site témoin lorsque les vagues sont supérieures à 3 m. La hauteur significative (H_s) des vagues est plus importante sur le site témoin lorsque H_s est plus élevé que 2 m. Ces phénomènes sont expliqués par la bathymétrie de secteur (voir annexe 44). En effet, la plage sous-marine du site d'étude forme un plateau de 20-30 m de profondeur jusqu'à environ 3 km de la côte. En revanche, la plage sous-marine du site témoin s'abaisse plus brusquement vers le sud-est. Or, c'est de cette direction que proviennent les vagues les plus énergétiques. La dissipation de l'énergie des vagues par la friction sur le fond est donc moins importante sur le site témoin, ce qui se traduit par des vagues plus hautes.

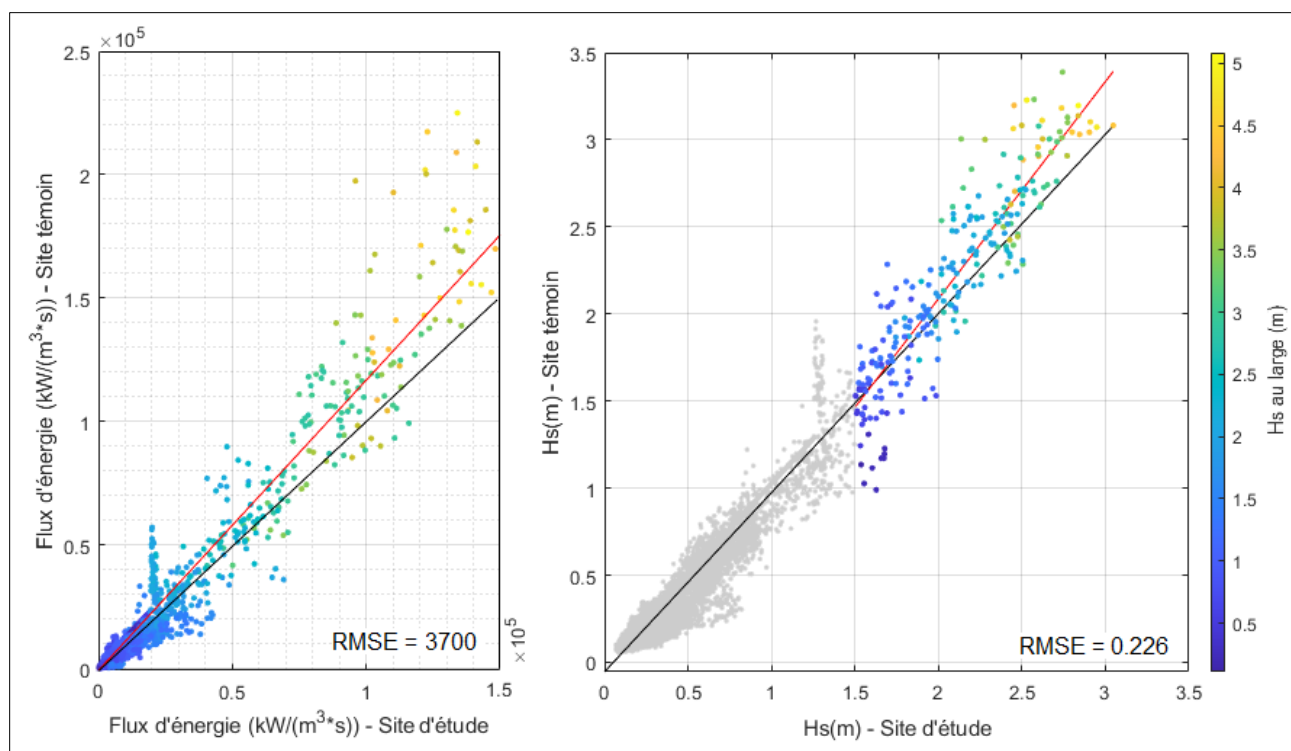


Figure 38. Comparaison du flux d'énergie (à gauche) et de la hauteur significative des vagues (à droite) à 5 m de profondeur entre le site d'étude et le site témoin à Cap-des-Rosiers. La hauteur significative au large a été mesurée à l'aide de l'AWAC.

À Cap-des-Rosiers, la majorité des événements de franchissement ont lieu l'automne lorsque les tempêtes sont les plus énergétiques (figure 39). La saison 2016 compte trois événements de franchissement. Les événements du 30 décembre 2016 (NET = 6,5 m) et du 4 janvier 2017 (NET = 5,7 m) sont les deux plus importants durant la période d'étude suivant le démantèlement (figure 40).

Les saisons 2017 et 2018 comptent chacune quatre événements de franchissement. Pour l'année 2019, les données de vague sont disponibles jusqu'au 18 novembre. Bien qu'aucun événement majeur n'ait été enregistré lors de cette période, un événement hautement morphogène a eu lieu le 25 novembre 2019. Le NET de cette tempête a pu être estimé à partir des équations 2 et 3, des niveaux d'eau mesurés à la station marégraphique de Rivière-au-Renard et des données d'archives de prévision de vague du modèle ICON (Icosahedral Nonhydrostatic). La tempête, avec une hauteur de vague significative de 2,4 m et une période de 8 s, atteint donc un NET de 3,9 m.

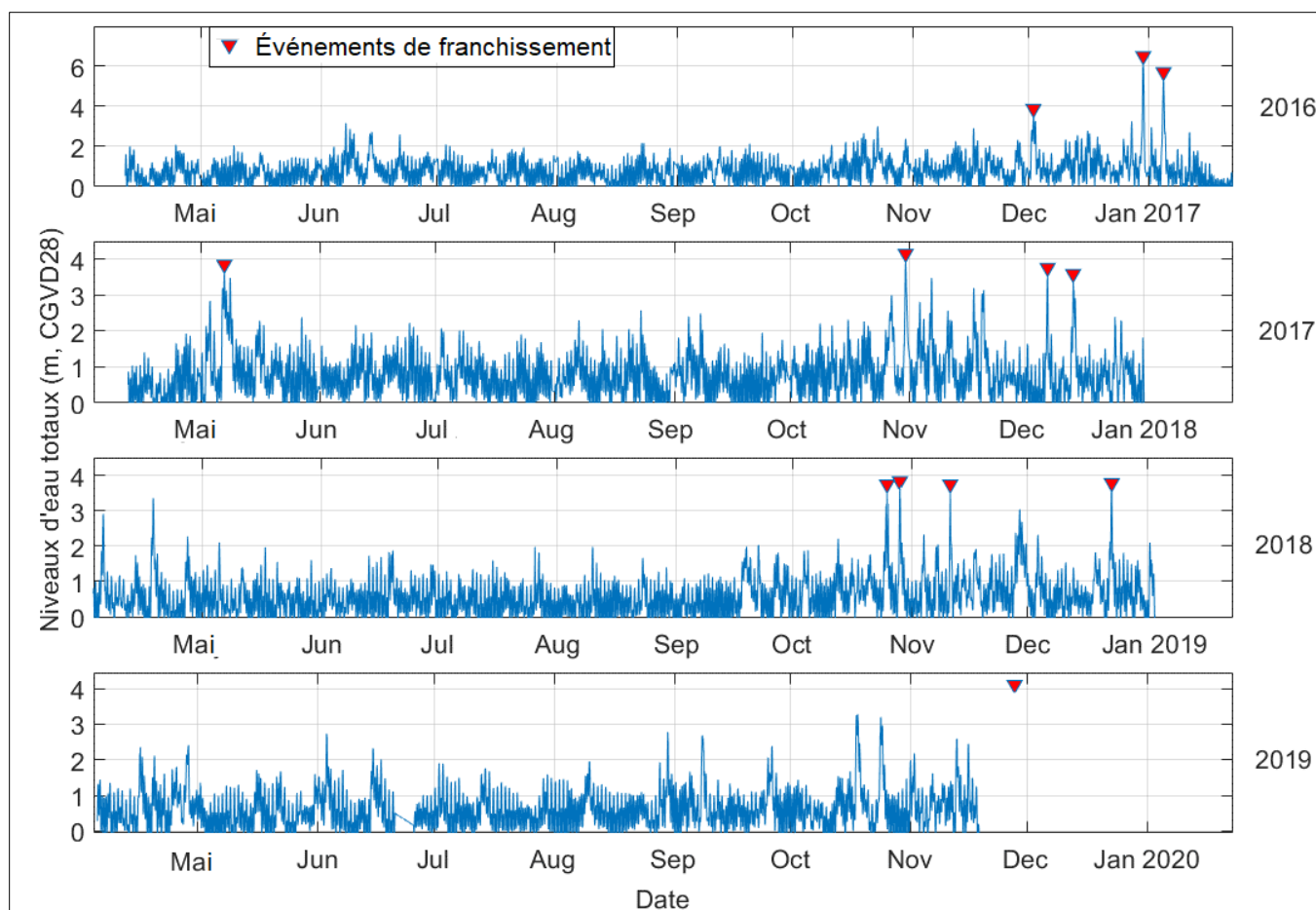


Figure 39. Niveaux d'eau totaux de 2016 à 2019 à Cap-des-Rosiers. Les triangles rouges représentent les événements de franchissement où le niveau d'eau total a dépassé 3,5 m. Ce seuil a été déterminé à l'aide des différents levés morphologiques et confirmé à l'aide des images de la caméra vidéo AXIS. Il est à noter que l'axe des Y de la figure de l'année 2016 est différent des autres.



Figure 40. Images avant et pendant l'événement de franchissement (14 décembre et 30 décembre 2016). N.B. La photo de droite a été enregistrée trois heures précédant l'atteinte maximale du niveau d'eau total.

4.1.3 Réponse de la plage au démantèlement d'un ouvrage de défense côtière

4.1.3.1 Perturbations anthropiques

Un premier segment de la route et de l'enrochement a été démantelé en 2011. Par la suite, les travaux de renaturation de la plage de Cap-des-Rosiers se sont échelonnés de 2016 à 2018 (figure 41).

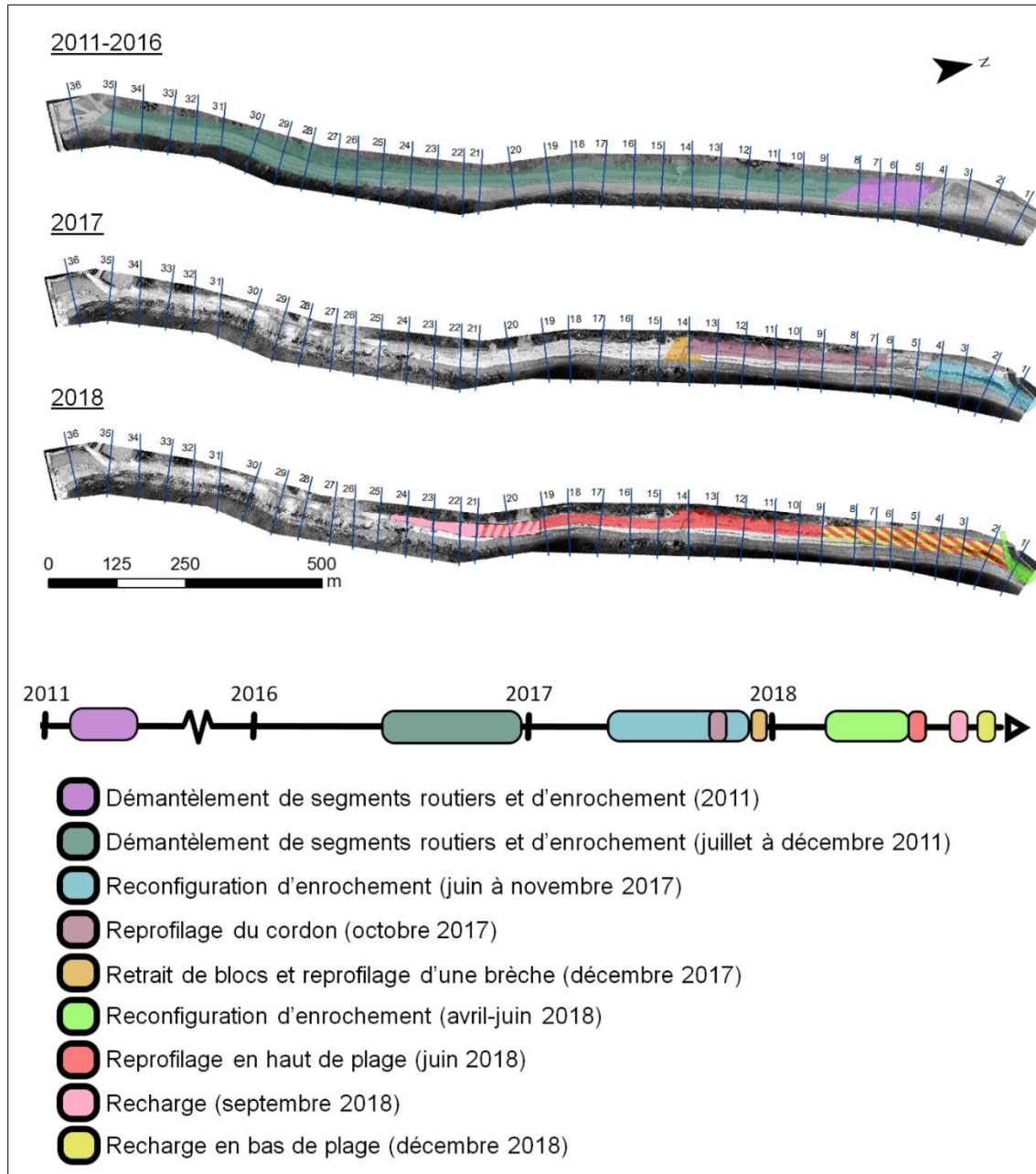


Figure 41. Description des interventions ayant été effectuées sur la plage.

Premièrement, à l'automne 2016 et en 2017, des travaux de démantèlement ont été effectués sur l'ensemble du site d'étude. Deuxièmement, à l'automne 2017 et au printemps 2018, des travaux de reprofilage et de « nettoyage » de plage ont été réalisés. Le reprofilage anthropique de la plage a été effectué selon les plans de la firme de génie WSP Inc., qui suggère une pente de 6,3° (9:1) sur l'ensemble

de l'estran au nord du profil n° 19 et une pente d'estran de 6,3° (9:1) suivi d'une pente de 18,4° (3:1) en haut de plage au sud du profil n° 20 (figure 42). Le nettoyage de plage a consisté en retrait des blocs d'enrochement de plus de 30 cm présents sur la plage. Finalement, à l'automne 2018, deux recharges ont été effectuées, pour valoriser le matériel récupéré lors du dragage du quai de Cap-des-Rosiers. Le volume total de ces recharges est de 6 840 m³ (Parcs Canada, communication personnelle). La figure 43 illustre les différentes interventions ayant été effectuées sur le site d'étude.

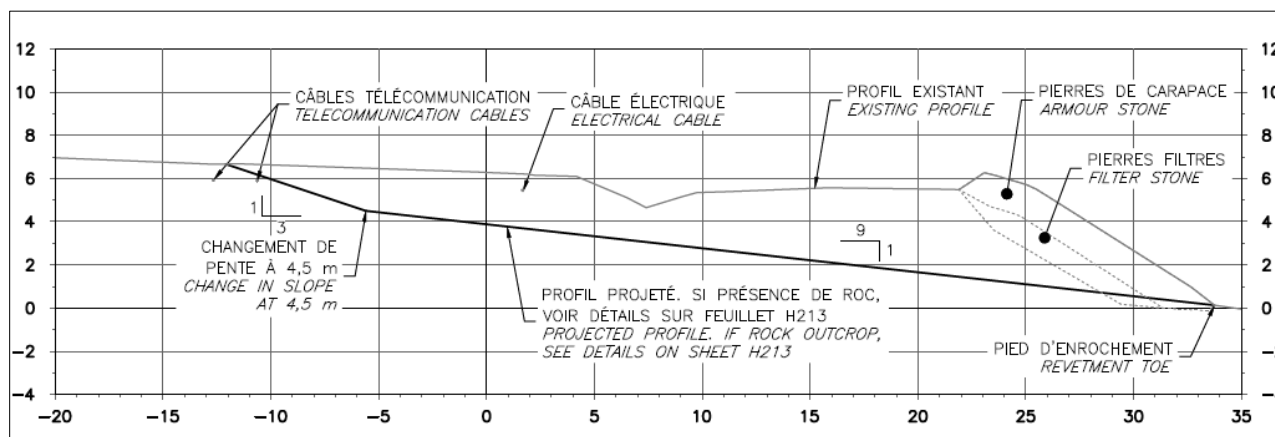


Figure 42. Exemple de plan de reprofilage de plage produit par la firme de génie WSP Inc.



Figure 43. Exemple d'interventions sur le site d'étude de Cap-des-Rosiers. La première photo représente des travaux de démantèlement le 28 octobre 2016. La deuxième photo représente un reprofilage du cordon le 13 octobre 2017. La troisième photo présente une recharge de plage le 12 décembre 2018.

4.1.3.1.1 Avant/après démantèlement

Le démantèlement de l'enrochement et de la route a grandement modifié l'environnement côtier. À la suite des travaux principaux de démantèlement, 55 000 m³ de matériel ont été mobilisés, soit le retrait d'environ 50 000 m³ et l'ajout d'environ 5000 m³ (figure 44). Les photos présentées dans la figure 31 et figure 45 témoignent de la modification esthétique de la plage, qui ressemble davantage à une plage « naturelle » à la suite du démantèlement.

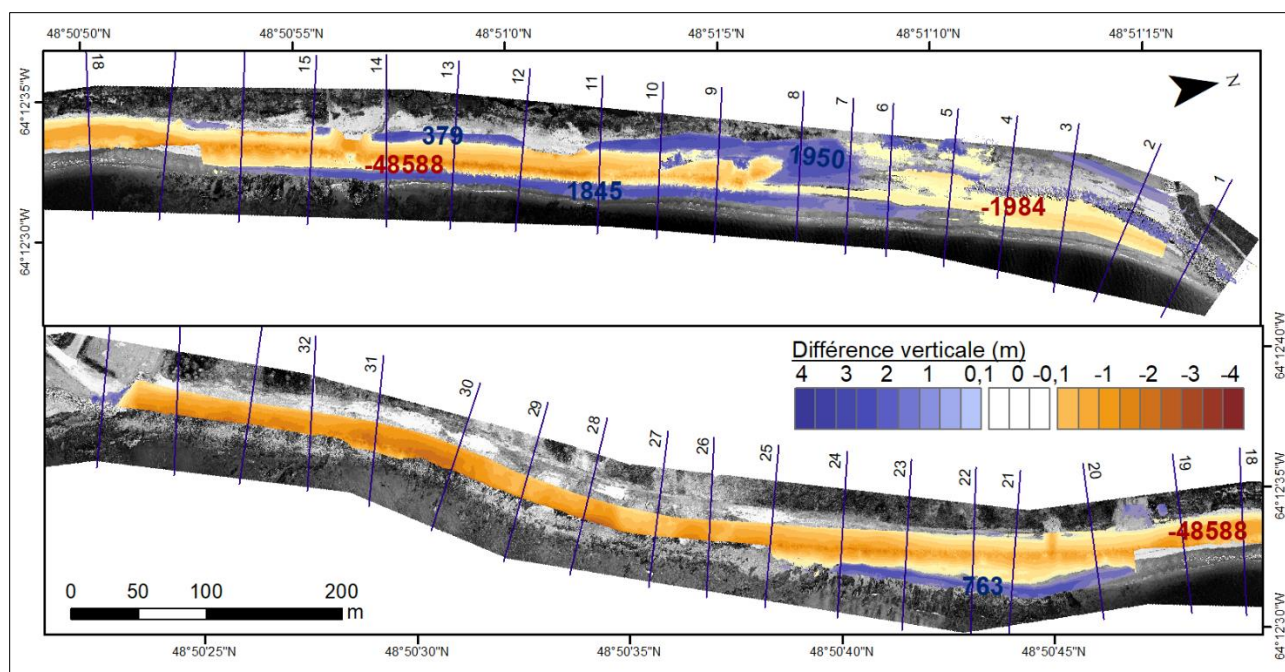


Figure 44. Différentiel d'élévation entre le 8 juillet et le 12 décembre 2016, soit avant et après la phase principale des travaux de démantèlement. Les variations de volume sont représentées en mètre cube.



Figure 45. Photos obliques prises avant et après le démantèlement (14 septembre 2010 et 26 septembre 2017).

Entre mai 2013 et décembre 2016, la variation verticale la plus marquée se trouve au niveau de l'enrochement (figure 46, flèche bleue) où l'élévation a diminué de 2,5 à 4 m. Le retrait de l'enrochement a également permis un élargissement majeur de la plage d'entre 20 m au profil n° 21 et 40 m au profil n° 9. La figure 46 montre un abaissement de 0,75 m au profil n° 17 entre mai 2013 et décembre 2016. Par contre, en se basant sur l'évolution annuelle du profil n° 17 (figure 50), on observe que cet abaissement de la plage a eu lieu entre 2013 et 2014 et que le profil de plage sous le niveau des PMSGM est demeuré stable. Nous pouvons ainsi affirmer que la plage sous le niveau des PMSGM est restée stable à la suite du démantèlement.

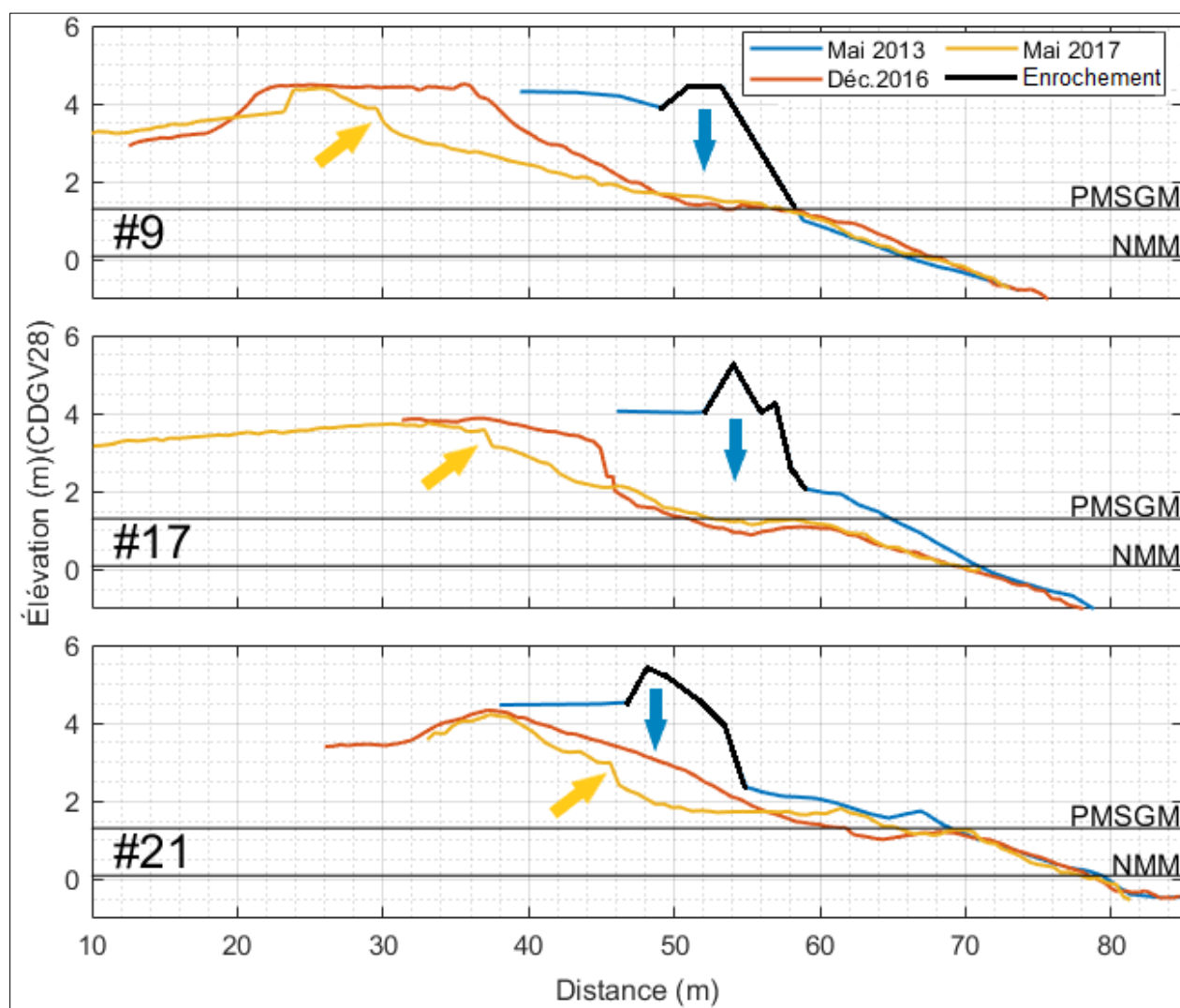


Figure 46. Évolution des profils avant et après le démantèlement.

À la suite de la fin des travaux en décembre 2016, deux événements majeurs (figure 39) ont modifié le profil de plage créé lors du démantèlement. Ces événements ont induit une érosion majeure de la plage (figure 46, flèche jaune). Une partie du sédiment érodé est redistribué entre les profils n° 1 à 5 et 14 et 23 (figure 47). À la suite de ces deux tempêtes, deux brèches se sont également élargies et de nombreux lobes de débordement se sont formés. Un exemple de lobes de débordement et une des brèches sont représentés sur la figure 48.

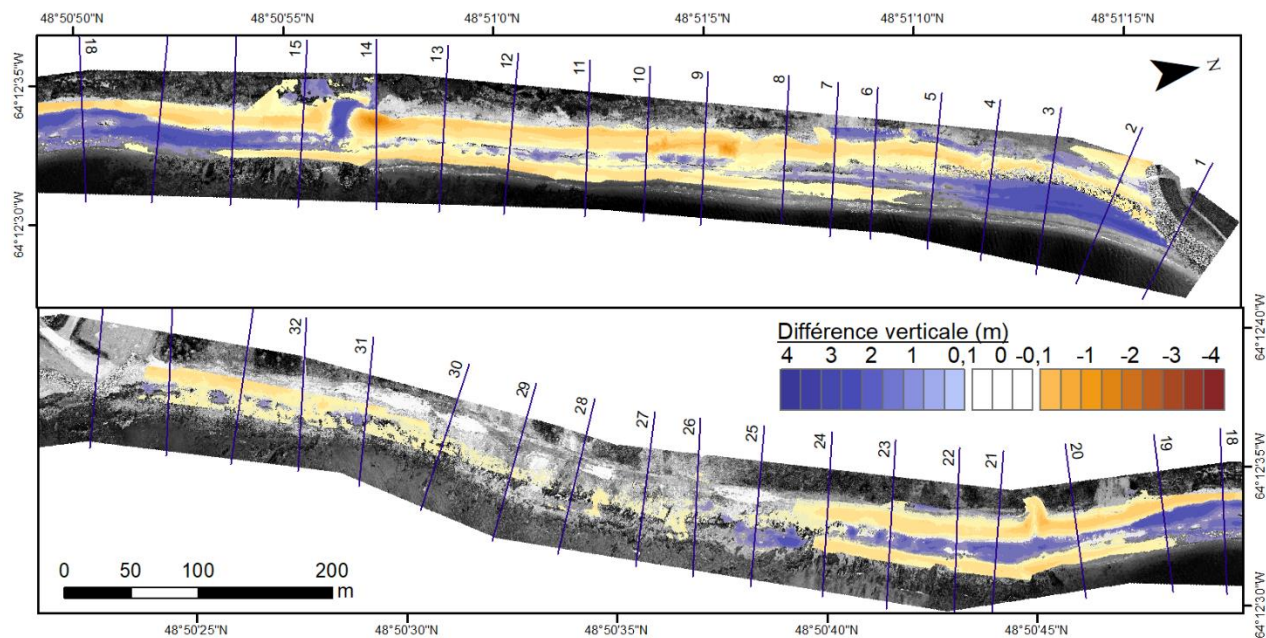


Figure 47. Différentiel d'élévation représentant l'évolution annuelle. Créé à partir des MNT du 12 décembre 2016 et du 11 juillet 2017.

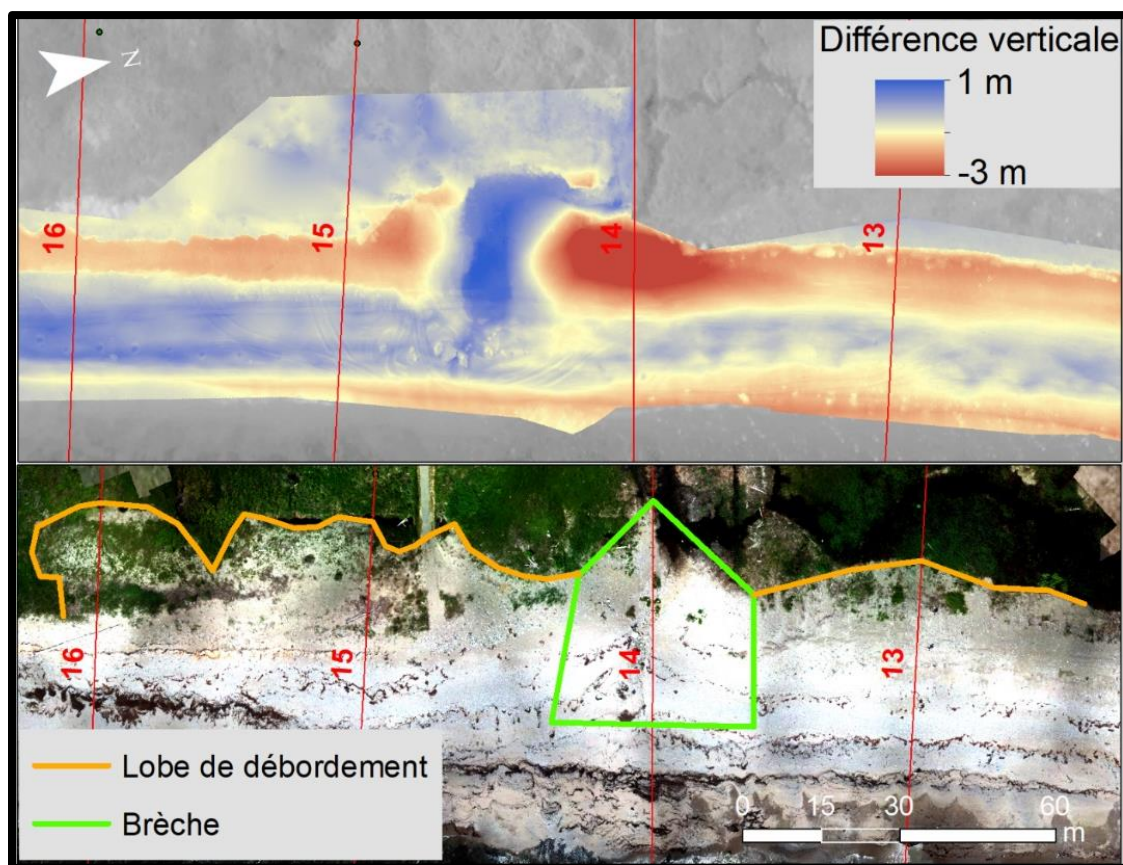


Figure 48. Représentation d'une des brèches et de lobes de débordement. L'image du haut est un différentiel d'élévation du 12 décembre 2016 au 8 juin 2017. L'image du bas est une orthophotographie créée à partir du levé photogrammétrique du 11 août 2018.

4.1.3.2 Évolution annuelle

4.1.3.2.1 Profils de plage et bilans sédimentaires

La variabilité du profil de plage suivant le démantèlement est plus importante sur les profils n° 9, 12, 17, 21 (figure 49, colonne de gauche). L'enveloppe verticale sous le niveau des PMSGM atteint jusqu'à 1,84 m au profil n° 12. L'enveloppe au-dessus des PMSGM atteint jusqu'à 2,12 m au profil n° 12. Les profils n° 32 et 25 situés au sud du site d'étude sont les moins dynamiques. Cette stabilité est expliquée par la présence de la plateforme rocheuse en bas de plage, par la présence d'affleurement rocheux et de blocs. En comparant le profil de plage moyen avant démantèlement et le profil moyen de 2019, on observe un abaissement sur les profils n° 12, 17 et 21.

Les bilans sédimentaires avant le démantèlement sont stables et peu élevés, avec un maximum de 51 m^3 au profil n° 21 (figure 49, colonne de droite). Les bilans augmentent après le démantèlement sur l'ensemble des profils, jusqu'à atteindre un volume de 227 m^3 au profil n° 4. On observe une diminution du volume de sédiment des profils n° 4 et 25 du démantèlement jusqu'à la fin de la période d'étude. Le bilan des autres profils demeure stable.

Durant la période précédant le démantèlement, de 2011 à 2014, on observe un abaissement progressif de la plage entre 0,25 m au profil n° 9 et 0,75 m au profil n° 17 (figure 50). Après le démantèlement, entre 2016 et 2017 l'ensemble des profils subit une érosion majeure du haut de plage. Entre 2017 et 2018, le profil n° 21 est stable et les profils n° 9 et 17 sont sujets à une érosion en haut de plage et en bas de plage, en plus d'une légère accumulation au-dessus de la PMSGM. Entre 2018 et 2019, on observe une accumulation en bas de plage au profil n° 9, la formation d'un talus d'érosion en haut de plage au profil n° 17 et une accumulation sous le niveau des PMSGM au profil n° 21. Finalement, la plage connaît un élargissement progressif de 2016 à 2019.

L'évolution du bilan sédimentaire, calculé à la suite du démantèlement et chaque été suivant, témoigne d'un bilan sédimentaire négatif de $-12\,000 \text{ m}^3$ de 2016 à 2017 (figure 51). Cette forte érosion est expliquée par les tempêtes du 30 décembre 2016, du 4 janvier et du 7 mai 2017 (figure 39). Entre 2017 et 2018, on observe un bilan sédimentaire négatif de $-11\,000 \text{ m}^3$. Cette érosion est en partie due aux événements majeurs de l'automne 2017. Nous l'expliquons également par les diverses interventions anthropiques réalisées sur la plage, car lors de cette période, un enrochement a été démantelé au nord du site d'étude entre le profil n° 1 et 5 (figure 52). Entre 2018 et 2019, on observe un bilan sédimentaire légèrement positif d'environ $2\,000 \text{ m}^3$. Cette accrétion est expliquée en partie par les recharges totalisant environ $7\,000 \text{ m}^3$. De l'année 2016 à 2019, on observe une diminution progressive du total du volume déplacé passant d'environ $25\,000 \text{ m}^3$ à environ $13\,000 \text{ m}^3$.

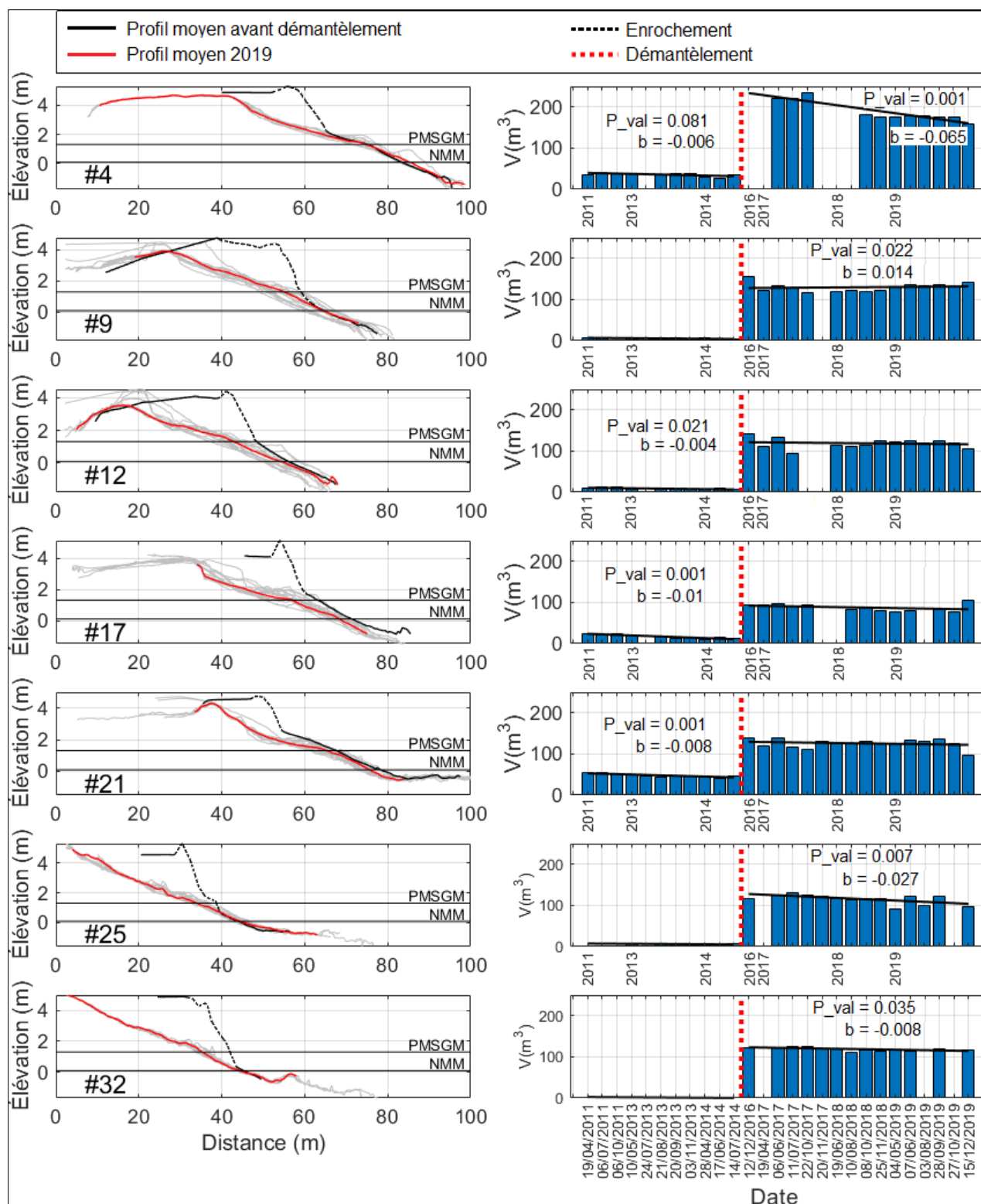


Figure 49. Colonne de gauche : Représentation des profils n° 4, 9, 12, 17, 21, 25 et 32 du site d'étude. Les traits en gris correspondent aux profils mesurés suivant le démantèlement, le trait en noir correspond au profil moyen de 2011 à 2016, le trait en rouge représente le profil moyen de 2019. Colonne de droite : Représentation du bilan sédimentaire des profils n° 4, 9, 12, 17, 21, 25 et 32 du site d'étude. Le trait rouge pointillé correspond au début des travaux de démantèlement. Seules les valeurs d'un coefficient de corrélation de Pearson inférieur à 0,01 sont affichées.

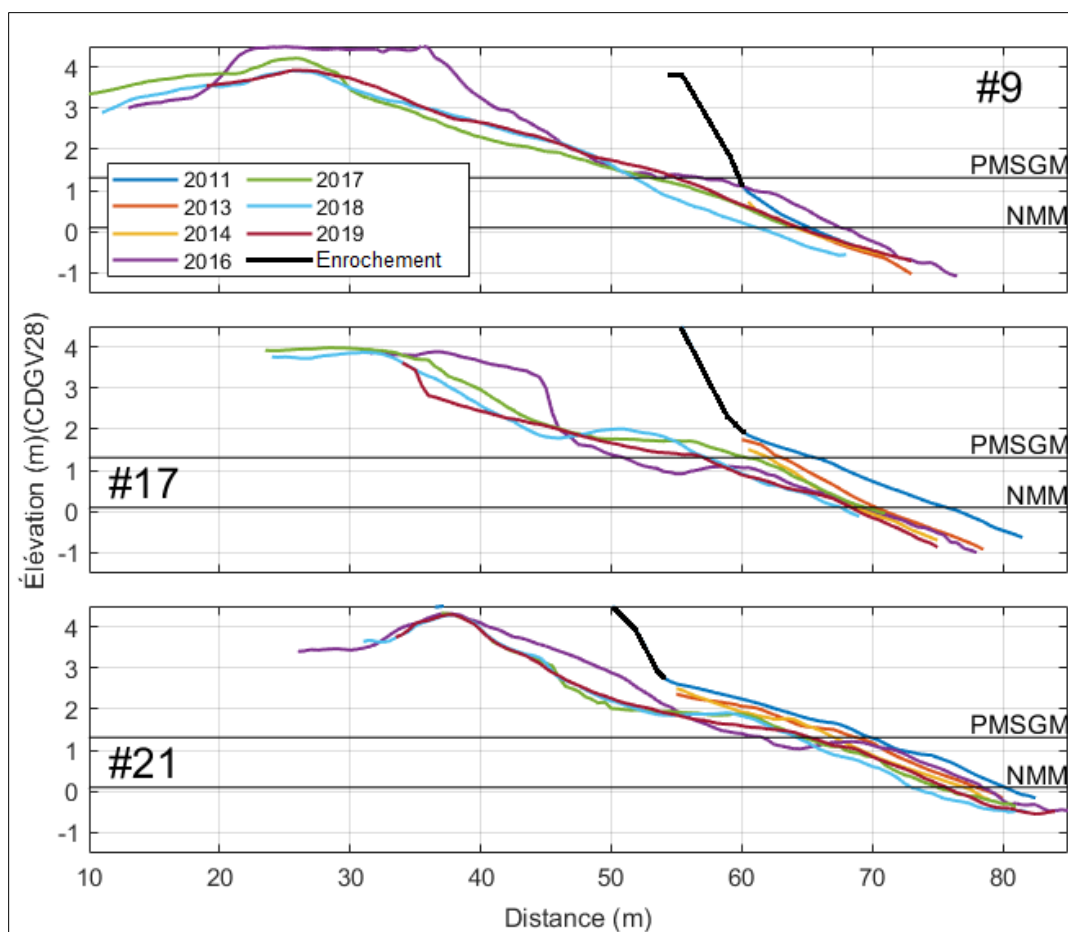


Figure 50. Évolution annuelle des profils moyens n° 9, 17 et 21 localisés au site d'étude à Cap-des-Rosiers.

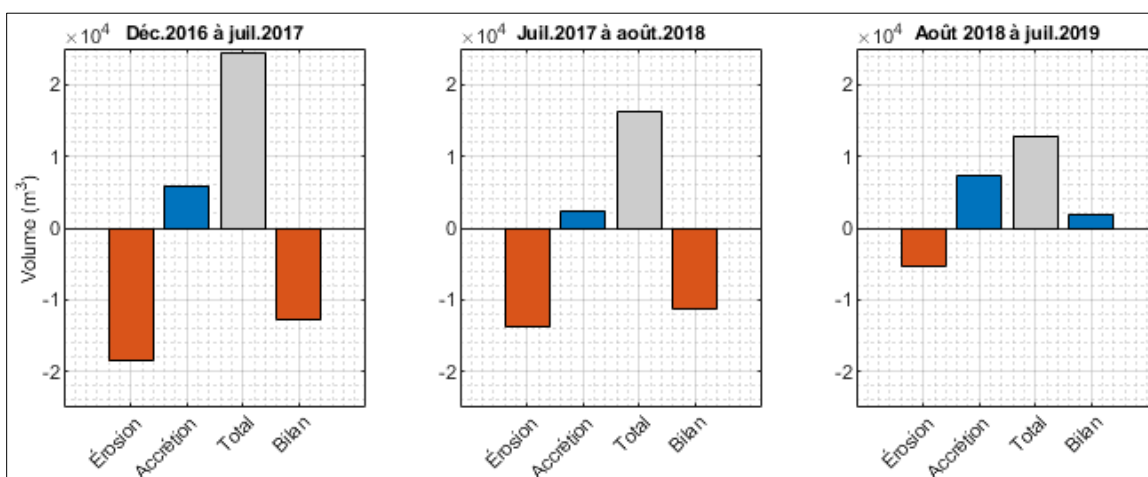


Figure 51. Bilans sédimentaires de la plage de Cap-des-Rosiers issus des différentiels de MNT des 12 décembre 2016, 11 juillet 2017, 11 août 2018 et 5 juillet 2019. Pour chaque graphique, de droite à gauche, la première barre correspond au volume de sédiments érodés, la deuxième barre correspond au volume de sédiments déposés, la troisième barre montre la somme des sédiments mobilisés (érosion + accrétion) et la quatrième barre correspond au bilan sédimentaire (érosion - accrétion). Le détail des différentiels est représenté dans les figure 47, figure 52 et figure 53.

On observe un transport sédimentaire de moins grande ampleur au sud du profil n° 24 (figure 52 et figure 53). Nous expliquons ces faibles morphodynamiques par la présence d'une plateforme rocheuse dans l'espace infralittoral, ainsi que par les blocs et affleurements rocheux présents sur cette partie du site d'étude.

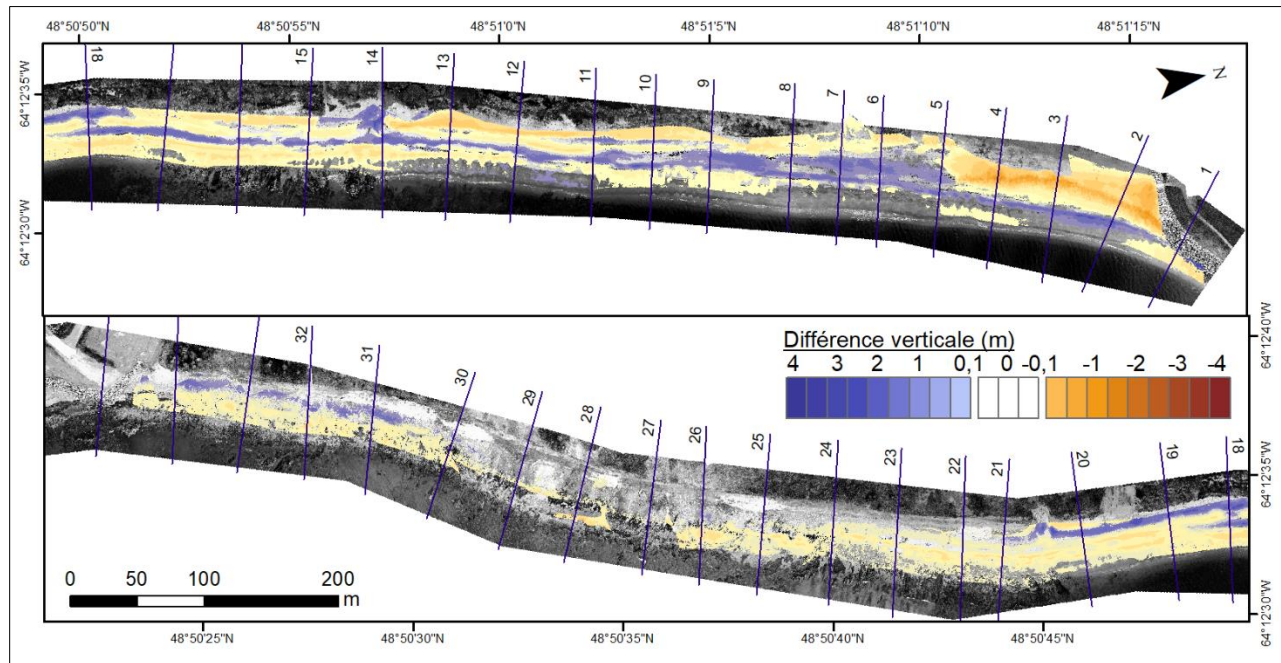


Figure 52. Différentiel d'élévation représentant l'évolution annuelle. Créé à partir des MNT du 11 juillet 2017 et 11 août 2018.

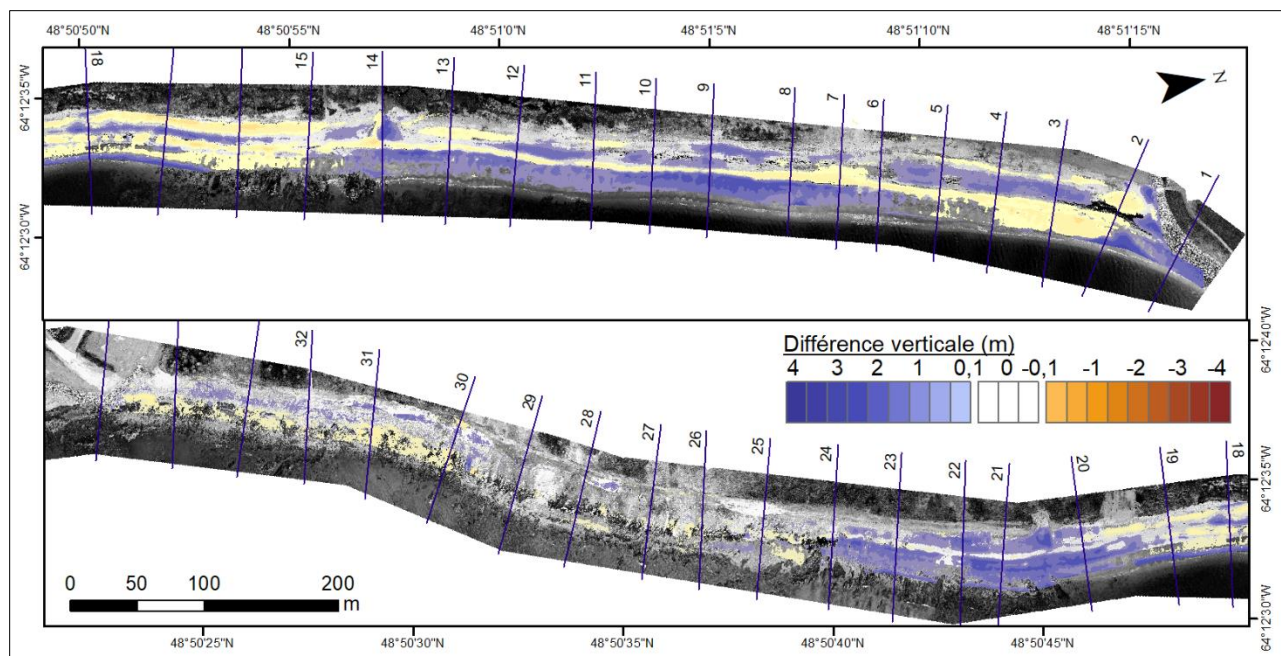


Figure 53. Différentiel d'élévation représentant l'évolution annuelle. Créé à partir des MNT du 11 août 2018 et du 5 juillet 2019.

4.1.3.2.2 Variabilité du trait de côte

Le trait de côte a reculé sur la majorité des profils avec une moyenne de 6,2 m entre 2014 et 2016, soit à la suite du démantèlement (figure 54). Seuls les profils n° 2, 7 et 8 ont subi une légère avancée de 0,6 m, 0,1 m, et 0,8 m respectivement.

La variabilité de trait de côte est plus grande lors de la période suivant le démantèlement, avec une moyenne de 5,4 m, par comparaison à la période avant le démantèlement, avec une moyenne de 2,8 m. La plus grande variation, 33,01 m au profil n° 14, est la conséquence d'une brèche au niveau de la crête de plage (figure 48). Les profils n° 23 à 34, qui se retrouvent sur la partie sud du site d'étude, sont moins dynamiques à la suite du démantèlement, avec une variation moyenne de 4,1 m en comparaison aux profils n° 2 à 22 situés au nord avec une moyenne de 6,1 m.

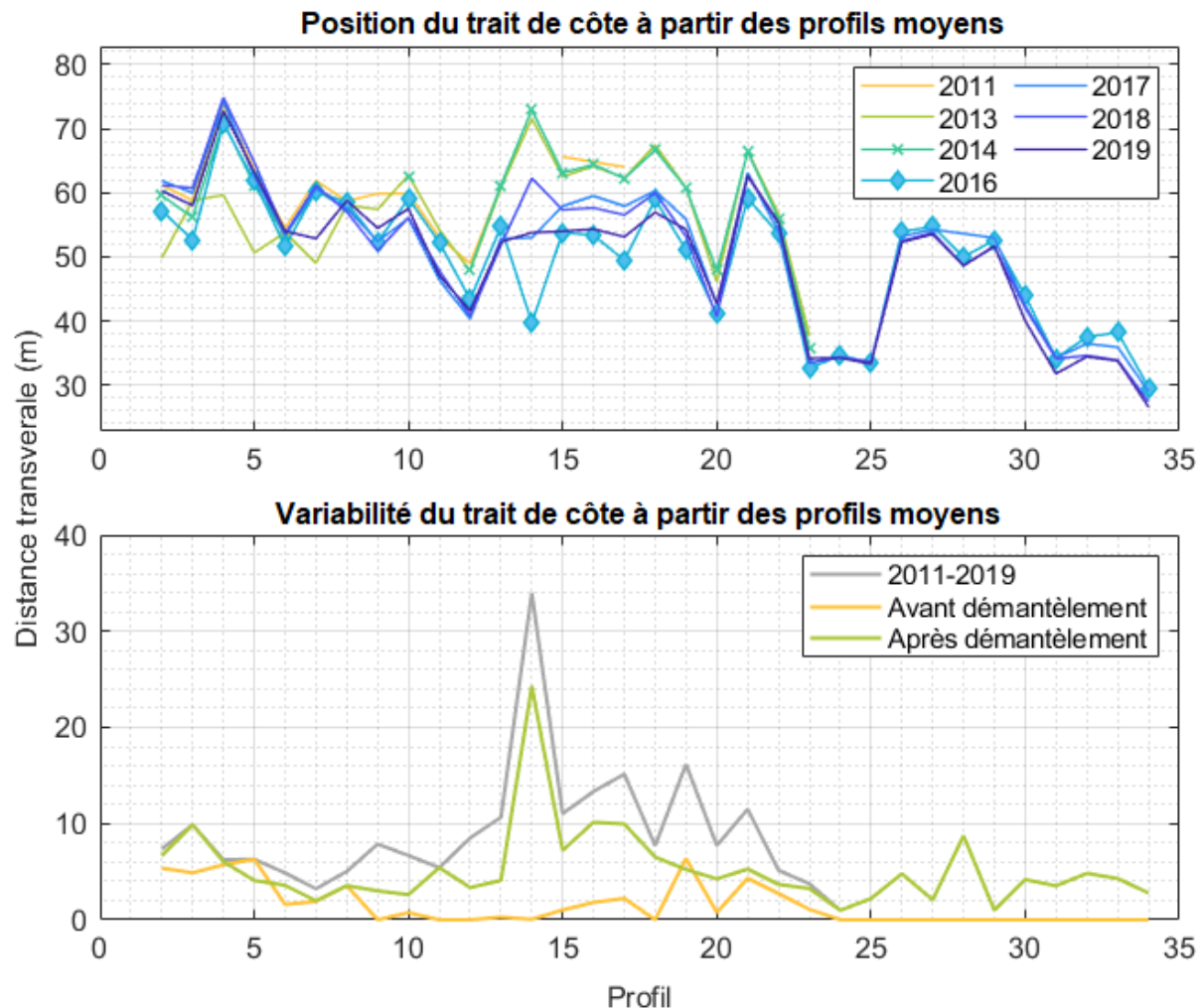


Figure 54. Évolution et variabilité du trait de côte sur le site d'étude à partir des profils moyens. Dans le graphique du haut, le trait de 2014 correspond à la période précédant le démantèlement. Le trait de 2016 correspond à la période suivant le démantèlement.

4.1.3.3 Évolution saisonnière

4.1.3.3.1 Suivi de 2017

L'année 2017 est marquée par la fin des travaux de démantèlement et par le reprofilage mécanique du cordon littoral du site d'étude.

Le bilan sédimentaire nul entre juin et juillet 2017 devient progressivement négatif jusqu'à atteindre environ -7000 m³ entre octobre et novembre 2017 (figure 55). On observe également une augmentation de la mobilisation totale de sédiments, qui peut être expliquée par la conjoncture de l'augmentation des événements morphogènes en automne (figure 39), ainsi que par le reprofilage mécanique de la plage le 19 octobre 2017 qui a fragilisé le matériel de remblai consolidé en haut de plage (figure 43-2).

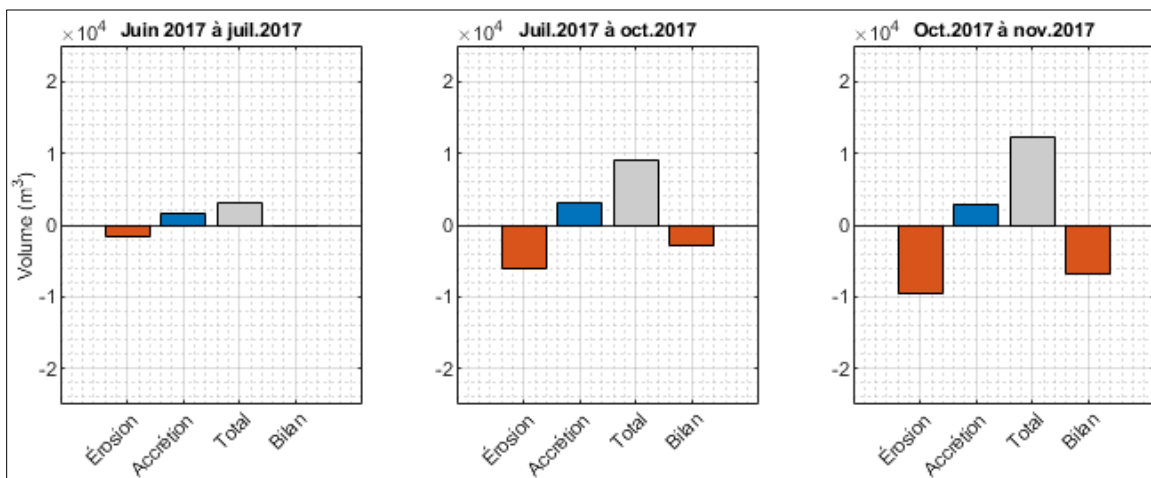


Figure 55. Bilans sédimentaires représentant l'évolution saisonnière de 2017 du site d'étude à Cap-des-Rosiers. Les bilans ont été créés à partir des différentiels de MNT du 8 juin, du 11 juillet, du 22 octobre et du 20 novembre 2017. Les différentiels sont disponibles en annexe.

L'évolution des profils de plage de mai à juin 2017 témoigne d'une érosion sous le niveau de la PMSGM au profil n° 9 et 21, ainsi qu'une accrétion de près de 1 m associée à la formation d'une berme importante au-dessus du niveau de PMSGM au profil n° 17 (figure 56). Cette berme demeure dynamique jusqu'en novembre, où elle atteint une élévation de 2,8 m (flèche brune). Les profils d'octobre ont été mesurés à la suite du reprofilage mécanique du cordon du 19 octobre. On observe ainsi sur le profil n° 9 une diminution de la hauteur du cordon d'environ 0,6 m, ainsi qu'une accumulation de sédiment en avant du cordon (flèche rouge). La période suivant le reprofilage mécanique entre octobre et novembre a été particulièrement morphogène pour la plage en raison de la tempête du 30 octobre (figure 39). Au profil n° 9, entre octobre et novembre, il y a une accrétion de 1,0 m sous le niveau de la PMSGM et une érosion au-dessus de celle-ci. La berme du profil n° 17 subit un déplacement vers les terres de 10 m. Au profil n° 21, les bermes présentes de chaque côté du niveau de la PMSGM (flèche verte) se font éroder entre octobre et novembre. Il en résulte ainsi d'une linéarisation du profil de plage.

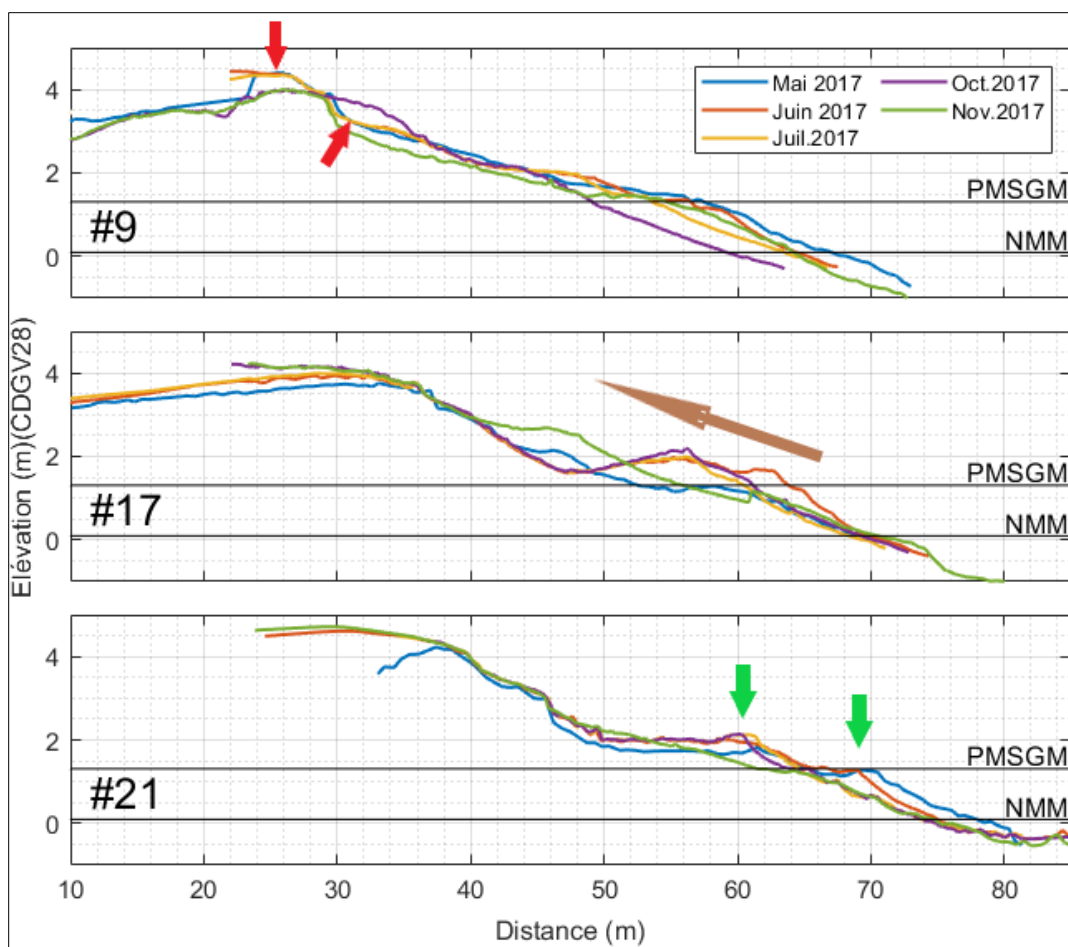


Figure 56. Évolution des profils n° 9, 17 et 21 en 2017 localisés sur site d'étude à Cap-des-Rosiers.

4.1.3.3.2 Suivi de 2018

Deux recharges de plage ont été effectuées en 2018. Une recharge de 1090 m³ a été réalisée le 19 septembre et une recharge totalisant 5900 m³ a été réalisée du 11 au 13 décembre.

L'ensemble des profils montrent une migration de la berme vers les terres de juin à octobre (figure 57, flèches brunes). En novembre, le profil est régularisé avec l'étalement des microformes de la saison estivale ainsi qu'une accumulation en haut de plage sur le profil n° 9.

L'année 2018 témoigne d'un bilan sédimentaire positif entre août et novembre (figure 58). Le bilan positif d'août à octobre 2018 est expliqué par une recharge ayant été effectuée le 19 septembre 2018. D'après le MNT du 8 octobre, le volume de cette recharge situé du profil n° 19 au profil n° 22 est de 1090 m³. On observe ensuite d'octobre à novembre un bilan positif d'environ 4000 m³ comprenant une accrétion de 9500 m³. Une petite partie de cette accrétion peut être expliquée par la redistribution de 550 m³ de la recharge qui s'est fait partiellement éroder lors des tempêtes du 28 octobre et du 10 novembre.

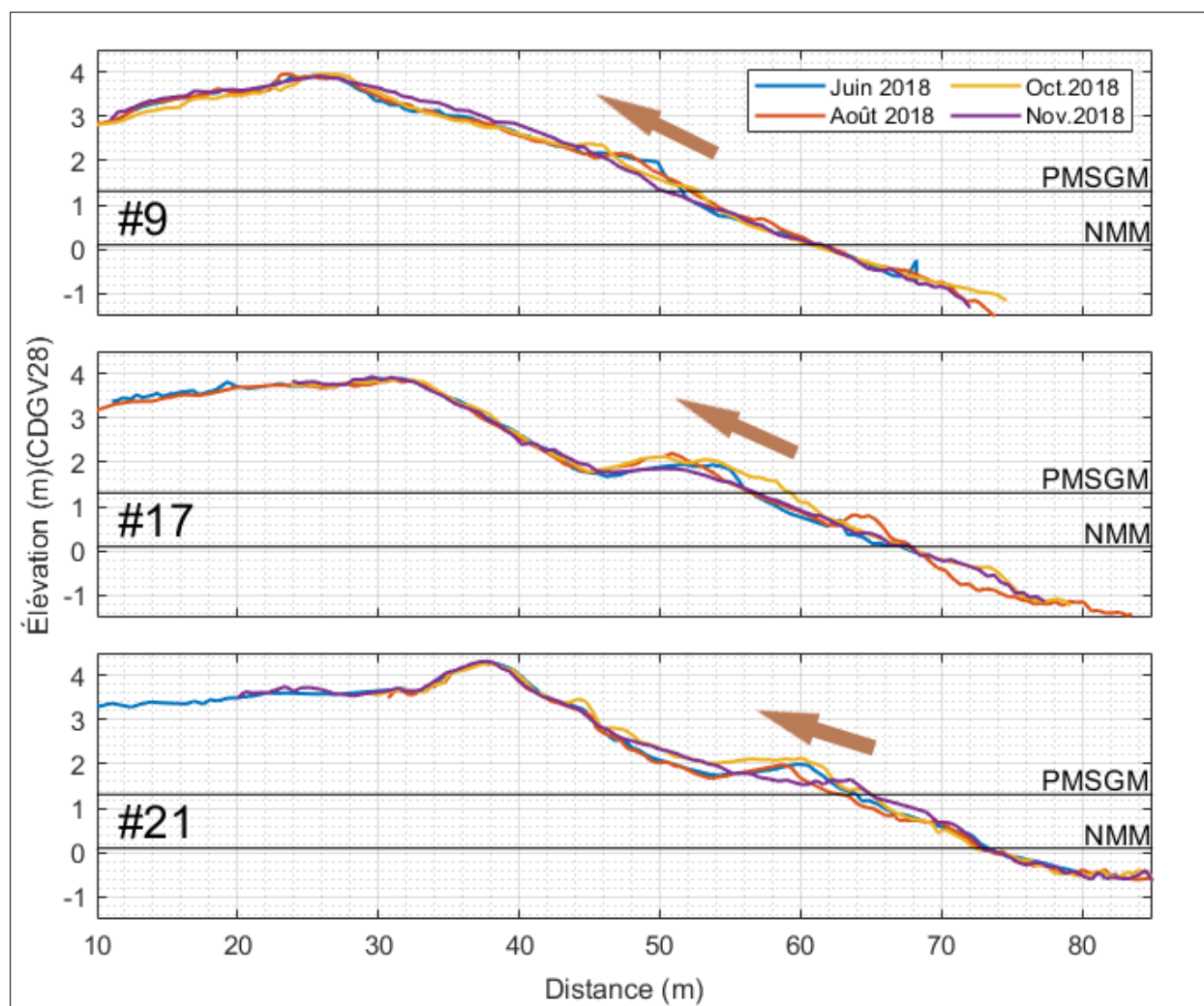


Figure 57. Évolution des profils n° 9, 17 et 21 en 2018 localisés sur le site d'étude à Cap-des-Rosiers.

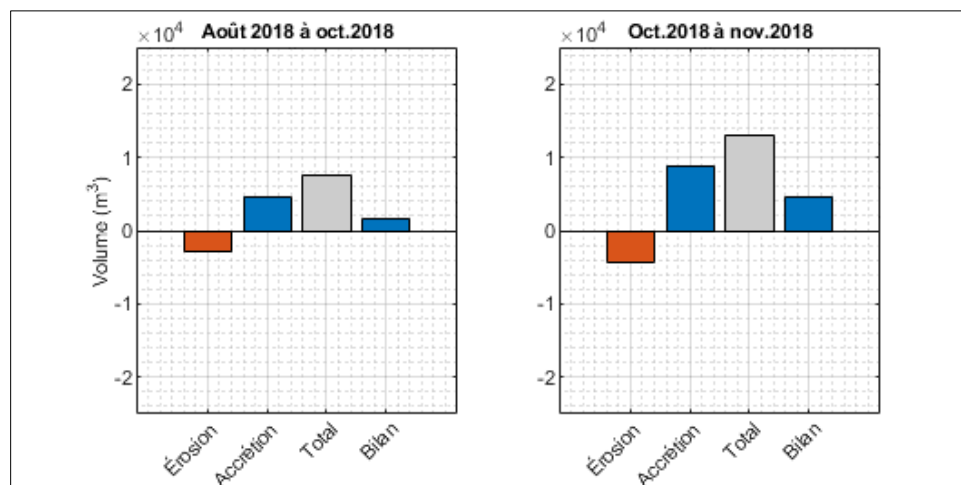


Figure 58. Bilans sédimentaires représentant l'évolution saisonnière de 2018 du site d'étude à Cap-des-Rosiers. Les bilans ont été créés à partir des différentiels de MNT du 11 août, du 8 octobre et du 26 novembre 2018. Les différentiels sont disponibles en annexe.

L'évolution de la recharge de plage, identifiée par les flèches noires, atteste d'un rehaussement de la plage de l'ordre de 0,40 m à 0,75 m selon le profil (figure 59). Entre octobre et novembre 2018, à la suite des tempêtes du 28 octobre et du 10 novembre, on observe l'érosion d'une grande partie de la recharge sur les trois profils.

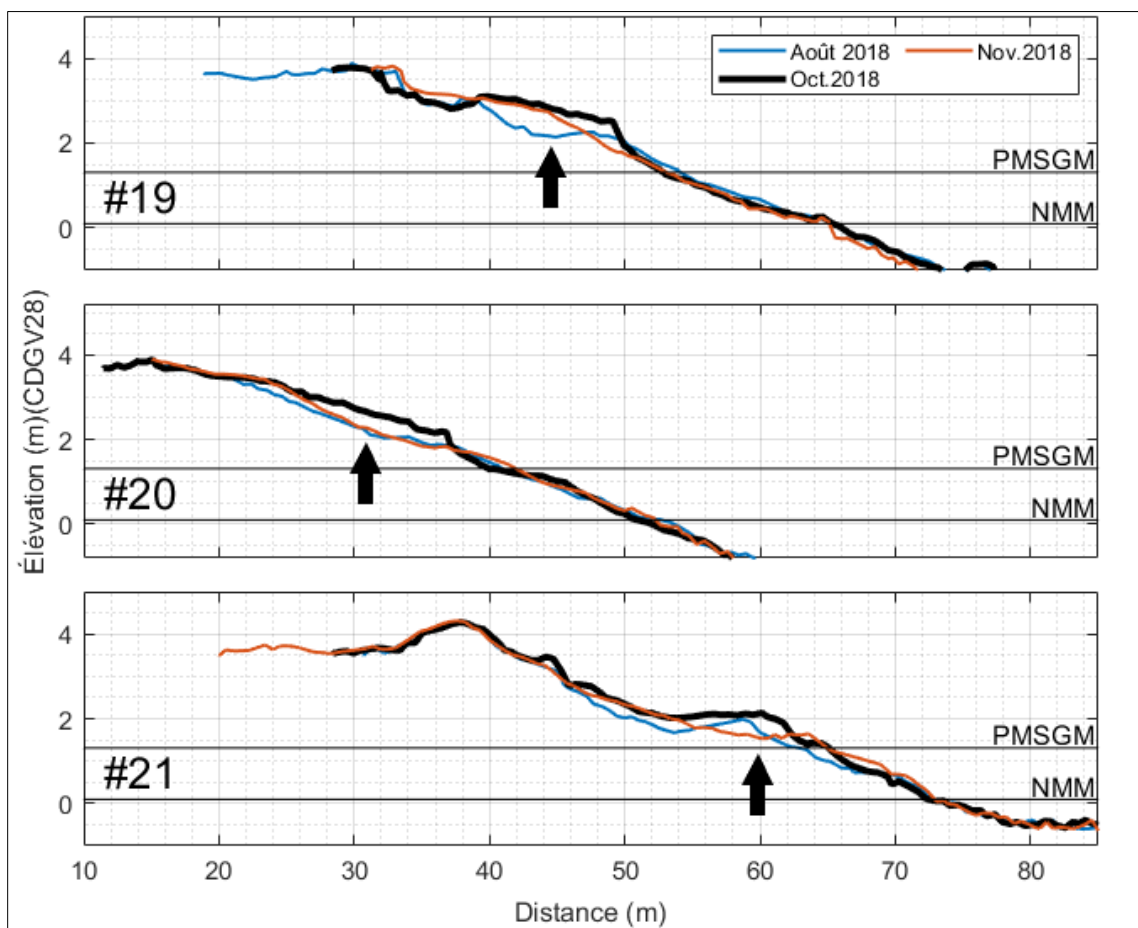


Figure 59. Suivi de l'évolution de la recharge de plage du 19 septembre 2018 à partir des profils de plage.

4.1.3.3.3 Suivi de 2019

L'année 2019 marque la première année sans intervention anthropique à Cap-des-Rosiers depuis 2016. L'année est également marquée par un climat de vague moins énergétique et une diminution des tempêtes hautement morphogènes.

On observe un bilan sédimentaire négatif entre mai et juin 2019, un bilan légèrement positif entre juin et juillet et un bilan presque nul entre juillet et septembre 2019 (figure 60). Bien que le bilan soit nul, le total de la variabilité des sédiments est de 10 000 m³. Ce sédiment a été mobilisé en grande partie par le passage de l'ouragan Dorian. L'événement s'est avéré morphogène même s'il n'a pas engendré de franchissement (NET=2,70 m).

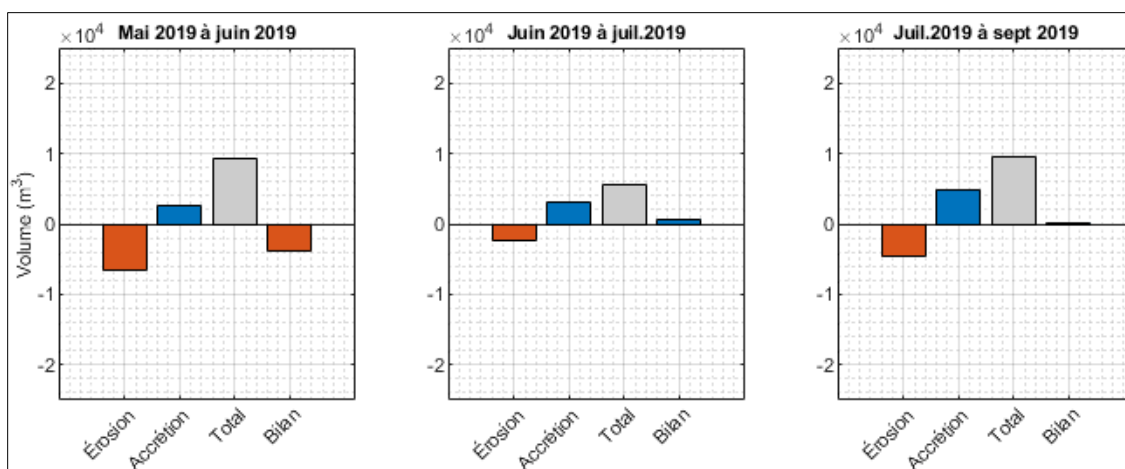


Figure 60. Bilans sédimentaires représentant l'évolution saisonnière de 2019 du site d'étude à Cap-des-Rosiers. Les bilans ont été créés à partir des différentiels de MNT du 3 mai, du 7 juin, du 5 juillet et du 28 septembre 2019. Les différentiels sont disponibles en annexe.

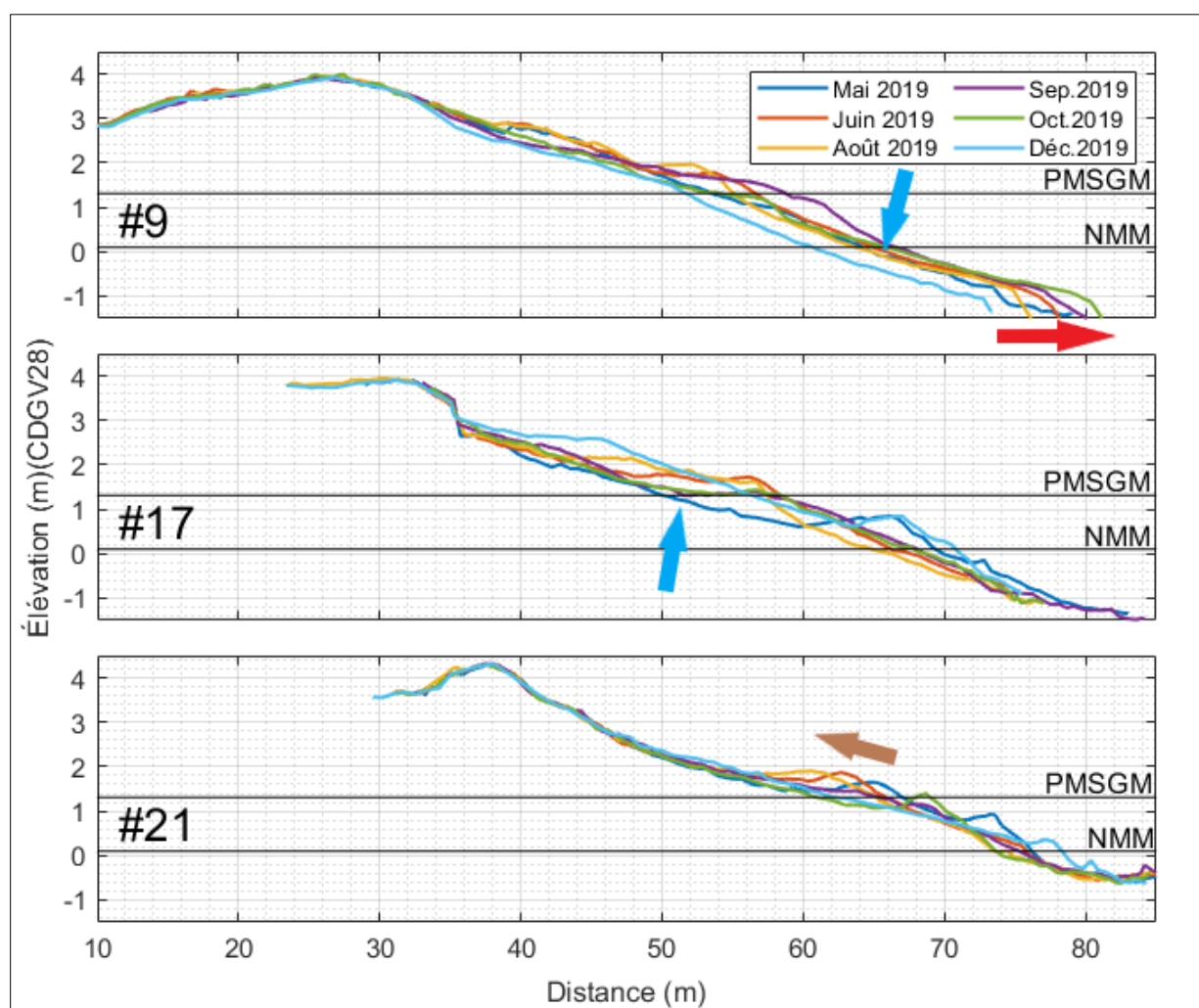


Figure 61. Évolution des profils n° 9, 17 et 21 en 2019 localisés sur le site d'étude à Cap-des-Rosiers.

L'évolution du profil de plage en 2019 soutient une évolution nette de la limite inférieure de la plage au profil n° 9, qui s'avance graduellement vers la mer entre mai et octobre (flèche rouge) avant de reculer vers les terres en décembre (figure 61). Entre mai et juin et sur l'ensemble des profils, on observe la formation d'une berme au-dessus du niveau de la PMSGM. Cette berme va ensuite migrer vers les terres jusqu'en août. Entre août et septembre, l'ouragan Dorian vient éroder la berme sur l'ensemble des profils. La berme du profil n° 9 sera reformée au niveau de la PMSGM. Le profil n° 21 illustre bien la séquence de dynamique de berme, soit la migration vers les terres jusqu'en août (flèche brune) suivie par une érosion en septembre, la reformation de la berme en octobre et la migration vers la mer en décembre. Entre octobre et décembre 2019, un événement fortement morphogène (NET = 3,9 m) entraîne une érosion du bas de plage au profil n° 9 et une accumulation au profil n° 17 (flèches bleues).

4.1.3.4 Comparaison avec le site témoin

Le bilan sédimentaire sur le site d'étude précédant le démantèlement se situe entre 19 et 39 m^3/m linéaire (figure 62). Suivant le démantèlement, le bilan du site d'étude subit une très forte croissance, passant de 36 à 128 m^3/m linéaire. En 2017, le bilan du site d'étude varie entre 106 et 120 m^3/m linéaire. En 2018 et 2019, le bilan est plus stable et varie entre 110 et 120 m^3/m linéaire. Sur le site témoin, les valeurs du bilan se situent entre 75 et 111 m^3/m linéaire pour l'ensemble de la période de suivi. Pour le site d'étude, la moyenne pré et post-démantèlement est de 29 et 117 m^3/m linéaire, respectivement. Pour le site témoin, les moyennes sont de 97 et 93 m^3/m linéaire, respectivement. Finalement, on observe sur le deuxième graphique que les écarts entre les valeurs des sites d'étude et témoin sont plus petits après le démantèlement.

Sur le site d'étude, l'augmentation soudaine du bilan suivant le démantèlement est expliquée par l'augmentation considérable de la largeur de plage moyenne (figure 30).

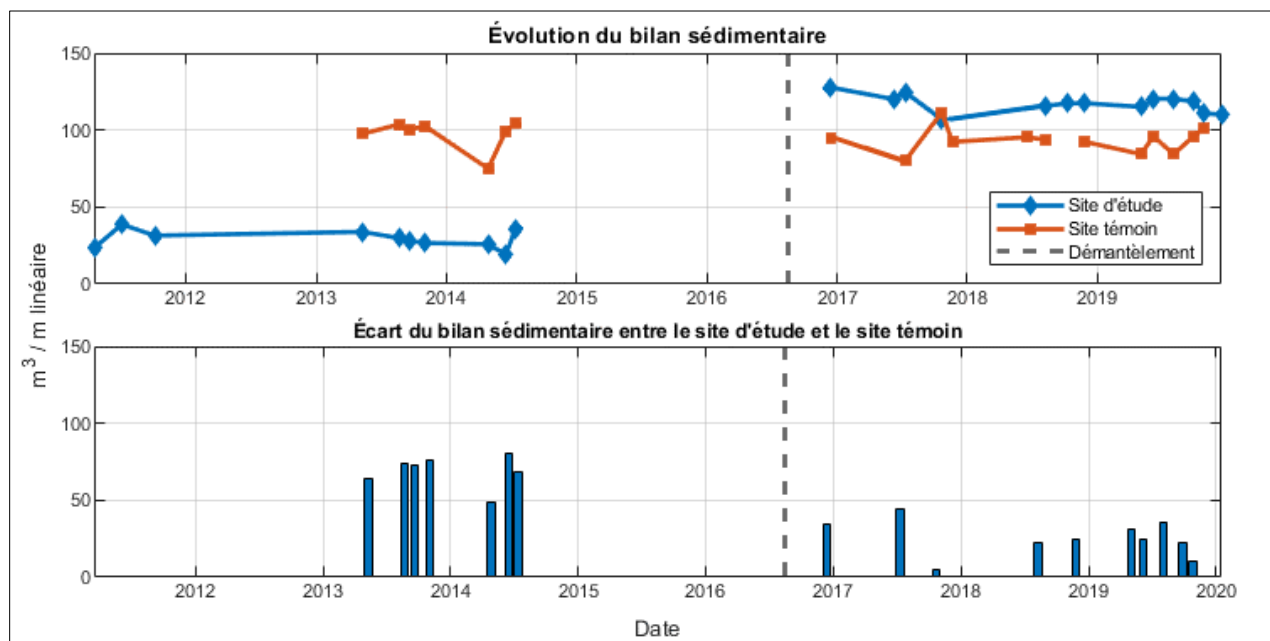


Figure 62. Évolution du bilan sédimentaire des sites d'étude et témoin de Cap-des-Rosiers créée à partir des profils de plage. Le trait vertical gris représente le début des travaux de démantèlement.

L'évolution de la pente de plage sur les sites d'étude et témoin illustre une diminution de la pente moyenne à la suite du démantèlement sur le site d'étude, contrairement au site témoin qui demeure plus stable (figure 63). En effet, pour le site d'étude, les moyennes des pentes pré et post-démantèlement sont respectivement de 0,13 et 0,10, alors que celles du site témoin sont toutes deux de 0,11. À la suite du démantèlement, les pentes du secteur d'étude sont constamment inférieures à celles du site témoin. Le graphique du bas (figure 63) indique que la variabilité de la pente entre les différents profils est majoritairement plus grande sur le site d'étude. Cette plus grande variabilité est expliquée par la présence de roc situé en bas de plage au sud du secteur d'étude, entraînant une plus grande variabilité entre les profils.

On observe également une grande variabilité de la pente du site d'étude en 2016 et 2017. Cette variabilité est expliquée par les tempêtes du 31 décembre 2016 et du 4 janvier 2017 et par le reprofilage mécanique du cordon en haut de plage le 19 octobre 2017. Les tempêtes ont considérablement abaissé le profil de plage (figure 46), résultant en des pentes plus faibles. Le reprofilage mécanique a, quant à lui, recréé une pente plus raide. En 2018 et 2019, la pente semble se stabiliser près de 0,1.

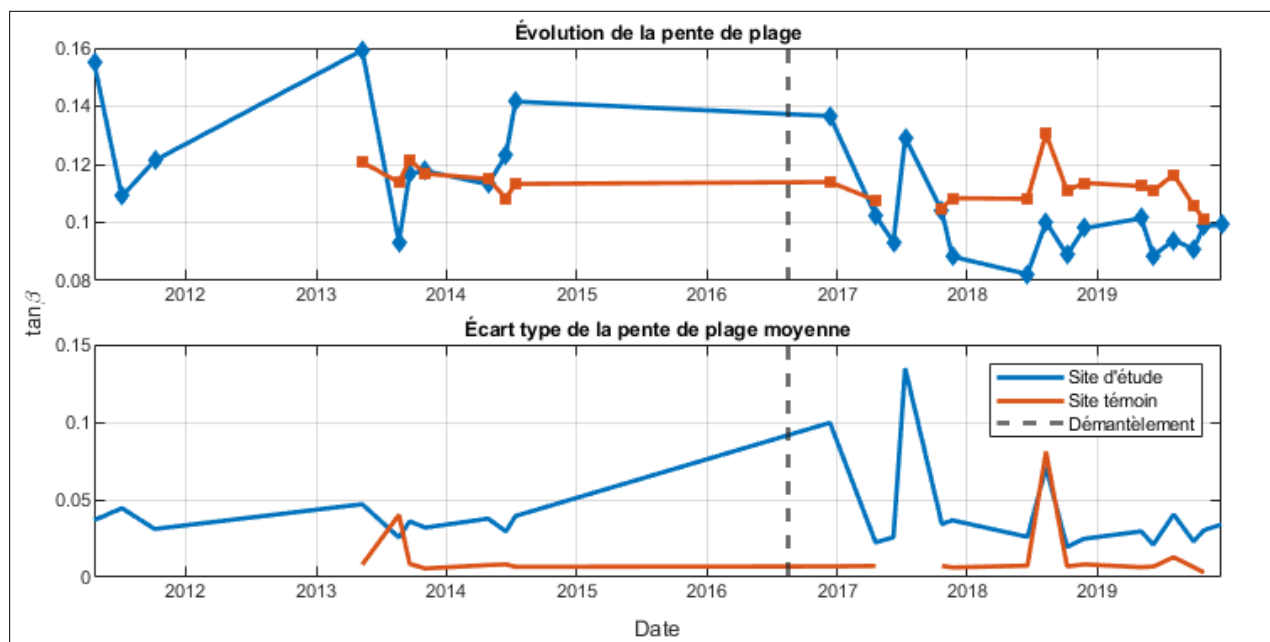


Figure 63. Évolution des pentes moyennes de plage des sites d'étude et témoin de Cap-des-Rosiers créée à partir des profils de plage. Le trait vertical gris représente le début des travaux de démantèlement.

4.1.4 Conclusion des résultats pour le suivi de la renaturalisation d'une plage

4.1.4.1 Évolution de la plage du site d'étude à travers les années

Depuis 1963 et jusqu'au démantèlement, on observe une diminution de la largeur de plage (figure 30). Cette diminution résulte de la présence d'ouvrages de protection implantés pour lutter contre l'érosion en 1963 et de la remontée du niveau marin depuis la fin des années 80 (Gibeault et al., 2016 ; Bernatchez & Fraser, 2012 b ; Griggs, 2005). Avant le démantèlement, la plage avait une largeur moyenne de 26,1 m, sauf sur une zone où une section de route et d'enrochement avait été démantelée en 2011 (figure 32). De 2011 à 2014, le bilan sédimentaire, qui est proportionnel à la largeur de plage, est faible avec une moyenne de $29 \text{ m}^{\text{in}^3\text{s}}/\text{m}$ (figure 62).

En 2016 débutent les travaux majeurs de démantèlement qui prendront fin à la mi-décembre. Environ 1300 m de route et d'enrochements sont démantelés. Au nord du site d'étude, 200 m d'enrochement restent toujours à être démantelés (figure 41). Par la suite, deux tempêtes fortement morphogènes frappent la côte avant l'arrivée des glaces et engendrent une érosion majeure de la plage. Un talus d'érosion exposant le matériel de remblai de l'ancienne route est visible sur l'ensemble du haut de plage (figure 46 et figure 64).



Figure 64. Photo du talus d'érosion prise lors de la campagne de terrain du 8 juin 2017.

L'année 2017 est marquée par le démantèlement des derniers 200 m d'enrochement, par la reconfiguration d'un enrochement situé au nord de la plage située à l'extérieur du site d'étude et par le reprofilage mécanique de la plage le 19 octobre. Le bilan sédimentaire neutre durant la période estivale devient négatif à l'automne (figure 55 et figure 62). Le cordon littoral est profilé à l'aide d'une pelle mécanique pour déconsolider le matériel en haut de plage, qui avait été compacté pour établir la route et pour recréer une pente homogène. Le matériel est donc déposé en avant du talus d'érosion entraînant une diminution de l'élévation du cordon (figure 56 et figure 65).



Figure 65. Photos illustrant les modifications du profil n° 9 avant et après le reprofilage mécanique du 19 octobre et suivant la tempête du 30 octobre, enregistrées respectivement les 11 octobre, 28 octobre et 1^{er} novembre 2017.

En 2018, des recharges de plages et des reprofilages sont effectués sur la plage, ce qui marque la fin des travaux de renaturalisation à Cap-des-Rosiers (figure 41). Le volume pour les deux recharges totalise environ 6800 m³. La première recharge, évaluée à 1090 m³, a été effectuée le 19 septembre et a été en grande partie érodée lors de la tempête du 30 octobre (figure 59 et figure 66). La deuxième recharge d'environ 5900 m³ a été effectuée du 11 au 13 décembre. En 2018, le bilan sédimentaire est positif pour la période entre août et novembre 2018 (figure 58 et figure 62). Bien que la recharge ait contribué à l'accrétion, elle n'explique pas la totalité du bilan positif de 2000 m³ entre la période d'août à octobre.

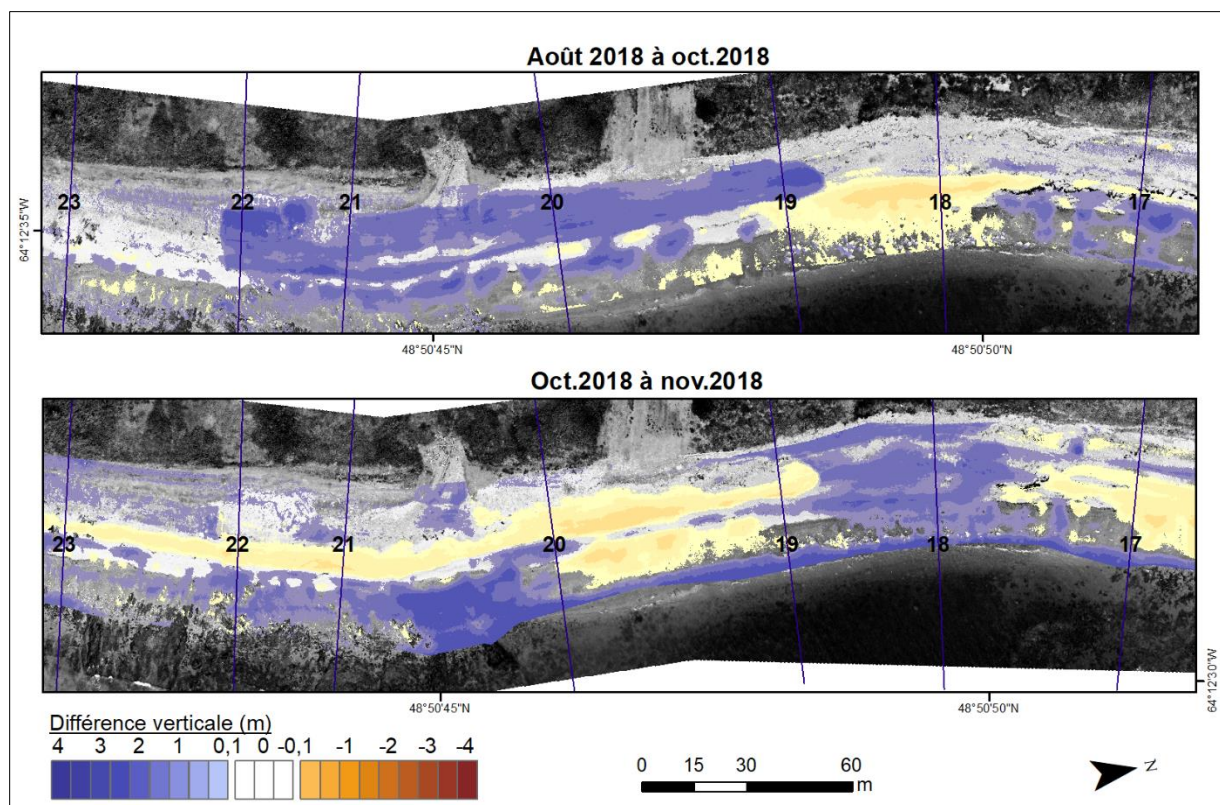


Figure 66. Suivi de l'évolution de la recharge de plage du 19 septembre 2018 à partir des différentiels d'élévation. La recharge correspond à la zone bleue située du profil n° 19 au n° 22 dans le différentiel du haut (août 2018 à oct. 2018).

L'année 2019 représente la première année sans travaux sur la plage du site d'étude depuis 2016. De plus, le régime de vagues est moins énergétique (figure 37). Le bilan sédimentaire est stable de mai à décembre tout en connaissant une légère baisse en octobre (figure 62). Il est à noter que pour la période de mai à juin, les bilans calculés à l'aide de la photogrammétrie sont négatifs (figure 60) alors que les bilans calculés à l'aide des profils sont positifs (figure 62). Cette divergence est créée par le fait que les profils au DGPS sont mesurés jusque dans l'espace infralittoral, où il y a des échanges sédimentaires, alors que la photogrammétrie telle que nous l'avons mise en œuvre ne permet pas d'effectuer de mesures topographiques sous l'eau. Les profils prennent ainsi en compte l'accumulation entre mai et juin dans la zone infralittorale comme démontré par le profil n° 9 à la figure 61.

Durant toute la période d'étude, la partie sud du site d'étude est moins dynamique que la partie nord. Les variations des bilans sédimentaires de cette partie sont relativement neutres, tel que démontré dans la variabilité du trait de côte entre les profils n° 25 à 36 (figure 54) et par les différents différentiels d'élévation (annexe 5). Nous attribuons cela à la présence de roc sur une grande partie de l'espace infralittoral et l'estran qui entraîne des morphodynamiques de moins grandes amplitudes. De plus, la présence de la plateforme rocheuse et du quai perturbe le transit sédimentaire et crée un déficit de sédiments plus fins dans la partie sud (figure 67).

4.1.4.2 Réponse de la plage aux tempêtes

Plusieurs tempêtes morphogènes ($NET > 3,5$ m) sont survenues dans la période après démantèlement, soit trois événements lors de la saison 2016, quatre en 2017, quatre en 2018 et un seul en 2019.

Les tempêtes du 30 décembre ($NET = 6,5$ m) et du 4 janvier ($NET = 5,7$ m) ont été les plus importantes durant la période d'étude post-démantèlement. Elles ont occasionné une érosion majeure en haut de plage avec un abaissement de plus de 1,75 m par endroits (figure 46 et figure 47) et créé un talus d'érosion dans le haut de plage constitué de matériel de remblai consolidé (figure 64). Le talus d'érosion est formé sur l'ensemble du cordon et est visible sur la deuxième photo de la figure 45. Les tempêtes provoquent également la formation de lobes de débordement et l'élargissement de deux brèches (figure 48).

La tempête du 30 octobre 2017 ($NET = 4,2$ m) survient 11 jours après le reprofilage mécanique du cordon. La tempête érode complètement le matériel redistribué en avant du talus d'érosion et sur le dessus du cordon par la pelle mécanique. La fondation de la route est de nouveau exposée (figure 65). Une partie du matériel érodé est redistribué sur les profils situés au sud, comme en témoigne l'accumulation de novembre sur les profils n° 17 et 21 (figure 56).

Les tempêtes du 28 octobre ($NET = 3,8$ m) et du 10 novembre 2018 ($NET = 3,7$ m) érodent partiellement la recharge effectuée le 19 septembre. La recharge est visible sur le différentiel du haut de la figure 66 du profil n° 19 au n° 22 et l'érosion de cette recharge par les tempêtes est visible sur le différentiel du bas. Par contre, le bilan sédimentaire créé à partir des MNT indique un bilan positif (figure 58) et le bilan créé à partir des profils est neutre (figure 62). Comme les MNT ne couvrent pas l'espace infralittoral et de déferlement des vagues, on peut en conclure que l'une des deux tempêtes a redistribué le sédiment accumulé en bas de plage pour le redistribuer sur le profil et ainsi créer un bilan neutre. Ce phénomène est observable sur le profil n° 9 d'octobre à novembre de la figure 57.



Figure 67. Carence en substrat fin ($D_{50} = 2,5 - 6,5$ mm) sur le profil n° 30 à gauche en comparaison avec le profil n° 9 à droite le 28 septembre 2019.

En 2019, un événement majeur ayant causé du franchissement (figure 68) est survenu le 25 novembre (NET = 3,9 m). Cet événement a causé une érosion sur certains profils et une accumulation sur d'autres (figure 61) résultant en un bilan sédimentaire neutre (figure 62).

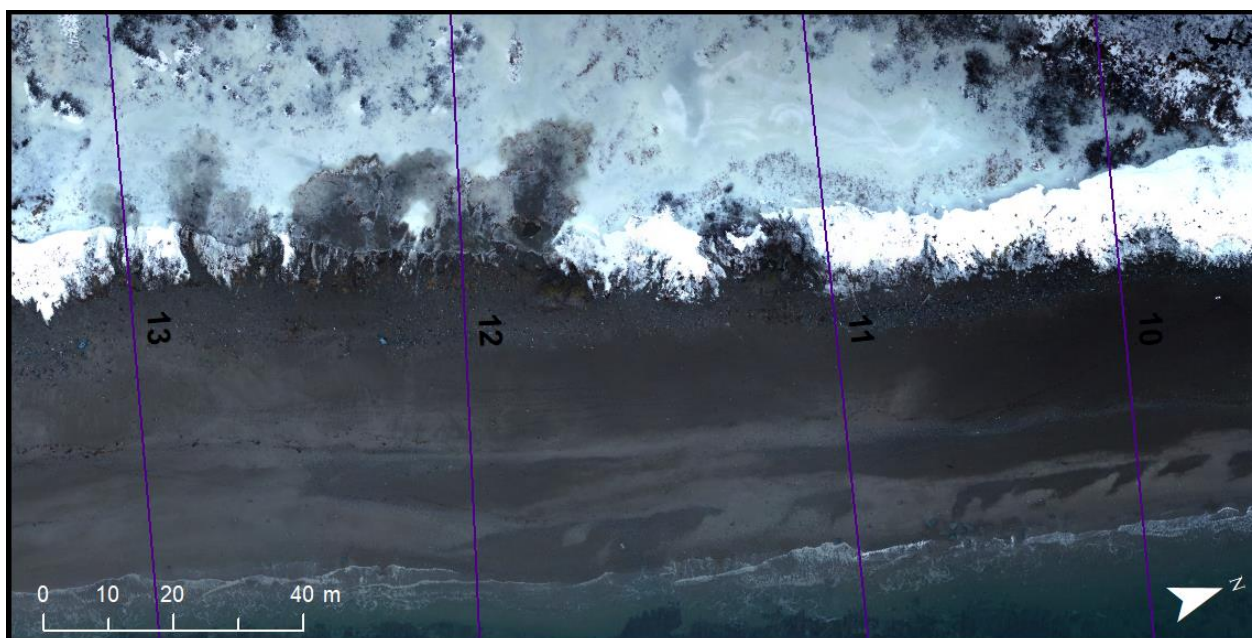


Figure 68. Représentation d'événements de franchissement sur le cordon lors de la tempête du 25 novembre 2019. Réalisé à partir de l'orthophotographie créée lors du levé de drone du 26 novembre 2019.

4.1.4.3 Comparaison avec le secteur témoin

Bien que le site d'étude et le site témoin soient près un de l'autre, qu'ils représentent tous deux des plages de gravier mixte et possèdent la même orientation, quelques différences existent entre les deux sites. Premièrement, le substrat est légèrement plus fin sur le site d'étude ($D_{50} = 9,5$ mm) en comparaison avec le site témoin ($D_{50} = 15,6$ mm) (figure 33). Cette différence est expliquée en partie par une énergie de vague à la côte plus faible sur le site d'étude lorsque la hauteur significative des vagues devient importante

(figure 38). La différence de vague à la côte est occasionnée par la bathymétrie de l'avant-côte (< 30 m) qui entraîne la dissipation de l'énergie des vagues de tempête provenant du sud-est sur une plus distance en avant du site témoin (annexe 4). Une granulométrie plus fine entraîne donc une pente légèrement plus abrupte sur le site d'étude (figure 63).

Le bilan sédimentaire est proportionnel à la largeur de plage. Dans la période précédant le démantèlement, la moyenne du bilan du site d'étude ($29,3 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire) est inférieure à celle du site témoin ($97,5 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire). Suivant le démantèlement, la moyenne du bilan du site d'étude ($117,3 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire) est supérieure à celle du site témoin ($93,5 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire) (figure 62). Des photos illustrant le site d'étude et le site témoin dans la période après le démantèlement sont présentées à la figure 69.



Figure 69. Photos de la plage, du site d'étude à gauche et du site témoin à droite, prisent le 28 septembre 2019.

4.2 SUIVI ENVIRONNEMENTAL DE TRAVAUX DE RECHARGEMENT DE PLAGE

4.2.1 Anse-aux-Coques

4.2.1.1 Caractérisation granulométrique

Sur le site de l'Anse-aux-Coques, 54 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 2015. Les résultats sont exprimés en ϕ (ϕ) au vu de la grande variabilité dans la taille des sédiments entre les sites. Les résultats démontrent que le site d'étude possède un D_{50} moyen de $0,42 \phi$, ce qui correspond à la classe du sable grossier. La distribution est unimodale, ce qui signifie que la granulométrie est plutôt homogène et suggère une seule source sédimentaire.

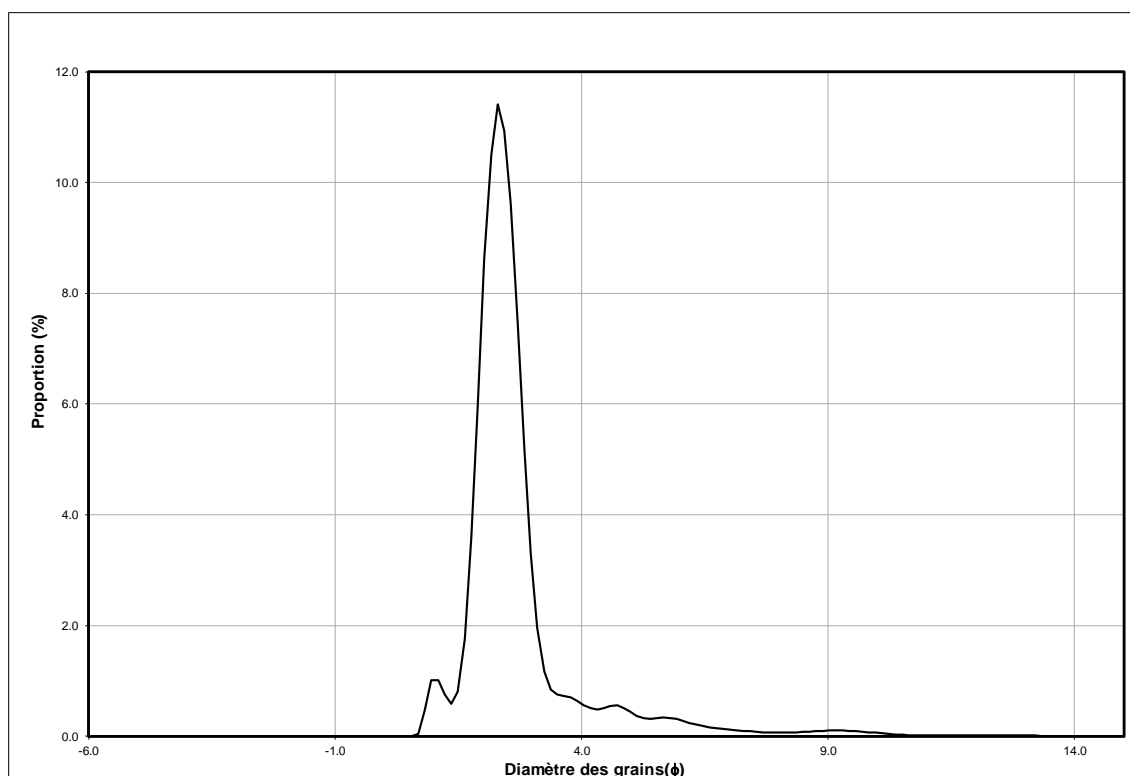


Figure 70. Distribution granulométrique de l'Anse-aux-Coques

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des échantillons est présentée avec les profils de plage dans la section 4.2.1.3.

4.2.1.2 Évolution historique (1963 à 2015)

La figure 71 présente l'évolution historique 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 protections étant fortement présentes sur les côtes de ce site d'étude, de nombreux secteurs se retrouvent sans calcul d'évolution.

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 d'évolution post-recharge (2012-2015), la vitesse de progradation de la ligne de rivage est en augmentation par rapport à la période d'évolution pré-recharge (1963-2012). La recharge a lieu en 2014. Il s'agit toutefois d'une tendance à court terme, ne couvrant que trois ans d'évolution. 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 71).

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

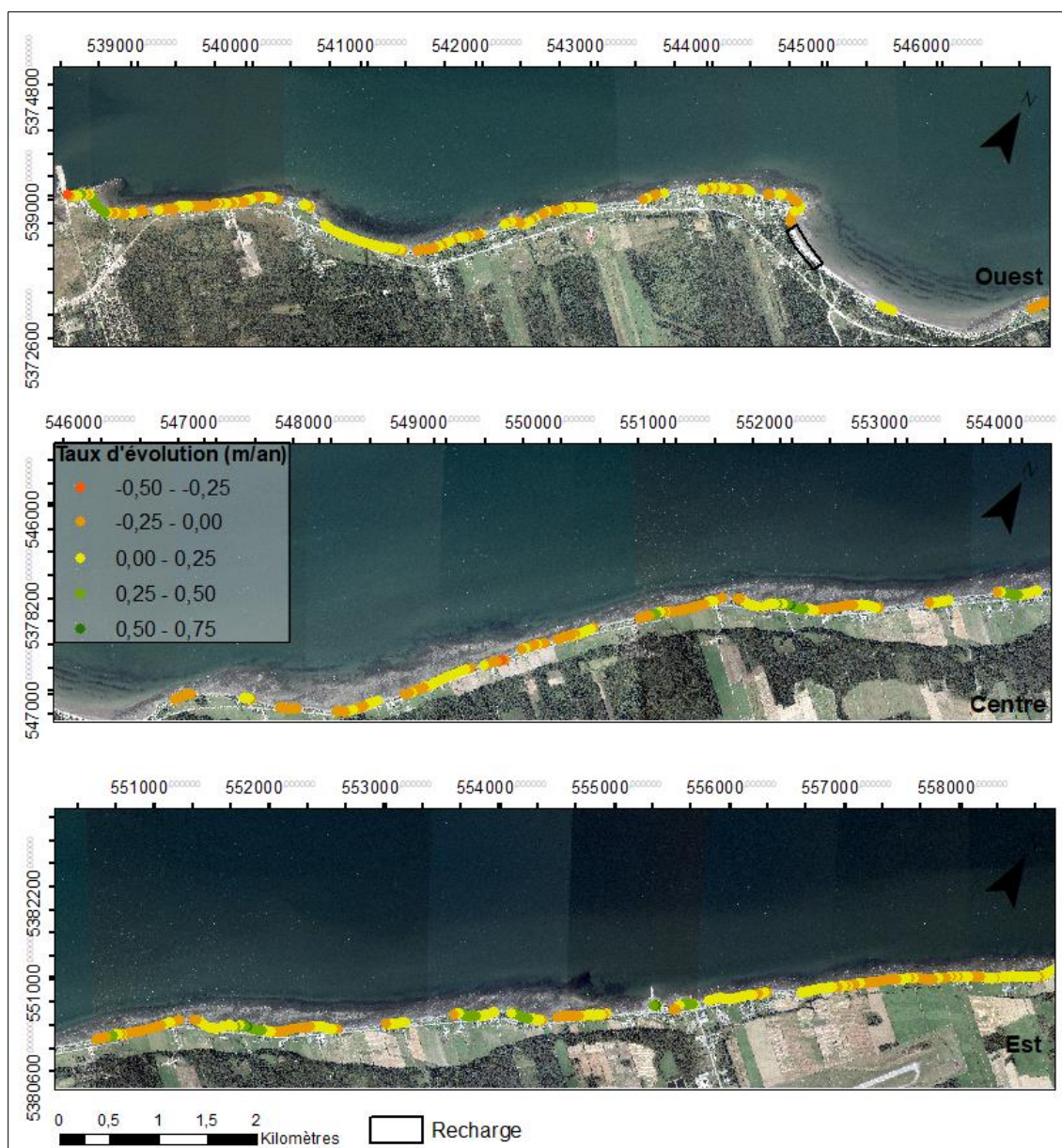


Figure 71. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de l'Anse-aux-Coques

La figure 72 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 représentent les années sans artificialité. L'évolution sans artificialité montre une avancée considérable de la ligne de rivage entre 1963 et 1976. Pour les années 1993, 2009 et 2012, la ligne de rivage représente la position du muret le long de la promenade. Le muret a probablement été mis en place à la suite d'un recul important, sa position étant plusieurs mètres plus près de la côte que 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, dont la limite inférieure devient l'indicateur de la ligne de rivage entre les transects 792 à 811.

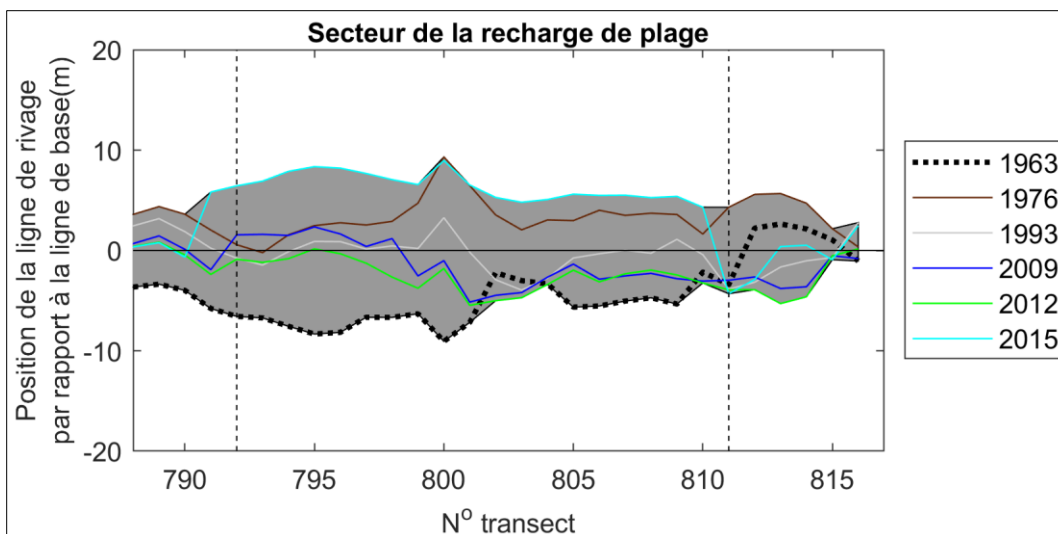


Figure 72. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques

4.2.1.3 Évolution du secteur de la recharge de plage de septembre 2012 à septembre 2019

Les changements morphologiques mesurés à l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019 montrent l'alternance de périodes excédentaires, déficitaires et de stabilité sur le plan des dynamiques sédimentaires.

Les périodes comprises entre septembre 2012 et octobre 2014 et entre juin 2016 et novembre 2017 montrent des bilans sédimentaires positifs (figure 73). Le bilan de la première période présente un excédent sédimentaire de $\pm 9\,530\text{ m}^3$ (sur un total de $\pm 13\,570\text{ m}^3$ de sédiment mobilisés). Il s'explique par les travaux de rechargement en sédiments à hauteur de $11\,200\text{ m}^3$ qui ont été effectués en octobre 2014. Le relevé de la plage avait été effectué au moment des travaux pour pouvoir bénéficier d'un état zéro du secteur rechargé. La seconde période (juin 2016 - novembre 2017) est caractérisée par un bilan positif de $\pm 1\,050\text{ m}^3$ (sur un total de $\pm 1\,100\text{ m}^3$ de sédiments mobilisés). Là encore, la plage avait fait l'objet d'une recharge sédimentaire à hauteur de $1\,000\text{ m}^3$.

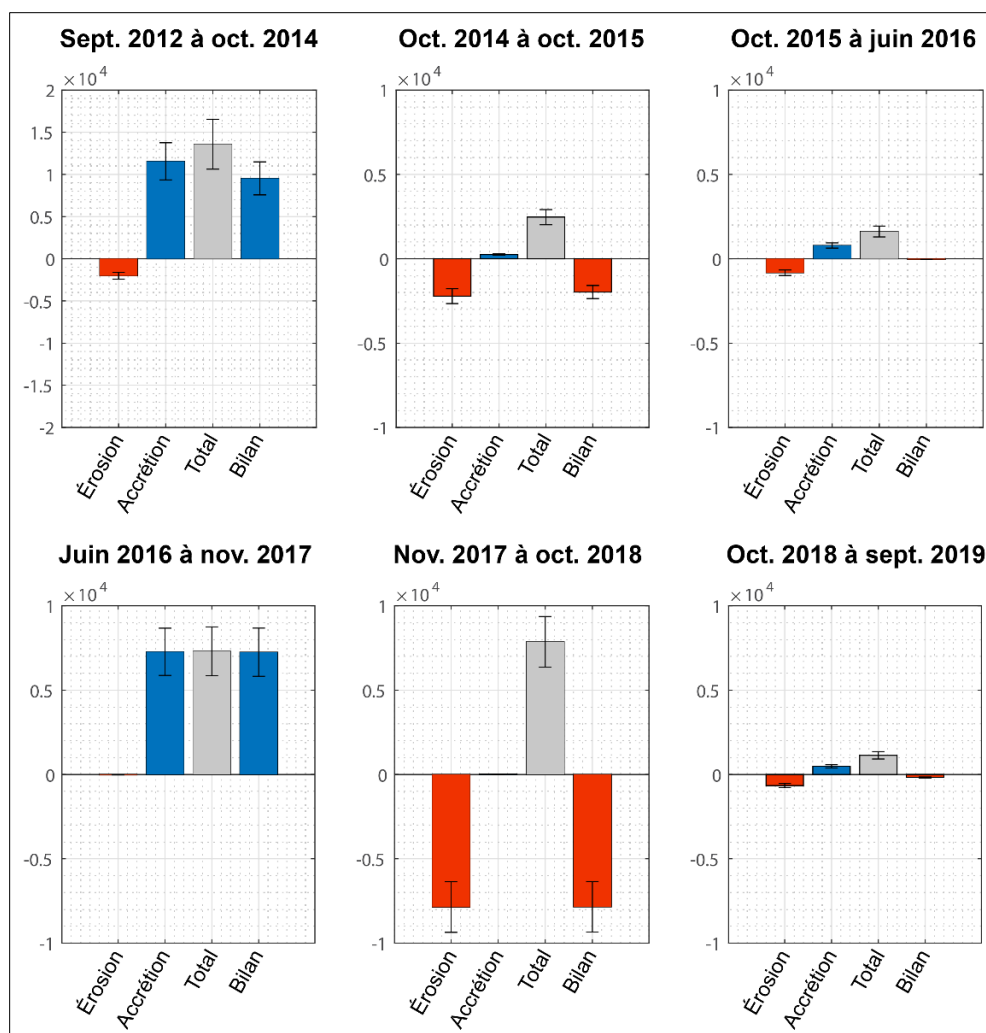


Figure 73. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019.

La période consécutive aux travaux de la recharge initiale a été marquée par un important déficit sédimentaire (figure 73). Entre octobre 2014 et octobre 2015, le secteur à l'étude a présenté un bilan déficitaire de $\pm 1\,970\text{ m}^3$ (sur un total de $\pm 2\,460\text{ m}^3$ de sédiment mobilisés). L'encadré relatif à cette période, sur la figure 74, montre que ce bilan résulte essentiellement de l'érosion des sédiments apportés lors de la recharge d'octobre 2014. Il en va de même pour la période comprise entre novembre 2017 et octobre 2018.

Les autres périodes sont caractérisées par des dynamiques sédimentaires de moindre envergure. Les bilans des périodes comprises entre octobre 2015 et juin 2016 et entre octobre 2018 et septembre 2019 témoignent d'un équilibre sédimentaire. Il faut toutefois noter que cet équilibre est artificiel puisque la plage a fait l'objet de recharges ponctuelles en 2015 et en 2018.

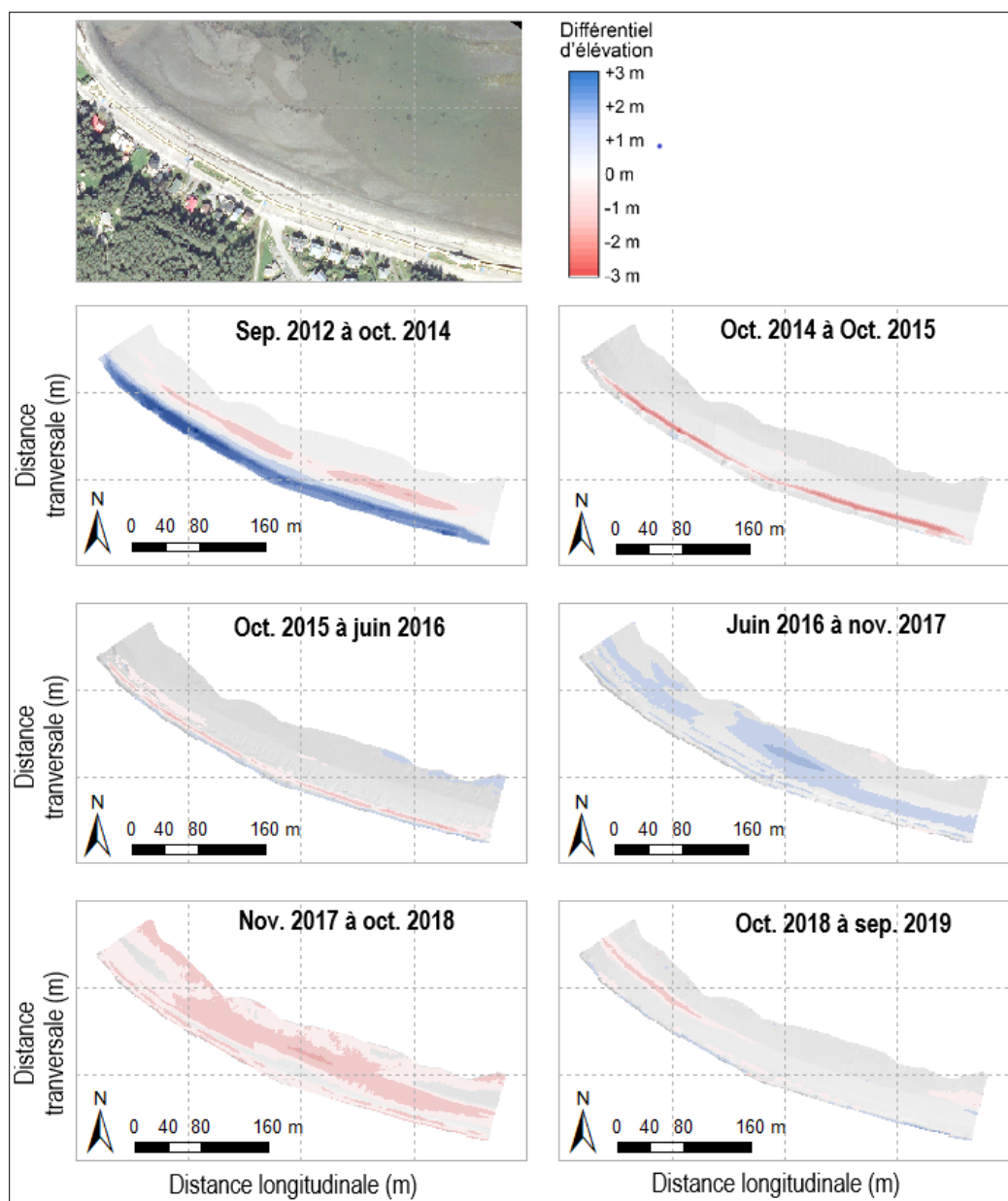


Figure 74. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge de l'Anse-aux-Coques entre septembre 2012 et septembre 2019.

L'analyse des profils de l'Anse-aux-Coques s'effectue sur les profils n° 1, 5, 9 et 13. Sur le profil n° 1, situé à l'ouest de la recharge, on peut observer la mise en place d'un cordon à 100 m de la ligne de rivage entre le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019. Celui-ci migre vers la côte entre le 18 mai et le 7 août 2019 avant de se stabiliser jusqu'au 11 décembre 2019 (figure 75). La plus grande enveloppe de mobilité du profil est causée par ce cordon (figure 76).

Une légère mobilité est visible sur le haut estran, correspondant à un abaissement du profil entre le 13 juin 2017 et le 5 mai 2018, puis un exhaussement au 7 août 2019 qui ramène le profil à sa position initiale (figure 75). Le NMM atteint la barre sableuse à ± 100 m de la ligne de rivage à partir de 2017. Ensuite, le niveau atteint le bas estran près de la flexure vers 50 m. Le PMSGM atteint la partie supérieure du haut estran. Dans l'ensemble, le profil présente peu de mobilité (figure 76). 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 deux pics de variabilité. Le premier sur le bas estran, à l'endroit de la formation de la barre sableuse, et le second sur la partie supérieure du bas estran (figure 75). L'écart-type couvre l'entièreté de l'enveloppe de variabilité, ce qui indique que l'ensemble des profils se situent dans une distribution normale des données. Finalement, la taille médiane des sédiments est plus grossière sur le haut estran et plus fine sur le bas estran (figure 76). Le haut estran est constitué de sable moyen, la flexure de graviers très fins et le bas estran de sables fins à limons fins.

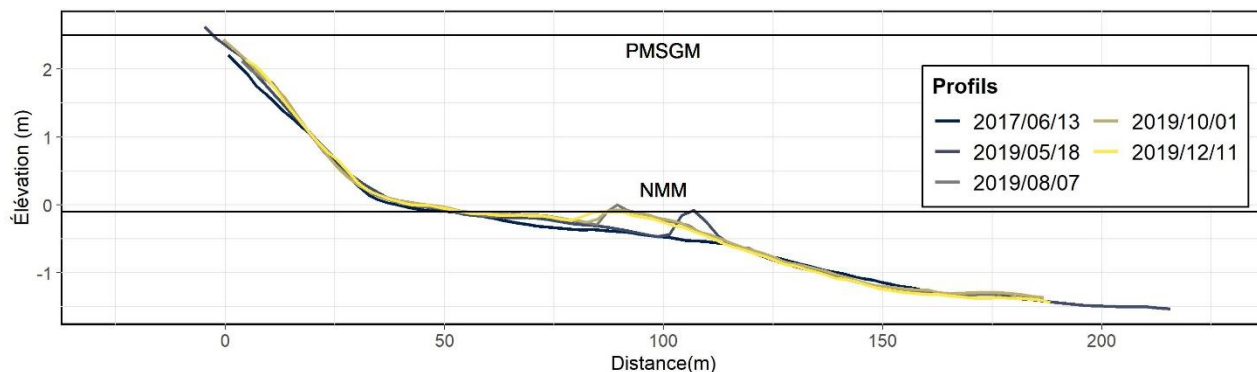


Figure 75. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 1 du 13 juin 2017 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

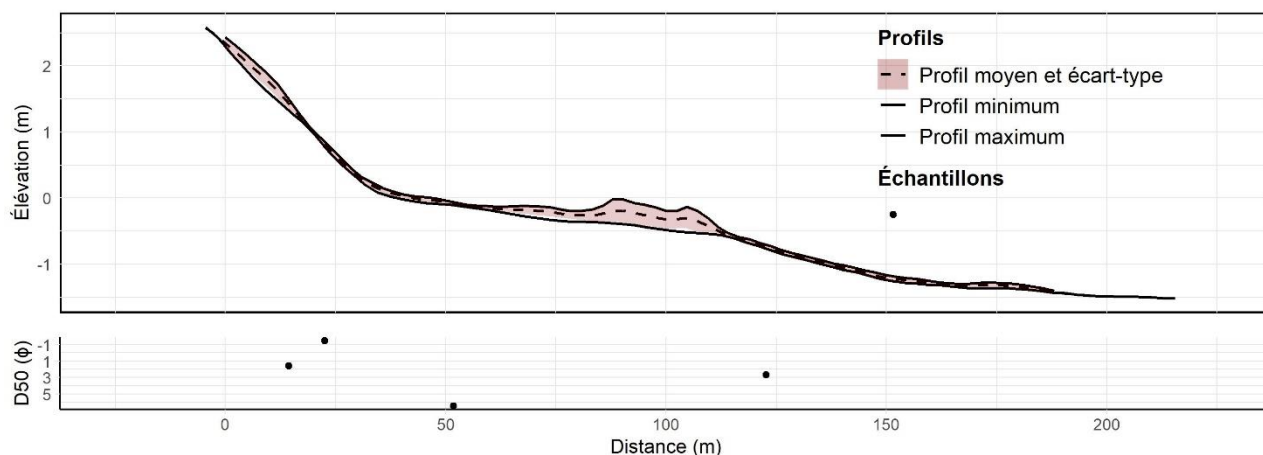


Figure 76. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 1 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 13, situé à l'est de la recharge, affiche un exhaussement sur le haut estran, particulièrement près de la flexure entre le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019, puis reste constant jusqu'au 11 décembre 2019 (figure 77). 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 78). 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 75). 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 se situe à plus d'un écart-type de la moyenne. Ceci est attribuable au levé de 2017 qui

est beaucoup plus bas à la flexure que les autres levés. Finalement, la taille médiane des sédiments est plus grossière sur le haut estran et plus fine sur le bas estran (figure 78). Le haut estran est constitué de sable très grossier et de graviers très fins et le bas estran, de sables fins.

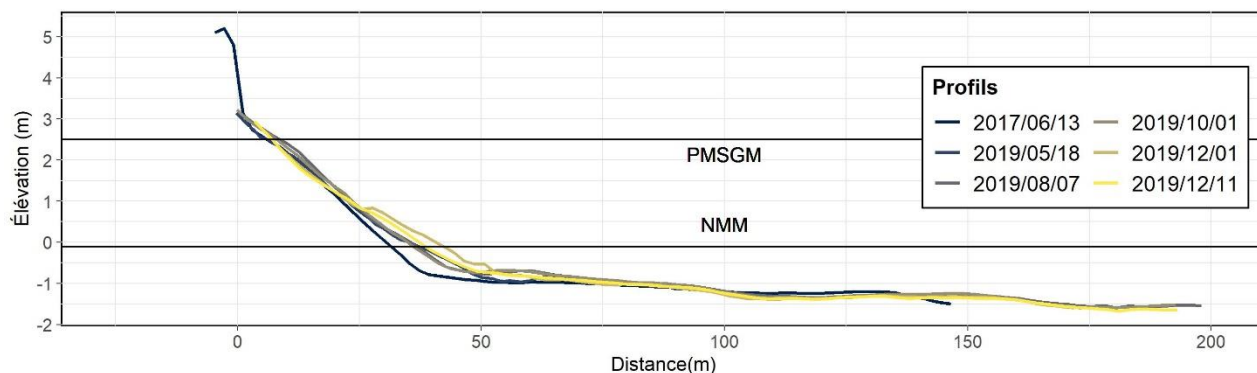


Figure 77. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 13 du 13 juin 2017 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

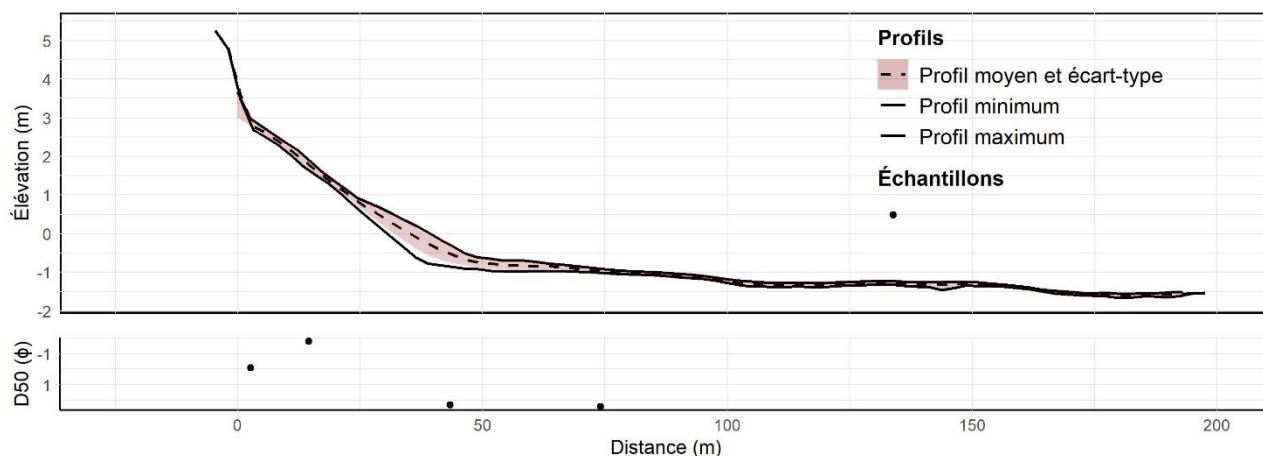


Figure 78. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 13 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Sur le profil n° 5, situé sur la recharge, un exhaussement important de la partie supérieure du haut estran est visible entre le 15 septembre 2012 et le 13 juin 2017 (figure 79). Cet exhaussement correspond à la mise en place de la recharge en 2014. Entre le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019, le profil s'abaisse sur le haut estran près de la flexure, puis reste constant jusqu'au 11 décembre 2019. À noter que la plage a fait l'objet d'une recharge d'entretien en 2017. Pour cette même période, la flexure passe de ± 55 m à ± 40 m de la ligne de rivage, réduisant la largeur de la 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. Le profil est très stable sur le bas estran, mais le haut estran affiche une enveloppe de mobilité de $\pm 0,5$ m à 1 m (figure 80).

Le NMM atteint le haut estran vers la flexure et le PMSGM la partie supérieure du haut estran (figure 79). 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 79). L'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur l'ensemble du bas estran et de la flexure, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une distribution normale des données à la flexure et sur le bas estran. Toutefois, l'enveloppe de la partie supérieure 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 rehaussement irrégulier du haut estran. Finalement, la taille médiane des sédiments est plus grossière sur le haut estran et plus fine sur le bas estran (figure 80). Le haut estran est constitué de sable moyen et de gravier fin plus près de la flexure et le bas estran, de sables fins.

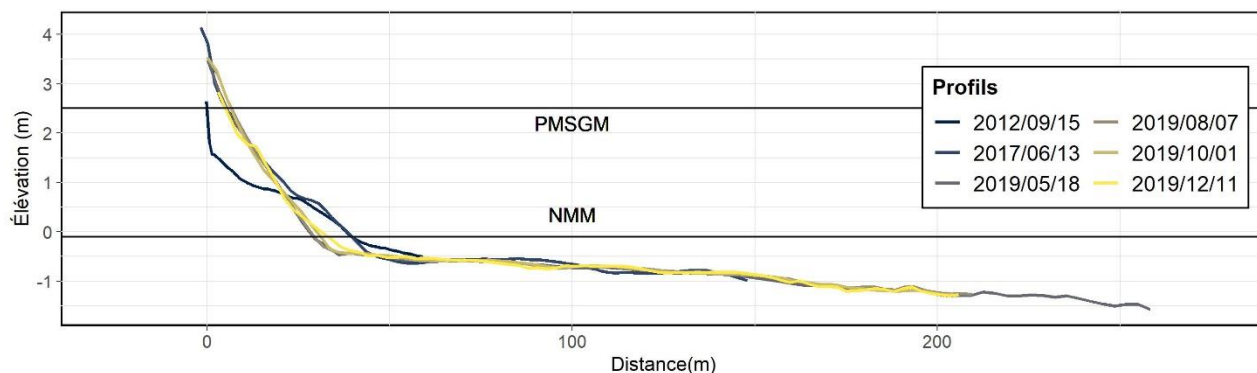


Figure 79. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 5 du 13 juin 2017 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

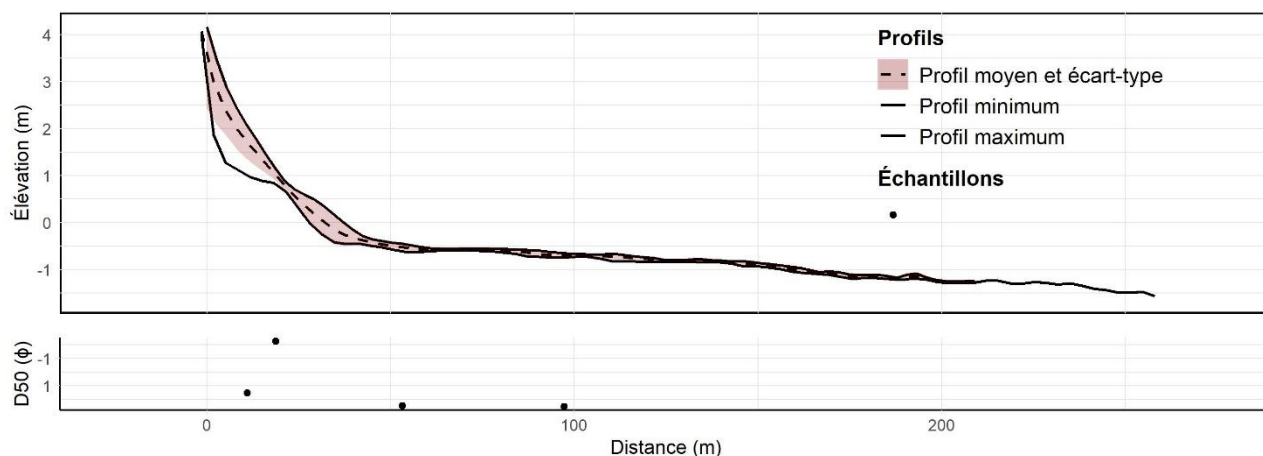


Figure 80. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 5 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Sur le profil n° 9, situé sur la recharge, un exhaussement important de la partie supérieure du haut estran est visible entre le 15 septembre 2012 et le 13 juin 2017 (figure 81). 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 le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019, le profil s'abaisse sur le haut estran près de la flexure, puis reste constant jusqu'au 11 décembre 2019. À noter que la plage a fait l'objet d'une recharge d'entretien en 2017. Sur le bas estran, il y a migration des cordons et de la flexure vers la côte entre le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019 (figure 82). La position de la flexure se déplace ± 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 50 m de la ligne de rivage, ce qui suggère une largeur de plage moyenne d'environ 50 m.

En résulte une enveloppe de mobilité de $\pm 0,5$ à 1 m sur le haut estran (figure 82). 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 81). 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 79). L'écart-type couvre l'enveloppe de variabilité sur l'ensemble du bas estran et de la flexure, ce qui indique que l'ensemble des profils s'approchent d'une

distribution normale des données à la flexure et sur le bas estran. Toutefois, l'enveloppe de la partie supérieure du haut estran se situe à plus d'un écart-type de la moyenne. Cet écart est aussi attribuable à la mise en place de la recharge en 2014. Finalement, la taille médiane des sédiments est plus grossière sur le haut estran et plus fine sur le bas estran (figure 82). Le haut estran est constitué de gravier fin et très fin plus près de la flexure. Le bas estran est constitué de sables fins.

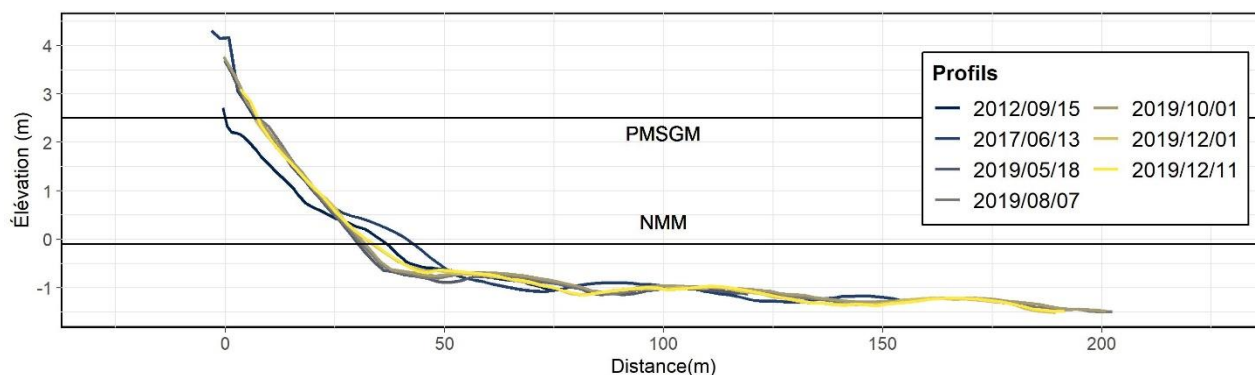


Figure 81. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 13 juin 2017 au 11 décembre 2019 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

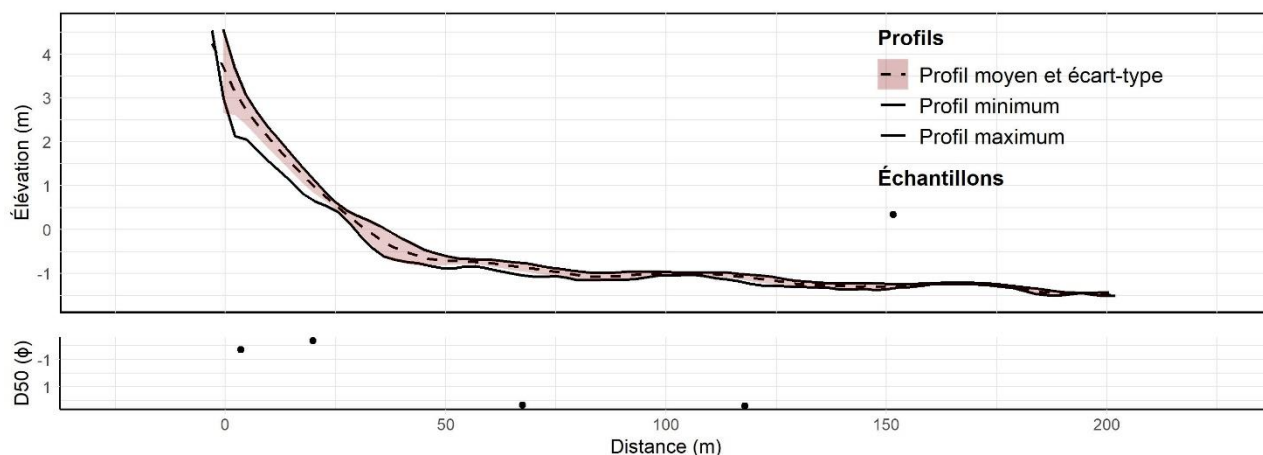


Figure 82. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 à l'Anse-aux-Coques. La référence altimétrique est le CGVD28.

Afin d'analyser les variations des largeurs de plages, le site de l'Anse-aux-Coques a été subdivisé en quatre secteurs. Le secteur 1 est situé à l'ouest du site et comprend les profils n° 1 à 4. Le secteur 2 est situé au centre-ouest du site et comprend les profils n° 5 et 6. Le secteur 3 est situé au centre-est du site comprend les profils n° 7 à 9. Le secteur 4 est situé à l'est du site et comprend les profils n° 10 à 13 (figure 83).

Le secteur 1 indique des déplacements entre le NMM et la ligne de rivage de -17,51 m à 7,28 m entre le 15 septembre 2012 et le 11 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -5,18 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 83, on aperçoit un déplacement négatif entre le 15 septembre 2012 et le 13 juin 2017 et entre le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019. L'isoligne du NMM reste ensuite plutôt stable jusqu'en décembre 2019. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est négatif pour tous les profils, à l'exception du profil n° 1. Pour ce même secteur, les largeurs de plage au NMM varient de 32,19 m à 53,97 m. La moyenne de ces largeurs est de 41,22 m.

Le secteur 2 indique des déplacements de -10,62 m à 0,13 m entre le 15 septembre 2012 et le 11 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -7,17 m, ce qui indique une diminution de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 83, on aperçoit un déplacement négatif entre le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019, puis un déplacement positif jusqu'au 11 décembre 2019. De façon générale, le secteur affiche des déplacements négatifs après la mise en place de la recharge en 2014, puis positifs pendant l'été 2019. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est négatif pour les profils n° 5 et 6. Pour ce secteur, les largeurs de plages au NMM varient entre 29,02 m et 40,82 m. La moyenne de ces largeurs est de 34,02 m.

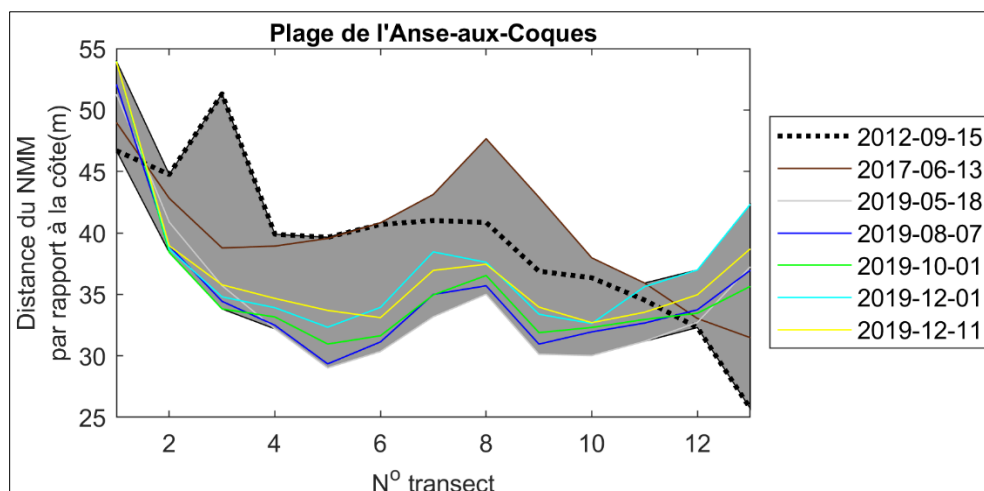


Figure 83. Distances du niveau moyen des mers par rapport à la ligne de rivage à l'Anse-aux-Coques

Le secteur 3 indique des déplacements de -7,82 m à 6,81 m entre le 15 septembre 2012 et le 11 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de -3 198 m, ce qui indique une augmentation de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 83, on aperçoit un déplacement positif entre le 15 septembre 2012 et le 13 juin 2017. L'isoligne du NMM se déplace ensuite de façon négative entre le 13 juin 2017 et le 18 mai 2019, puis positive jusqu'au 11 décembre 2019. De façon générale, le secteur affiche des déplacements négatifs après la mise en place de la recharge en 2014, puis positifs pendant l'été 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 plages au NMM varient entre 30,13 m et 47,67 m. La moyenne de ces largeurs est de 36,84 m.

Le secteur 4 indique des déplacements de -6,33 m à 16,6 m entre le 13 juin 2017 et le 11 décembre 2019. La moyenne de ces déplacements est de 2,22 m, ce qui indique une augmentation de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. Sur la figure 83, on aperçoit un déplacement positif entre le 15 septembre 2012 et le 13 juin 2017, puis négatif jusqu'au 18 mai 2019. L'isoligne du NMM se déplace ensuite de façon négative entre le 18 mai et le 1^{er} décembre 2019, puis négative jusqu'au 11 décembre 2019. De façon générale, le secteur affiche des déplacements positifs après la mise en place de la recharge en 2014, puis des phases de recul et d'avancée entre le 13 juin 2017 et le 11 décembre 2019. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est positif pour les profils n° 10 et 11 puis négatif pour les profils n° 12 et 13. Pour ce secteur, les largeurs de plages au NMM varient entre 25,72 m et 42,32 m. La moyenne de ces largeurs est de 34,13 m.

4.2.2 Banc Larocque

4.2.2.1 Caractérisation granulométrique

Sur le site du banc Larocque, 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. Les résultats démontrent que le site d'étude possède un D_{50} moyen de $-2,26 \phi$, ce qui correspond à la classe du gravier fin. Toutefois, la distribution est bimodale (figure 84) et indique une concentration des sédiments à $-5,73 \phi$ qui correspond à la classe du gravier très grossier et $1,74 \phi$ qui correspond à la classe du sable moyen. La granulométrie est donc plutôt hétérogène et suggère plus d'une source sédimentaire.

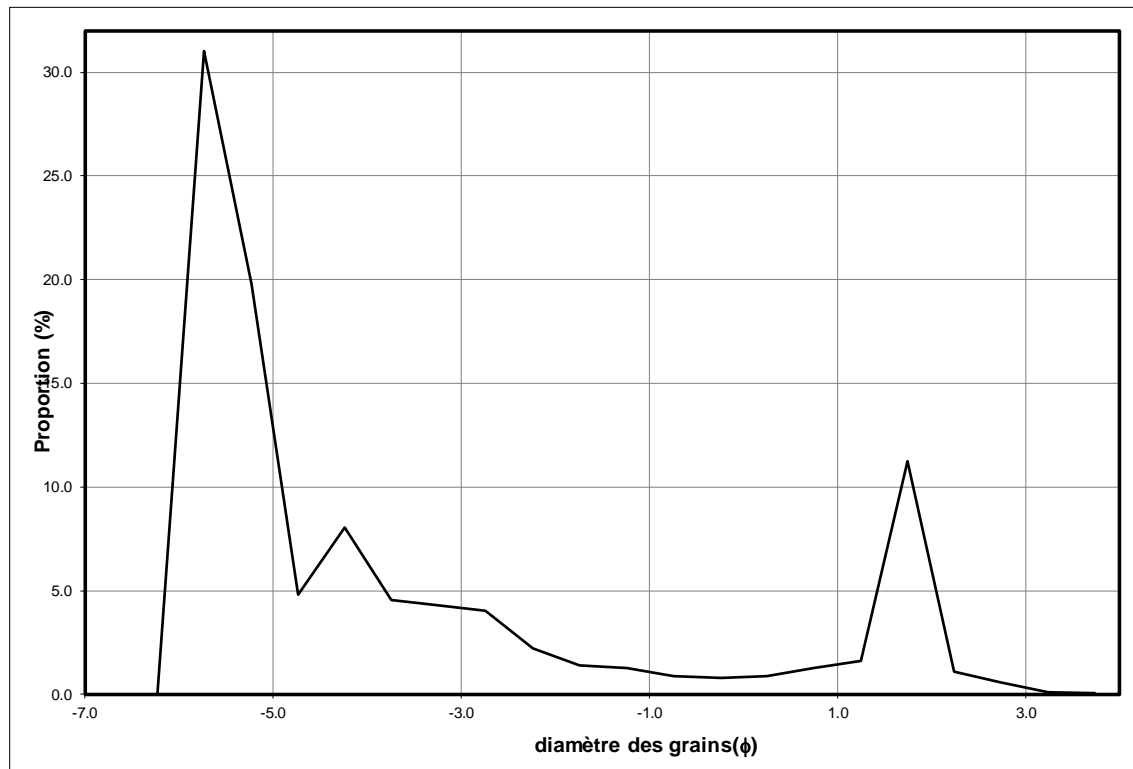


Figure 84. Distribution granulométrique du banc Larocque

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des échantillons sera présentée avec les profils de plage dans la section 4.2.1.3.

4.2.2.2 Évolution historique

La figure 85 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 progradation, avec des valeurs se situant entre $-0,25$ m par année et $0,50$ m par année. Un secteur, principalement constitué d'une falaise meuble, obtient des valeurs négatives plus importantes situées entre $-0,25$ m et $-1,20$ m par année (figure 85 ouest). Un autre secteur, le banc Larocque, obtient des valeurs positives plus importantes situées entre $0,50$ m et $2,02$ m par année.

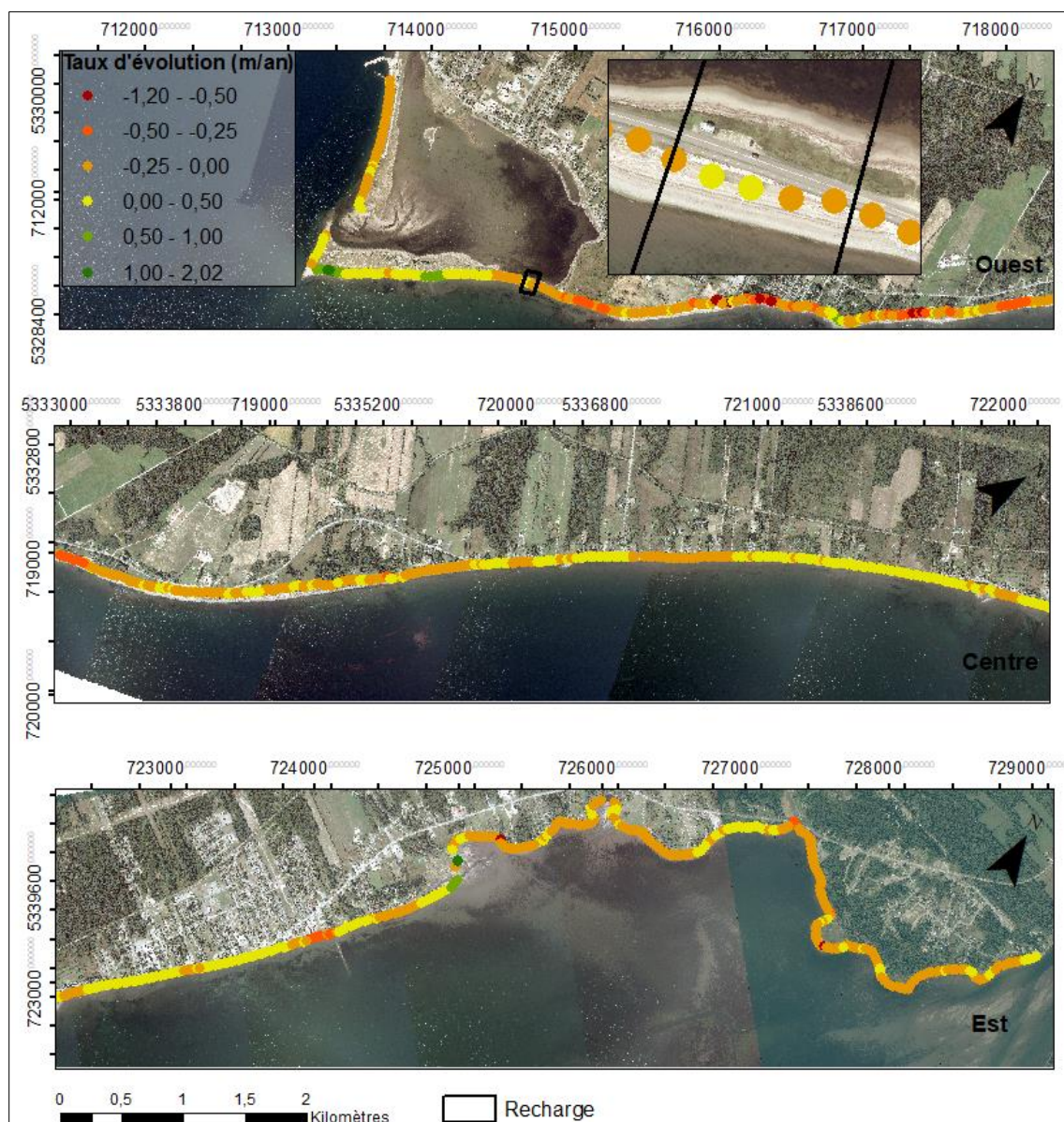


Figure 85. Évolution historique des cellules hydrosédimentaires du barachois de Carleton et de la baie de Cascapédia (1963-2018).

Tableau 4. Taux d'évolution de la ligne de rivage des cellules hydrosédimentaires du barachois de Carleton et de la baie de Cascapédia (m/an).

	1963-2007	2007-2018	1963-2018
Cellules hydrosédimentaires	-0,01	-0,04	-0,01
Secteur de la recharge	-0,05	-0,17	-0,08

Le taux d'évolution pour la période 1963-2018 est négatif à l'échelle des cellules hydrosédimentaires et du secteur de la recharge (tableau 4). Ce taux est aussi négatif pour la période d'évolution 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 85).

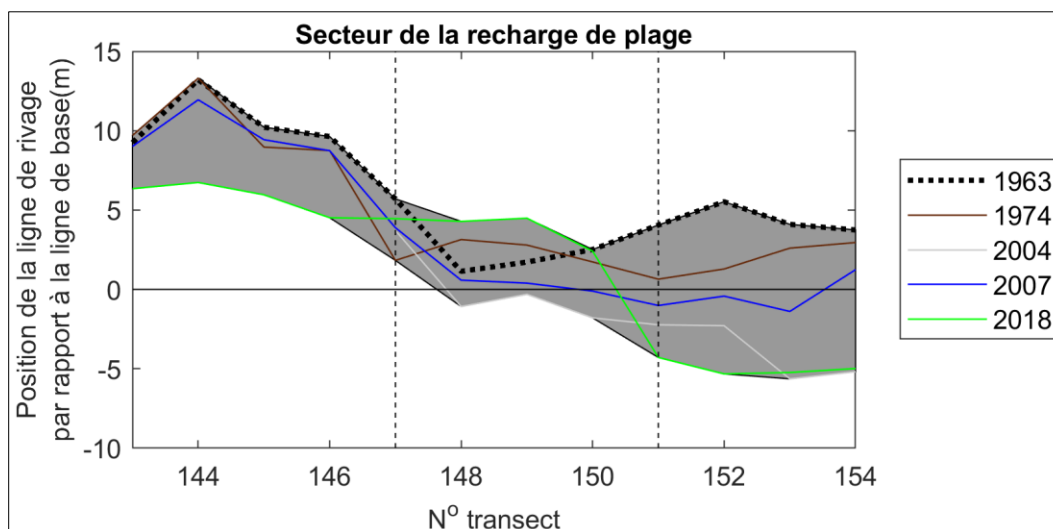


Figure 86. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge du banc Larocque.

La figure 86 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. Toutefois, pour cette même période, la ligne de rivage avance devant la recharge, soit aux transects 147 à 151.

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

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 87).

Pendant la période du suivi, le secteur est caractérisé par un bilan sédimentaire positif, avec des bilans sédimentaires intermédiaires proches de l'équilibre (figure 88). 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).

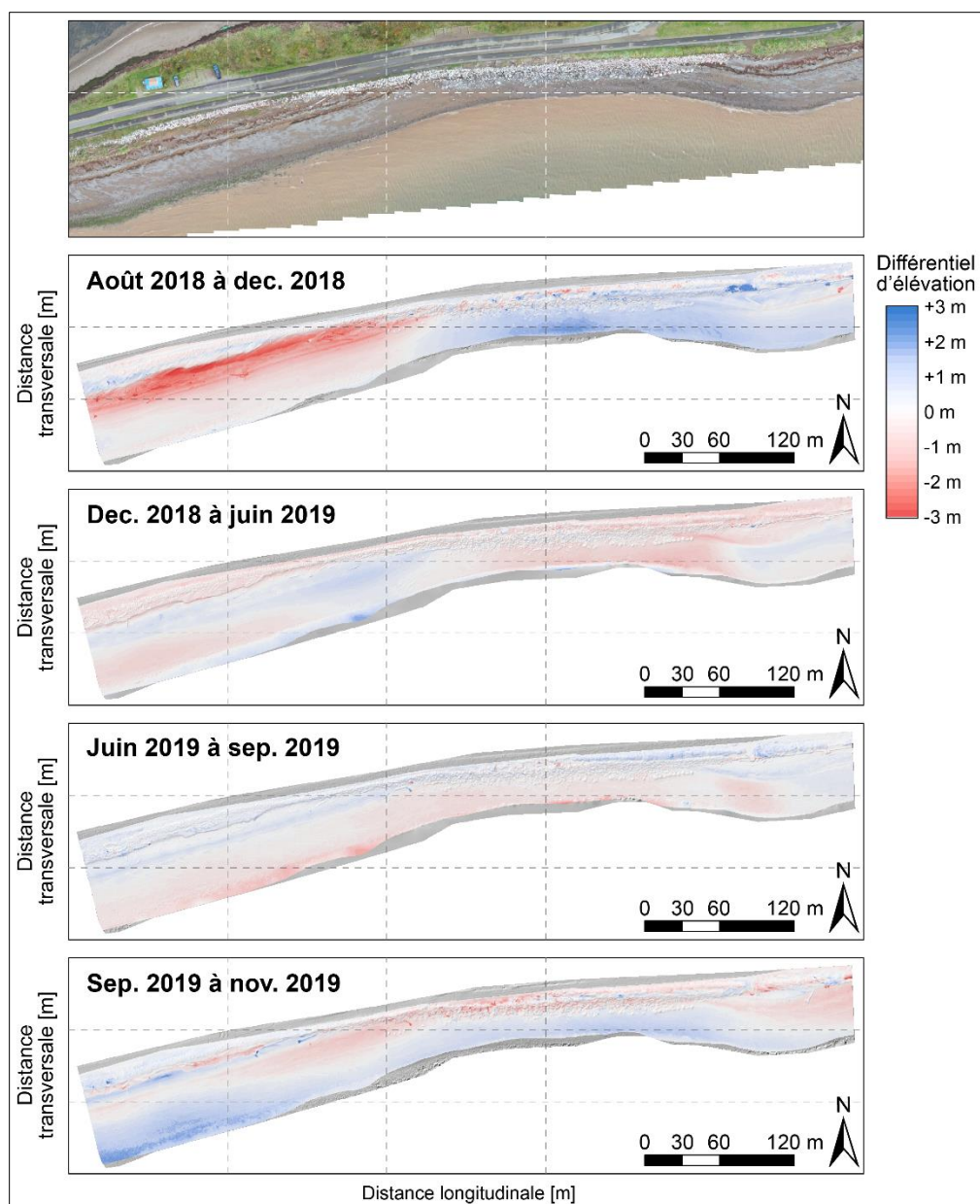


Figure 87. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge du banc Larocque entre août 2018 et novembre 2019.

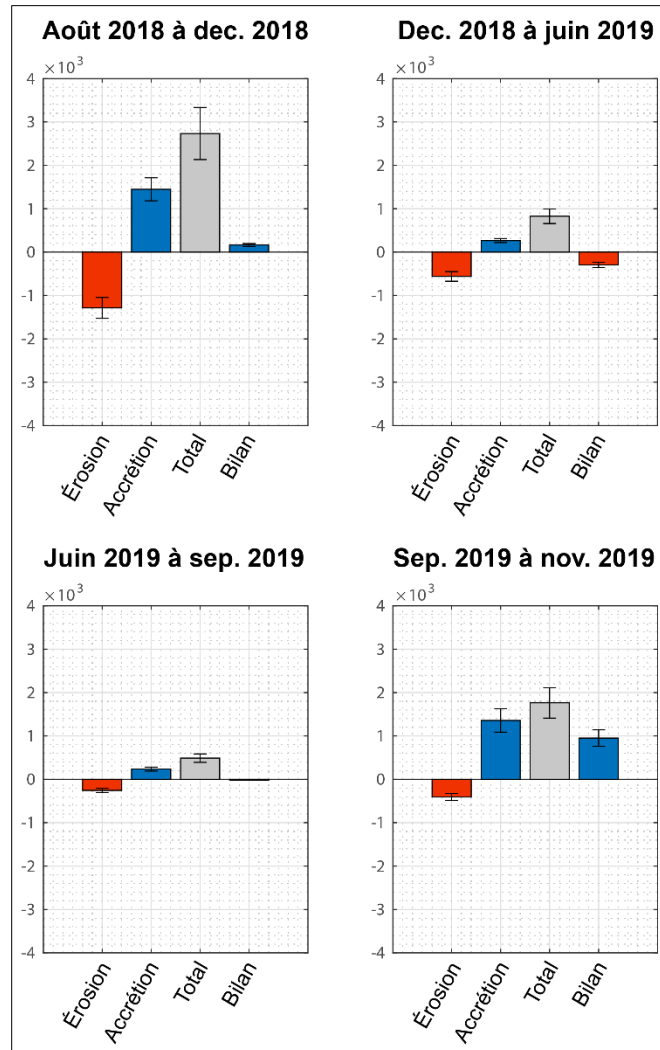


Figure 88. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge du banc Larocque entre août 2018 et novembre 2019.

Sur le site du banc Larocque, les profils n° 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 89). Sur le haut estran, le profil se rehausse entre le 6 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 90). Les cordons de bas estran sont aussi caractérisés 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 90). Le haut estran est constitué de sédiments de la classe du gravier fin. Près de la flexure, les sédiments font partie de la classe du gravier moyen. Sur le bas estran, les sédiments sont constitués de sables moyens et de sables fins.

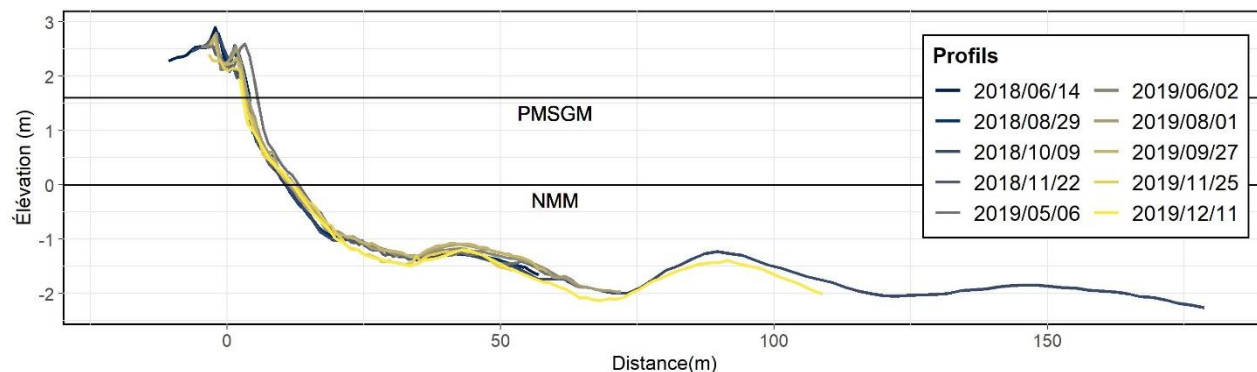


Figure 89. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 14 juin 2018 au 11 décembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

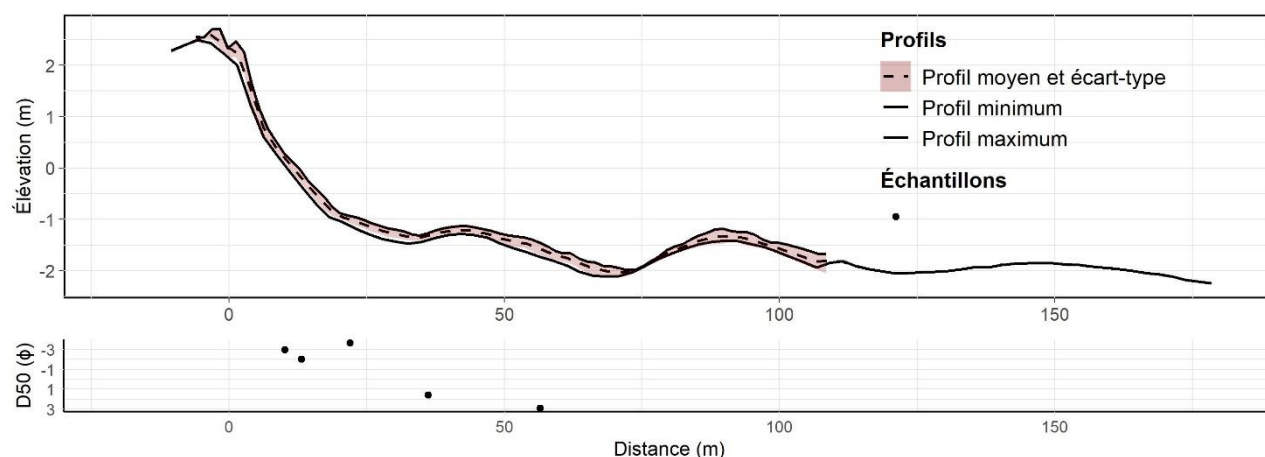


Figure 90. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 19, situé à 100 m à l'ouest de la recharge, est aussi caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement du profil (figure 91). 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 92). Sur le haut de plage, à environ 10 m de la ligne de rivage, on observe une érosion de 2,65 m entre le 14 juin 2018 et le 22 novembre 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, près de la recharge. 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 92). 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 du gravier fin et grossier. Près de la flexure et sur tout le bas estran, les sédiments font partie de la classe du gravier moyen et grossier.

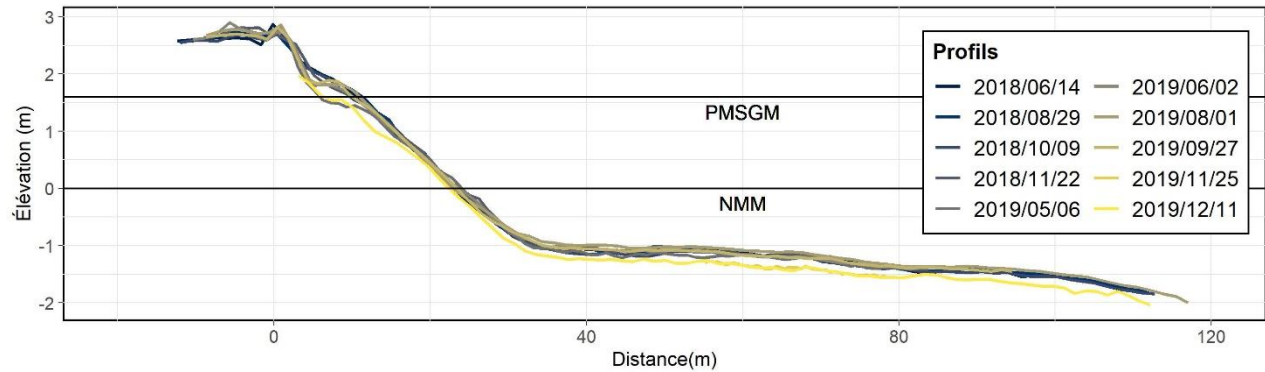


Figure 91. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 14 juin 2018 au 11 décembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

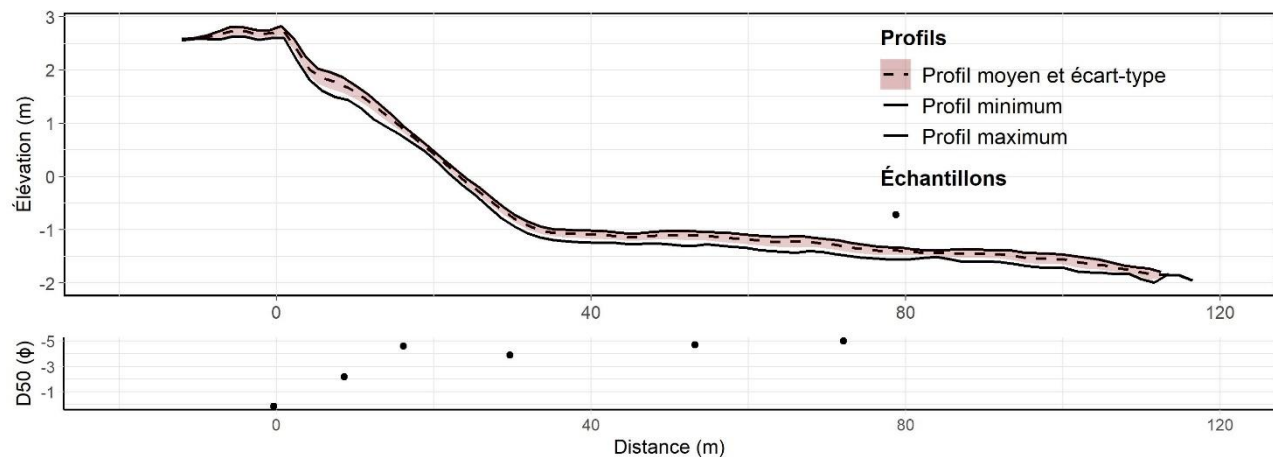


Figure 92. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 19 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 14, situé devant la recharge, est aussi caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement du profil (figure 93). 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 94). 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 légèrement plus importante sur le haut estran que sur le bas estran.

La taille des sédiments est plus fine sur le haut de plage, plus grossière près de la flexure et plus fine sur le bas estran (figure 94). 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 du gravier fin et gravier grossier. Près de la flexure et sur la partie supérieure de bas estran, les sédiments font partie de la classe du gravier grossier. La partie inférieure du bas estran est constituée de sable grossier.

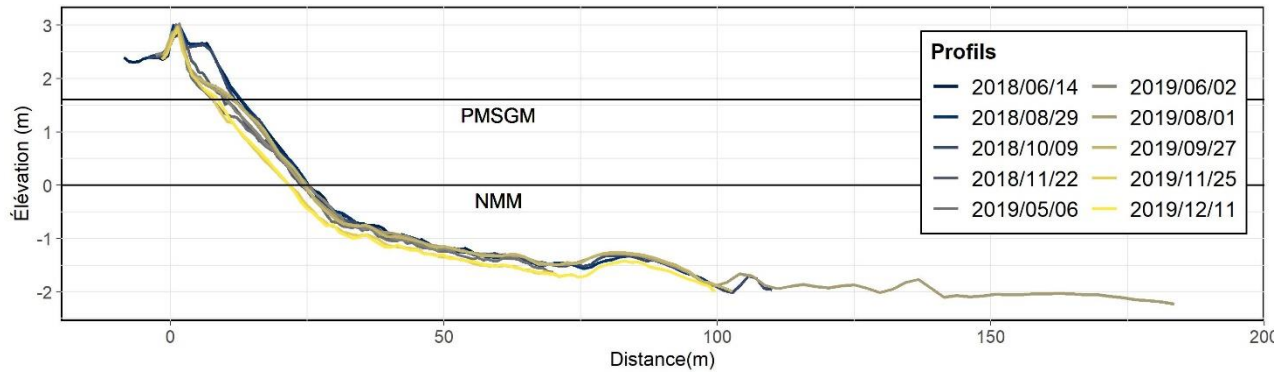


Figure 93. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 14 du 14 juin 2018 au 11 décembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

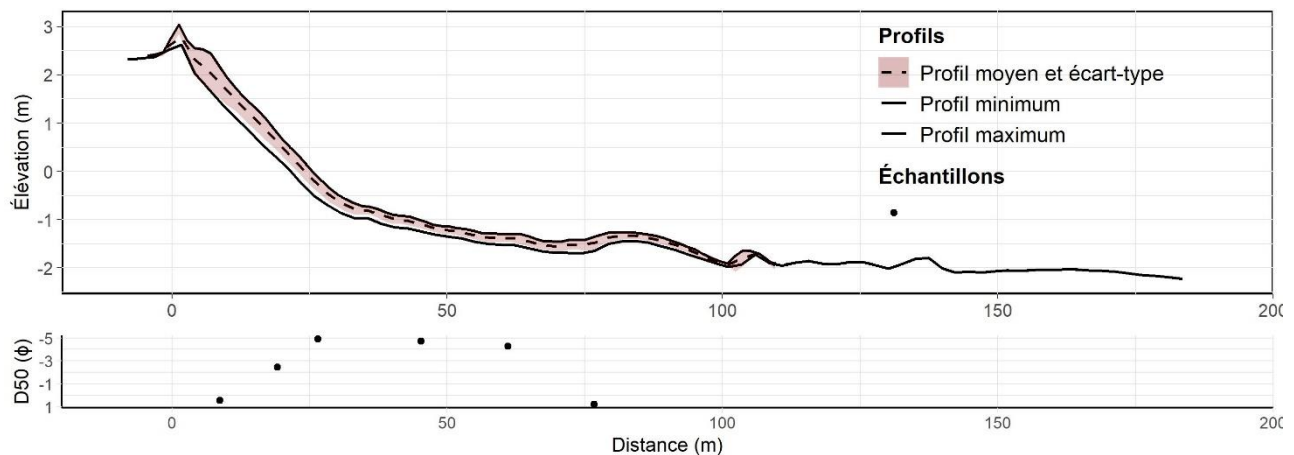


Figure 94. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 14 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 16, situé sur la recharge, est aussi caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement du profil (figure 95). 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 95). 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 14 juin 2018 et le 22 novembre 2018. Le cordon situé à ± 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 ± 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. Sur le profil, jusqu'à ± 70 m de la ligne de rivage le profil minimum se retrouve au-dessus d'un écart-type de la moyenne, ce qui est attribuable au levé du 11 décembre 2019 qui représente un profil beaucoup plus bas que pour les autres levés.

La taille des sédiments est plus fine sur le haut de plage, plus grossière sur le bas estran et près de la flexure, plus grossière, et plus fine sur le bas estran, à l'exception de l'échantillon près de la flexure du

cordon (figure 94). 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 des classes du gravier très fin et très grossier. Le bas estran est constitué de sable moyen, à l'exception de l'échantillon près de la flexure du cordon qui est constitué de gravier grossier.

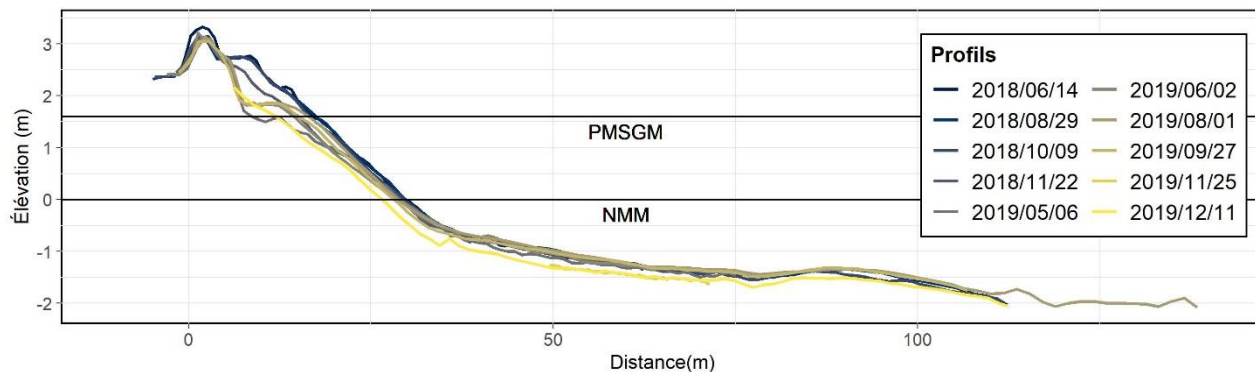


Figure 95. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 16 du 14 juin 2018 au 11 décembre 2019 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

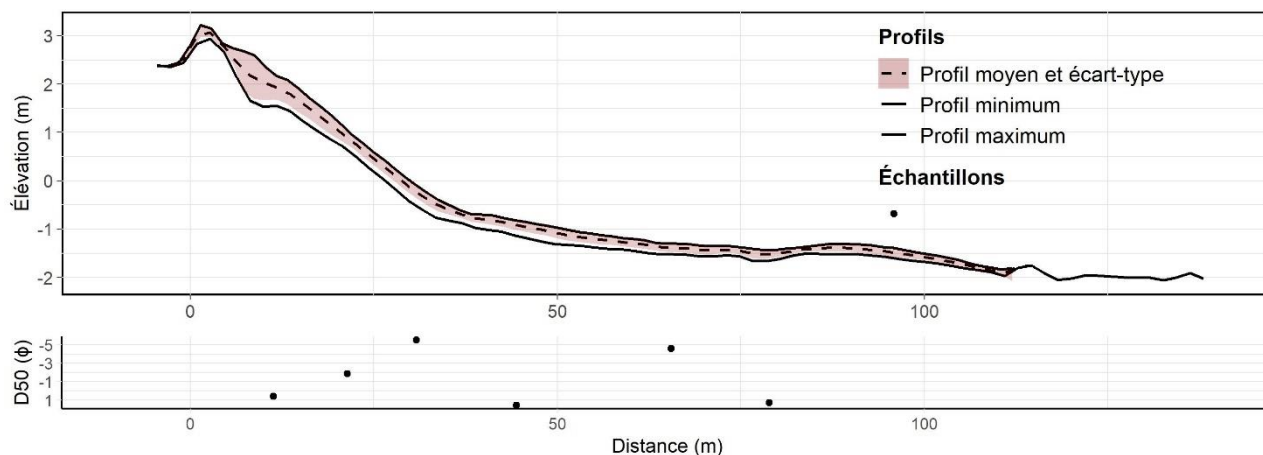


Figure 96. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 16 sur le banc Larocque. La référence altimétrique est le CGVD28.

Afin d'analyser les variations des largeurs de plages, le site du banc Larocque a été subdivisé en quatre secteurs (figure 97). Le secteur 1 est situé à l'est du site comprend les profils n° 1 à 5. Le secteur 2 est situé au centre-est du site comprend les profils n° 6 à 12. Le secteur 3, constitué de la recharge, est situé au centre-est du site et comprend les profils n° 13 à 16. Le secteur 4 est situé à l'est du site et comprend les profils n° 17 à 31. Sur la figure 97, les lignes pointillées indiquent le secteur de la recharge, soit la recharge et 100 m de part et d'autre. Sur la figure 98, les lignes pointillées indiquent la délimitation de la recharge.

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 25 novembre 2019. 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 97, 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 entre la ligne de rivage et le NMM 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.

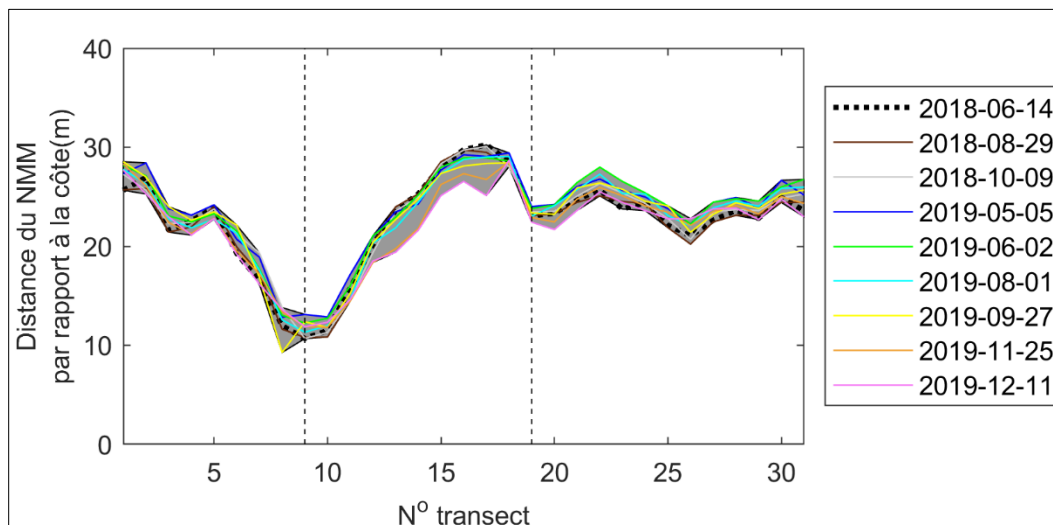


Figure 97. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur du banc Laroque.

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 97, 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° 8, 9 et 10, puis négatif pour les profils n° 6, 7, 11 et 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.

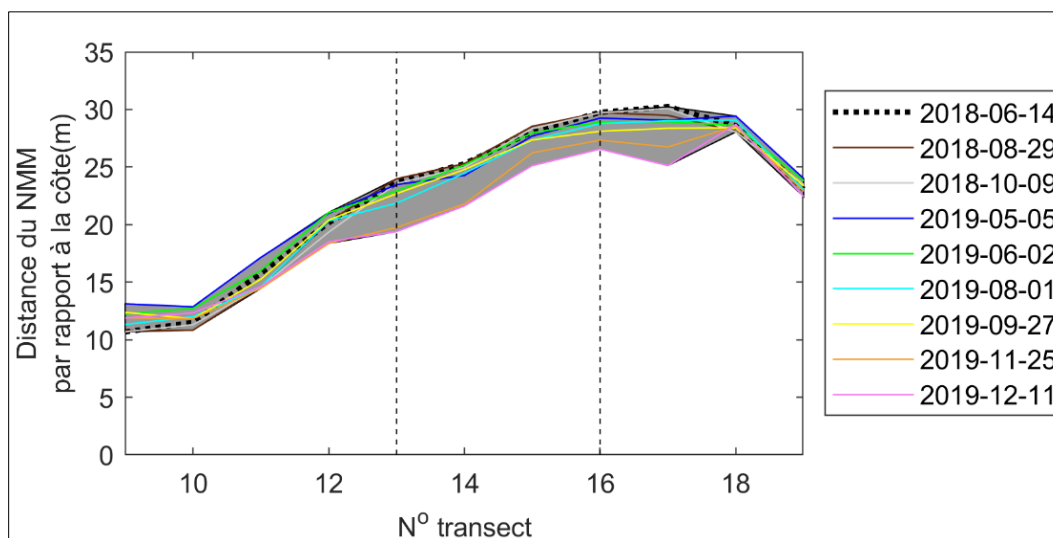


Figure 98. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge du banc Laroque

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 98, 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 -5 114 m à 2,78 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 97, on aperçoit que l'isoligne 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° 18, 23, 25 à 29 et 31, puis négatif pour les profils n° 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.

4.2.3 Plage Monaghan

4.2.3.1 Caractérisation granulométrique

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 ϕ vu la grande variabilité de la taille des sédiments entre les sites. Les résultats montrent que le site d'étude possède un D_{50} moyen de 1,72 ϕ , ce qui correspond à la classe du sable moyen, près de la limite du sable fin. La distribution est unimodale, ce qui signifie que la granulométrie est plutôt homogène et suggère une seule source sédimentaire.

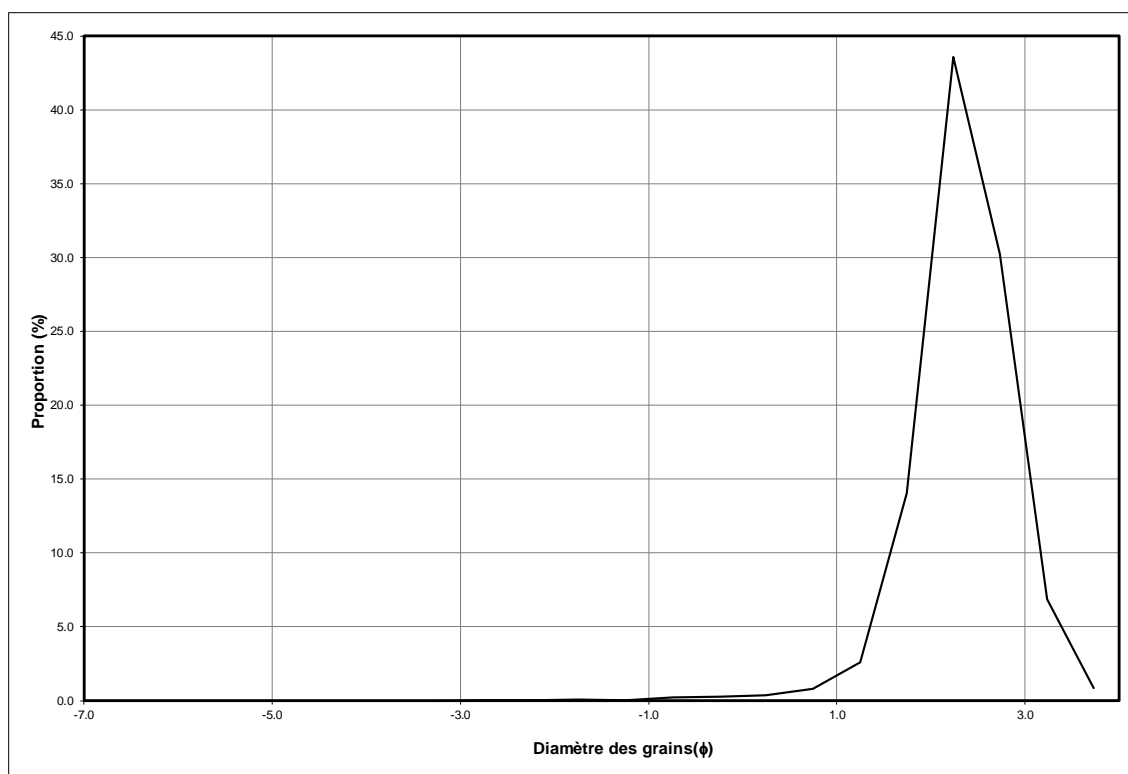


Figure 99. Distribution granulométrique de la plage Monaghan

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des échantillons sera présentée avec les profils de plage dans la section 4.2.3.3.

4.2.3.2 Évolution historique

La figure 100 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 100 est).

Tableau 5. Taux d'évolution de la ligne de rivage 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

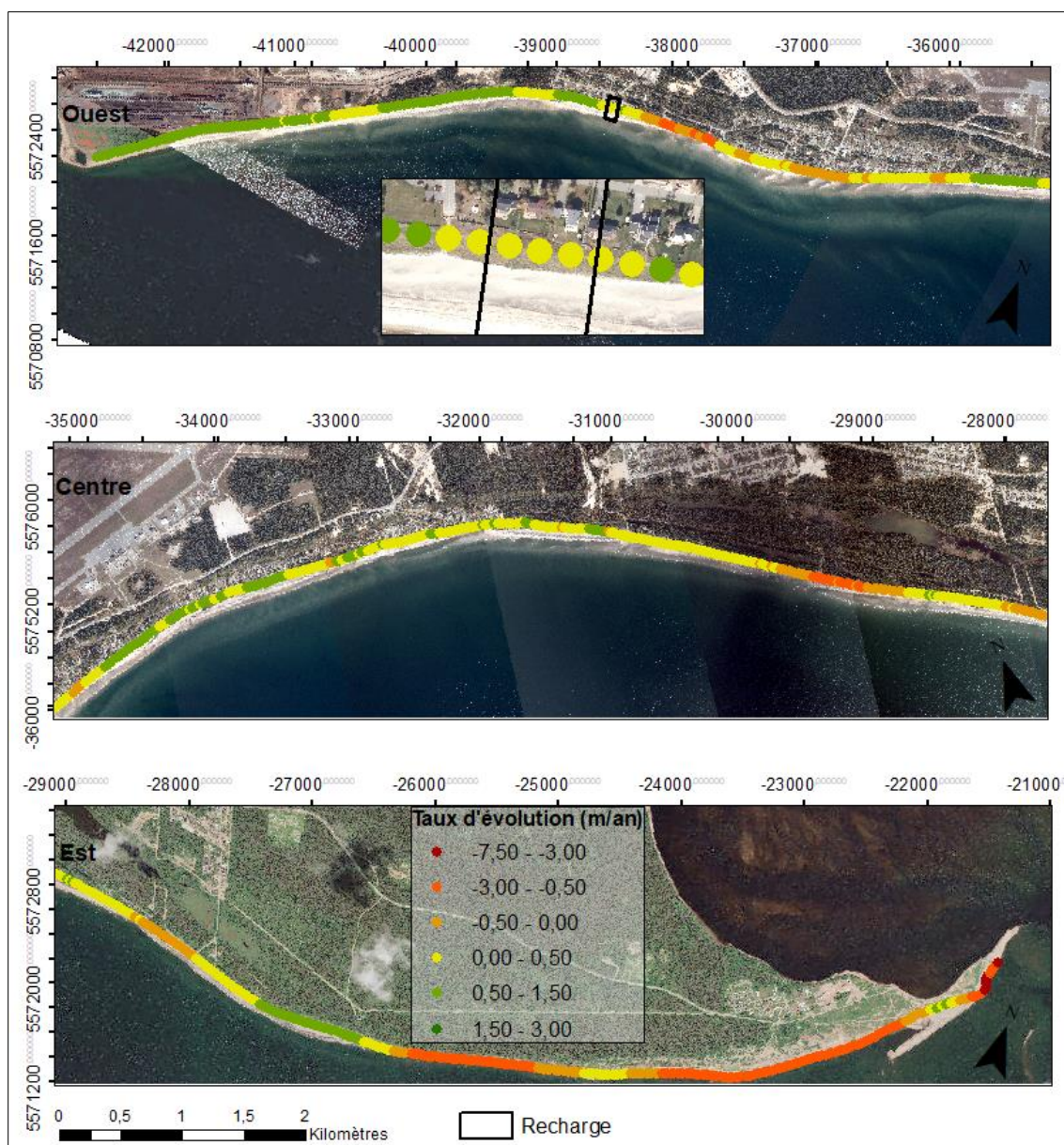


Figure 100. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de la Boule (1965-2017).

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 5). 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.

La figure 101 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 1965-1979, le secteur de la recharge affiche une alternance de progradation et de recul de la ligne de rivage. À l'avant de la recharge, soit aux transects 173 à 175, il y a recul. La ligne de rivage prograde ensuite de 1979 à 1996,

puis recule fortement entre 1996 et 2001. La recharge est effectuée en 2000. De 2001 à 2017, il y a progradation sur près de 20 m.

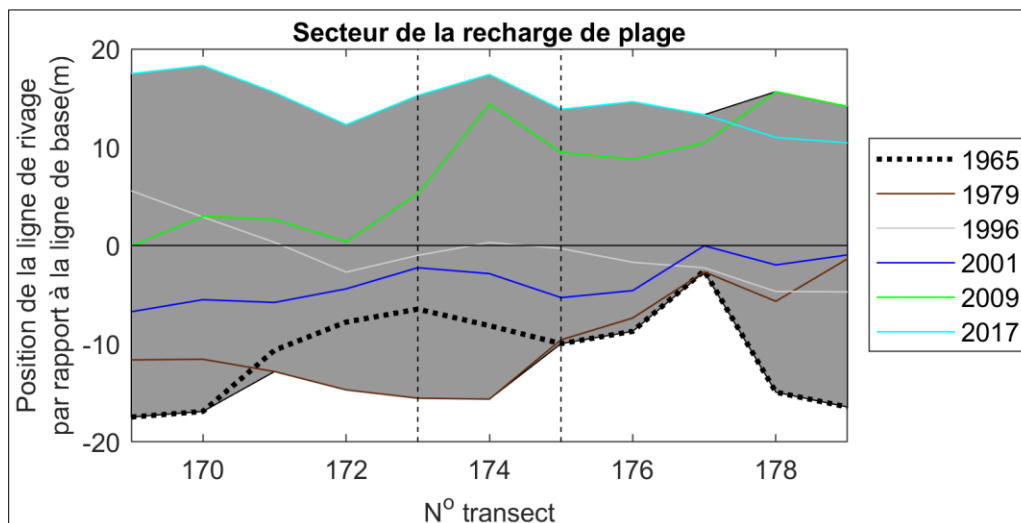


Figure 101. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de la plage Monaghan.

4.2.3.3 Évolution du secteur de la recharge de plage.

Les analyses surfaciques à haute résolution spatiale (bilans sédimentaires) n'ont pas pu être réalisées sur le secteur de la plage Monaghan, faute de données exploitables.

Sur la plage Monaghan, les profils n° 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 102). Pendant cette période, une berme se forme en haut de plage et le cordon sableux situé à ± 175 m de la ligne de rivage migre vers le large. Toutefois, le cordon et la berme migrent légèrement vers la côte entre le 28 octobre et le 13 décembre 2019. 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 103). 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 75 m de la ligne de rivage. 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 15 juillet 2018 qui représente un profil beaucoup plus bas que pour les autres levés, sans formation de berme. Toutefois, 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 103). 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.

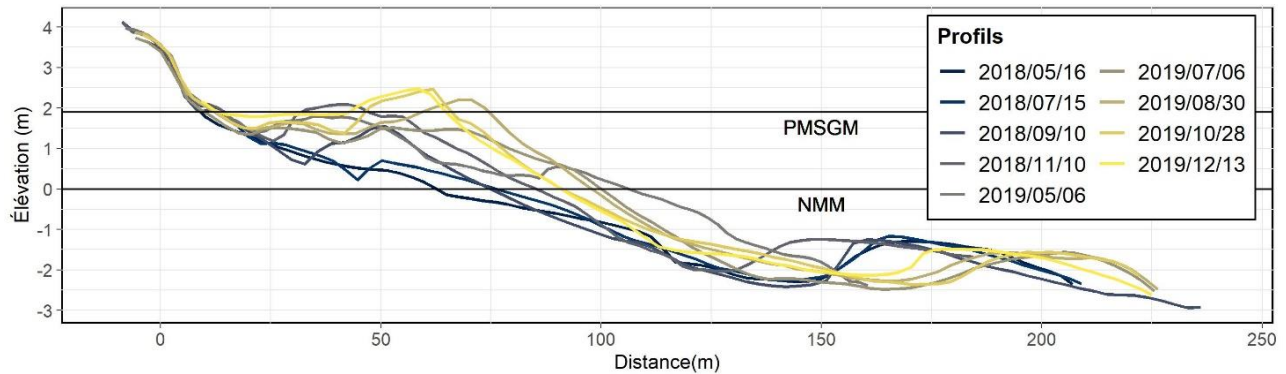


Figure 102. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 4 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

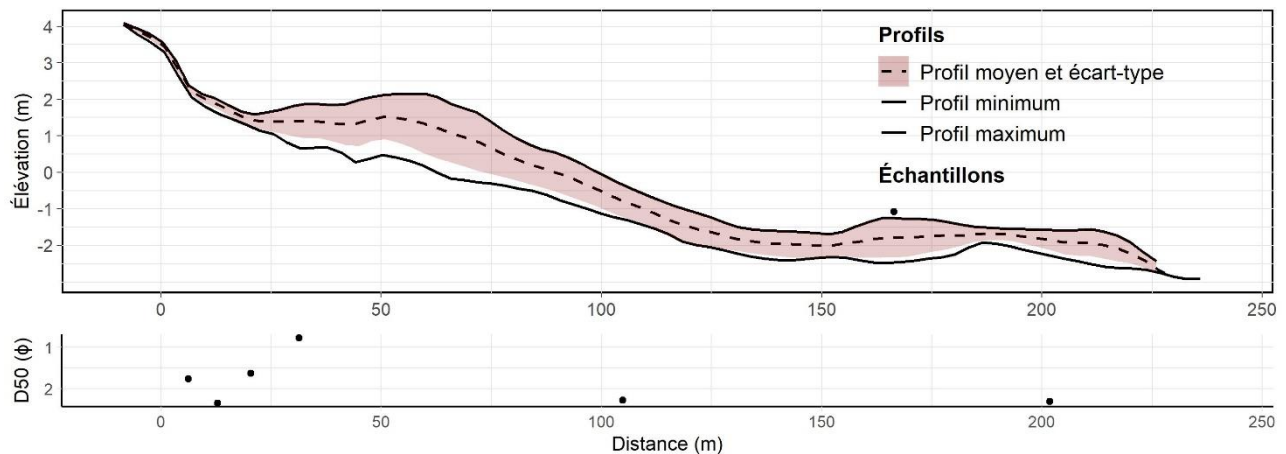


Figure 103. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 4 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 11, situé à 100 m à l'ouest de la recharge, est caractérisé par un abaissement du profil entre le 16 mai 2018 et le 10 novembre 2018 (figure 104). Le profil se relève ensuite pendant l'été 2019, où il y a formation d'une berme en haut de plage. Il semble ensuite y avoir migration vers le large ou disparition du premier cordon sableux situé à ± 125 m de la ligne de rivage. Toutefois, le cordon et la berme migrent légèrement vers la côte entre le 28 octobre 2019 et le 13 décembre 2019. 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 105). 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 du cordon littoral. Toutefois, 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 sur la crête de la berme et plus fine sur le bas de l'estran (figure 105). Toutefois, 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.

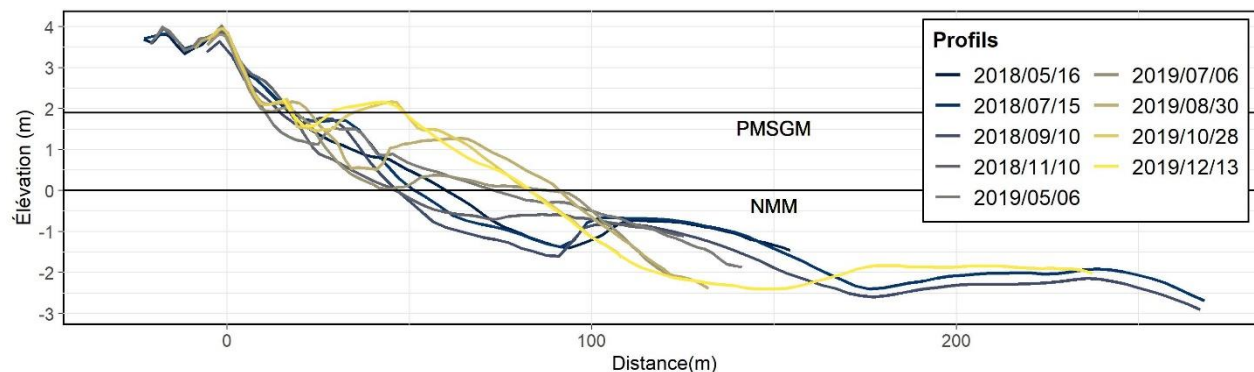


Figure 104. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 11 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

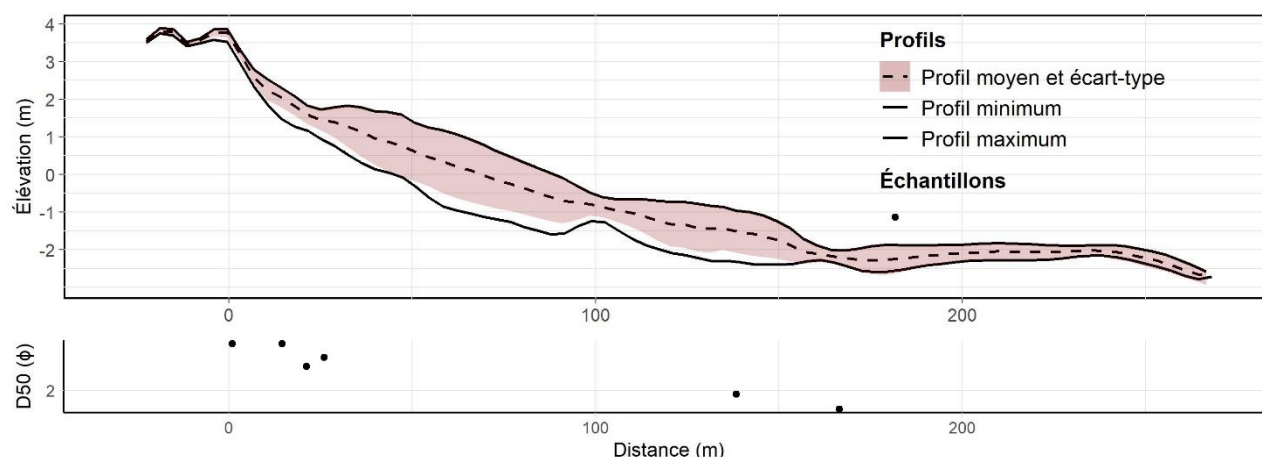


Figure 105. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 11 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 6, situé devant la recharge, est caractérisé par un rehaussement constant du profil entre le 16 mai 2018 et le 13 décembre 2019 (figure 106). Pendant cette période, une berme se forme en haut de plage et le cordon sableux de bas estran situé à ± 150 m de la ligne de rivage migre vers le large. Toutefois, le cordon et la berme migrent légèrement vers la côte entre le 28 octobre 2019 et le 13 décembre 2019. 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 107). 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 du cordon littoral. Toutefois, 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 107). 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.

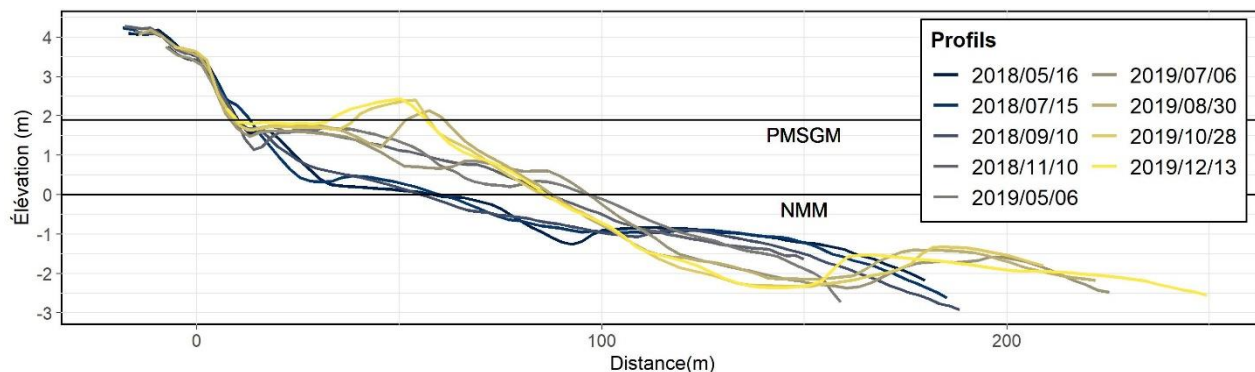


Figure 106. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 6 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

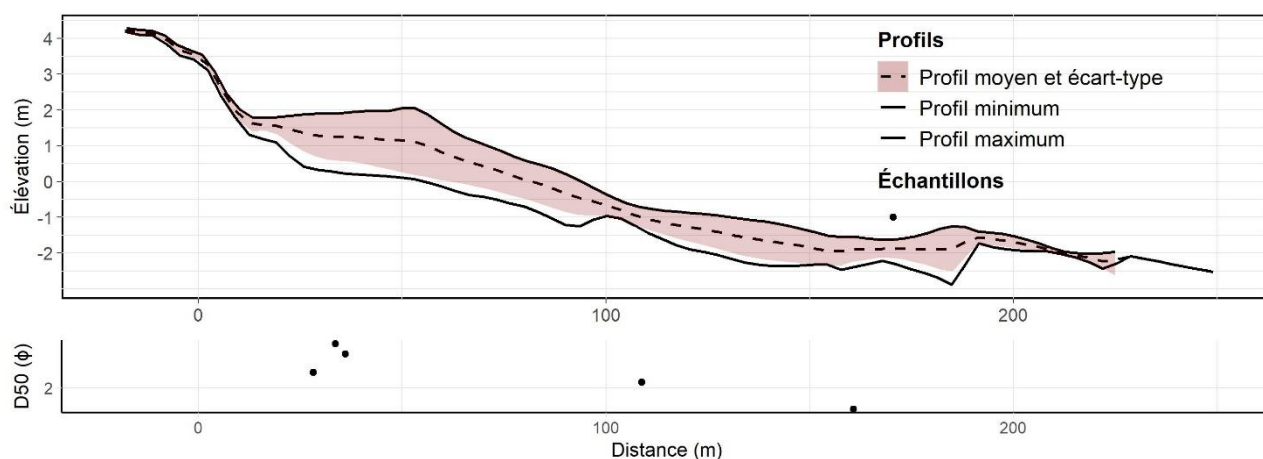


Figure 107. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 6 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 8, situé devant la recharge, est caractérisé par un rehaussement constant du profil entre le 16 mai 2018 et le 13 décembre 2019 (figure 108). Pendant cette période, une berme se forme en haut de plage et le cordon sableux de bas estran situé à ± 125 m de la ligne de rivage migre vers le large. Toutefois, le cordon et la berme migrent légèrement vers la côte entre le 28 octobre 2019 et le 13 décembre 2019. 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 109). 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 du cordon littoral. Toutefois, 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 109). Toutefois, 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.

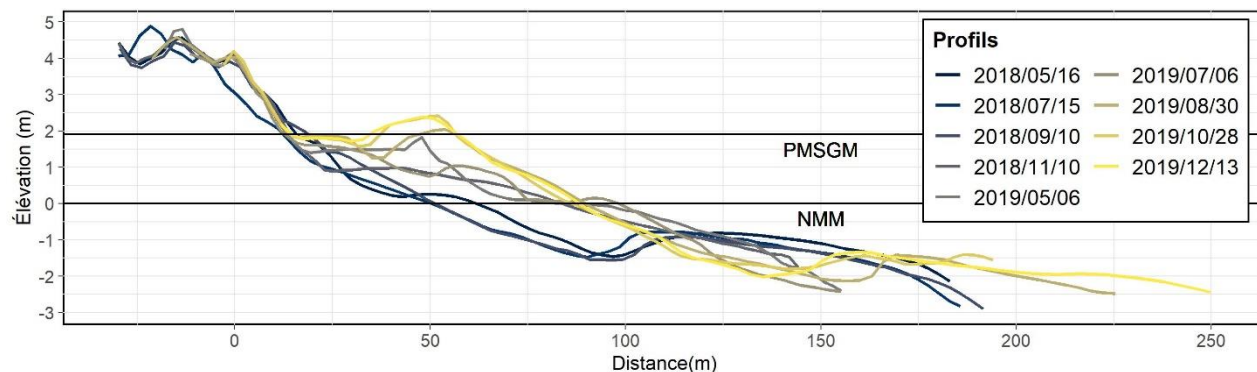


Figure 108. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 8 du 16 mai 2018 au 13 décembre 2019 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

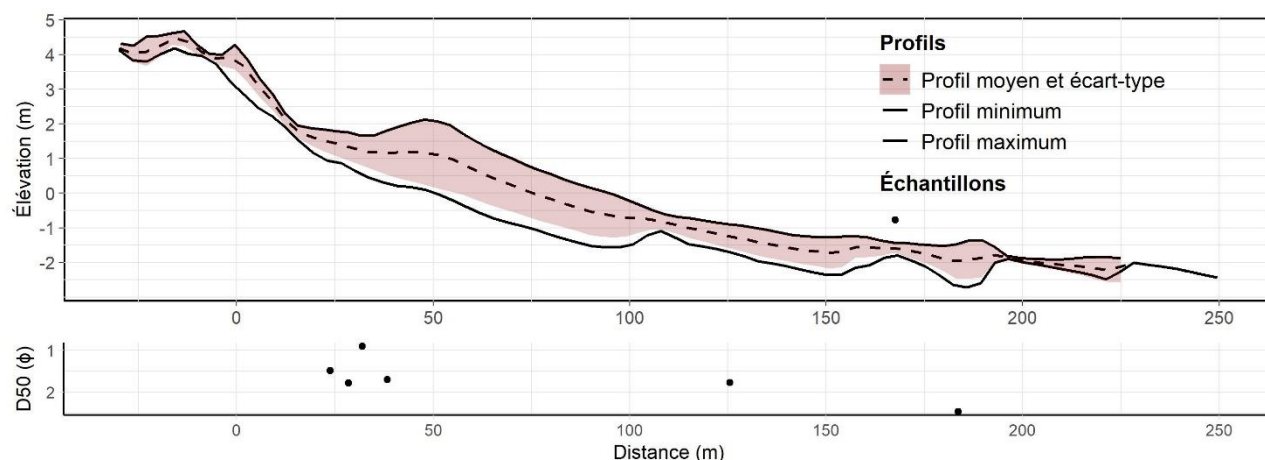


Figure 109. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 8 sur la plage Monaghan. La référence altimétrique est le CGVD28.

Afin d'analyser les variations des largeurs de plages, le site de la plage Monaghan a été subdivisé en deux secteurs. Le secteur 1 est situé à l'est du site et comprend la zone de recharge, soit les profils n° 1 à 11. Le secteur 2 est situé à l'ouest du site et comprend les profils n° 12 à 23. Sur la figure 110, les lignes pointillées indiquent le secteur de la recharge, soit la recharge et 100 m de part et d'autre. Sur la figure 111, les lignes pointillées indiquent la délimitation de la recharge.

Le secteur 1 est caractérisé par une côte à terrasses de plage non artificialisée. La recharge se trouve dans ce secteur entre les profils n° 6 et 8. Les déplacements du NMM par rapport à la ligne de rivage varient de -17,06 m à 43,32 m entre le 16 mai 2018 et le 12 décembre 2019. 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 110, on aperçoit que les isolignes du NMM sont très variables dans le temps et 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, le 16 mai 2018. Le bilan du déplacement entre la ligne de rivage et le NMM est positif pour les profils n° 3 à 11 et négatif pour les profils n° 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.

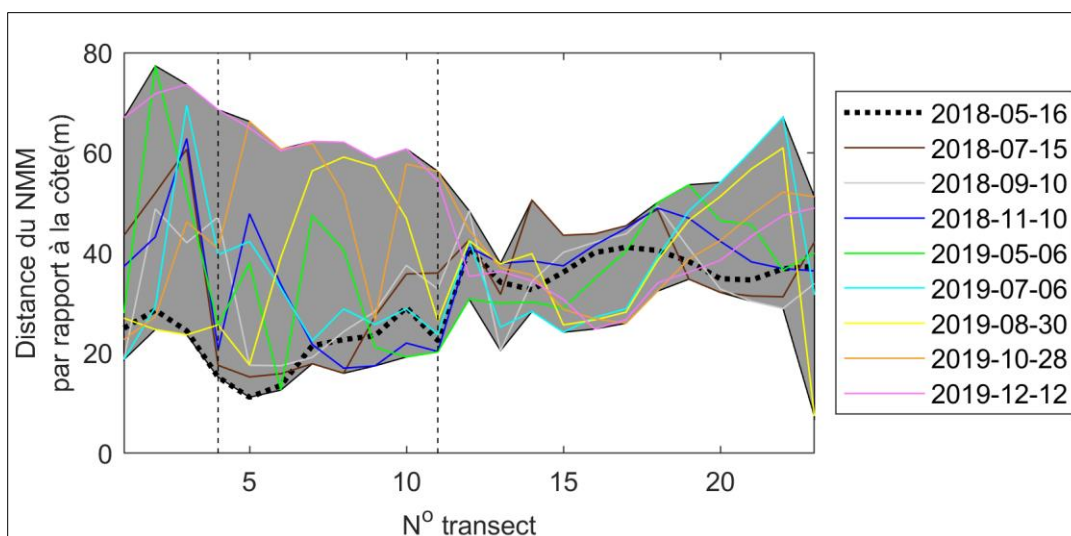


Figure 110. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de la plage Monaghan

Le secteur 2 est caractérisé par une côte à terrasses 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 110, 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° 12 à 17 et négatif pour les profils n° 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.

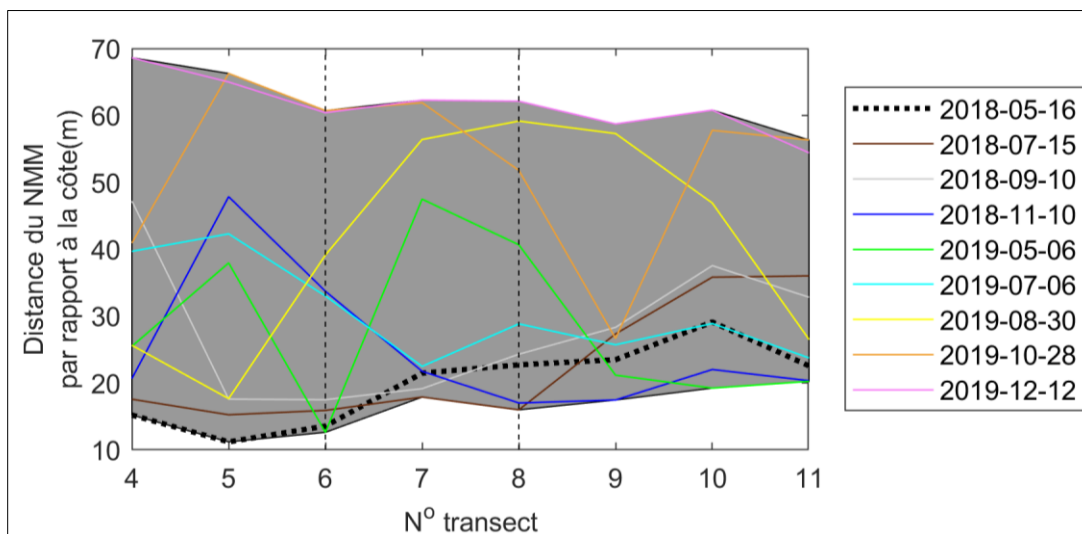


Figure 111. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers de la recharge de la plage Monaghan

4.2.4 Plage de La Martinique

4.2.4.1 Caractérisation granulométrique

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. Les résultats montrent que le site d'étude possède un D_{50} moyen de 1,85 ϕ , ce qui correspond à la classe du sable moyen, près de la limite du sable fin. La distribution est unimodale, ce qui signifie que la granulométrie est plutôt homogène et suggère une seule source sédimentaire.

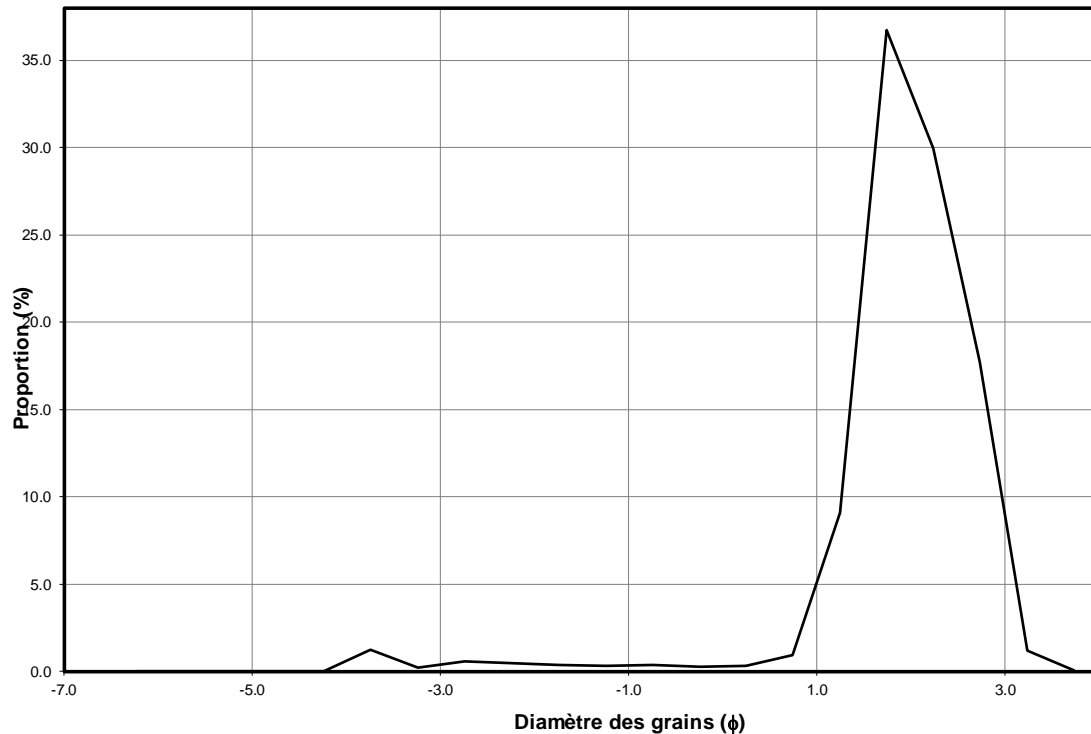


Figure 112. Distribution granulométrique de la plage de La Martinique

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des sédiments sera présentée avec les profils de plage dans la section 4.2.4.3.

4.2.4.2 Évolution historique

La figure 113 représente l'évolution historique de la ligne de rivage 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. 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. Toutefois, un secteur atteint des valeurs négatives allant jusqu'à -1,50 m par année. La recharge se situe dans ce secteur.

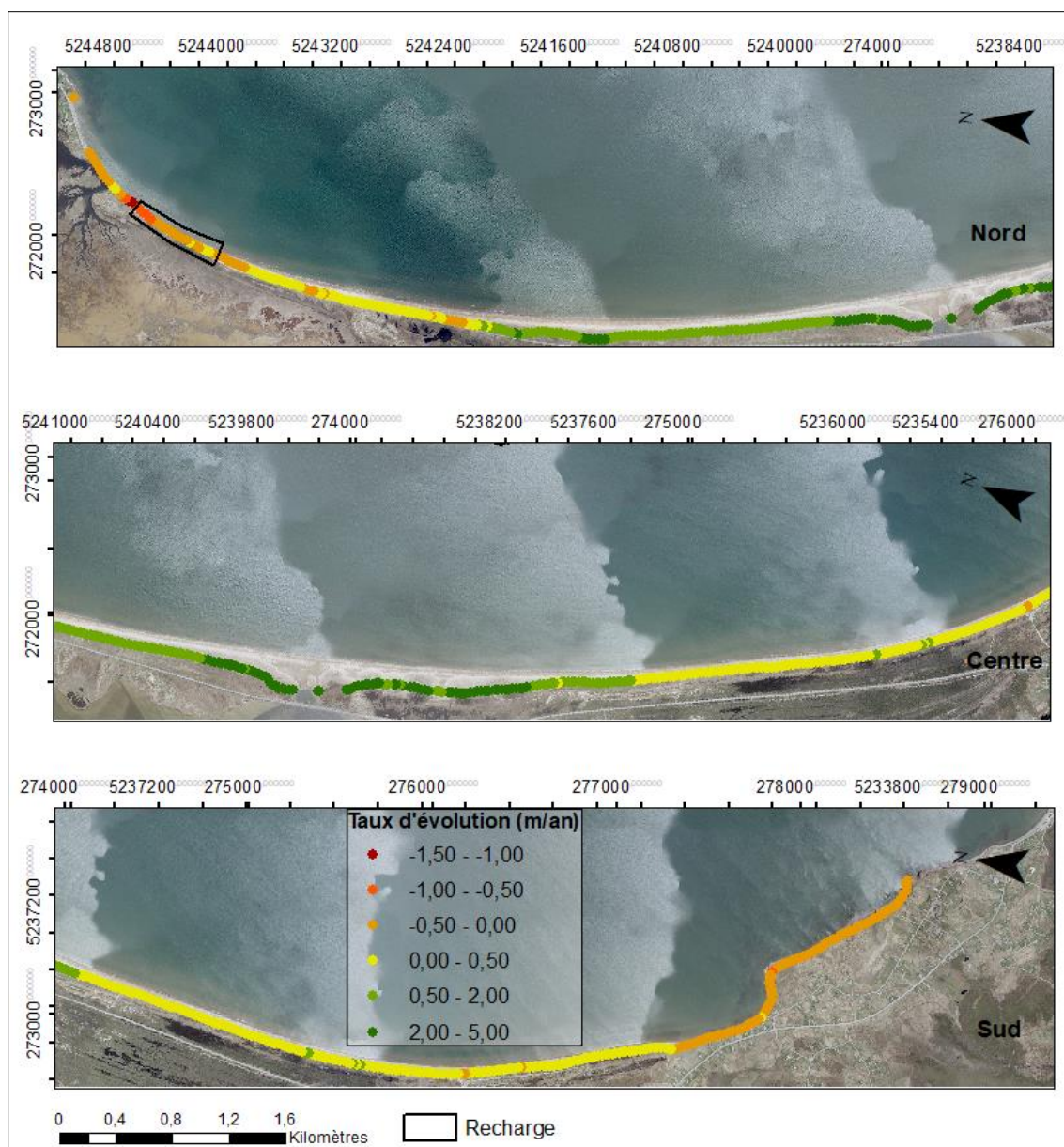


Figure 113. Évolution historique de la cellule hydrosédimentaire de la baie de Plaisance (1963-2019).

Tableau 6. 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 de la ligne de rivage à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire est positif pour la période 1963-2019 (tableau 6), 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. Cependant, 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 expliquant le changement de tendance observé.

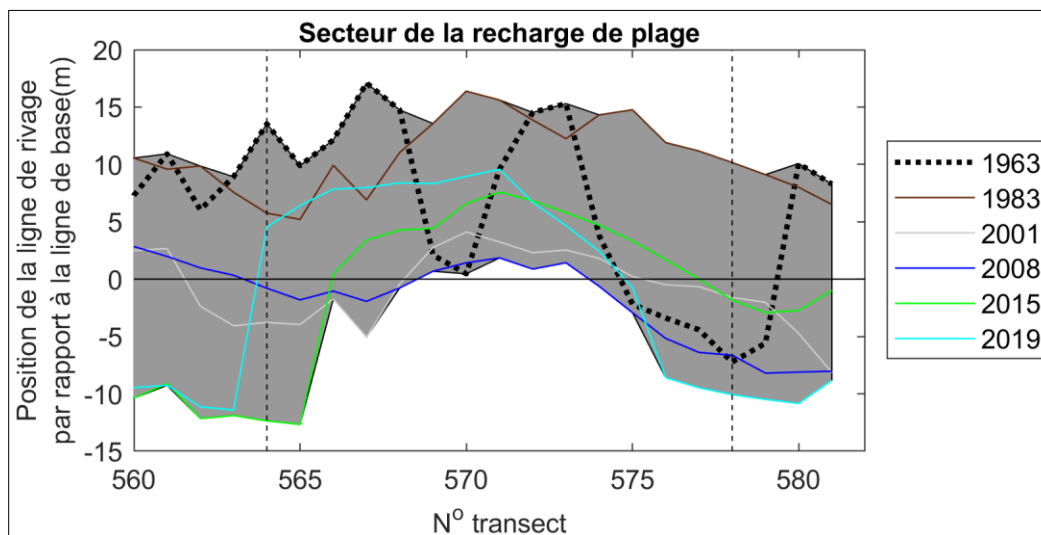


Figure 114. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de la plage de La Martinique.

La figure 114 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. Le programme de recharge pour ce secteur a débuté en 2008. De façon générale, les lignes de rivages indiquent une érosion soutenue entre 1963 et 2001, suivi d'une stabilisation pour l'année 2008. La ligne de rivage de 2015 avance devant la recharge et au sud de la recharge, soit aux transects n° 578 à 582. En 2019, la ligne de rivage avance toujours pour une partie de la recharge, soit des transects n° 563 à 571, mais recule pour les transects n° 571 à 578 de la recharge et au sud, aux transects n° 578 à 582.

4.2.4.3 Évolution du secteur de la recharge de plage de décembre 2018 à novembre 2019

Les changements morphologiques mesurés sur le secteur de la recharge de la plage de La Martinique montrent les efforts réalisés par le ministère des Transports du Québec (MTQ) pour stabiliser ce secteur de la route 199.

La période comprise entre décembre 2018 et mai 2019 est caractérisée par un bilan sédimentaire proche de l'équilibre (figure 115). 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 $\pm 12\,000\text{ m}^3$ (figure 116). L'érosion s'est quant à elle concentrée sur la

plage au droit de l'enrochement (partie nord du secteur d'étude). Plus ou moins 4 000 m³ de sédiments ont été transportés en dehors du secteur étudié (figure 115).

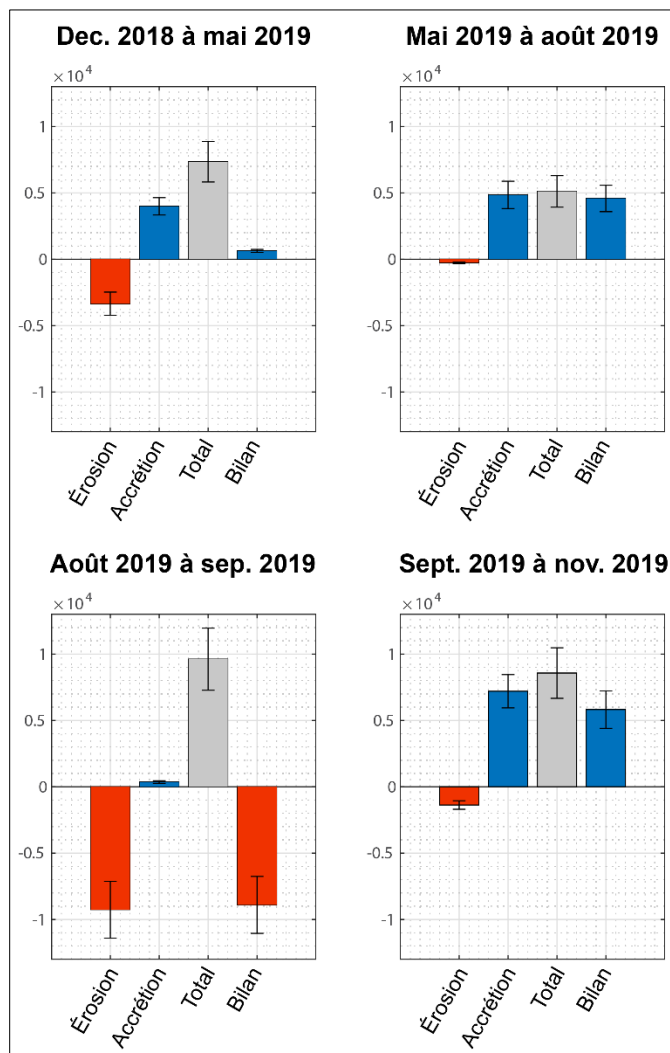


Figure 115. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage de La Martinique entre décembre 2018 et décembre 2019.

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 116), $\pm 4\,840\text{ m}^3$ de sédiments nouveaux se sont déposés (sur un total de $\pm 5\,100\text{ m}^3$ de sédiment mobilisés) (figure 115).

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 116). 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). En réponse à cet événement, $\pm 7\,200\text{ m}^3$ de sédiments ont été artificiellement déposés pour reconstituer l'intégralité de la recharge (figure 115).

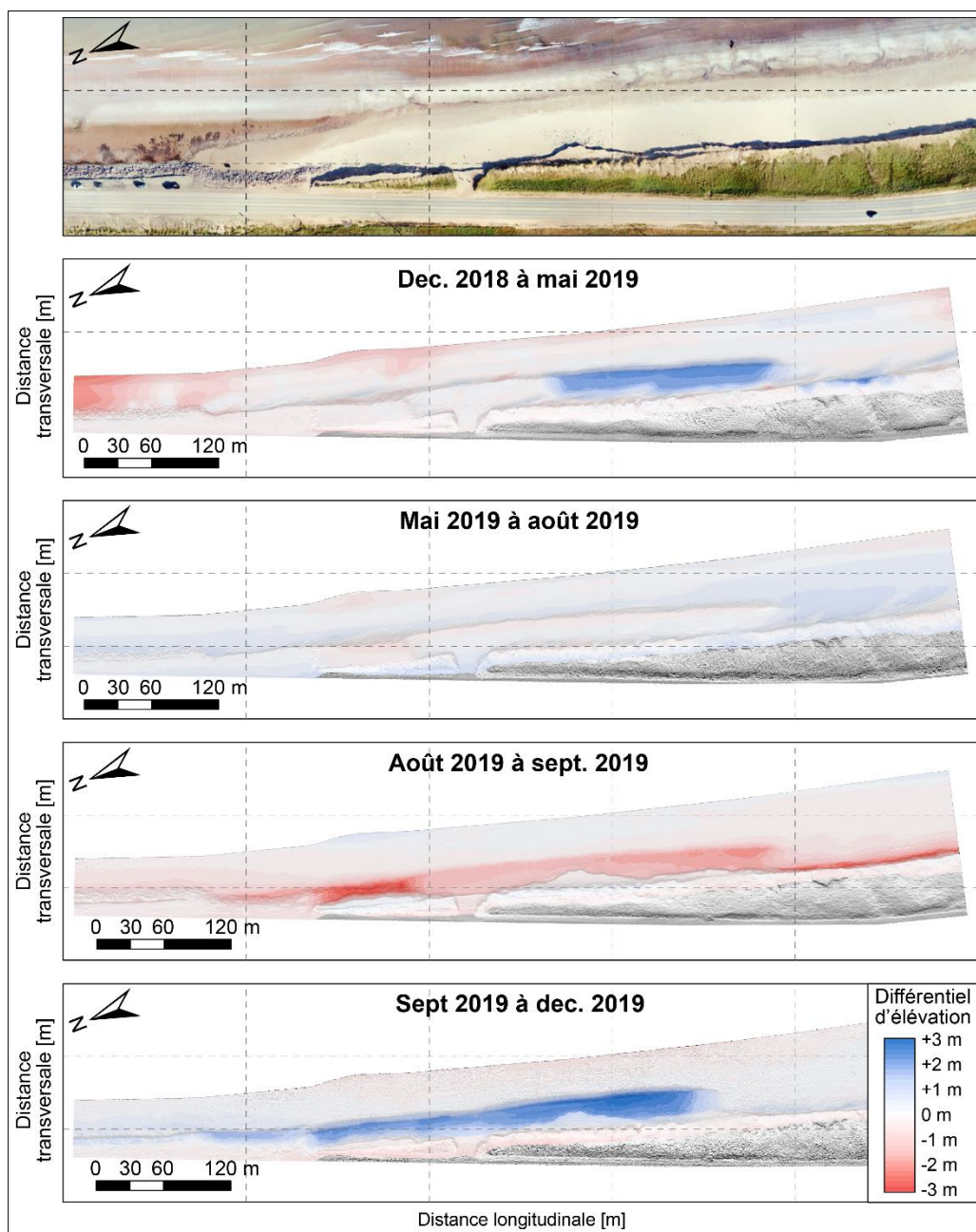


Figure 116. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge de la plage de La Martinique entre décembre 2018 et décembre 2019 (Photo du haut prise le 13 septembre 2019).

Sur la plage de La Martinique, les profils n° 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 117). 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. Un cordon 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 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 de l'estran près de la flexure et le PMSGM le haut estran près de la recharge (figure 117). 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 118). Tous les échantillons se situent à la limite du sable moyen et du sable fin.

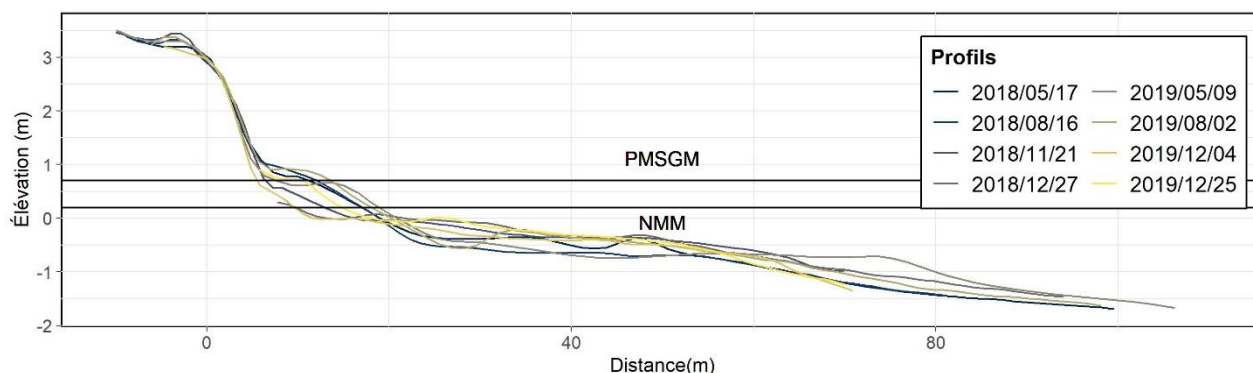


Figure 117. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 16 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

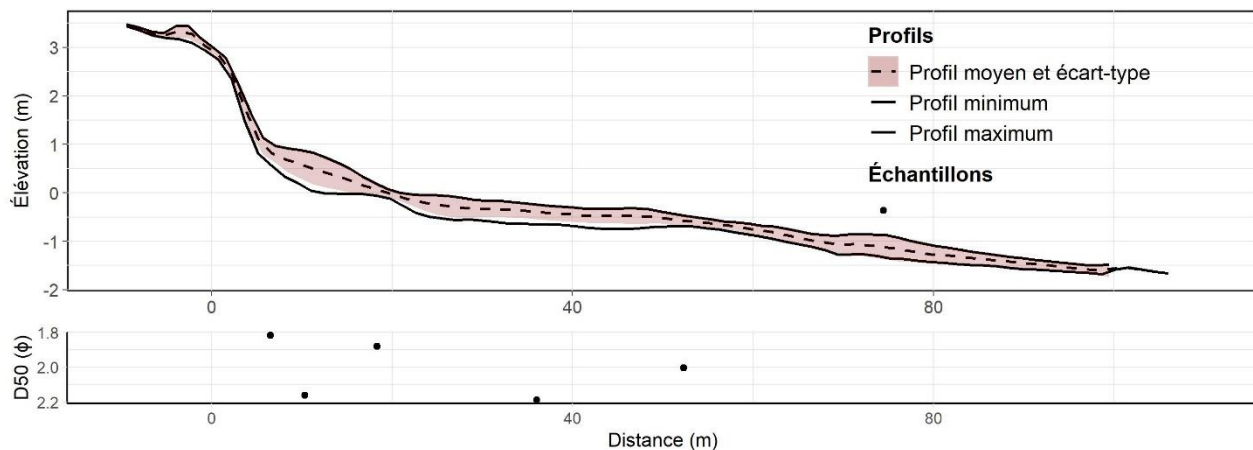


Figure 118. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 16 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 25, situé à 100 m au sud de la recharge, est caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement (figure 119). 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 une légère progradation 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, exhaussement du haut estran et abaissement du bas estran. Entre le 4 et le 25 décembre 2019, il y a une légère accumulation de sédiments au pied de la dune, léger abaissement de haut estran et léger exhaussement du bas estran.

De ces variations résulte une enveloppe de mobilité de 0,5 m à 1 m sur l'ensemble du profil (figure 120). 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 119). L'écart-type indique un pic de variabilité sur le haut estran, près de la flexure. 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 de granulométrie.

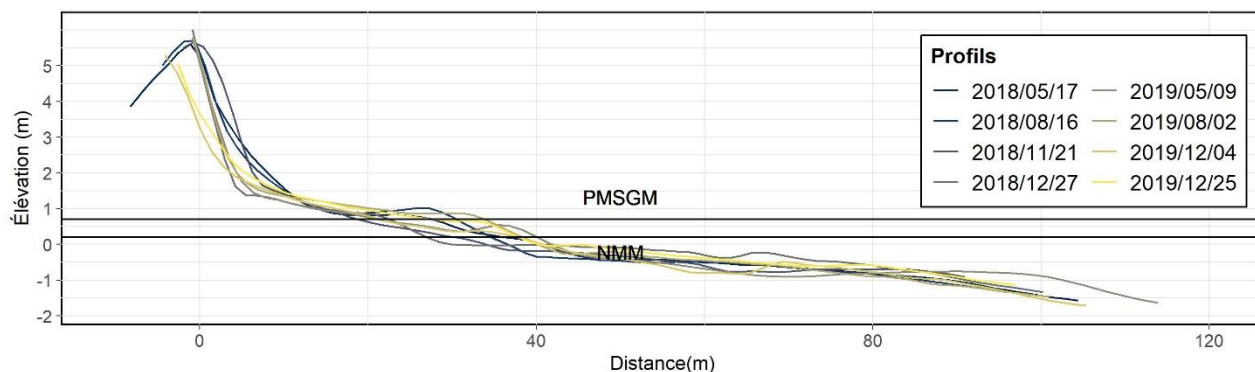


Figure 119. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 25 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

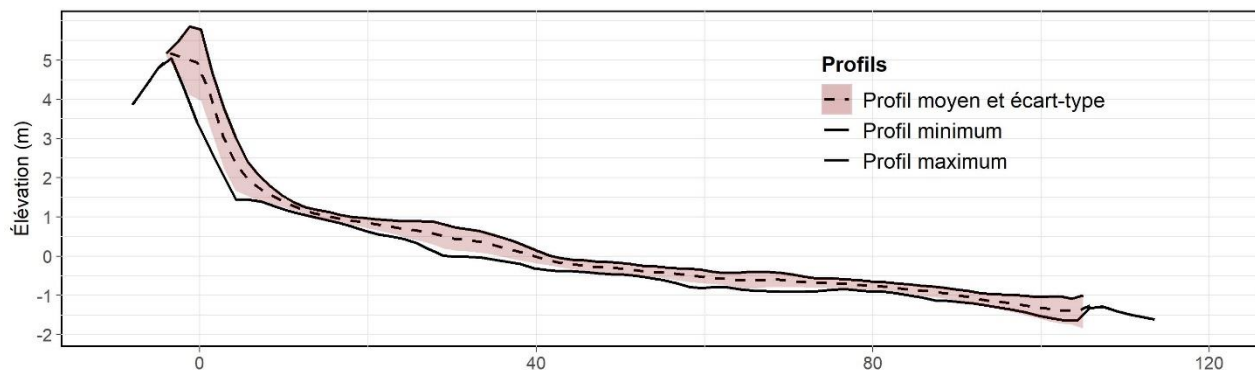


Figure 120. Enveloppe et profil moyen du profil n° 25 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 19, situé devant la recharge, est caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement (figure 121). 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 122). 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 la PMSGM la moitié du haut estran (figure 121). L'écart-type indique un pic de variabilité sur le haut estran, près de la flexure. 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 122). 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 du gravier très fin.

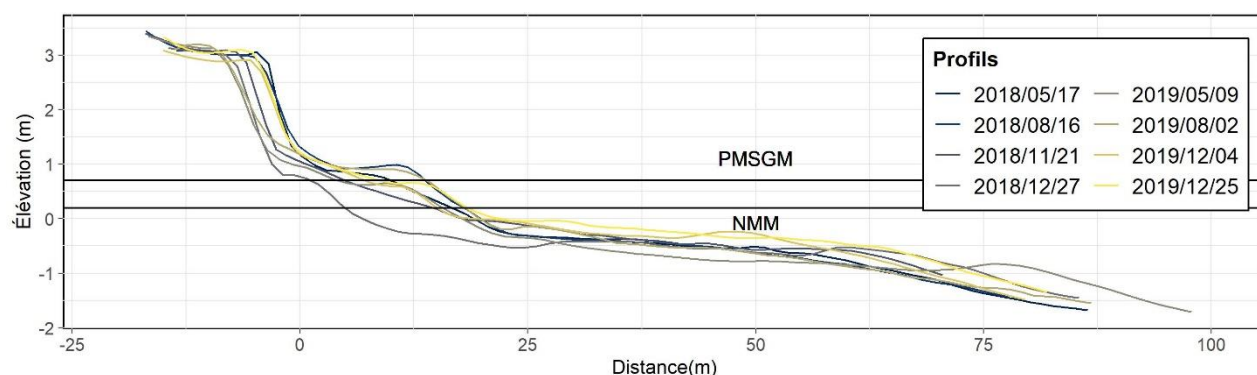


Figure 121. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

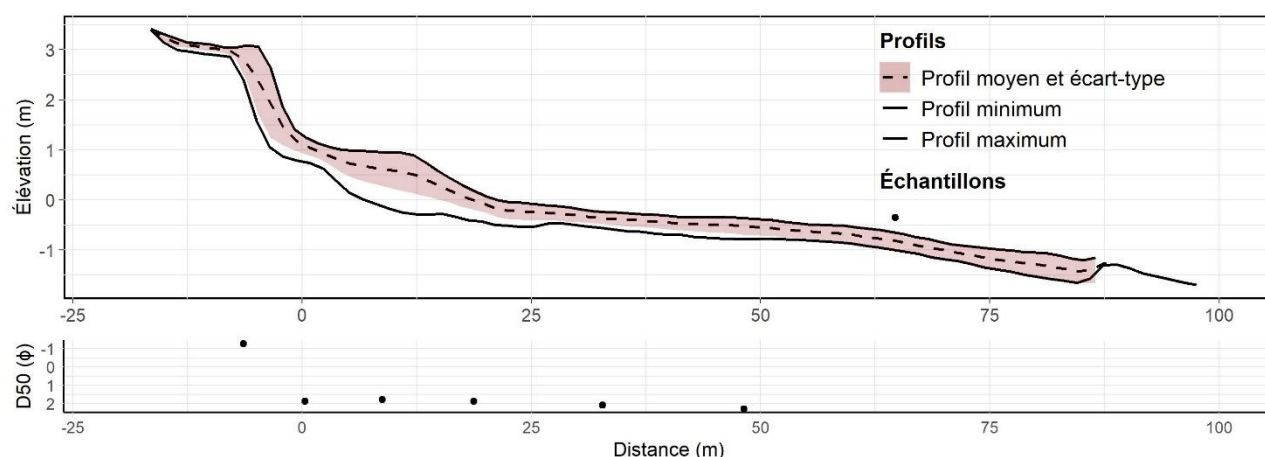


Figure 122. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 19 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 21, situé devant la recharge, est caractérisé par des phases d'abaissement et d'exhaussement (figure 123). 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 l'ensemble du profil (figure 124). L'enveloppe est plus importante sur le haut estran, là où il y a formation de la berme. 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 la PMSGM la mi-hauteur de l'estran (figure 123). 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'approchent d'une distribution normale des données. Toutefois, 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 124). Les échantillons se situent tous à la limite du sable moyen et du sable fin.

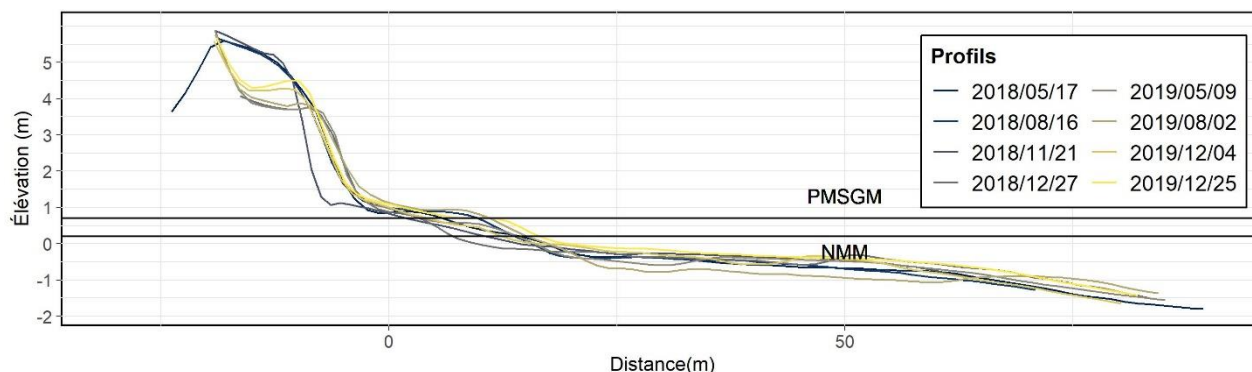


Figure 123. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 21 du 17 mai 2018 au 25 décembre 2019 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

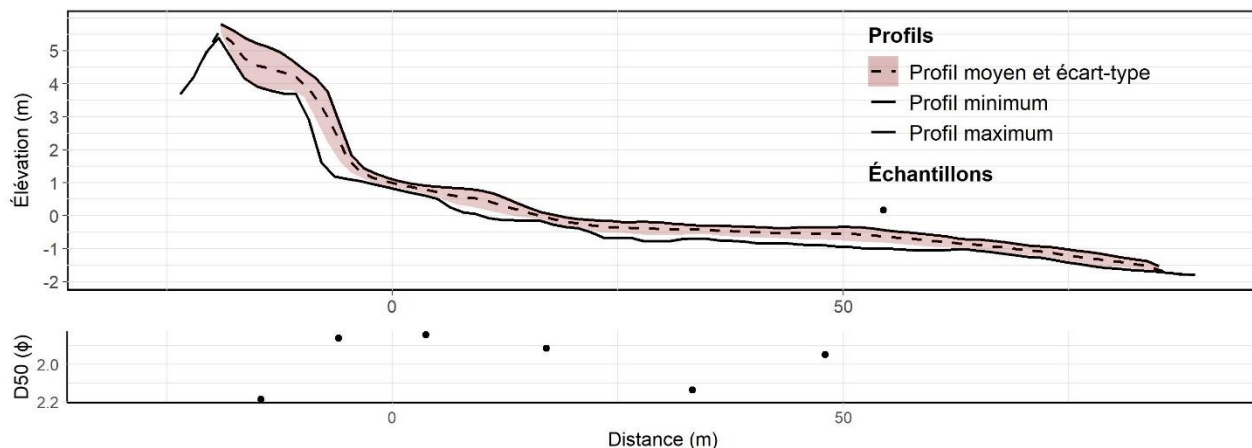


Figure 124. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 21 sur la plage de La Martinique. La référence altimétrique est le CGVD28.

Afin d'analyser les variations des largeurs de plages, le site de la plage de La Martinique a été subdivisé en quatre secteurs. Le secteur 1 est situé au nord du site et comprend les profils n° 1 à 10. Le secteur 2 est situé au centre-nord du site et comprend les profils n° 11 à 15. Le secteur 3, constitué de la recharge, est situé au centre-est du site et comprend les profils n° 16 à 25. Le secteur 4 est situé au sud du site et comprend les profils n° 26 à 30. Sur la figure 125, les lignes pointillées indiquent le secteur de la recharge, soit la recharge et 100 m de part et d'autre. Sur la figure 126, les lignes pointillées indiquent la délimitation de la recharge.

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. 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 125 indique que la largeur de plage au NMM est plutôt stable jusqu'au 5 mai 2019, puis elle subit un déplacement positif jusqu'au 27 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° 1, 2 et 5 à 7, puis négatif pour les profils n° 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 artificialisée 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 125 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.

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 126 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° 19 à 25, puis négatif pour les profils n° 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 augmentation de la largeur de plage au NMM depuis le premier levé. La figure 126 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° 1, 2 et 5, puis négatif pour les profils n° 3 et 4. 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.

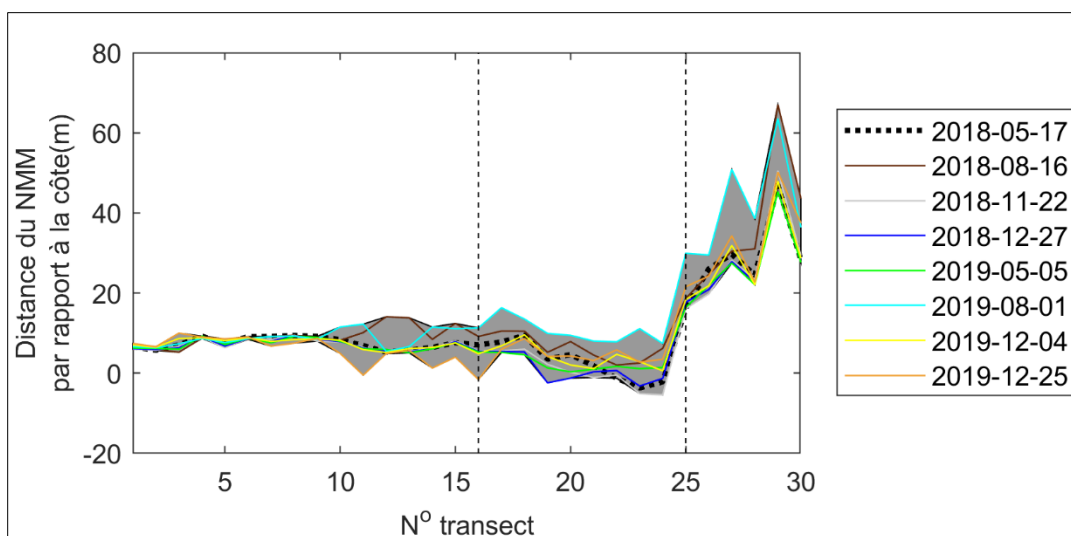


Figure 125. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de La Martinique

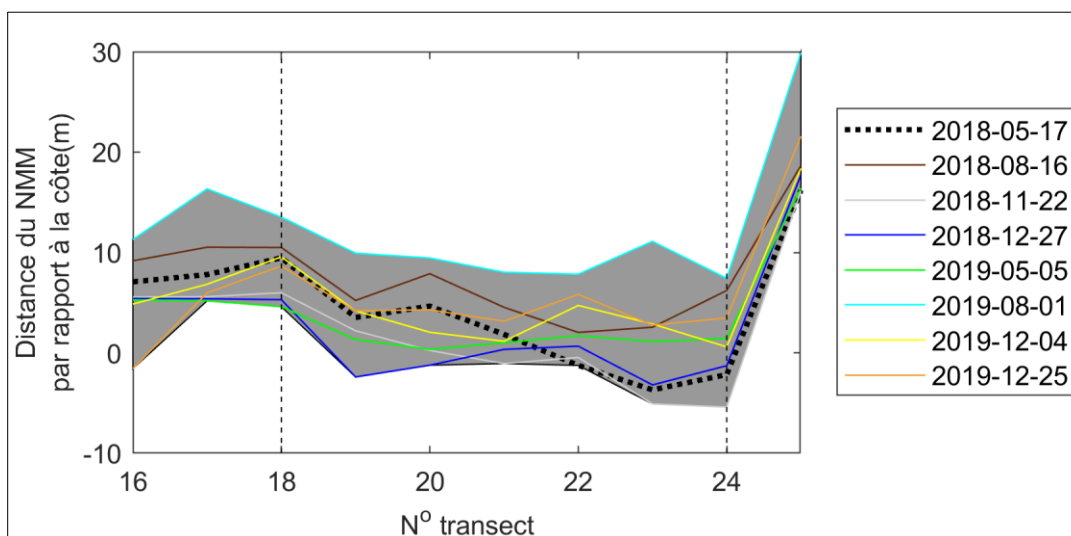


Figure 126. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge de La Martinique

4.2.5 Plage de Pointe-aux-Loups

4.2.5.1 Caractérisation granulométrique

Sur le site de la plage de 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 ϕ vu la grande variabilité dans la taille des sédiments entre les sites. Les résultats montrent que le site d'étude possède un D_{50} moyen de 1,48 ϕ , ce qui correspond à la classe du sable moyen. La distribution est unimodale, ce qui signifie que la granulométrie est plutôt homogène et suggère une seule source sédimentaire (figure 127).

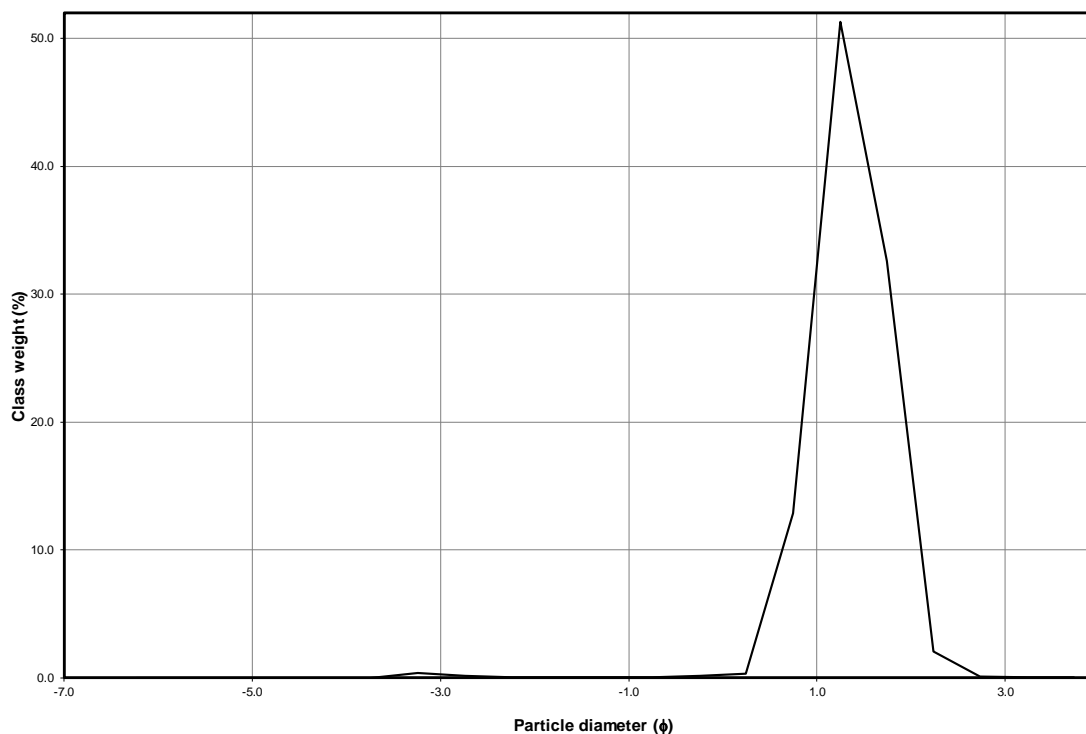


Figure 127. Distribution granulométrique de Pointe-aux-Loups

La distribution perpendiculaire à la côte de la taille des échantillons sera présentée avec les profils de plage dans la section 4.2.5.3.

4.2.5.2 Évolution historique

La figure 128 représente l'évolution historique de la ligne de rivage de la cellule hydrosédimentaire de Pointe-aux-Loups, pour la période 1965-2019, 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 7. Taux d'évolution de la ligne de rivage 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

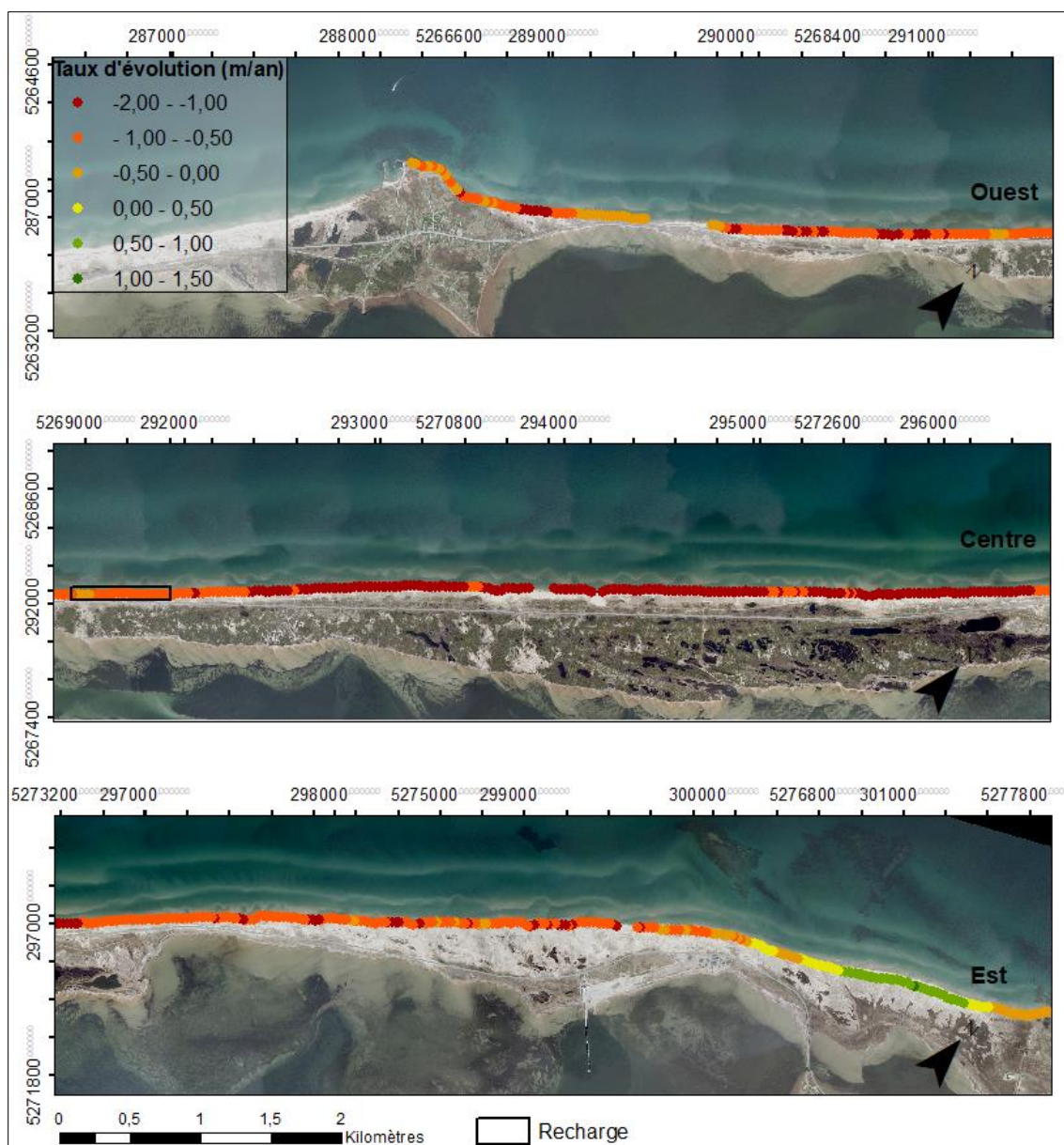


Figure 128. Évolution historique de la ligne de rivage de la cellule hydrosédimentaire de la Pointe-aux-Loups (1963-2019)

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 7). 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.

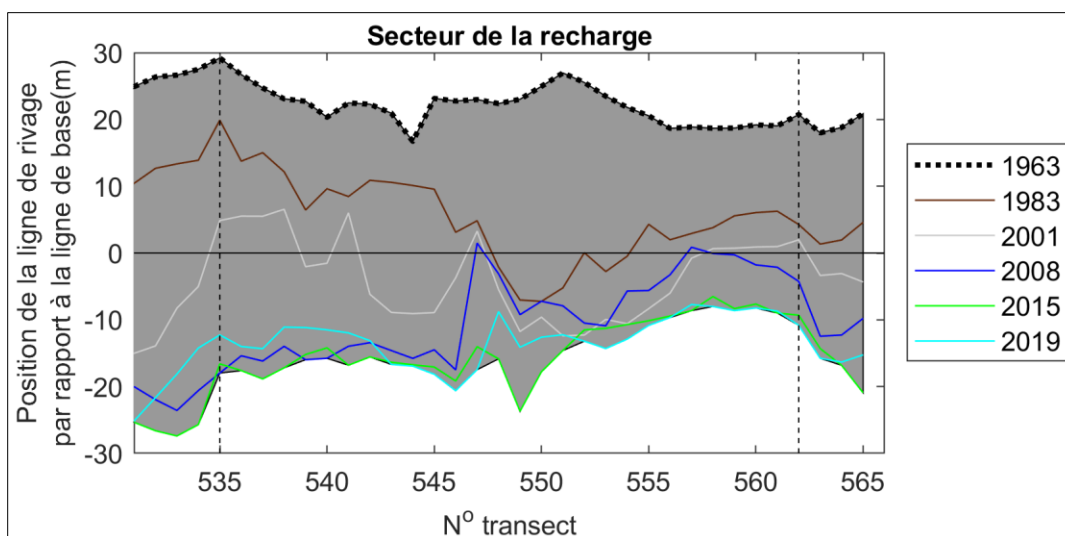


Figure 129. Position de la ligne de rivage par rapport à la ligne de référence pour le secteur de la recharge de Pointe-aux-Loups.

La figure 129 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. 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 entre 2008 et 2019. Le ralentissement est davantage marqué devant la recharge, entre les transects n° 535 et 562, qu'aux extrémités, entre les transects n° 531 et 535, ainsi qu'aux transects n° 562 et 566.

4.2.5.3 Évolution du secteur de la recharge de plage de décembre 2018 à novembre 2019

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

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 ($\pm 1\,350\text{ m}^3$). Ce dernier a été transposé dans l'enrochement de la partie centre-nord du secteur (figure 130).

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 131). 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 130).

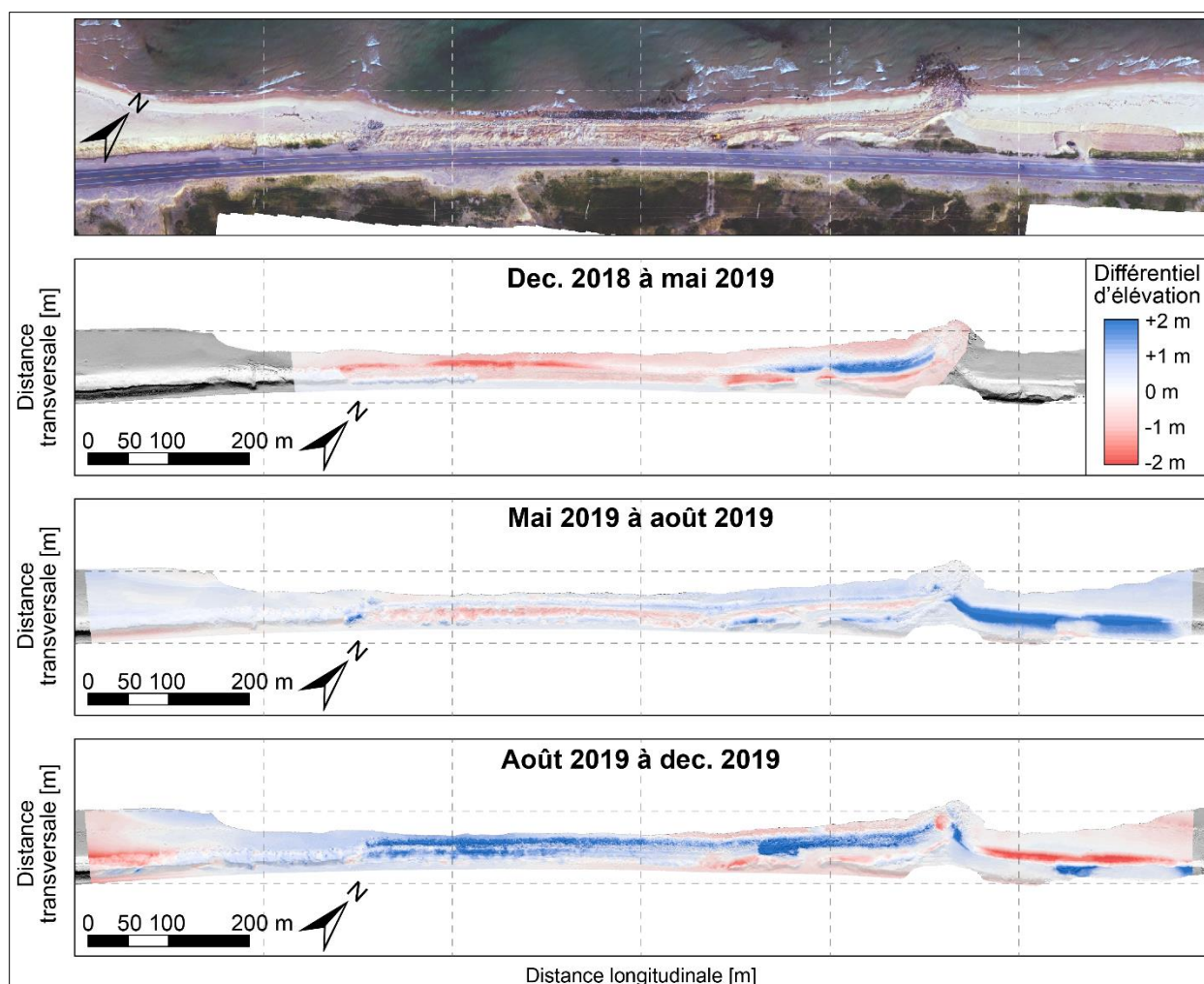


Figure 130. Différentiels d'élévations sur le secteur de la recharge de la plage de Pointe-aux-Loups entre décembre 2018 et décembre 2019.

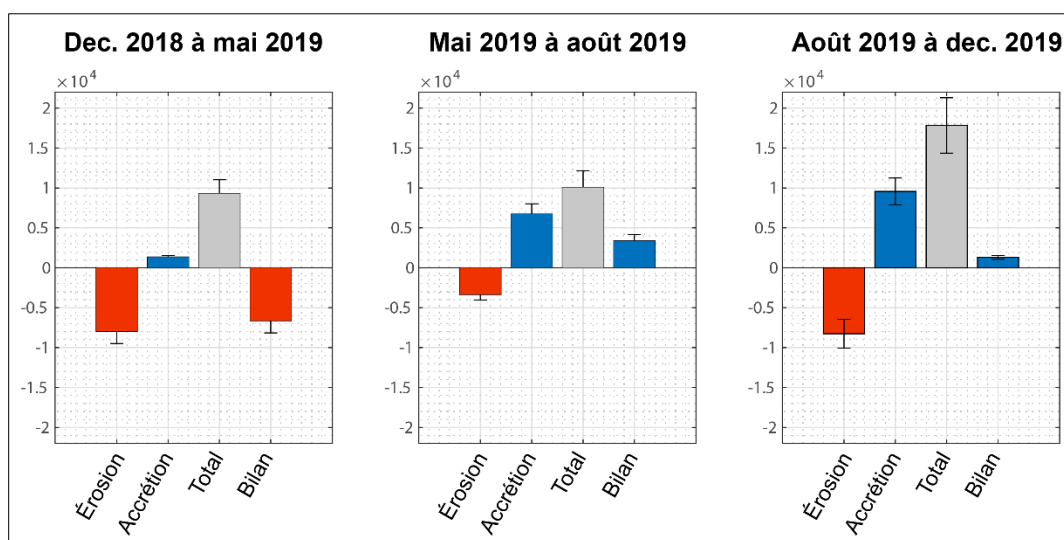


Figure 131. Bilans sédimentaires sur le secteur de la recharge de la plage de Pointe-aux-Loups entre décembre 2018 et décembre 2019.

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 131). 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.

Sur la plage de Pointe-aux-Loups, les profils n° 4, 16, 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'un cordon à $\pm 80\text{ m}$ 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 $\pm 5,5\text{ m}$. Entre décembre 2018 et mai 2019, il y a exhaussement du profil sur le haut estran et disparition du cordon. 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 bas estran. La flexure est difficilement identifiable sur ce profil.

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 le cordon littoral. 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.

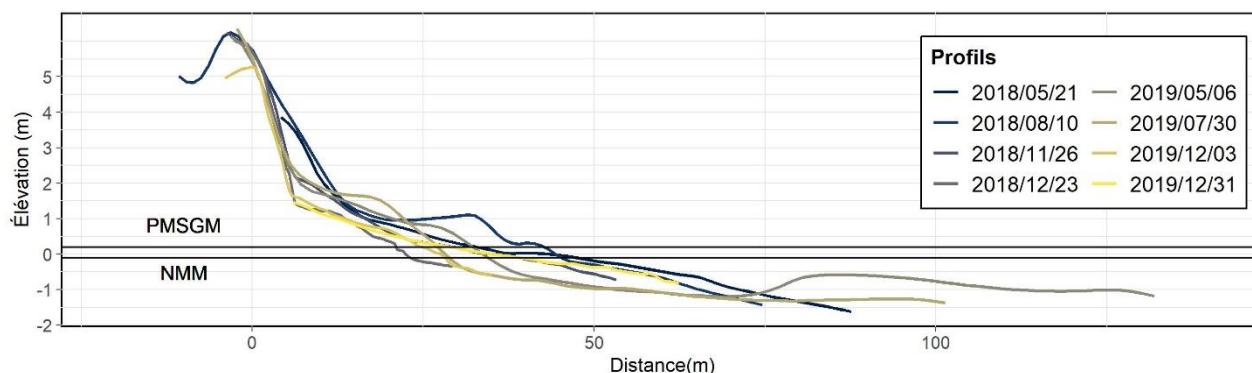


Figure 132. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 4 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

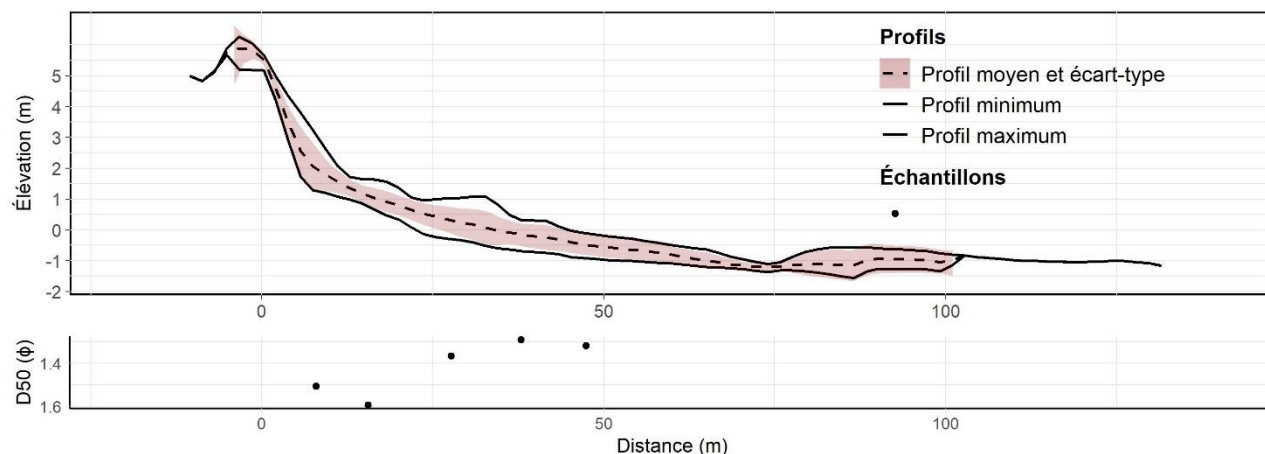


Figure 133. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 4 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

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 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. Toutefois, 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.

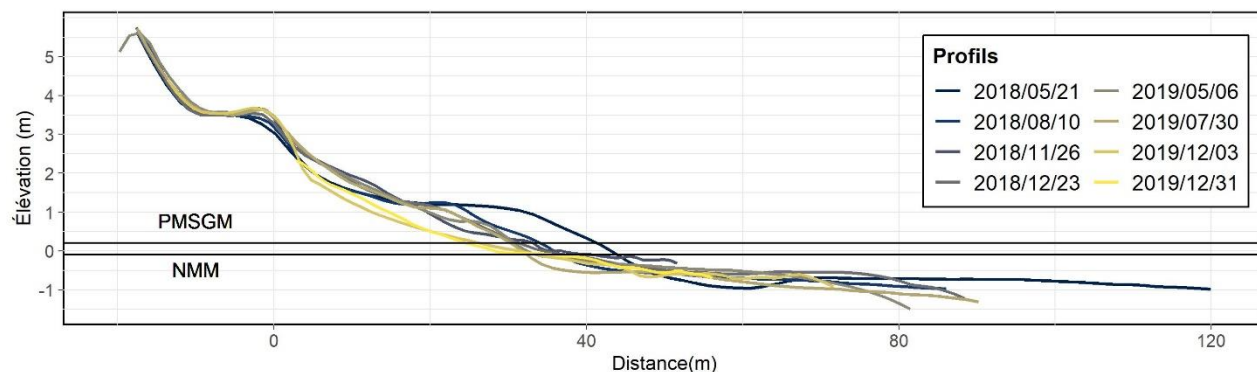


Figure 134. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 19 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

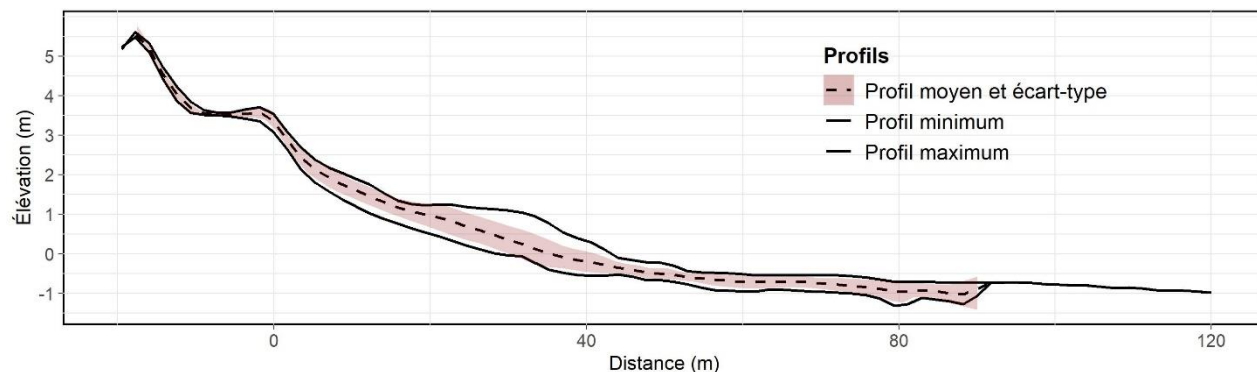


Figure 135. Enveloppe et profil moyen du profil n° 19 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 6, situé devant 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. 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, ce qui fait que le profil s'arrête à environ 30 m de la ligne de rivage. Du 4 décembre au 25 décembre 2019, le profil s'abaisse sur le bas estran. La flexure est difficilement identifiable sur ce profil.

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). 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. Toutefois, 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.

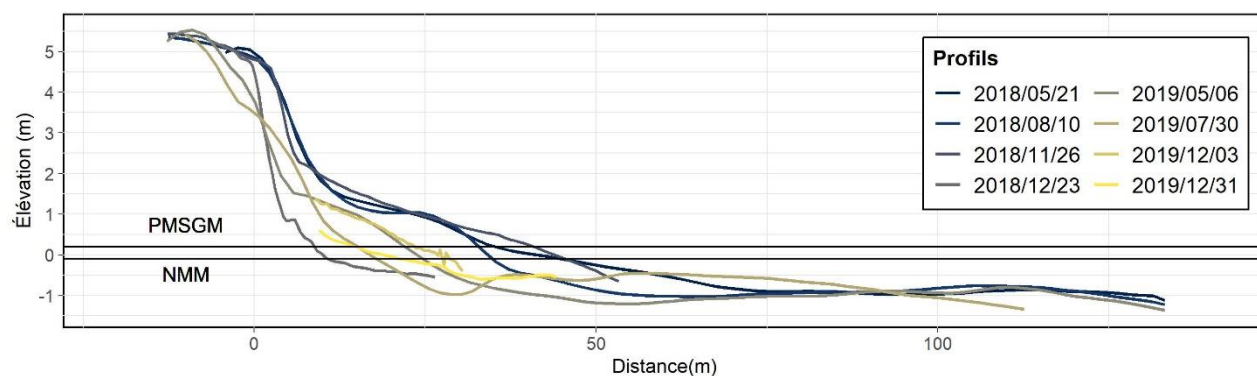


Figure 136. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 6 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

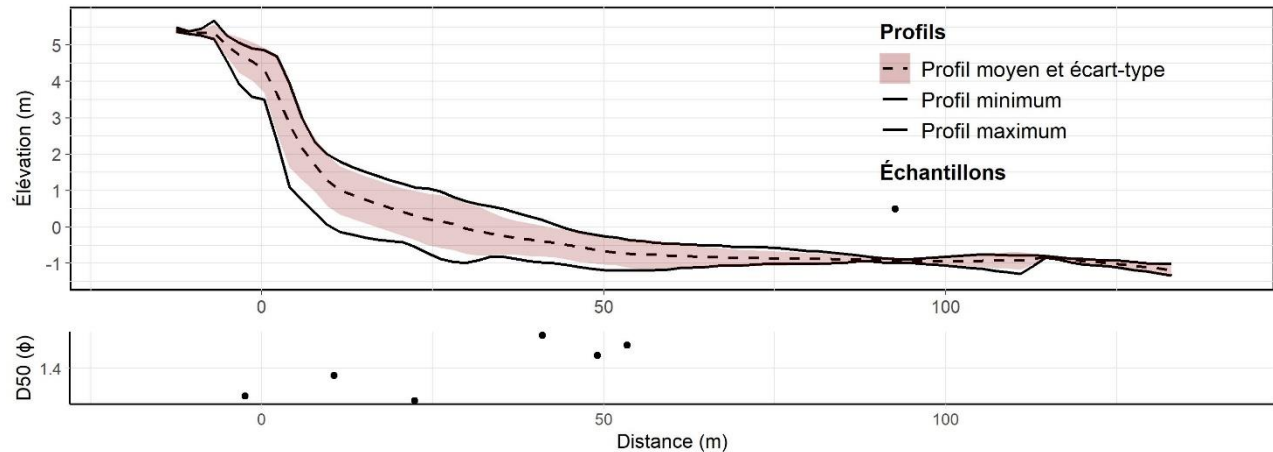


Figure 137. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 6 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 9, situé devant 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, dernier levé de profil 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, un cordon 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'estran 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. Toutefois, 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.

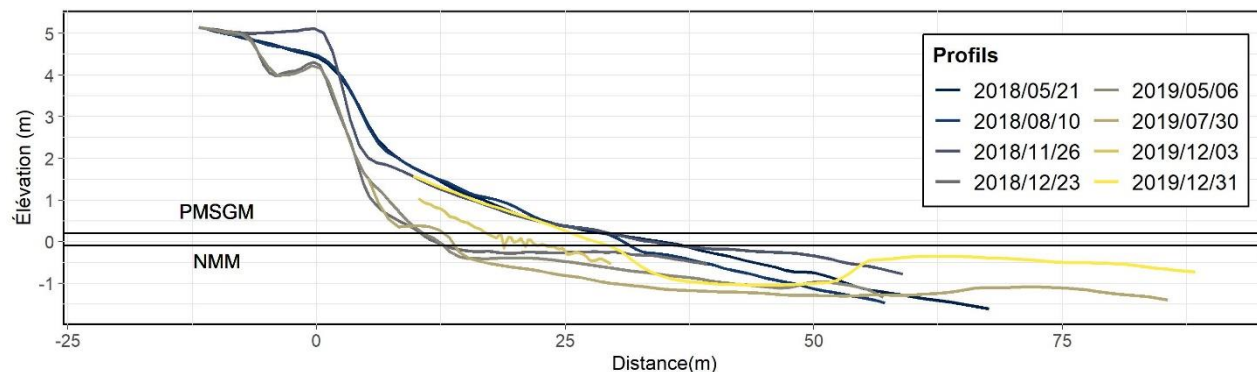


Figure 138. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 9 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

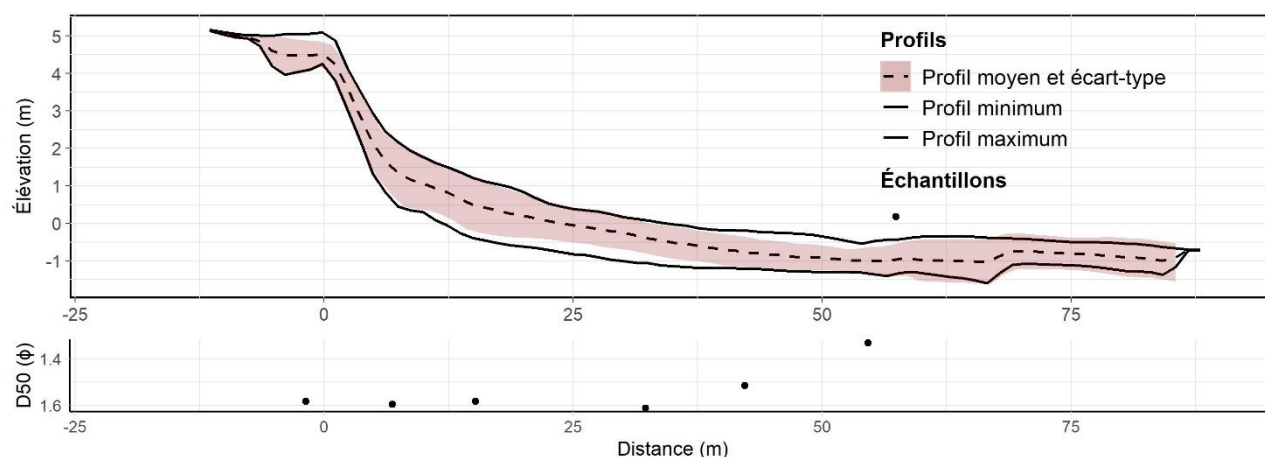


Figure 139. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 9 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 12, situé devant 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 ± 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 ± 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'estran et le PMSGM atteint le pied de l'enrochement en 2019 (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'estran 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.

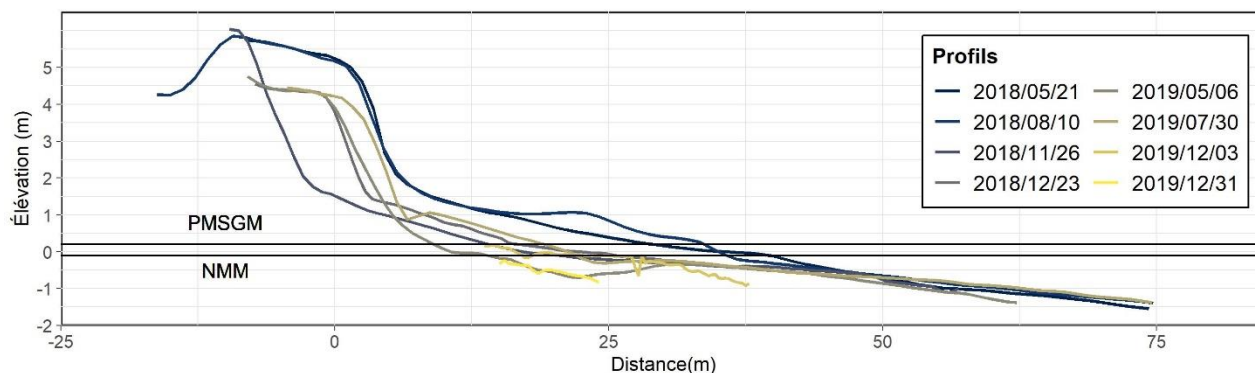


Figure 140. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 12 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups.

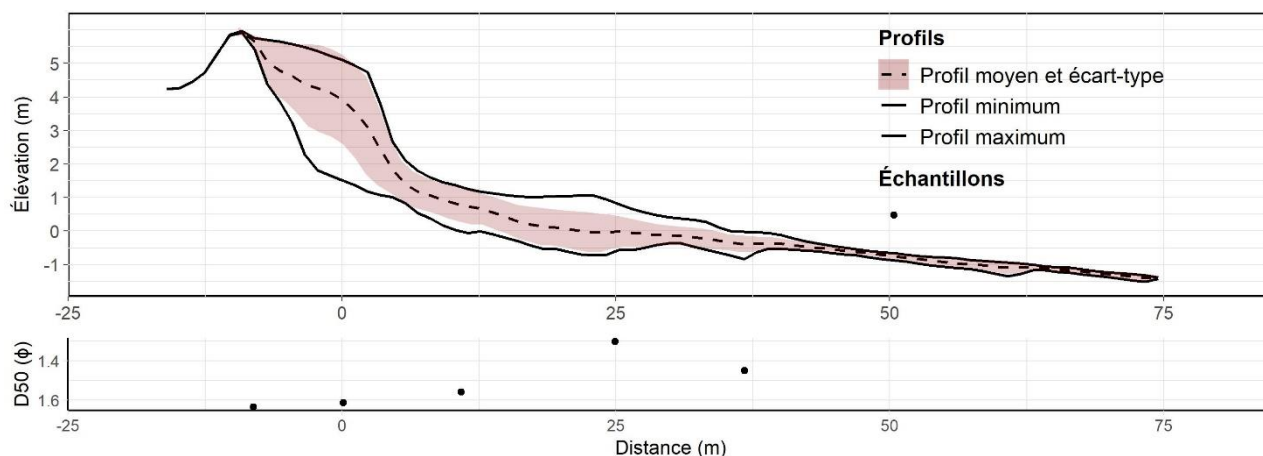


Figure 141. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 12 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Le profil n° 14, situé devant 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. Toutefois, 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.

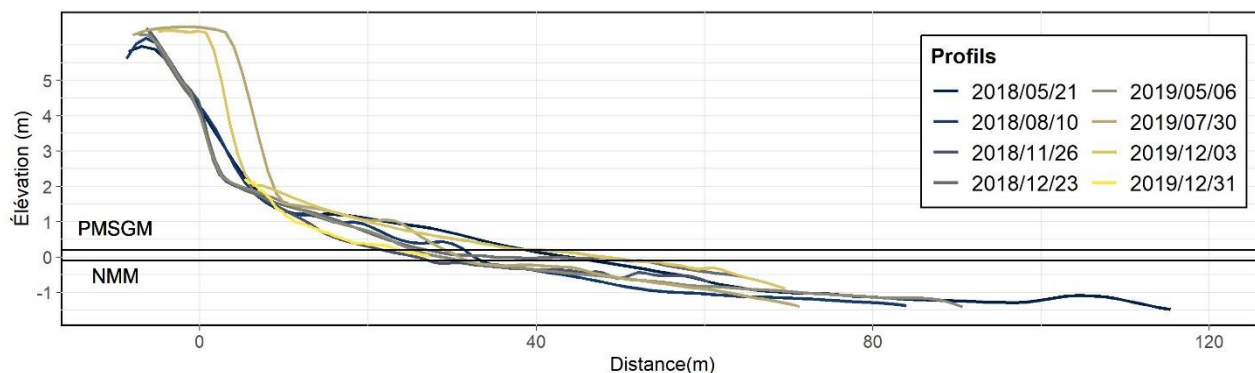


Figure 142. Ensemble des levés effectués sur le profil n° 14 du 21 mai 2018 au 31 décembre 2019 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

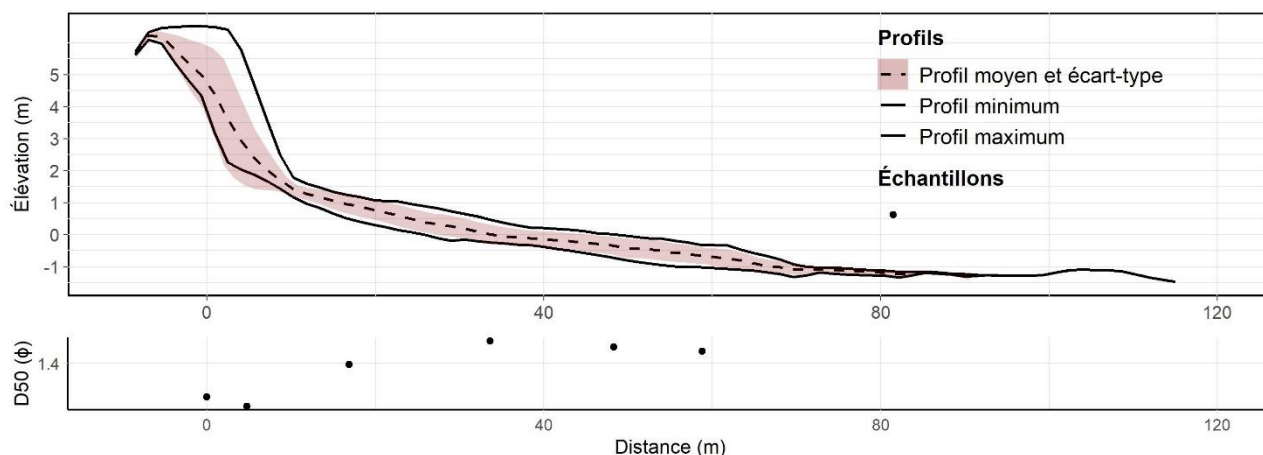


Figure 143. Enveloppe, profil moyen et distribution granulométrique du profil n° 14 sur la plage de Pointe-aux-Loups. La référence altimétrique est le CGVD28.

Afin d'analyser les variations des largeurs de plage, le secteur de la plage de Pointe-aux-Loups a été subdivisé en quatre sous-secteurs. Le secteur 1 est situé au sud du site et comprend les profils n° 1 à 5. Le secteur 2 est situé au centre-sud du site et comprend les profils n° 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 comprend les profils n° 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 comprend les profils n° 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.

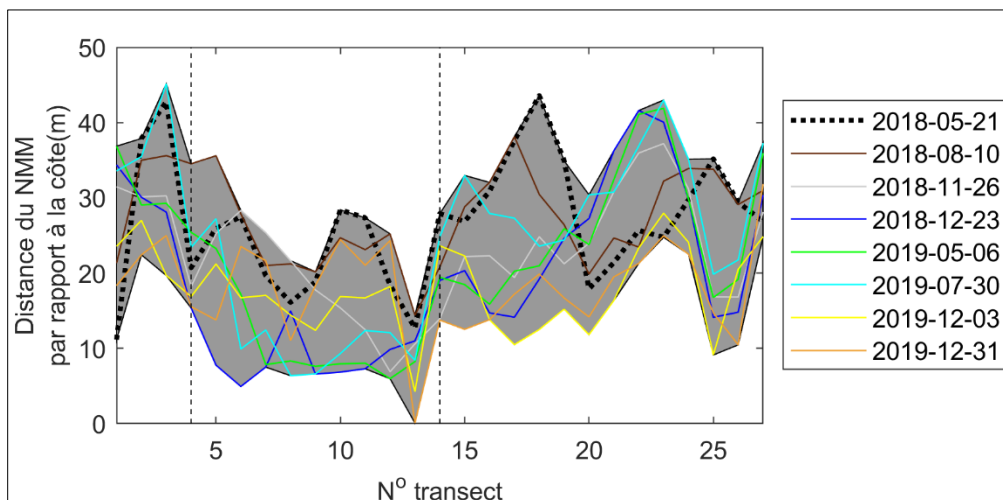


Figure 144. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour le secteur de Pointe-aux-Loups.

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.

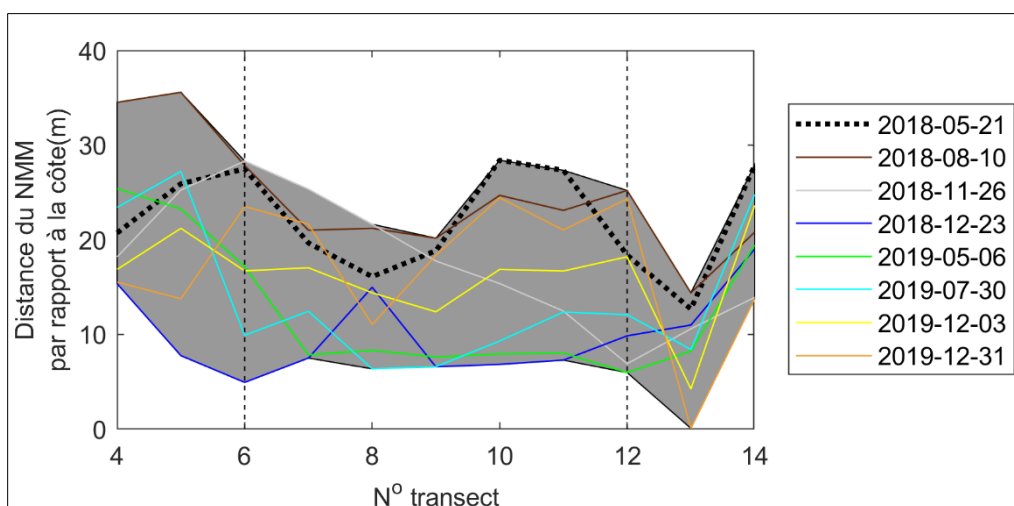


Figure 145. Distance entre la ligne de rivage et le niveau moyen des mers pour la recharge de Pointe-aux-Loups.

Le secteur 2 est caractérisé par une côte à tombolo dunifié avec recharge en 2018 et un 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 et l'automne 2019 et négativement pendant l'automne 2018. 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 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° 13 et 14, puis négatif pour les profils n° 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° 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.

4.2.6 Conclusion des résultats sectoriels pour le suivi environnemental de travaux de rechargement de plage

4.2.6.1 Anse-aux-Coques

4.2.6.1.1 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, la promenade dans sa position actuelle est en effet présente depuis au moins 1993. 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 indique une enveloppe de variabilité beaucoup plus importante avant 1993.

Les levés réalisés indiquent une importante accumulation sédimentaire ainsi qu'un rehaussement du profil à la suite de 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 font donc suite aux recharges qui amènent une grande quantité de sédiments nouveaux sur la plage. Depuis 2018, les largeurs de plage, les profils et le bilan sédimentaire de la plage sont plutôt en équilibre. Ainsi, les recharges d'entretien effectuées pour cette période semblent suffisantes. La figure 146 illustre l'état de la plage pendant les travaux de recharge et en 2019, soit 5 ans après la première recharge.

Les profils des plages devant 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. Toutefois, les largeurs de plage au NMM sont moins grandes depuis l'implantation de la recharge. Ainsi, la plage est plus abrupte, moins large et le NMM se situe plus près de la ligne de rivage qu'en 2012. Cependant, le rehaussement de la surface 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 atteignent plus rarement le muret.



Figure 146. Plage de l'Anse-aux-Coques en 2014 (pendant les travaux de recharge) et en 2019.

4.2.6.1.2 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 et une bonne partie du bas estran. Il y a toutefois apparition et migration d'un cordon à une distance de ± 100 m. Le cordon migrant vers la côte pourrait suggérer une migration du système vers la côte, toutefois la flexure conserve sa position. Pour ce secteur, tel qu'illustré sur la figure 83, la largeur de plage au NMM augmente à partir de la recharge initiale, contrairement au secteur devant la recharge.

Le profil n° 13, situé à l'est du site, présente un exhaussement du profil sur le haut estran près de la flexure. Pendant cette même période, les profils de la recharge affichent un abaissement. Il pourrait alors y avoir diffusion des sédiments, 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.

4.2.6.1.3 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. 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 % (CUR & Hydraulics, 1987 ; 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 plutôt efficace.

La taille utilisée pour la recharge initiale est de $-2,81 \phi$ (Tremblay et al., 2014), correspondant à la classe du gravier fin, ce qui est supérieur à la granulométrie moyenne de la plage de $0,42 \phi$. Dans le rapport de

2017 sur le suivi de la recharge de Sainte-Luce (Bernatchez, Cormier, et al., 2017), les données démontraient que le recul du front de la recharge avait laissé une matrice mixte de sable et gravier sur le haut estran, alors qu’au moment de la recharge elle était constituée uniquement de gravier. La distribution granulométrique de la campagne de 2015 indique une dominance du sable, lequel est constitué de sédiments plus grossiers sur le haut estran. La conception initiale de la recharge correspond alors aux recommandations dans la littérature suggérant une granulométrie équivalente ou légèrement supérieure à la granulométrie d’origine (Bachand & Comtois, 2016 ; CUR & Hydraulics, 1987 ; Dean, 2002).

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 pourraient atteindre le muret. Il est à noter que contrairement à ce qu’on retrouve dans la littérature, le volume par mètre linéaire 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.

4.2.6.2 Banc Laroque

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

L’évolution historique du secteur indique que le secteur du banc Laroque 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. Toutefois, nous observons un léger abaissement du haut estran et une érosion de la recharge entre le début de 2018 et la fin de 2019 (figure 147). L’analyse de la largeur des plages au NMM indique une différence claire entre le site de recharge, le secteur des falaises et le secteur du barachois sans artificialité et le secteur de 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 plus étroite avec une valeur moyenne de 15,60 m. La moyenne du déplacement du NMM est cependant négative pour les secteurs de l’enrochement et de la recharge, la recharge affichant aussi des valeurs de recul plus importantes. Ces valeurs augmentent par contre en s’éloignant du secteur de l’enrochement pour le secteur de la recharge et des falaises meubles. Pour le secteur de la recharge, le NMM atteint la partie inférieure du haut estran et le PMSGM la partie supérieure du haut estran.



Figure 147. Recharge du banc Larocque en août 2019. Une microfalaie se dessine sur l'ensemble de la recharge.

4.2.6.2.2 Comparaisons avec les secteurs témoins

Les secteurs témoins 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 à l'est, 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.

4.2.6.2.3 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 bimodale de la granulométrie suggère deux sources sédimentaires. Sur la figure 84, on observe un premier mode dans la classe du gravier très grossier à $-5,73 \phi$ et un deuxième mode dans la classe du sable moyen à $1,74 \phi$. Lorsque l'on observe la distribution perpendiculaire à la côte des échantillons, le haut estran est constitué de gravier très fin à très grossier, le haut de plage et la recharge de sable grossier et le bas estran de sable fin, moyen et grossier. Ainsi le mode correspondant au sable moyen provient de la recharge, du haut de plage et du bas estran et le mode correspondant aux graviers très grossiers du haut estran. Ceci pourrait mener à l'hypothèse que les sédiments de la recharge, étant plus fins, sont érodés vers le bas estran plutôt que de se reprofiler sur le haut estran. Toutefois, comme illustré sur la figure 148 la granulométrie du haut estran du banc Larocque est assez hétérogène. Ainsi des

analyses supplémentaires devraient être effectuées afin de comprendre le transport des sédiments de la recharge sur le profil.



Figure 148. 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 ($-4,32 \phi$) (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 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. Toutefois, 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, étant constituée de $\pm 57 \text{ m}^3/\text{m}$ linéaire. Ainsi si une recharge était de nouveau à effectuer, un volume plus grand pourrait être à considérer.

4.2.6.3 Plage Monaghan

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

L'évolution historique de la ligne de rivage 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 à l'étude de la recharge, passant de 0,30 m par année de 1965 à 1996 à 1,04 m par année de 2001 à 2017. Le secteur n'est donc généralement pas sujet à l'érosion. Toutefois, la ligne de rivage a reculé fortement entre 1996 et 2001. Le site peut néanmoins être sujet à une grande mobilité caractérisée par des périodes successives d'érosion et d'accumulation (figure 101). L'évolution des largeurs de plages au NMM indique aussi que les largeurs de plages peuvent être très variables de façon parallèle à la côte, ce qui pourrait détériorer certains secteurs, et ce, même si la plage s'avère généralement en accumulation. C'est d'ailleurs ce qui pourrait justifier la mise en place d'une recharge, très ponctuelle, dans un secteur pourtant en accumulation.

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. La hauteur du haut de plage est aussi légèrement plus élevée pour les profils sur la recharge, particulièrement sur le profil n° 4. Pour cette même période, les largeurs de plage au NMM augmentent de façon importante, confirmant que le milieu est en accumulation (figure 149). 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 149. Plage Monaghan en août 2019

4.2.6.3.2 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. 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. 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.

4.2.6.3.3 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 et de maintenir l'équilibre dynamique et sédimentaire de la plage. La recharge réalisée en 2001 a fait suite à une période importante d'érosion entre 1996 et 2000 où une microfalaie reculait. Le secteur de la recharge est grandement en accumulation devant la recharge et de part et d'autre de celle-ci. Cette accumulation est plus marquée depuis 2001, soit un an après la recharge, mais elle peut difficilement lui être attribuée puisque cette recharge était de faible ampleur par rapport à l'accumulation dans le secteur. Les volumes utilisés ne sont pas disponibles, mais les dimensions de 50 m de longueur par 20 m de largeur et 1,5 à 2 m de hauteur en font la plus petite recharge parmi les sites d'études. La longueur de seulement 50 m en fait aussi une recharge très ponctuelle qui pourrait

difficilement avoir un impact sur tout le secteur d'études d'une longueur de ± 1 km. Toutefois, 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 150 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 150. 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.

4.2.6.4 Plage de La Martinique

4.2.6.4.1 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 rechargement, 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, quoiqu'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 foyers 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 151). 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. Toutefois, 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 aussi 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. La recharge peut tout de même être affectée lors d'événements hydrodynamiques importants.



Figure 151. Recharge de La Martinique avant et après la tempête Dorian.

4.2.6.4.2 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 de recharge.

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 à la suite de la recharge ponctuelle de décembre 2018, suggérant 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 plages au NMM. Les largeurs de plage atteignent toutefois une largeur moyenne de 52,03 m, donc beaucoup plus larges que dans les autres secteurs.

4.2.6.4.3 Évaluation de l'efficacité de la recharge de plage

Les objectifs de la recharge étaient de réduire l'érosion et de protéger les infrastructures. 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 urgence, celles-ci étant effectuées avant l'arrivée de tempêtes. Toutefois, 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 démontre 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 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, 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 graviers très fins 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 la route 199 à l'approche de tempêtes. En effet, aucun plan, devis ou étude de la durabilité de la recharge n'a été entrepris, ce qui résulte en 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.

4.2.6.5 Plage de Pointe-aux-Loups

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

L'évolution historique de la plage de 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 de 2008 à 2019, 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 6,5 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. Toutefois, 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 et que l'indicateur utilisé pour un enrochement est le sommet de l'infrastructure. 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 152). De plus, il est difficile d'évaluer la réponse de la plage à l'enrochement, celui-ci étant très récent.



Figure 152. 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.

4.2.6.5.2 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 plages 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.

4.2.6.5.3 Évaluation de l'efficacité de la recharge de plage

Les objectifs de la recharge étaient de réduire l'érosion et de protéger les infrastructures lors des tempêtes. 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 urgence, 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 6,5 m. Tout comme pour la recharge de La Martinique, la pente est de $\pm 1:2$. La granulométrie est également fine, unimodale et constante sur tout le profil. 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 vers le bas estran et semblent plutôt complètement sortir du secteur de la recharge.

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 199 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 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 de conclusions, mais le suivi devrait être continué afin d'évaluer l'effet de l'enrochement sur la dynamique de la plage.

5. ÉVALUATION DES MÉTHODES DE RENATURALISATION ET DE RECHARGE DE PLAGES COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS

5.1 SUIVI DE LA RENATURALISATION D'UNE PLAGE COMME SOLUTION D'ADAPTATION AUX ALÉAS CÔTIERS

À Cap-des-Rosiers, les travaux de renaturation de la plage qui ont duré d'août 2016 à décembre 2018 ont été bénéfiques d'un point de vue socioéconomique et environnemental. La plage, ayant retrouvé un aspect naturel, est redevenue beaucoup plus attrayante pour les communautés locales et les touristes, ce qui a entraîné une augmentation du nombre d'utilisateurs de 27,4 % après le démantèlement, par rapport à la fréquentation antérieure (annexe 8). De plus, Parcs Canada (2018) a observé que la restauration de la dynamique naturelle de plage a accru et amélioré l'habitat de frai du capelan dans ce secteur. En raison des nombreuses interventions anthropiques réalisées durant la période d'étude, qui ont perturbé la dynamique naturelle de la plage, il est difficile d'en faire ressortir des tendances de dynamique hydrosédimentaire durant la période après démantèlement. Par contre, d'un point de vue géomorphologique, plusieurs éléments témoignent de la restauration d'une dynamique naturelle, connue pour augmenter la résilience du système côtier face aux tempêtes, à savoir :

- l'augmentation de la largeur de plage ;
- la formation et la migration de bermes ;
- l'augmentation et la stabilisation du bilan sédimentaire ;
- la stabilisation des pentes de plages.

Premièrement, la largeur de plage du site d'étude, qui était en diminution depuis les années 1960, a triplé à la suite de la renaturation. En 2019, la largeur de plage du site d'étude a atteint une valeur légèrement supérieure aux valeurs moyennes du site témoin (figure 30). En raison d'une pente moyenne plus douce sur le site d'étude, en comparaison au site témoin, une plage plus large est attendue. La largeur de plage est un bon indicateur de son bilan sédimentaire et découle de l'équilibre hydrodynamique et hydrosédimentaire de la région (Bernatchez & Fraser, 2012 b).

Deuxièmement, dans la période précédant le démantèlement, les bermes surtout présentes au sud du secteur d'étude étaient petites. Suivant le démantèlement, les bermes sont plus grosses et présentes sur l'ensemble de la plage. Dans les plages de gravier, les bermes constituent une forme dynamique atténuant l'énergie des vagues et limitant les événements de franchissement ainsi que l'érosion du haut de plage (Buscombe & Masselink, 2006). Entre autres, les bermes permettent la redistribution de leurs matériels vers le haut de plage lors des événements de tempête. Ce phénomène est observable dans les migrations des bermes montrées aux figure 56, figure 57 et figure 61.

Troisièmement, le bilan sédimentaire, qui était relativement peu élevé, augmente considérablement suivant le démantèlement et demeure relativement stable jusqu'à la fin de la période d'étude (figure 49, figure 62). Par exemple, les bilans sédimentaires de 2018 sont constamment positifs (figure 57). Bien que deux recharges aient été effectuées dans cette période, elles n'expliquent pas la totalité de l'accrétion survenue en 2018. De plus, le bilan sédimentaire de 2019 témoigne de la capacité du système côtier à retrouver un certain équilibre. Le bilan sédimentaire du site d'étude demeure stable bien que le total de sédiment mobilisé par l'ouragan Dorian ait été d'environ 9000 m³ (figure 60). Une stabilité dans le bilan sédimentaire témoigne de la capacité de la plage à retrouver un état d'équilibre suivant les périodes d'érosion.

Finalement, les pentes de plages, qui étaient très variables dans la période suivant le démantèlement et jusqu'à la fin 2017, semblent devenir plus stables en 2018 et 2019 (figure 63). On observe également qu'à

partir de 2018, les variations de pente du site d'étude correspondent davantage à celles du site témoin, ce qui illustre la capacité des plages à retrouver une pente d'équilibre à la suite d'épisodes de tempête.

La stabilisation du bilan sédimentaire et des pentes de plage peut être expliquée par une diminution du régime de vague de 2017 à 2019 (figure 37), mais aussi par la fin des travaux de renaturalisation qui a permis à la plage de retrouver une dynamique côtière naturelle.

Les résultats montrent que dans une perspective de gestion des risques côtiers le démantèlement d'ouvrages rigides pourrait être une solution dans certains contextes. Par exemple, certaines côtes basses présentent des valeurs d'érosion très faibles et sont plutôt stables dans le temps. La mise en place de murs et d'enrochements a favorisé l'érosion de la plage et a augmenté le risque de submersion côtière (Bernatchez et al., 2011 ; Didier et al., 2015). La renaturalisation de ces milieux pourrait ainsi réduire le risque de submersion côtière. Comme nous l'avons vu, un espace d'accommodement est toutefois nécessaire à la suite du démantèlement lors de la période de rééquilibrage sédimentaire du système pour lui permettre de migrer.

5.2 SUIVI ENVIRONNEMENTAL DES TRAVAUX DE RECHARGEMENT DE PLAGE

Les conclusions des résultats sectoriels du suivi environnemental des travaux de rechargement 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 Pointe-aux-Loups.

5.2.1 Réponse de la plage Monaghan

La recharge de la plage Monaghan a été effectuée à l'été 2000. Le suivi environnemental a débuté en 2018, soit 18 ans plus tard. Le réseau de suivi de l'érosion côtière qui a été implanté en 2000 dans ce secteur, permet de constater que le déplacement de la ligne de rivage dans le secteur immédiat à la recharge a été en moyenne de -0,8 m entre 2000 et 2001, puis de -0,03 m entre 2001 et 2002. Par la suite, le bilan a été positif. Comme les résultats le montrent, le secteur est largement en accumulation depuis la mise en place de la recharge. Toutefois, le bilan sédimentaire de la cellule hydrosédimentaire était déjà positif avant les travaux de rechargement. Il est donc difficile de tirer des conclusions sur l'efficacité de la recharge, cette accumulation 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), mais fort probablement due à la migration d'un cordon de bas estran devant ce secteur qui est venu engraisser la plage tout en atténuant l'énergie des vagues (Bernatchez et al., 2008).

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 engraisées. 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.

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.

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 *et al.*, 2017 ; Ropars, 2013). La recharge de l'Anse-aux-Coques a également fait l'objet d'un suivi jusqu'en 2016 (Bernatchez *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, montrent 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).

Les recharges sur ces deux sites sont toutefois devant des infrastructures rigides. Dans le cas de Sainte-Luce, le muret pourrait avoir un effet négatif sur la recharge. En effet, comme de hauts niveaux d'eau peuvent l'atteindre lors d'événements hydrodynamiques importants, le muret pourrait favoriser l'érosion de la recharge (Castelle *et al.*, 2009a ; Cooper & McKenna, 2008 ; Defeo *et al.*, 2009), ce qui irait à l'encontre des efforts poursuivis. La recharge de Carleton peut 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).

5.2.3 Réponse des plages de La Martinique et de Pointe-aux-Loups

Les recharges de La Martinique et de 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 prévention 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, puisque sans ces recharges préventives et répétées, la route 199 aurait été menacée. 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 comme efficaces puisqu'elles nécessitent des interventions régulières. 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 prématurément 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 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 travaux. Ces recharges sont aussi

accompagnées d'infrastructures rigides à proximité. Elles pourraient donc aussi être affectées par l'effet de bout occasionné par les enrochements (Balaji *et al.*, 2017 ; Kraus & McDougal, 1996).

Ceci 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.

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

6.1 RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

À notre connaissance, et selon Nordstrom *et al.* (2016), peu d'études de cas sur le suivi du démantèlement d'un enrochement n'ont été effectuées auparavant. La littérature contient donc peu de recommandations à ce sujet, toutefois, nous considérons que les recommandations générales des recharges de plage s'appliquent aux travaux de démantèlement d'un enrochement.

Les recharges de plage devraient être effectuées lorsque les processus d'érosion sont bien compris, que les incertitudes dans la conception et la prédiction 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 déséquilibre 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 pratiques et scientifiques, et qui couvrent les composantes d'ingénierie, géomorphologique, biologique, économique, sociale et de gouvernance disponibles, facilite 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 facilite 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 à la suite de dragages et de 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.

6.2 PHASE DE CONCEPTION

6.2.1 Renaturalisation d'une plage

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

- Lorsque la plage doit subir un reprofilage, comme dans le cas de Cap-des-Rosiers, une pente doit être déterminée. Cette pente peut être modélisée en fonction du régime de vague et de la granulométrie de la plage. Plusieurs équations et méthodologies ont été développées pour modéliser une pente d'équilibre dynamique (Dean, 1991 ; Dean *et al.*, 2002 ; Holman *et al.*, 2014 ; López *et al.*, 2018). Il est important que ces équations correspondent aux environnements ciblés. Les équations peuvent également être validées sur des sites témoins adjacents ou encore la pente d'équilibre peut être déterminée sur le terrain dans un environnement similaire stable à proximité du site d'intervention. La stabilité de la plage dans le temps peut notamment être déterminée à partir d'une analyse rétrospective de la largeur de la plage à partir des photographies aériennes.
- Dans le cas du démantèlement d'un ouvrage de protection, il faut prévoir, notamment si celui-ci a entraîné un déficit sédimentaire de la plage, que le système pour se réajuster va migrer vers l'intérieur des terres. L'évaluation de cet espace d'accommodement est particulièrement importante si des infrastructures sont maintenues à l'arrière-plage ou l'arrière-côte.

6.2.2 Recharge de plage

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

- Utiliser une approche par cellule hydrosédimentaire pour 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'évolution historique de la ligne de rivage et de la largeur de la plage ; la présence de foyers d'érosions, l'identification des sources sédimentaires ; et la présence d'autres infrastructures de protection à proximité. Nos 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).
- La taille des sédiments servant à la recharge doit être adaptée aux conditions hydrodynamiques et respecter la texture des sédiments de l'environnement récepteur pour réduire les impacts environnementaux. Le D50 seul informe peu sur la pertinence de la taille granulométrique. Il doit être accompagné de l'écart-type de la distribution granulométrique. Lorsque possible, il faudrait privilégier les matériaux d'emprunt de sites terrestres pour éviter les perturbations que peut

entraîner l'utilisation de sources sédimentaires en zone marine. Il existe de nombreux deltas postglaciaires émergés au Québec à proximité des côtes qui présentent souvent des tailles granulométriques similaires à celles retrouvées sur les plages.

- Rédiger des plans et devis en tenant compte de l'analyse de l'état initial et de la modélisation. Une analyse de solution multicritère devrait toujours être effectuée afin de s'assurer que la conception présentée est l'option la plus avantageuse et adaptée à la dynamique côtière (Campbell & Benedet, 2006 ; National Research Council, 1995).
- 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).

6.3 PHASE DE RÉALISATION

6.3.1 Renaturalisation d'une plage

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

- Effectuer les interventions au printemps plutôt qu'à l'automne. À Cap-des-Rosiers, les travaux de démantèlement de 2016, de reprofilage de 2017 et de recharge en 2018 ont tous été effectués à l'automne et ont été immédiatement affectés par les tempêtes automnales. La planification des interventions au printemps favoriserait la consolidation du sédiment pendant l'été, un meilleur ajustement de la plage par les processus naturels de beau temps pour obtenir une pente d'équilibre avant les tempêtes automnales.
- À la suite du démantèlement, réduire au minimum la compaction du substrat de la plage par le passage des machineries lourdes. La compaction du sédiment réduit la mobilité du sédiment et par conséquent les réajustements hydromorphosédimentaires de la plage. Ces dynamiques sont essentielles pour que la plage réajuste naturellement son profil d'équilibre.
- Dans le cas d'un démantèlement, nos données montrent qu'il est important d'assurer le retrait et la déconsolidation des matériaux servant à la fondation du segment routier. Ces matériaux sont en effet problématiques, car leur compaction réduit la mobilité du sédiment et contraignent les morphodynamiques de la plage. De plus, leur exposition entraîne la détérioration de l'aspect naturel de la plage, car ces matériaux sont souvent très différents de ceux qui composent la plage.

6.3.2 Recharge de plage

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

- 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. Viser d'abord d'utiliser une distribution granulométrique similaire au milieu récepteur ou légèrement supérieure. Un choix de matériel granulaire plus grossier peut parfois rendre un projet possible, en diminuant les volumes de sédiments et les coûts. Il serait intéressant d'évaluer si l'utilisation

d'un matériel plus grossier augmente la résistance de la recharge à l'érosion et sa durée de vie utile (sans recharge d'entretien). Aussi, tenir compte de la fraction de sédiments fins (sable fin, limon argile) 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 du milieu. Peu d'études s'y intéressent, menant à des biais quant aux impacts positifs et négatifs de la mise en place de recharges de plages (Nordstrom, 2005 ; Peterson & Bishop, 2005).
- 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 (en dehors de la période de fraie du Capelan qui se fait sur la plage), la plupart des tempêtes ayant lieu à l'automne et à l'hiver (Danard *et al.*, 2003).

6.4 SUIVI ET RÉAJUSTEMENT

6.4.1 Renaturalisation d'une plage et recharge de plage

Les mêmes méthodes de suivi et de réajustements peuvent être utilisées suivant une renaturalisation ou une recharge de plage. À la lumière de nos résultats et de la littérature, les recommandations pour la phase de suivi et de réajustement 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. Ce suivi permet aussi d'évaluer les recharges d'entretien qui sont souvent nécessaires à la suite de la recharge principale. 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).

- 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 devrait être adaptée au fil du temps pour refléter l'information et la compréhension obtenue 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).
- Pour les recharges de plages, 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. Leurs contributions et influences sont rarement reflétées dans les rapports techniques, qui se concentrent sur les impacts de la mise en place du projet (Nordstrom, 2005).

7. CONCLUSION

7.1 CONSTATS GÉNÉRAUX

Les résultats ont montré que la renaturalisation permet à la plage de retrouver plusieurs de ses qualités initiales. D'un point de vue géomorphologique, la plage a retrouvé une dynamique naturelle avec des largeurs de plage et des bilans sédimentaires comparables aux plages adjacentes. D'un point de vue paysager, la plage a également retrouvé un aspect « naturel » et les modifications anthropiques sont de moins en moins apparentes. D'un point de vue social, une augmentation du nombre d'utilisateurs a été observée. Bien que nous n'ayons pas encore un recul de plusieurs années suivant les travaux de renaturalisation, les avantages sont apparus dès le démantèlement de la route et de l'enrochement. La prolongation du suivi permettrait d'étudier plus en détail l'évolution de la plage à long terme et permettrait de déceler des tendances.

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 recharges plus efficaces ou plus adaptées. 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 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 et un projet de renaturalisation ont été effectués, avec plusieurs méthodes d'interventions différentes. Concernant les recharges, il y a 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 rapport 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 montré que les projets ayant le mieux fonctionné sont ceux ayant fait l'objet d'une analyse de conception plus détaillée, comme celle de Sainte-Luce financée par le MSP.

Les bénéfices environnementaux sont souvent au cœur des travaux de renaturalisation de plage (Lithgow *et al.*, 2013 ; Toft *et al.*, 2014), ce qui n'est souvent pas le cas des recharges (Nordstrom, 2005 ; Peterson & Bishop, 2005). Selon Nordstrom (2005), les plages avec recharges devraient être considérées comme des écosystèmes en tant que tels et pas seulement comme des infrastructures d'ingénierie ou des lieux de plaisance. Des critères devraient être développés pour leur gestion future. Plus d'études à court et à long terme sur les effets, positifs et négatifs, des recharges doivent être effectuées.

Finalement, ce rapport montre que les recharges et la renaturalisation de plage possèdent de nombreux avantages géomorphologiques et socioécologiques. Ces méthodes douces de protection du littoral peuvent donc s'avérer d'excellentes alternatives aux structures de protection rigides sur les côtes basses de sable et de gravier.

7.2 PERSPECTIVES

Une quantité importante de données a 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. Des analyses historiques de l'évolution de la largeur de plage et des taux d'érosion pourront être réalisées. 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 de la population locale autour de la renaturalisation de la plage de Cap-des-Rosiers. La mise en place d'un enrochement sur le secteur de la recharge de Pointe-aux-Loups constitue une occasion unique d'évaluer la réponse d'un même système sans ouvrage de protection, avec recharge et avec enrochement. De plus, une partie du secteur est encore rechargée, ce qui permettrait d'analyser la coévolution du même système avec deux ouvrages de protection différente.

8. RÉFÉRENCES

- Agence Parcs Canada. (2018). Naturellement une priorité – Un rapport sur le programme de conservation et de restauration de Parcs Canada. In *Agence Parc Canada*.
- Argus inc. (2001). PROTECTION ET RESTAURATION DU LITORAL DE SEPT-ÎLES : PROJETS PILOTES - SUIVI. In *Rapport remis à la ville de Sept-Îles*.
- 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. <https://doi.org/10.7202/1036508ar>
- 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.
- 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*, 231(1), 33–48. <https://doi.org/10.2112/06-0706.1>
- 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). In *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., Bandet, M., & Didier, D. (2019). 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), Phase III : cartographie des types de morphodynamiques de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. In *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 2019, 24 p.*
- Bernatchez, P., Cormier, L., Van-Wierts, 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. In *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. (2012a). Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Québec, Canada. *Journal of Coastal Research*, 285(6), 1550–1566. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-10-00189.1>
- Bernatchez, P., & Fraser, C. (2012b). 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., 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. Ra. *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*.
- 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.
- 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>
- 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., Lamari, M., Bernatchez, P., Jacob, J., & Nouwoudjro, K. (2015). Analyse institutionnelle de la trajectoire d'adaptation aux

- changements climatiques dans le Québec maritime. *Adaptation Aux Changements Climatiques En Zones Côtières, Politiques Publiques et Indicateurs de Suivi Des Progrès Dans Sept Pays Occidentaux*, PUQ, Punta Arenas, 77–126.
- 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>
- Buscombe, D., & Masselink, G. (2006). Concepts in gravel beach dynamics. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 33–52.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.003>
- 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. (2009a). 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>
- Castelle, B., Turner, I. L., Bertin, X., & Tomlinson, R. (2009b). 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>
- 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.
- CUR, R., & Hydraulics, D. (1987). Manual on artificial beach nourishment. *Centre for Civil Eng Research, Codes and Specifications*, Gouda, Rep, 130.
- Danard, M., Munro, A., & Murty, T. (2003). Storm surge hazard in Canada. *Natural Hazards*, 28(2–3), 407–434.
- 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>
- 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.
- 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., Kriebel, D., & Walton, T. (2002). *Chapter III-3: Cross-shore sediment transport processes*. EM 1110-2-1100, Coastal Engineering Research Center, US Army Engineer
- 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>
- Didier, D., Bernatchez, P., Marion, N., & Drejza, S. (2018). Suivi environnemental de travaux de rechargement de plage dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent et suivi de la re-naturalisation d'une plage comme solution d'adaptation aux aléas côtiers - Rapport intermédiaire 1 : analyse pré- et post-démantèlement. In *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*.
- Didier, D., Caulet, C., Bandet, M., Bernatchez, P., Dumont, D., Augereau, E., Floc'h, F., & Delacourt, C. (2020). Wave runup parameterization for sandy, gravel and platform beaches in a fetch-limited, large estuarine system. *Continental Shelf Research*, 192, 104024.
- Didier, D., Lalanne, P.-A., Cormier, L., & Bernatchez, P. (2017). Suivi environnemental des côtes du

- Québec maritime (2016- 2019) : rapport de gestion des instruments. In *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.*
- 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.
- Folk, R. L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks* (Vol. 84). Hemphill Publishing Company. <http://ir.obihiro.ac.jp/dspace/handle/10322/3933>
- 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.*
- Griggs, G. (2005). the Impacts of Coastal Armoring. *Shore and Beach*, 1, 13–22.
- 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.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide*. US Geological Survey.
- Holman, R. A., Lalejini, D. M., Edwards, K., & Veeramony, J. (2014). A parametric model for barred equilibrium beach profiles. *Coastal Engineering*, 90, 85–94.
- Kraus, N. C., & Galgano, F. A. (2001). *Beach erosional hot spots: types, causes, and solutions*. ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS COASTAL AND HYDRAULICS LAB.
- 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.
- Lambert, A., Bernatchez, P., Didier, D., Arsenault, E., Dumont, D., Senneville, S., & Bismuth, E. (2015). 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) Phase I: rapport final. *Chaire 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 2017, 122p + Annexe.*
- Lithgow, D., Martínez, M. L., Gallego-Fernández, J. B., Hesp, P. A., Flores, P., Gachuz, S., Rodríguez-Revelo, N., Jiménez-Orocio, O., Mendoza-González, G., & Álvarez-Molina, L. L. (2013). Linking restoration ecology with coastal dune restoration. *Geomorphology*, 199, 214–224.
- 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>
- 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>
- 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.
- National Research Council. (1995). *Beach Nourishment and Protection*. <https://doi.org/10.17226/4984>
- Nordstrom, K. F. (2005). Beach nourishment and coastal habitats: research needs to improve compatibility. *Restoration Ecology*, 13(1), 215–222.
- Nordstrom, K. F., Jackson, N. L., & Roman, C. T. (2016). Facilitating landform migration by removing shore protection structures: Opportunities and constraints. *Environmental Science & Policy*, 66, 217–226.
- Nordstrom, K. F., Lampe, R., & Vandemark, L. M. (2000). Reestablishing naturally functioning dunes on developed coasts. *Environmental Management*, 25(1), 37–51.
- Parc national du Canada Forillon. (2010). Plan directeur. In *Parcs Canada*.
- Pender, D., & Karunarathna, 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.
- 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., Wetzel, L., & Williams, A. T. (2015). Aspects of coastal erosion and protection in Europe. *Journal of Coastal Conservation*, 19(4), 445–459.
- Quintin, C., Bernatchez, P., & Jolivet, Y. (2013). Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs. In *LDGIZC et Chaire de recherche en géoscience côtière, UQAR, Rimouski, Volume I, 48 p.; Volume II*.
- 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)
- Ropars, Y. (2013). *Protection de la berge : Sainte-Luce, Québec*.
- Seelig, W. N. (1983). Understanding beach erosion and accretion. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 109(4), 490–494.
- Serafin, K. A., & Ruggiero, P. (2014). Simulating extreme total water levels using a time-dependent, extreme value approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(9), 6305–6329.
- Sorensen, R. M., Douglass, S. L., & Weggel, J. R. (1989). Results from the Atlantic City, NJ beach nourishment monitoring program. In *Coastal Engineering 1988* (pp. 2806–2817).
- Stauble, D. K., & Holem, G. W. (1991). Long term assessment of beach nourishment project performance. *Coastal Zone'91*, 510–524.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Miller, T. L. (2005). Digital shoreline analysis system (DSAS) version 3.0. *An ArcGIS® Extension for Calculating Shoreline Change: US Geological Survey Open-File Report*, 1304.
- Toft, J. D., Cordell, J. R., & Armbrust, E. A. (2014). Shoreline armoring impacts and beach restoration effectiveness vary with elevation. *Northwest Science*, 88(4), 367–375.
- Tremblay, M., Vigneault, B., Delaître, 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*.
- Van-Wierst, 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.
- 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>
- Verhagen, H. J. (1996). Analysis of beach nourishment schemes. *Journal of Coastal Research*, 179–185.
- Weggel, J. R. (1996). A primer on monitoring beach nourishment projects. *Oceanographic Literature Review*, 3(43), 317.
- WSP. (2015). Étude hydrodynamique du littoral dans l'anse du Cap-des-Rosiers - Rapport d'étape 1. In *WSP Canada*.

ANNEXES

ANNEXE 1 – DONNÉES MARÉGRAPHIQUE DES SITES D'ÉTUDES

NM = Niveau moyen de l'eau ; PMSGM = Pleine mer supérieure de grande marée ; BMIGM = Basse mer inférieure de grande marée ; PMSMM = Pleine mer supérieure de marée moyenne ; BMIMM = Basse mer inférieure de marée moyenne.

Site d'étude	Niveaux d'eau (CGVD28)				
	NM	PMSGM	BMIGM	PMSMM	BMIMM
Cap-des-Rosiers	0,01 m	1,3 m	-0,8 m	0,8 m	- 0,6 m
Anse-aux-Coques	2,2 m	4,8 m	0,0 m	3,9 m	0,8 m
Banc Larocque	1,2 m	2,8 m	0,0 m	2,2 m	0,4 m
Monaghan	1,5 m	3,4 m	-0,1 m	2,7 m	0,5 m
La Martinique	0,9 m	1,4 m	0,3 m	1,2 m	0,6 m
Pointe-aux-Loups	0,8 m	1,1 m	0,2 m	1,0 m	0,4 m

ANNEXE 2 – DATES, HEURES ET HAUTEURS D’EAU POUR LES LEVÉS

ANNEXE 2-1 – LEVÉS DE PROFILS DE PLAGE

Site	Date	Heure	Hauteur d’eau (m, zéro des cartes)
Cap-des-Rosiers (2011)	19 avril 2011	9:00	0,27
	6 juillet 2011	11:00	0,5
	6 octobre 2011	8:00	?
Cap-des-Rosiers (2013)	10 mai 2013	8:00	0,51
	24 juillet 2013	9:00	0,39
	21 août 2013	20:00	0,24
	20 septembre 2013	8:00	0,62
	3 novembre 2013	20:00	0,23
Cap-des-Rosiers (2014)	28 avril 2014	7:00	0,2
	17 juin 2014	11:00	0,34
	14 juillet 2014	21:00	0,31
Cap-des-Rosiers (2016)	12 décembre 2016	19:00	0,52
Cap-des-Rosiers (2017)	19 avril 2017	14:00	0,41
	8 juin 2017	8:00	0,5
	11 juillet 2017	10:00	0,52
	22 octobre 2017	22:00	0,33
	20 novembre 2017	22:00	0,47
Cap-des-Rosiers (2018)	19 juin 2018	13:00	0,55
	10 août 2018	18:00	0,53
	8 octobre 2018	19:00	0,08
	25 novembre 2018	22:00	0,26
Cap-des-Rosiers (2019)	6 mars 2019	8:00	0,84
	14 avril 2019	16:00	0,63
	4 mai 2019	7:00	0,51
	7 juillet 2019	12:00	0,45
	3 août 2019	10:00	0,33
	28 septembre 2019	7:00	0,25
	27 octobre 2019	7:00	0,3
Anse-aux-Coques (2017)	13 juin 2017	NA	NA
Anse-aux-Coques (2018)	8 décembre 2018	8:30	
Anse-aux-Coques (2019)	18 mai 2019	8:00	0,3
	7 août 2019	13:00	0,8
	1 ^{er} octobre 2019	10:00	0,2
	1 ^{er} décembre 2019	11:00	1,1
	11 décembre 2019	7:00	1,0
Banc Larocque (2018)	13 juin 2018	20:00	0,4
	29 août 2018	10:30	0,5
	8 octobre 2018	7:30	0,2

	22 novembre 2018	7:00	0,5
Banc Larocque (2019)	6 mai 2019	9:30	0,2
	2 juin 2019	8:00	0,3
	1 ^{er} août 2019	9:00	0,5
	26 septembre 2019	18:00	0,4
	25 novembre 2019	19:00	0,2
	11 décembre 2019	20:30	0,3
Plage de Monaghan (2018)	16 mai 2018	20:00	0,2
	15 juillet 2018	23:00	0,3
	10 septembre 2018	20:00	0,0
	10 novembre 2018	21:30	0,3
	6 décembre 2018	22:00	0,5
Plage de Monaghan (2019)	6 mai 2019	8:00	0,2
	6 juillet 2019	22:30	0,4
	30 août 2019	9:00	0,1
	28 octobre 2019	7:30	0,1
	13 décembre 2019	8:00	0,4
Plage de La Martinique (2018)	17 mai 2018	16:00	0,3
	16 août 2018	18:30	0,7
	21 novembre 2018	1:15	0,6
	27 décembre 2018	6:09	0,5
Plage de La Martinique (2019)	9 mai 2019	17:30	0,4
	1 ^{er} août 2019	15:00	0,4
	4 décembre 2019	8:30	0,7
	25 décembre 2019	2:00	0,4
Plage de Pointe-aux-Loups (2018)	21 mai 2018	20:00	0,4
	10 août 2018	14:00	0,3
	26 novembre 2018	14:30	0,4
	31 décembre 2018	5:30	0,6
Plage de Pointe-aux-Loups (2019)	6 mai 2019	16:00	0,3
	30 juillet 2019	14:00	0,3
	3 décembre 2019	8:00	0,5
	24 décembre 2019	1:18	0,3

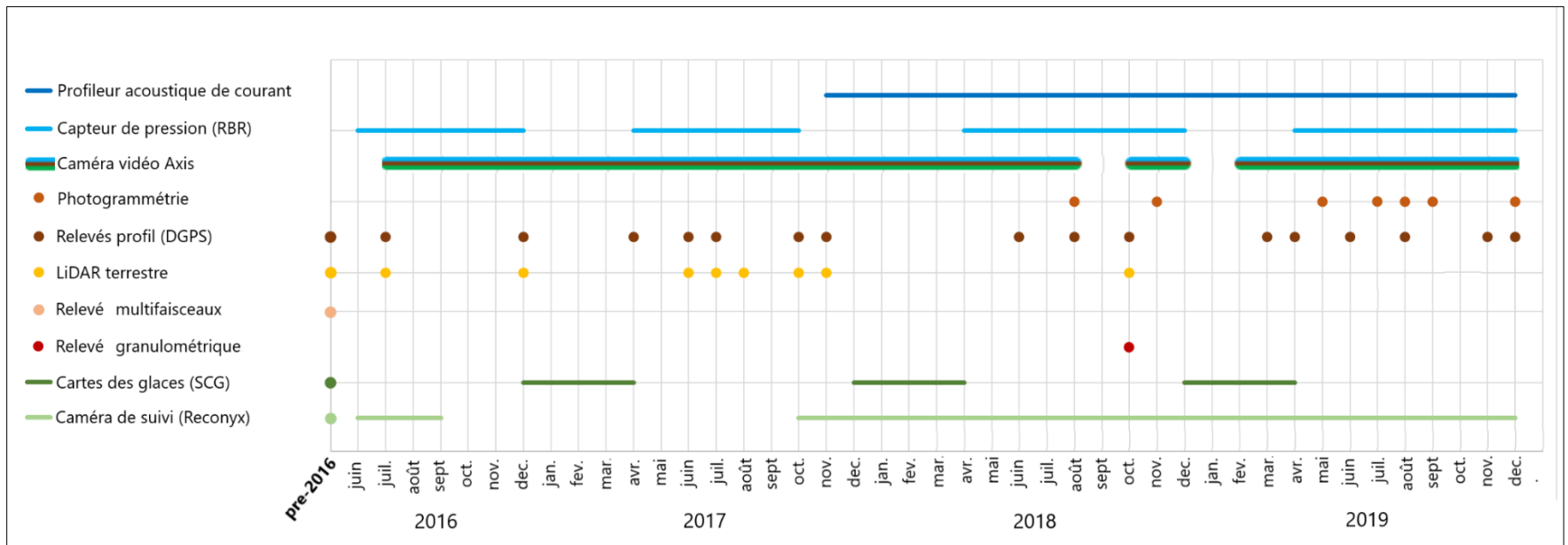
ANNEXE 2-2 – LEVÉS TOPOGRAPHIQUES SMLT

Site	Date	Heure	Hauteur d'eau (m, zéro des cartes)
Cap-des-Rosiers	8 juillet 2016	11:00	0,34
	12 décembre 2016	19:00	0,52
	8 juin 2017	8:00	0,5
	11 juillet 2017	10:00	0,52
	22 octobre 2017	10:00	0,55
	20 novembre 2017	9:00	0,7
	8 octobre 2018	10:00	0,98
Anse-aux-Coques	21 septembre 2012		
	23 octobre 2014		
	15 octobre 2015		
	14 juin 2016		
	18 novembre 2017		
	7 octobre 2018		
	5 septembre 2019		

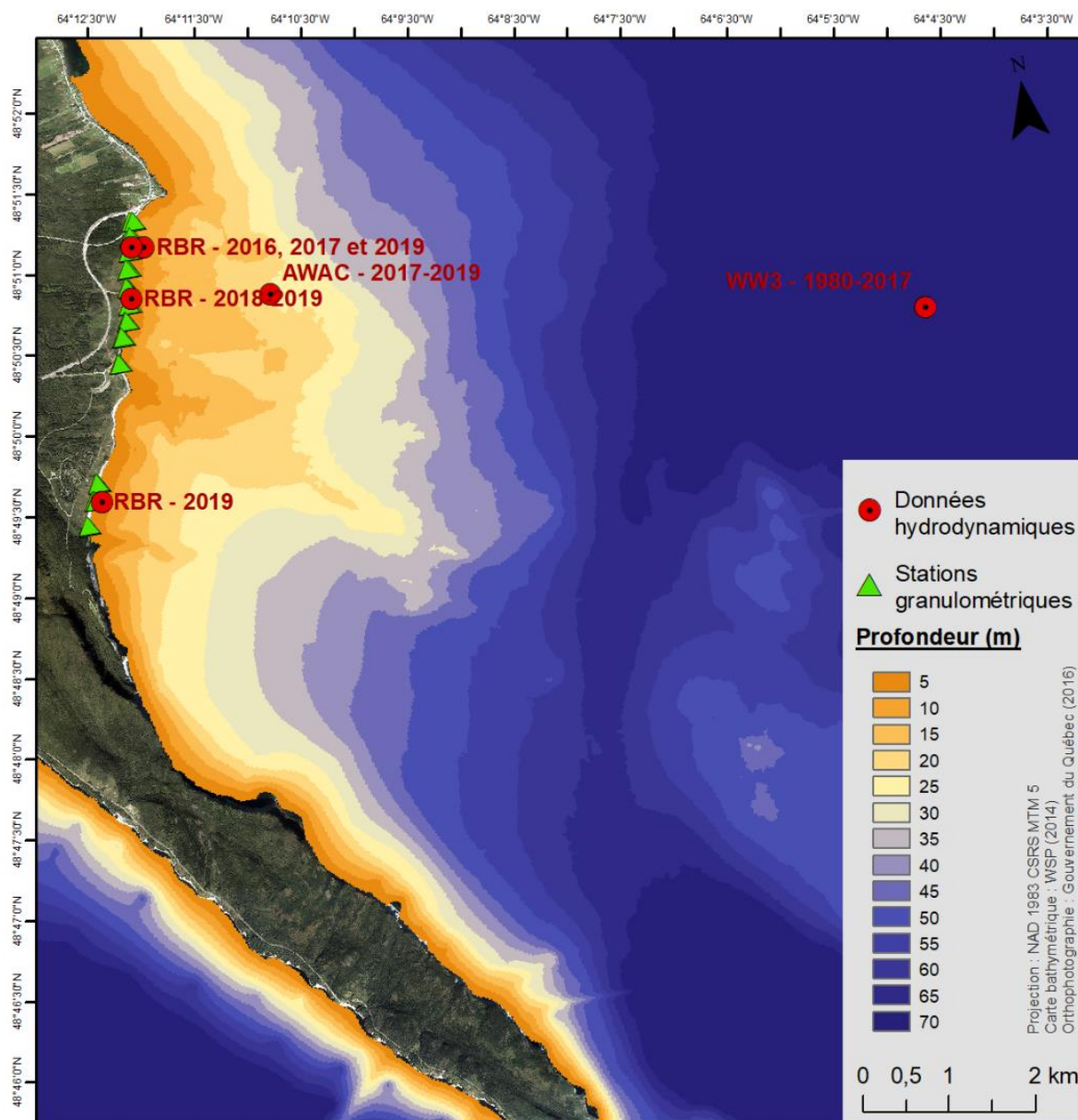
ANNEXE 2-3 – LEVÉS PHOTOGRAPHIQUE DE BASSE ALTITUDE

Site	Date	Heure	Hauteur d'eau
Cap-des-Rosiers	11 août 2018	8:00	0,39
	26 novembre 2018	9:00	0,65
	3 mai 2019	7:00	0,51
	7 juin 2019	11:00	0,48
	5 juillet 2019	10:00	0,39
	28 septembre 2019	7:00	0,25
Banc Larocque	17 août 2018	12:30	0,6
	8 décembre 2018	8:30	0,5
	2 juin 2019	8:00	0,3
	27 septembre 2019	7:00	0,2
	26 novembre 2019	7:30	0,3
Plage de La Martinique	21 décembre 2018	13:30	0,9
	12 mai 2019	8:00	0,9
	6 août 2019	19:00	0,7
	13 septembre 2019	14:30	0,6
	26 novembre 2019	14:00	0,9
Plage de Pointe-aux-Loups	28 novembre 2018	6:30	0,3
	6 mai 2019	16:00	0,3
	3 août 2019	17:00	0,3
	2 décembre 2019	17:00	0,4

ANNEXE 3 – PRÉSENTATION DES PÉRIODES D'INSTRUMENTATIONS ET DES DIFFÉRENTS RELEVÉS À CAP-DES-ROSIERS

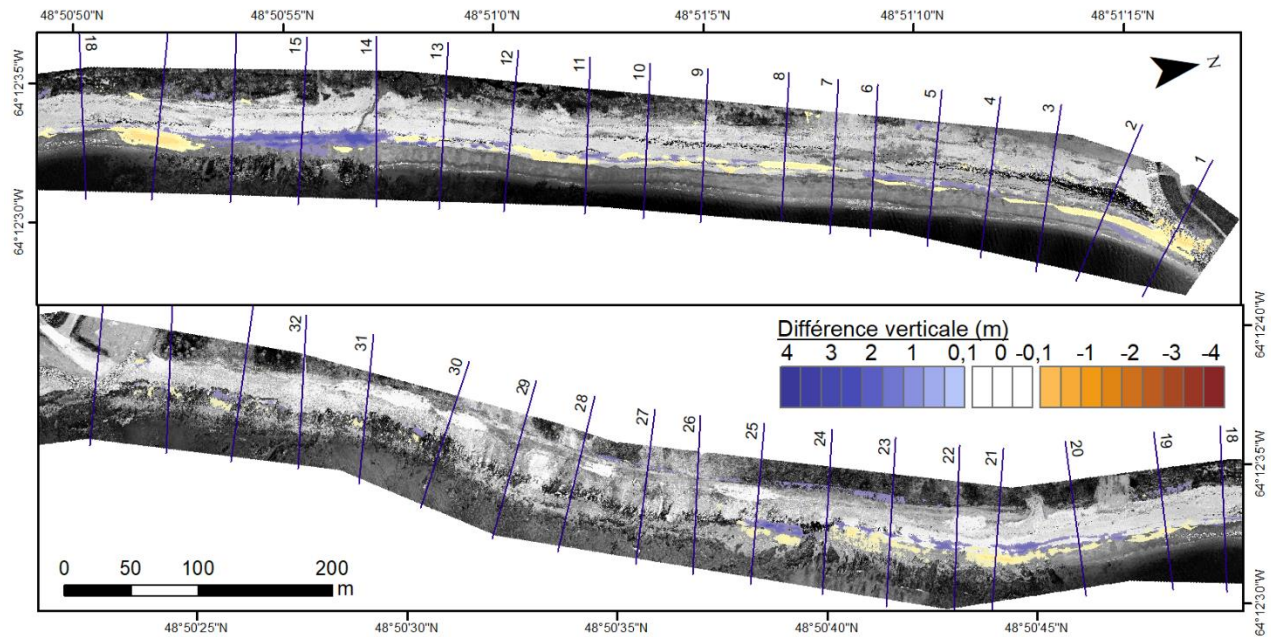


ANNEXE 4 – BATHYMÉTRIE ET LOCALISATION DES STATIONS GRANULOMÉTRIQUES ET DE LA RÉCOLTE DES DONNÉES HYDRODYNAMIQUES

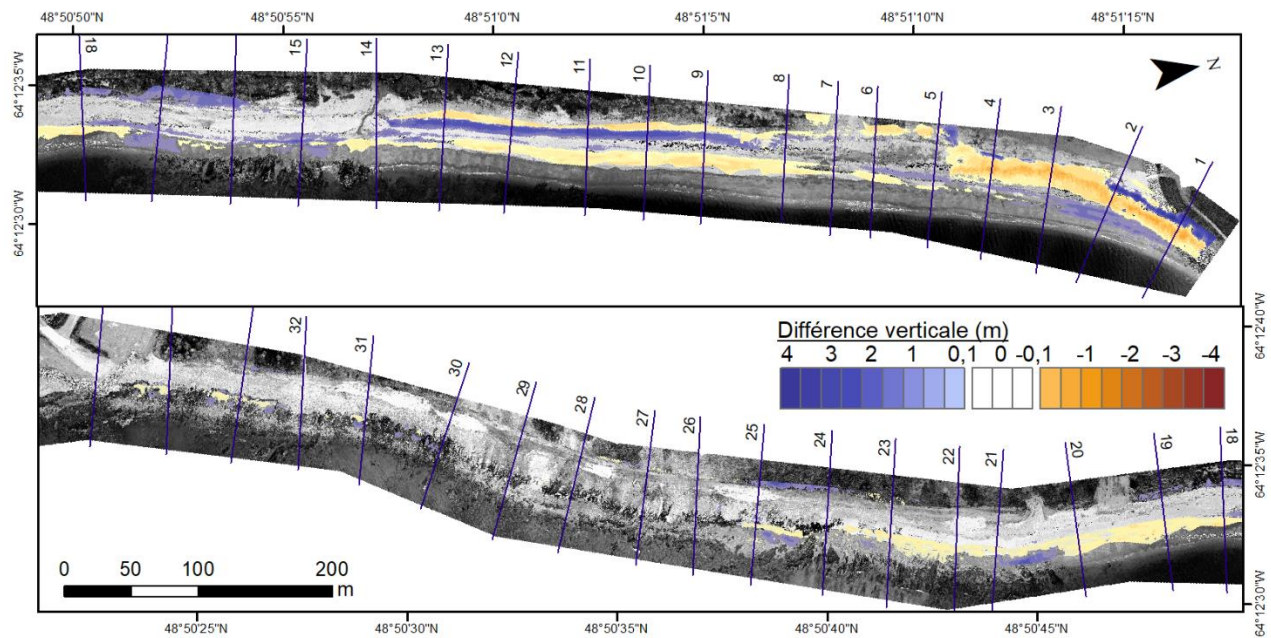


ANNEXE 5 – DIFFÉRENTIELS D'ÉLEVATION REPRÉSENTANT LE SUIVI DE 2017.

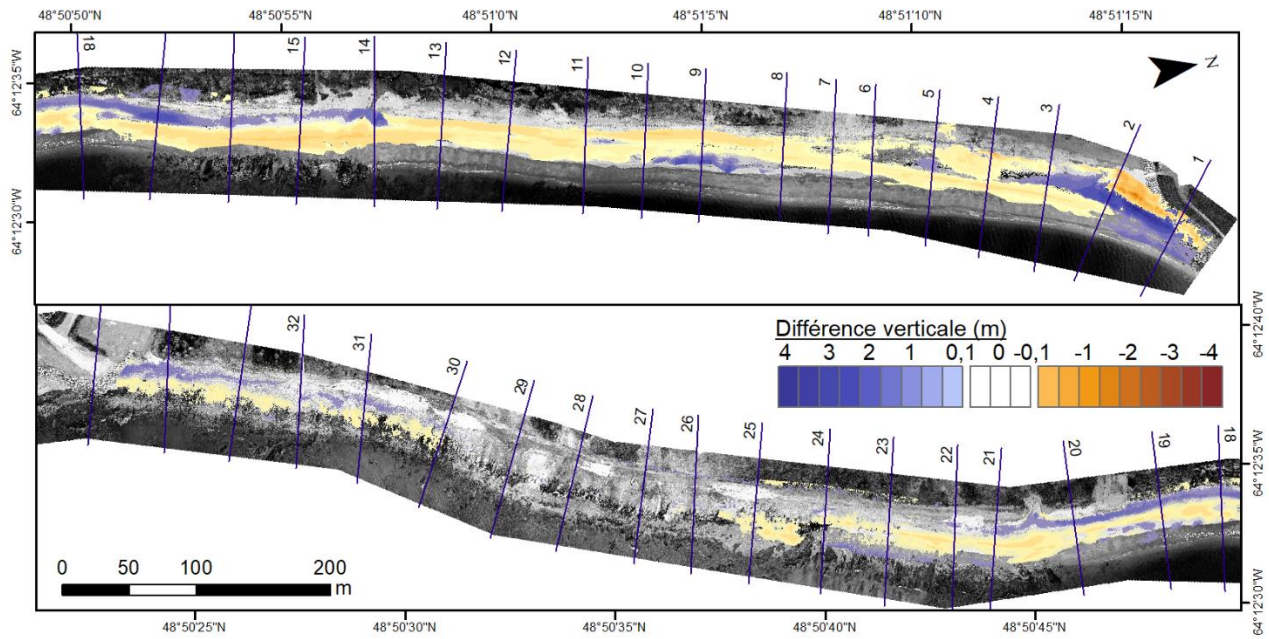
ANNEXE 5-1 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 8 JUIN ET DU 11 JUILLET 2017.



ANNEXE 5-2 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 11 JUILLET ET 22 OCTOBRE 2017.

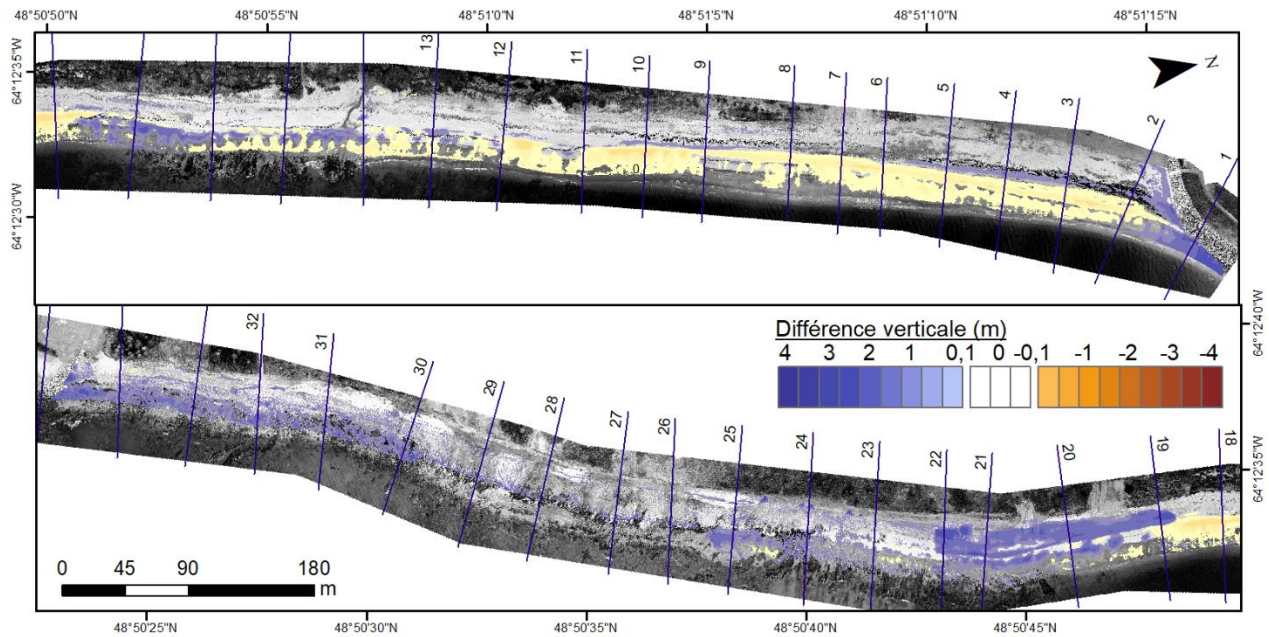


ANNEXE 5-3 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 22 OCTOBRE ET 20 NOVEMBRE 2017.

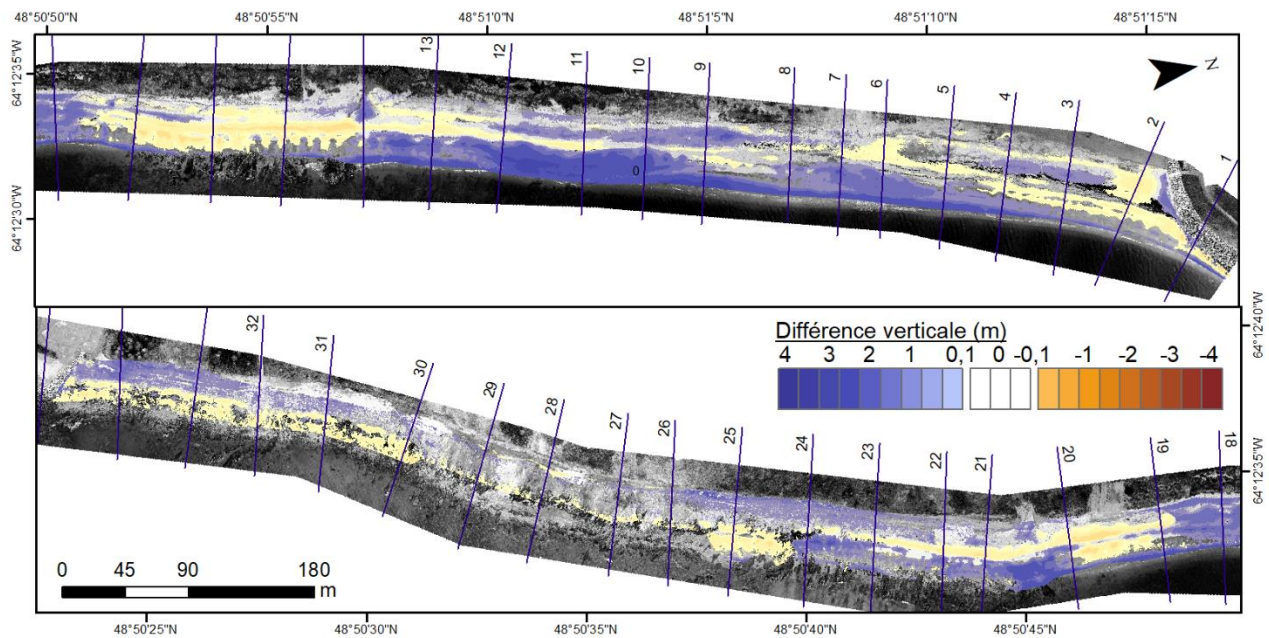


ANNEXE 6 – DIFFÉRENTIEL D'ÉLEVATION REPRÉSENTANT LE SUIVI DE 2018.

ANNEXE 6-1 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 11 AOÛT ET 8 OCTOBRE 2018.

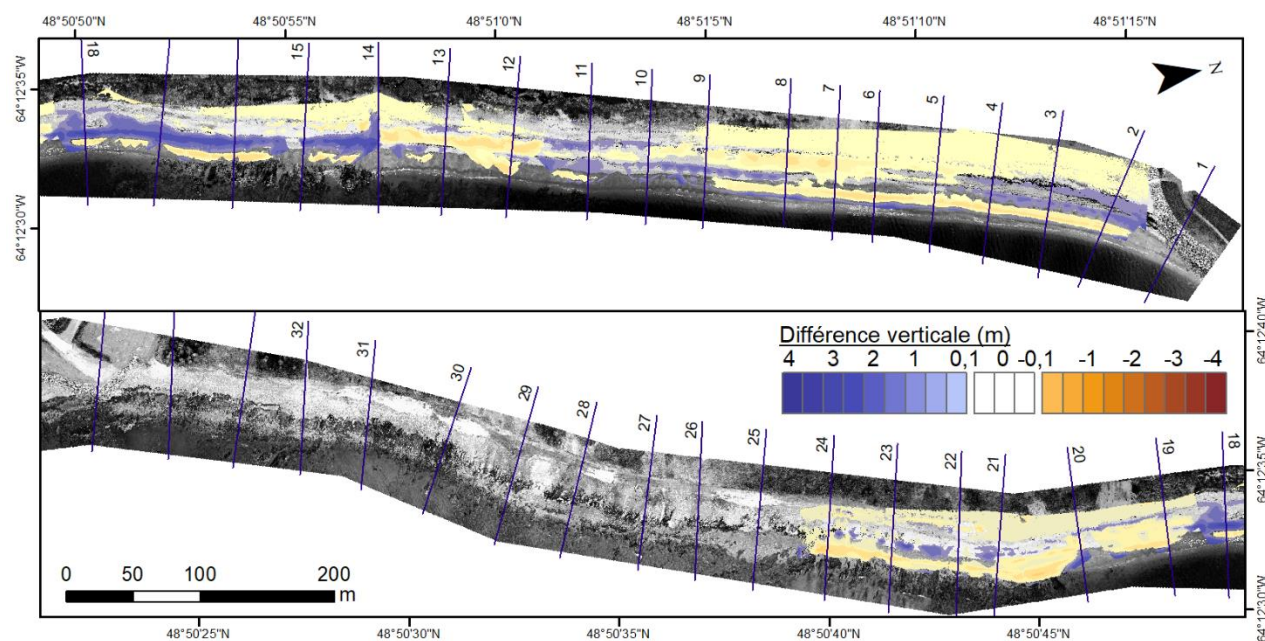


ANNEXE 6-2 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 8 OCTOBRE ET 26 NOVEMBRE 2018.

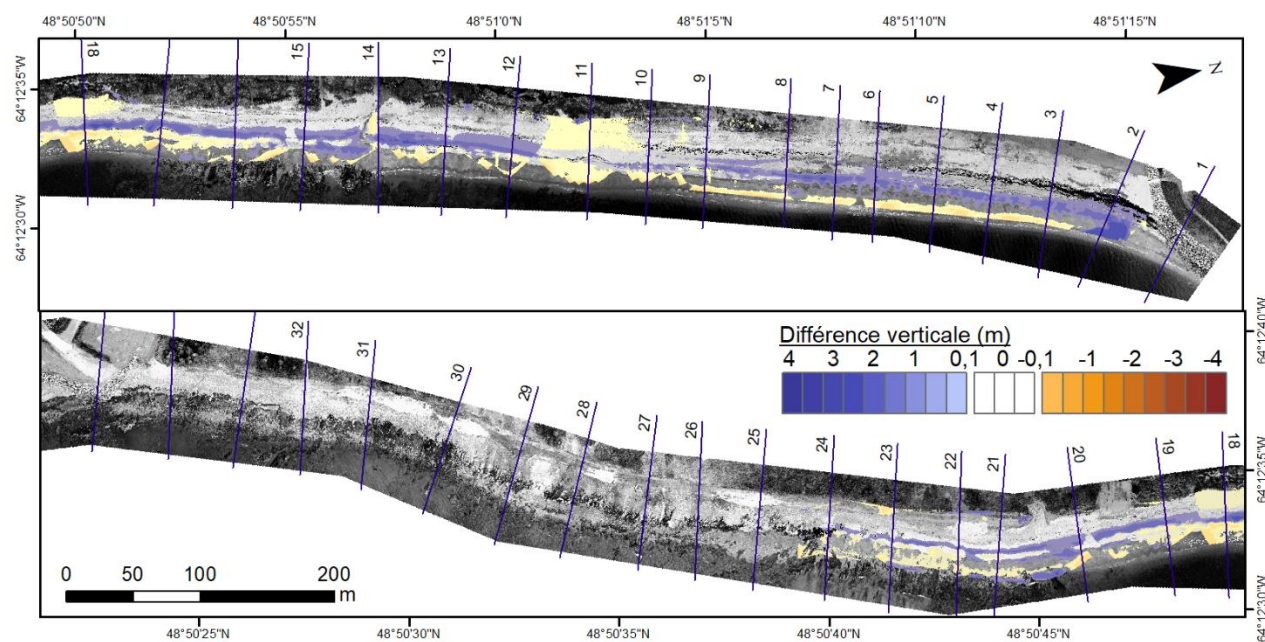


ANNEXE 7 – DIFFÉRENTIEL D'ÉLEVATION REPRÉSENTANT LE SUIVI DE 2019.

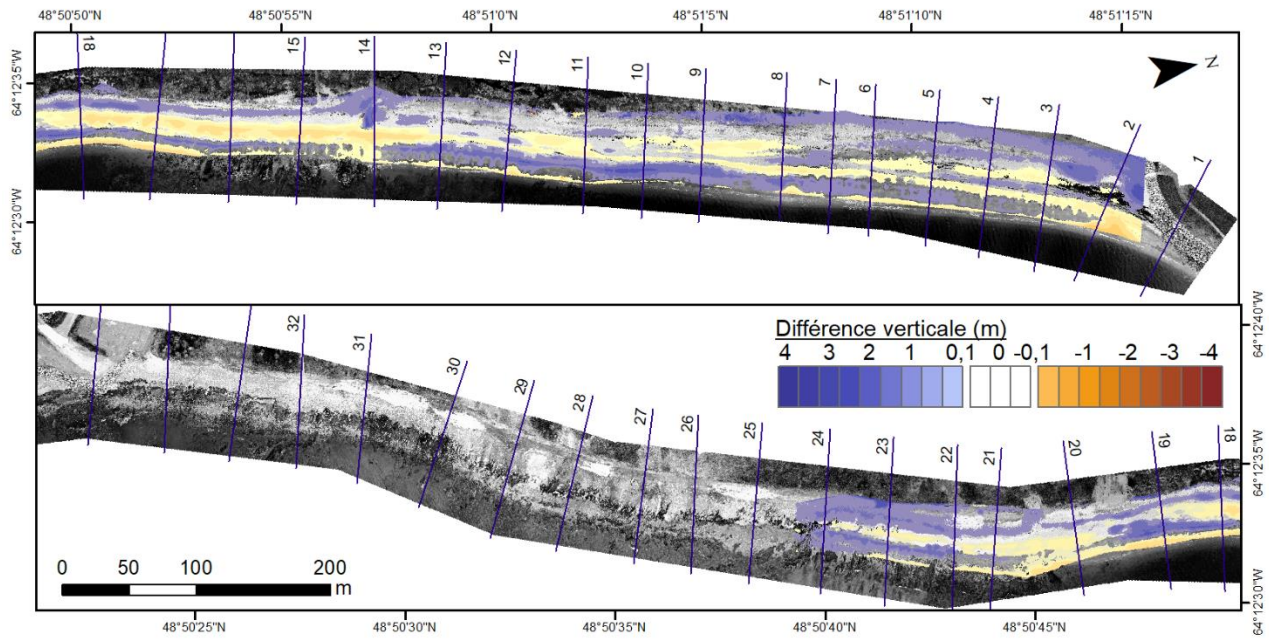
ANNEXE 7-1 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 3 MAI ET 7 JUIN 2019.



ANNEXE 7-2 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 7 JUIN ET 5 JUILLET 2019.



ANNEXE 7-3 – CRÉÉ À PARTIR DES MNT DU 5 JUILLET ET 28 SEPTEMBRE 2019..



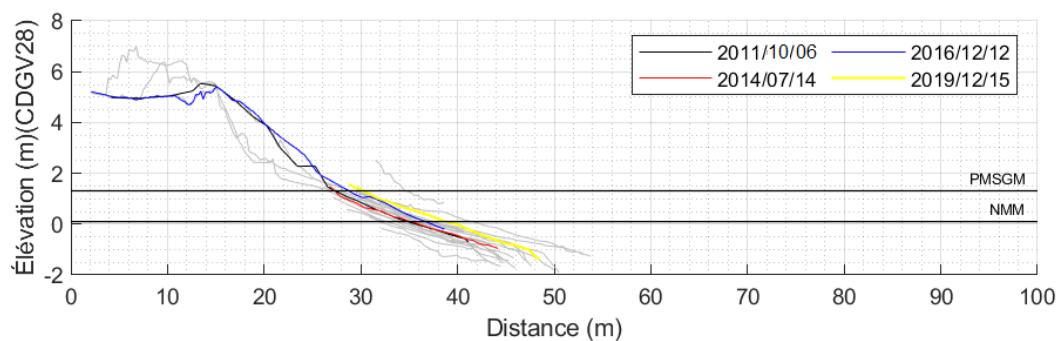
ANNEXE 8 – NOMBRE D’UTILISATEURS DE LA PLAGE DÉNOMBRÉ ENTRE LE 11 JUILLET ET 11 AOÛT 2011 ET 2018.

Les utilisateurs ont été dénombrés à partir d’une image enregistrée toutes les 15 minutes de 5 h à 19 h. Les images ont été enregistrées à l’aide d’une caméra Reconyx en 2011 et d’une caméra AXIS en 2018. Les deux caméras sont localisées au centre du secteur d’étude et orientées vers le sud.

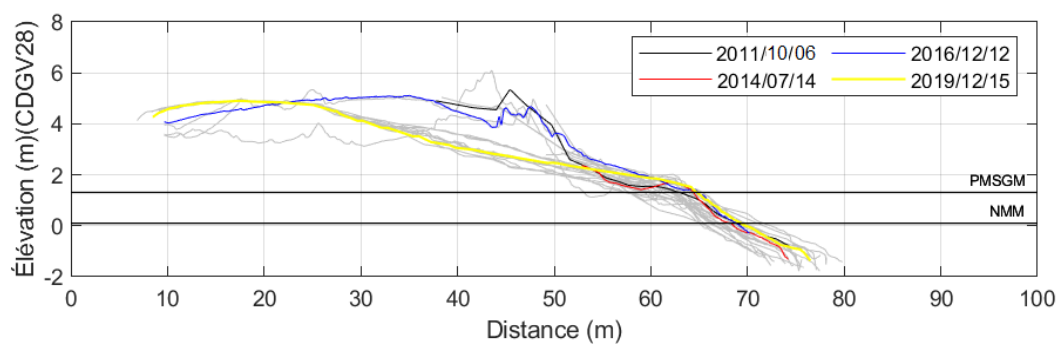
Année	Nombre total d’utilisateurs de la plage	Écart-type
2011 (avant démantèlement)	525	10,3
2018 (après démantèlement)	669	9,29

ANNEXE 9 – PROFILS DE PLAGE POUR L'ENSEMBLE DE LA PÉRIODE DE SUIVI

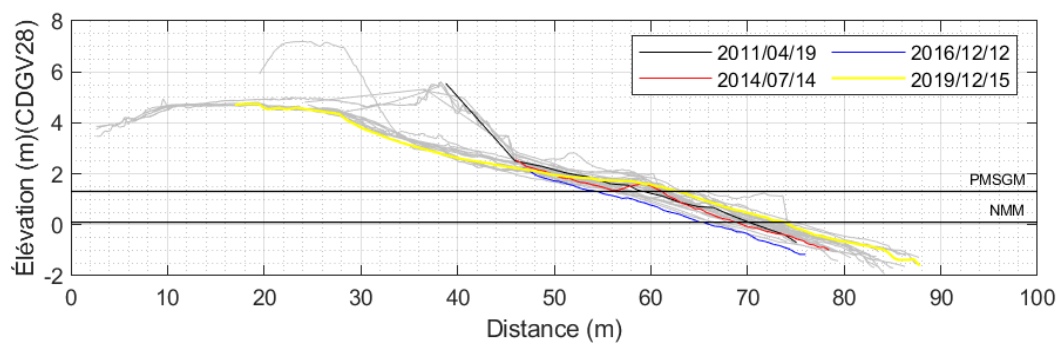
ANNEXE 9-1 – CAP-DES-ROSIERS



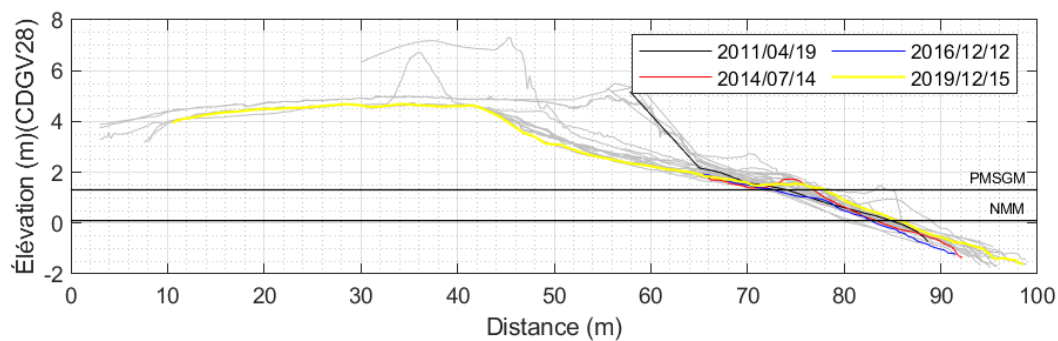
Profil n° 1 Cap-des-Rosiers



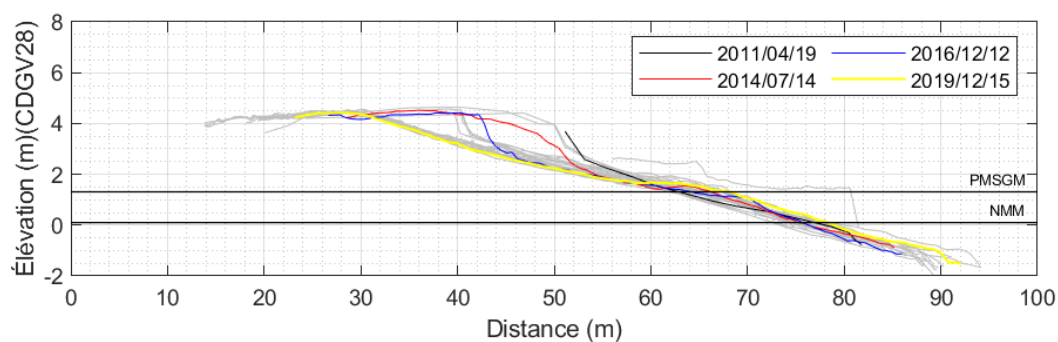
Profil n° 2 Cap-des-Rosiers



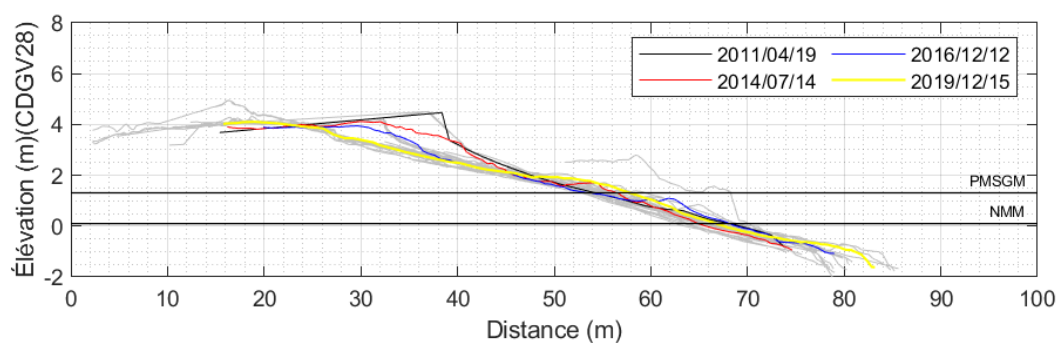
Profil n° 3 Cap-des-Rosiers



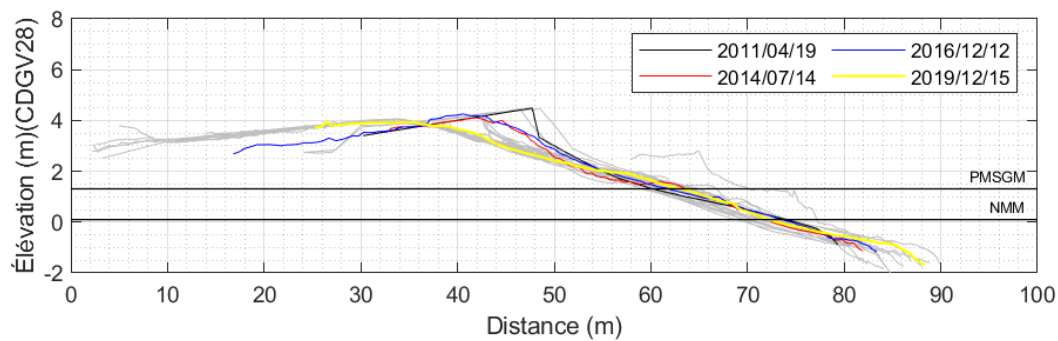
Profil n° 4 Cap-des-Rosiers



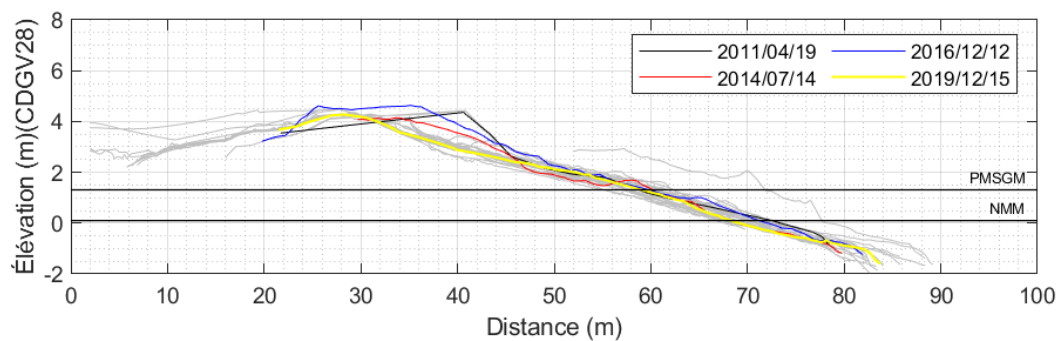
Profil n° 5 Cap-des-Rosiers



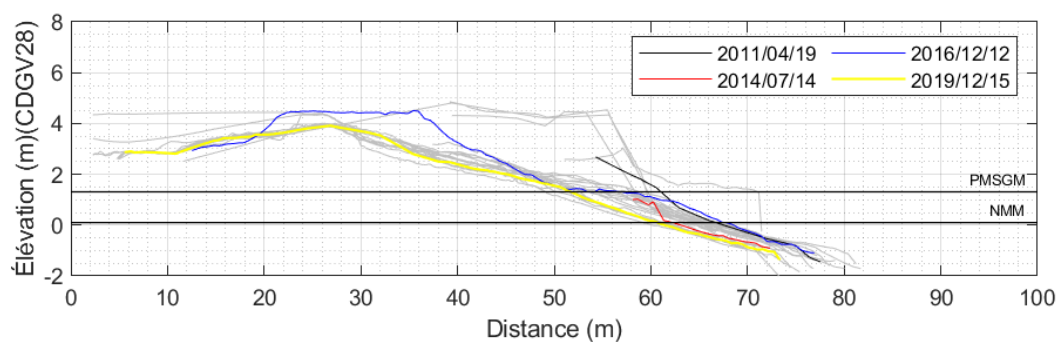
Profil n° 6 Cap-des-Rosiers



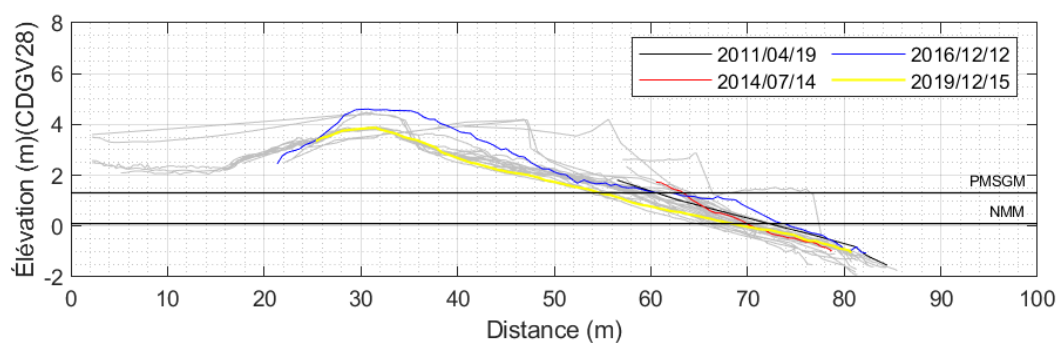
Profil n° 7 Cap-des-Rosiers



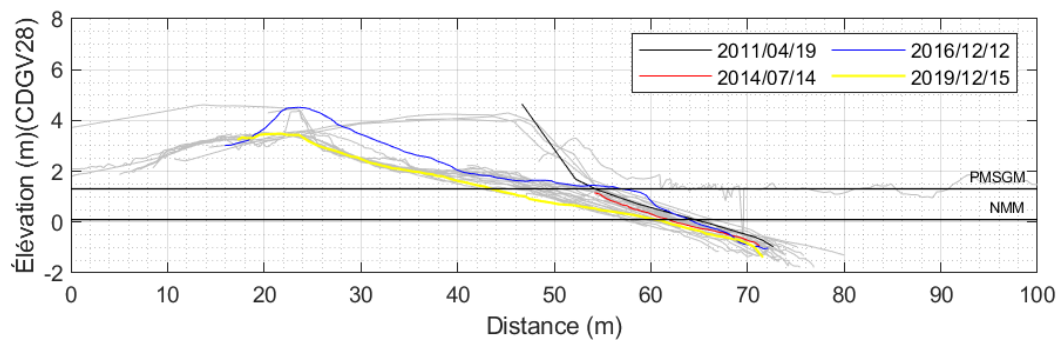
Profil n° 8 Cap-des-Rosiers



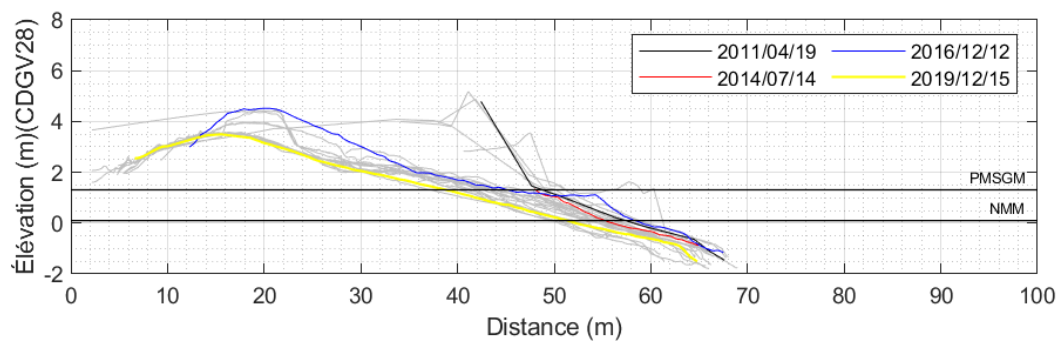
Profil n° 9 Cap-des-Rosiers



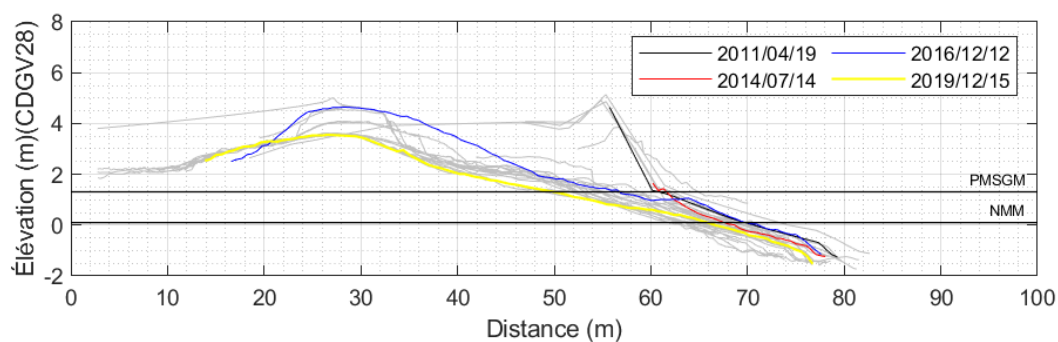
Profil n° 10 Cap-des-Rosiers



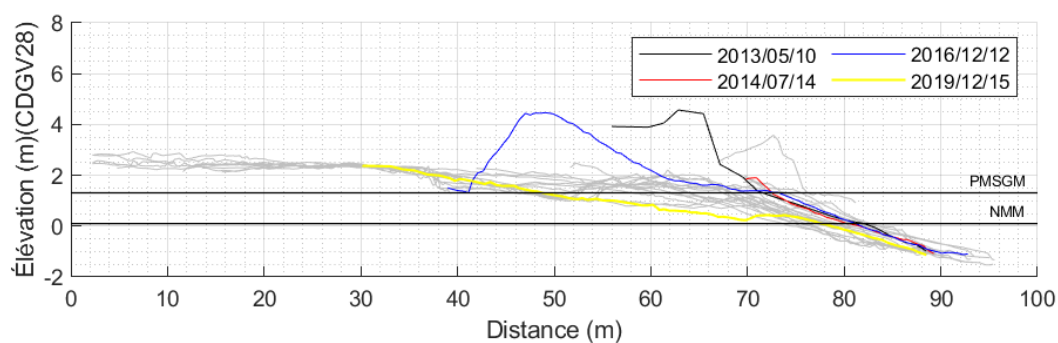
Profil n° 11 Cap-des-Rosiers



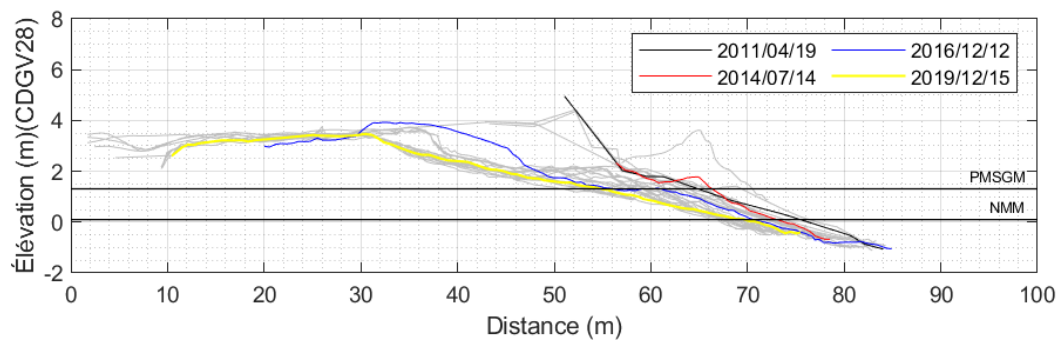
Profil n° 12 Cap-des-Rosiers



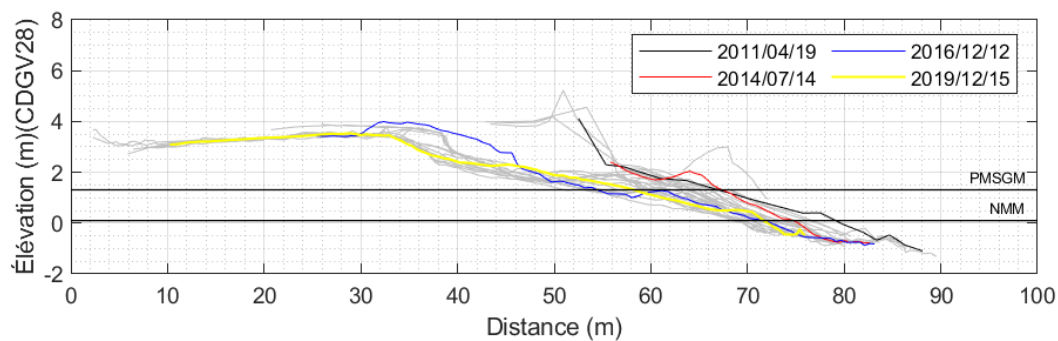
Profil n° 13 Cap-des-Rosiers



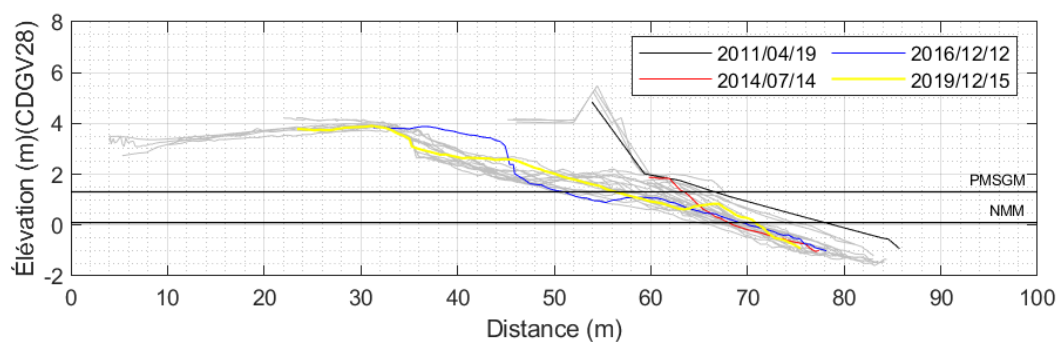
Profil n° 14 Cap-des-Rosiers



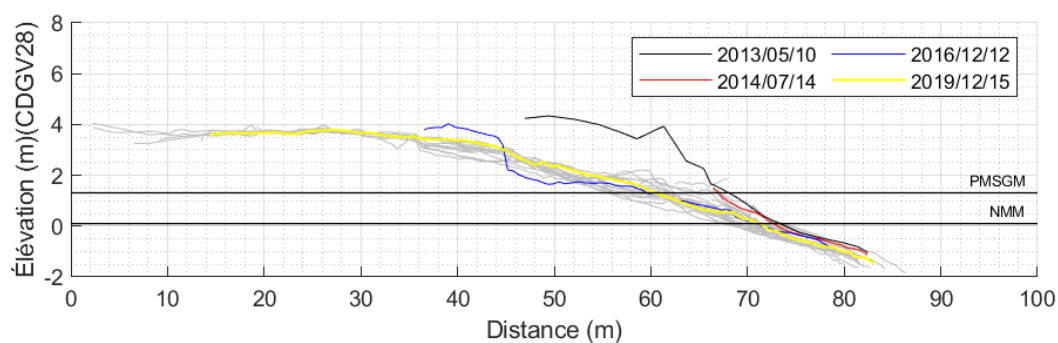
Profil n° 15 Cap-des-Rosiers



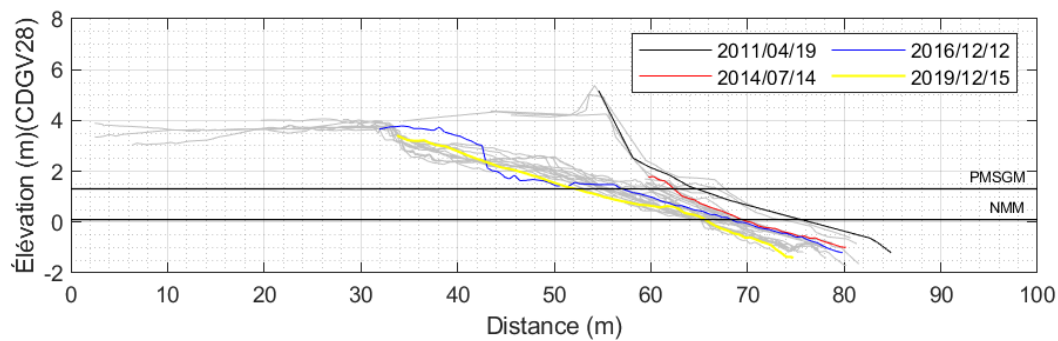
Profil n° 16 Cap-des-Rosiers



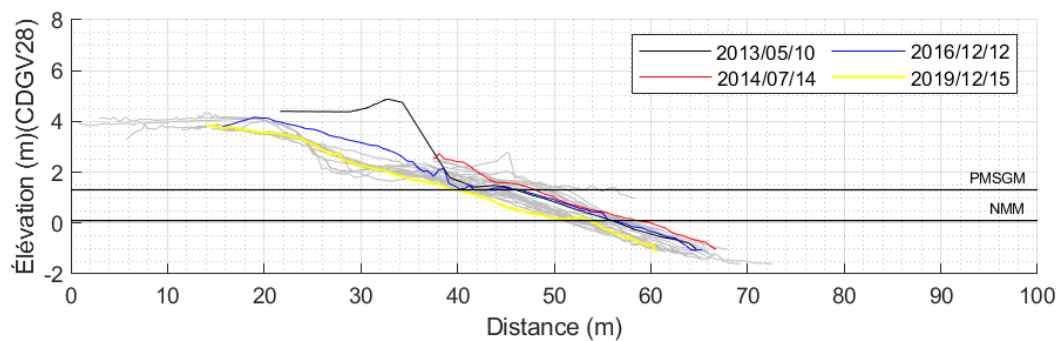
Profil n° 17 Cap-des-Rosiers



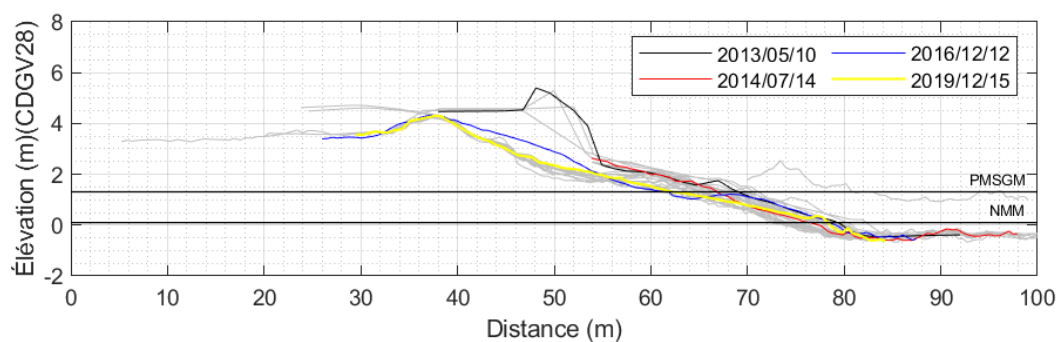
Profil n° 18 Cap-des-Rosiers



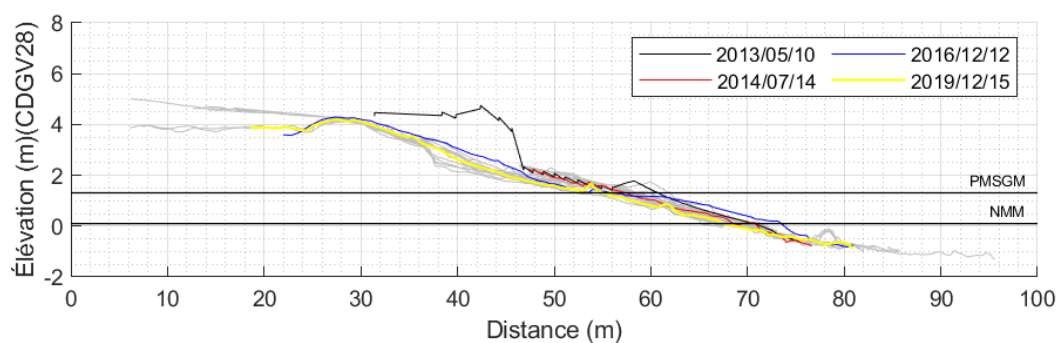
Profil n° 19 Cap-des-Rosiers



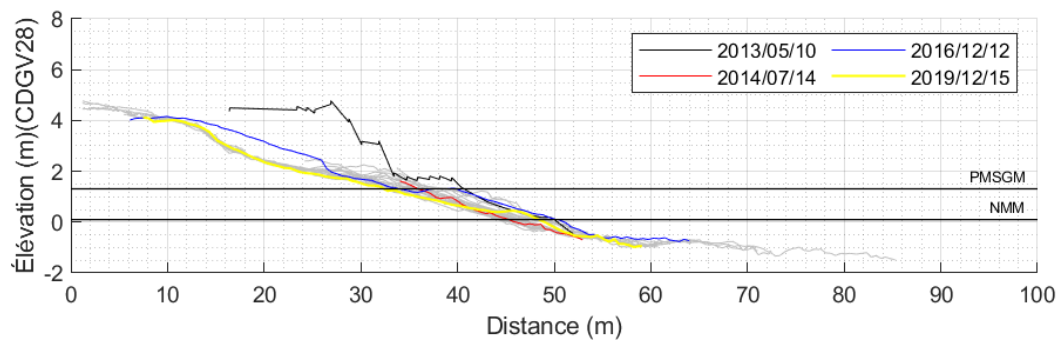
Profil n° 20 Cap-des-Rosiers



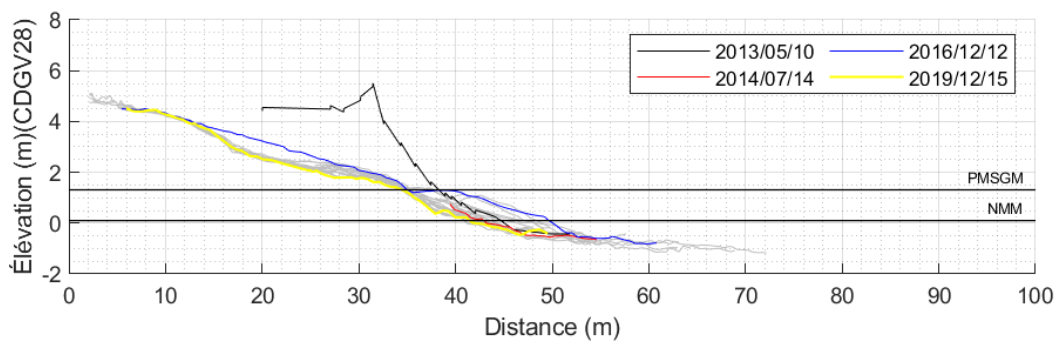
Profil n° 21 Cap-des-Rosiers



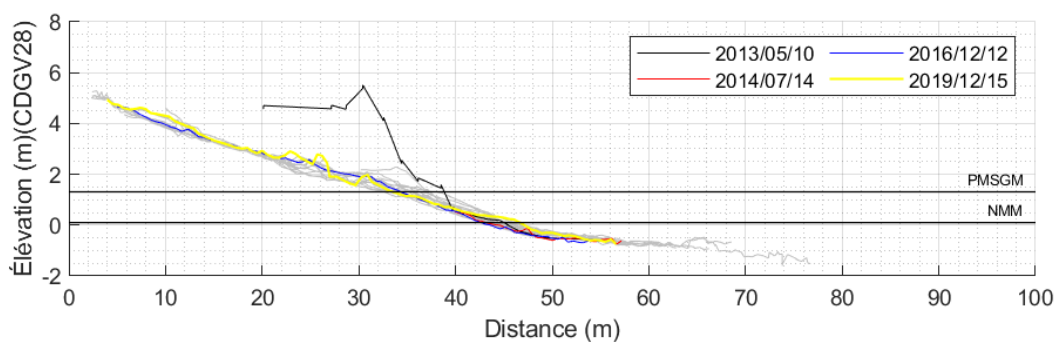
Profil n° 22 Cap-des-Rosiers



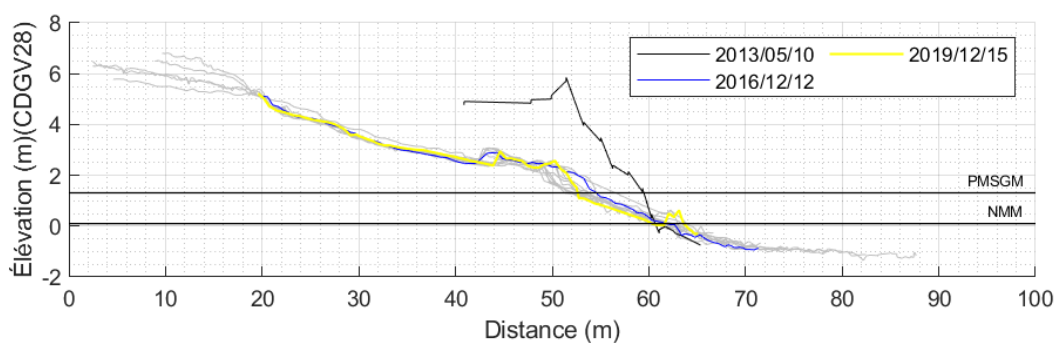
Profil n° 23 Cap-des-Rosiers



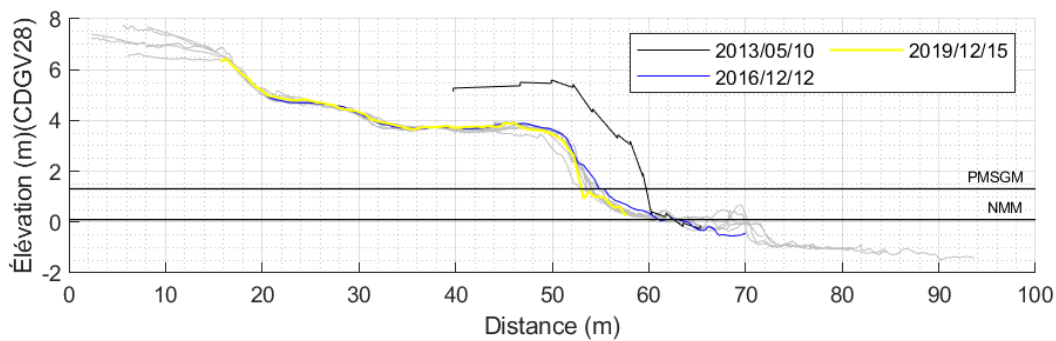
Profil n° 24 Cap-des-Rosiers



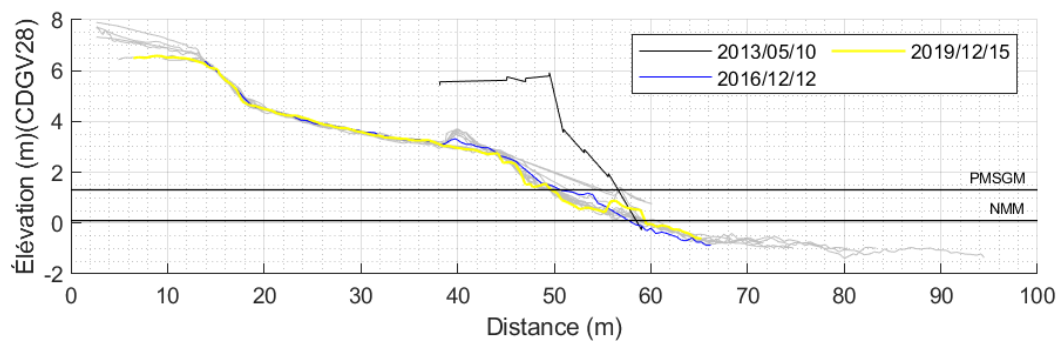
Profil n° 25 Cap-des-Rosiers



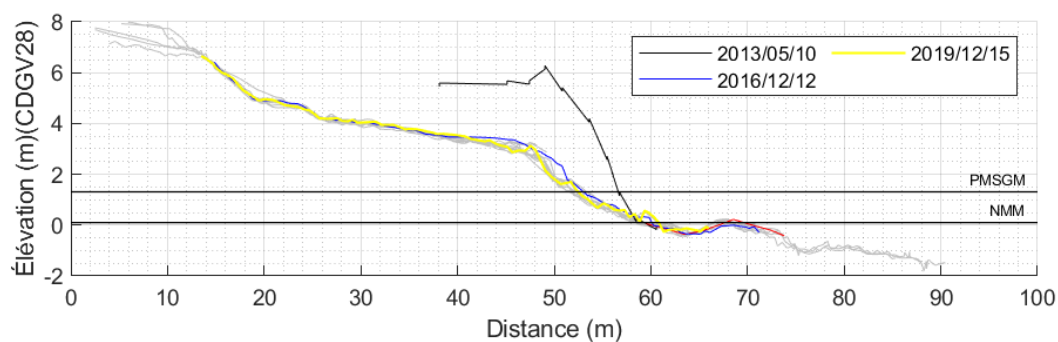
Profil n° 26 Cap-des-Rosiers



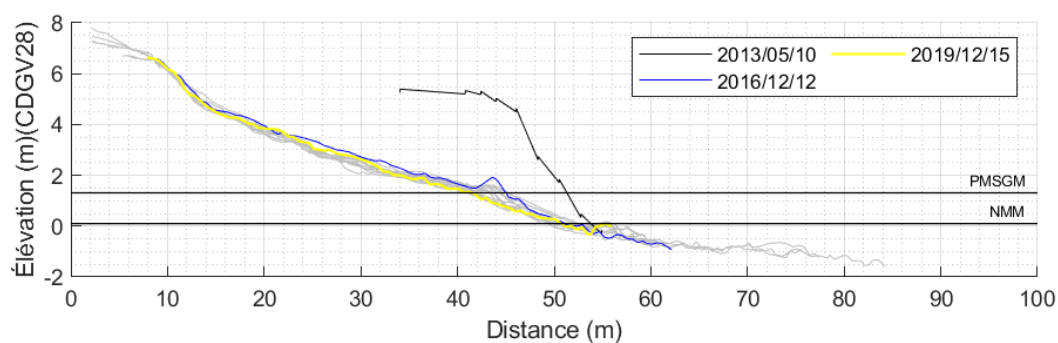
Profil n° 27 Cap-des-Rosiers



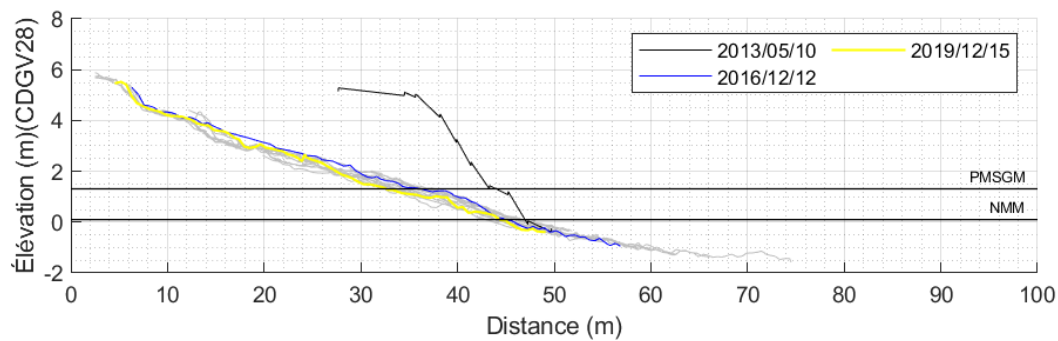
Profil n° 28 Cap-des-Rosiers



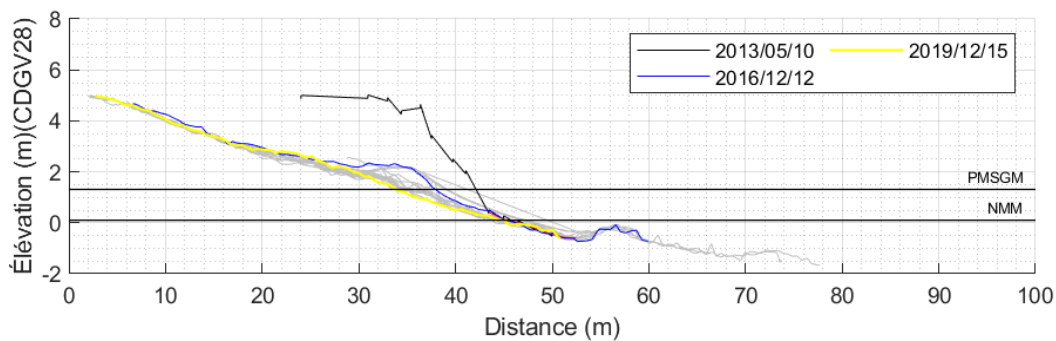
Profil n° 29 Cap-des-Rosiers



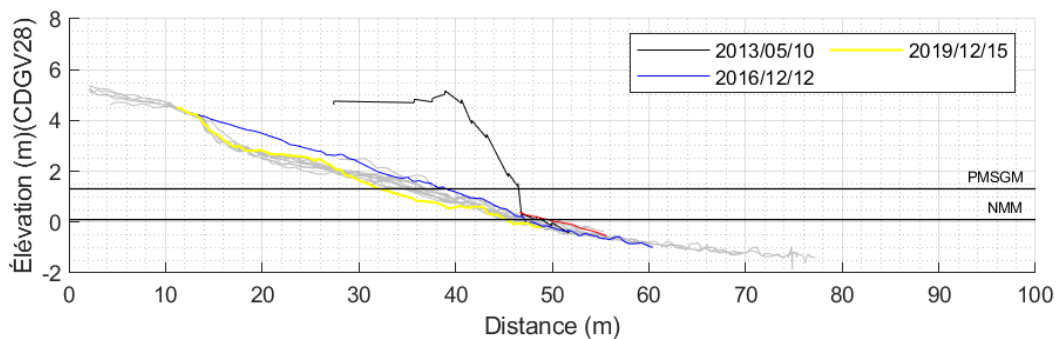
Profil n° 30 Cap-des-Rosiers



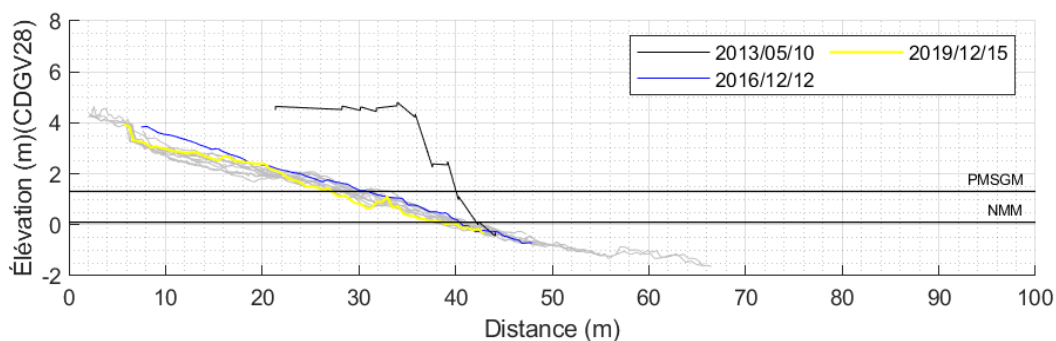
Profil n° 31 Cap-des-Rosiers



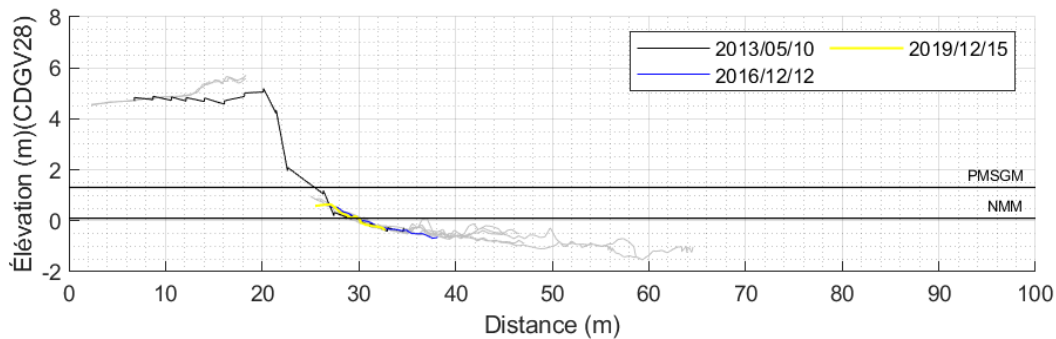
Profil n° 32 Cap-des-Rosiers



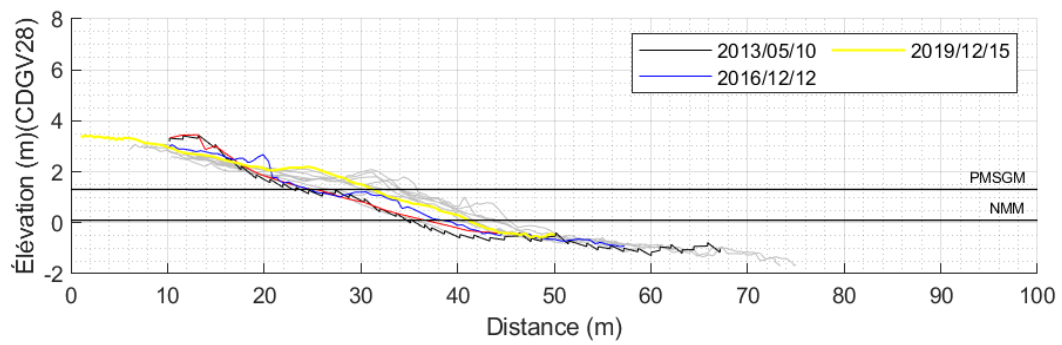
Profil n° 33 Cap-des-Rosiers



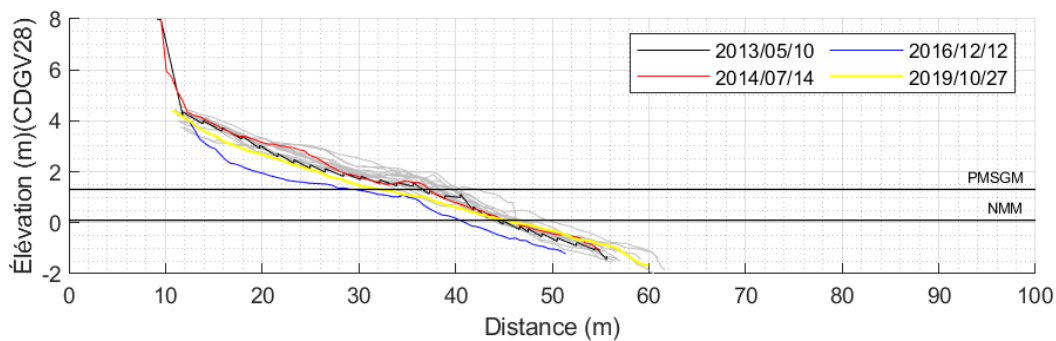
Profil n° 34 Cap-des-Rosiers



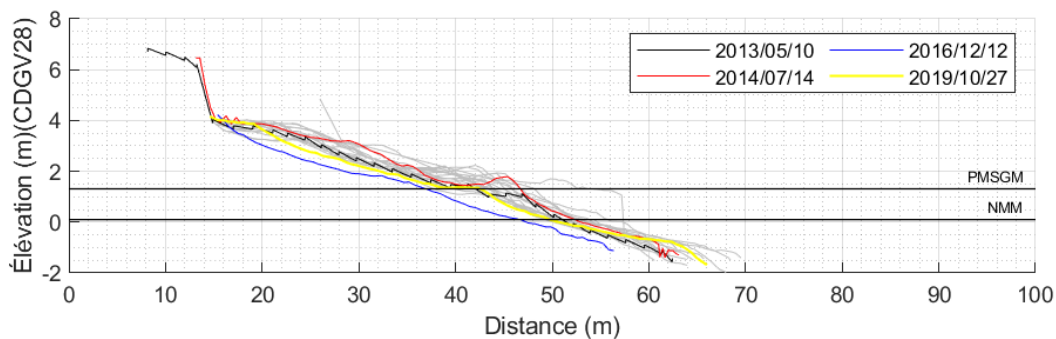
Profil n° 35 Cap-des-Rosiers



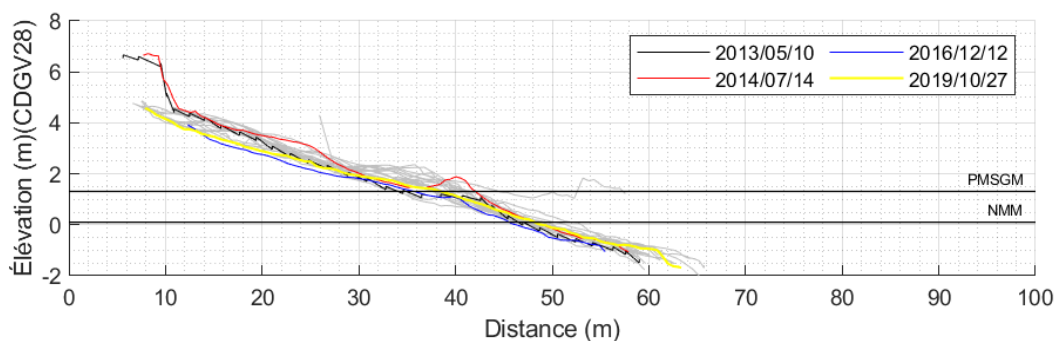
Profil n° 36 Cap-des-Rosiers



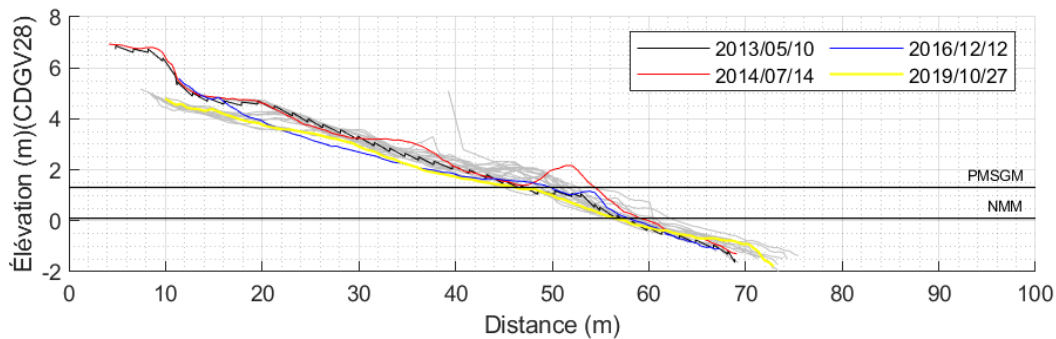
Profil n° 1 Cap-des-Rosiers, site témoin



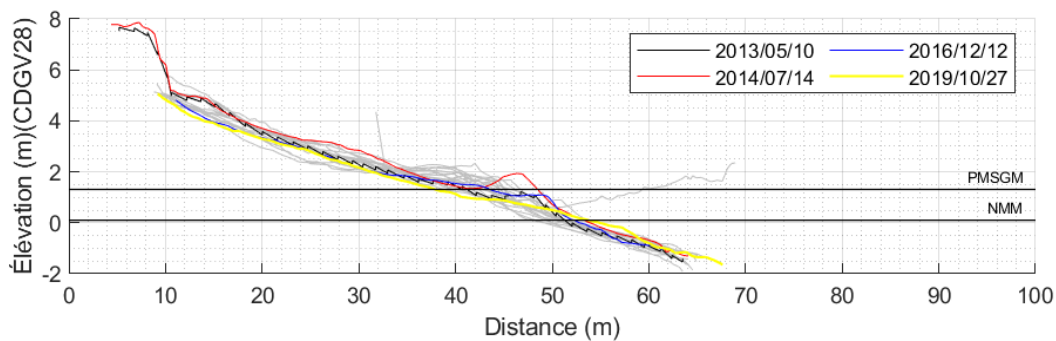
Profil n° 2 Cap-des-Rosiers, site témoin



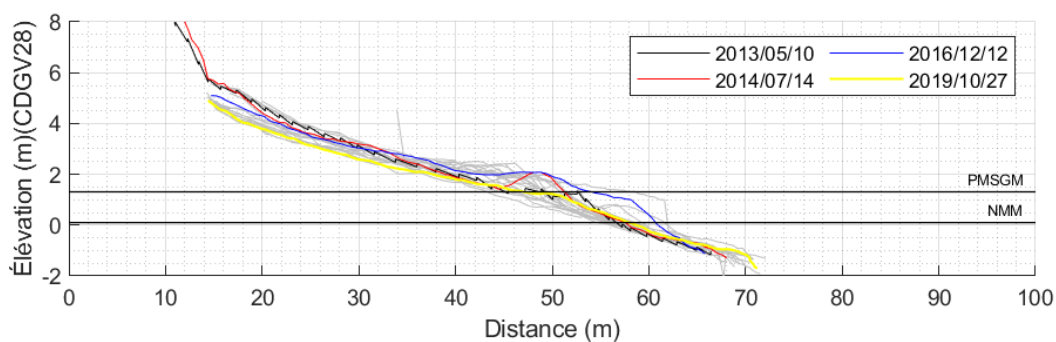
Profil n° 3 Cap-des-Rosiers, site témoin



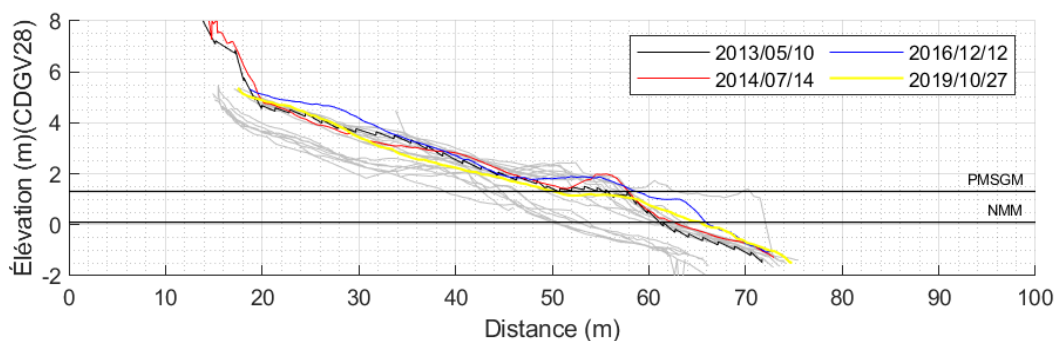
Profil n° 4 Cap-des-Rosiers, site témoin



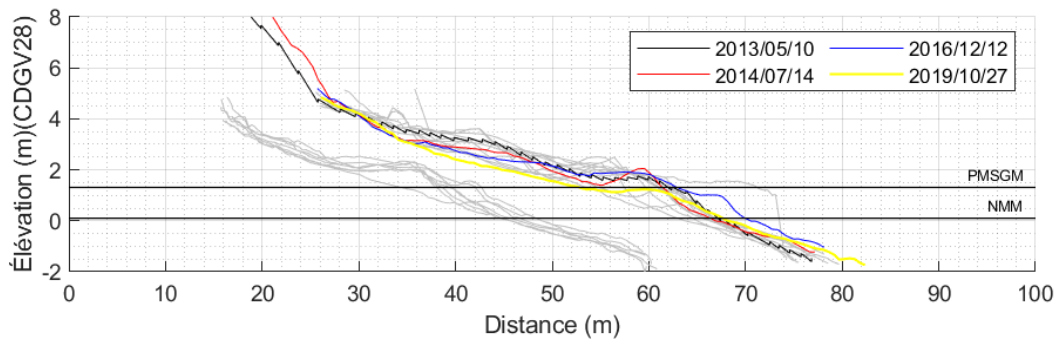
Profil n° 5 Cap-des-Rosiers, site témoin



Profil n° 6 Cap-des-Rosiers, site témoin

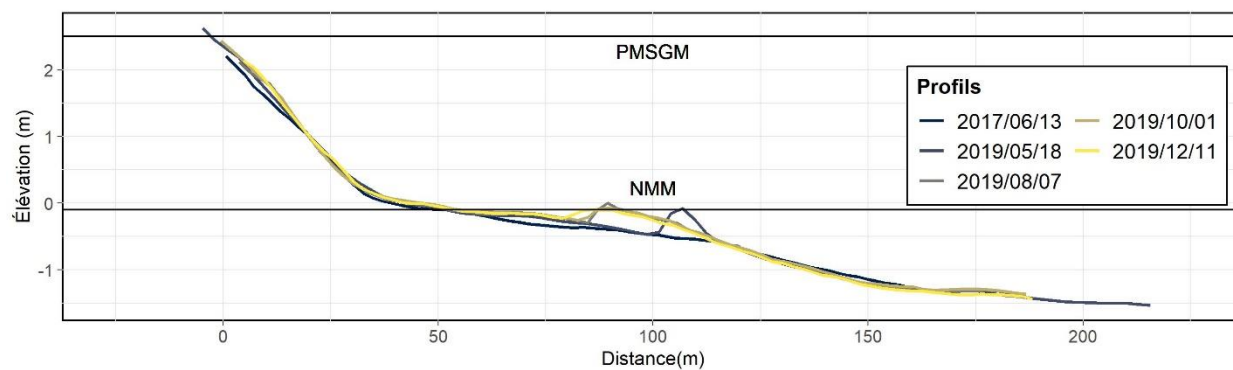


Profil n° 7 Cap-des-Rosiers, site témoin

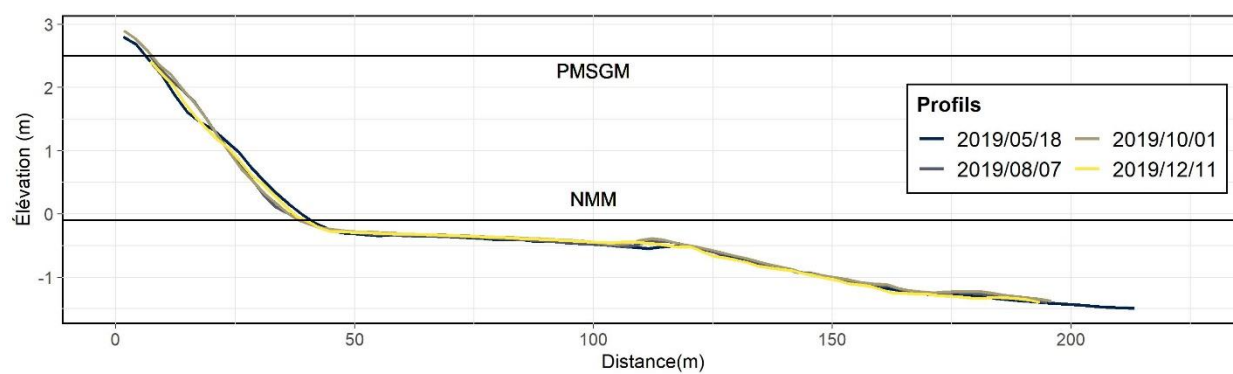


Profil n° 8 Cap-des-Rosiers, site témoin

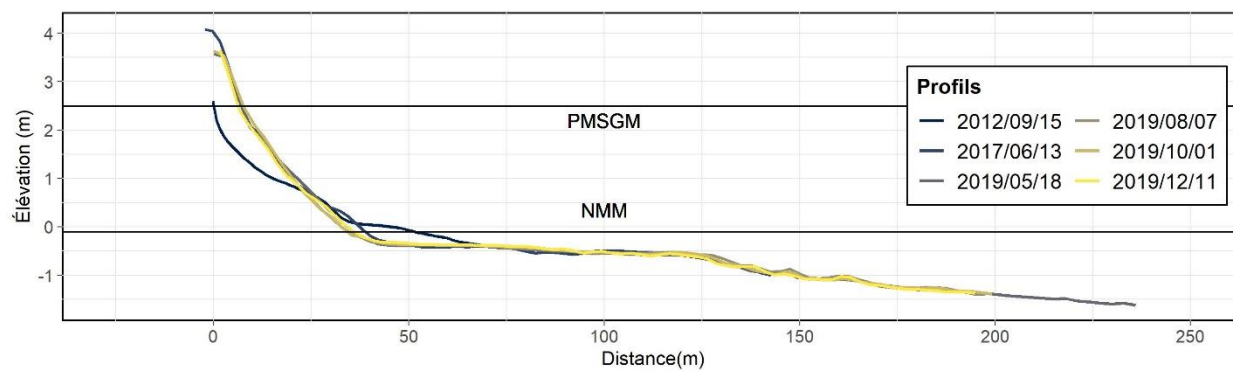
ANNEXE 9-2 – PLAGE DE L'ANSE-AUX-COQUES



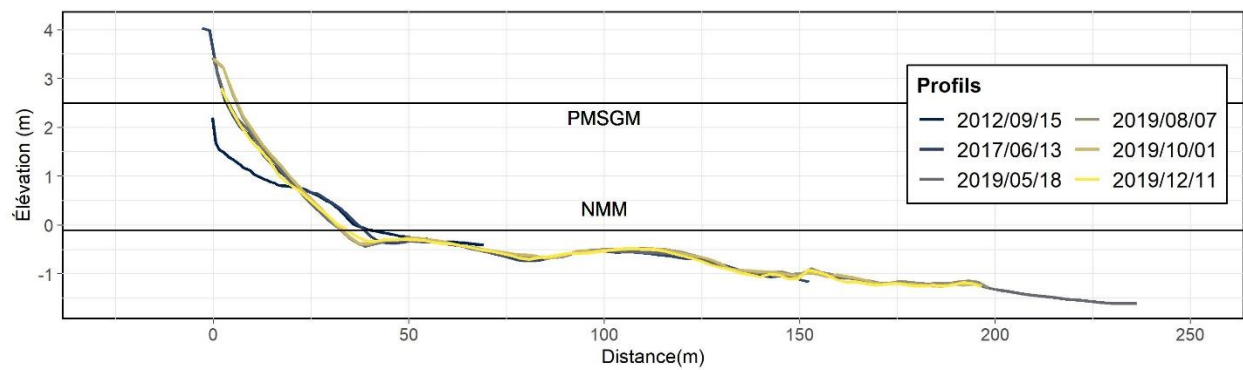
Profil n° 1 Anse-aux-Coques



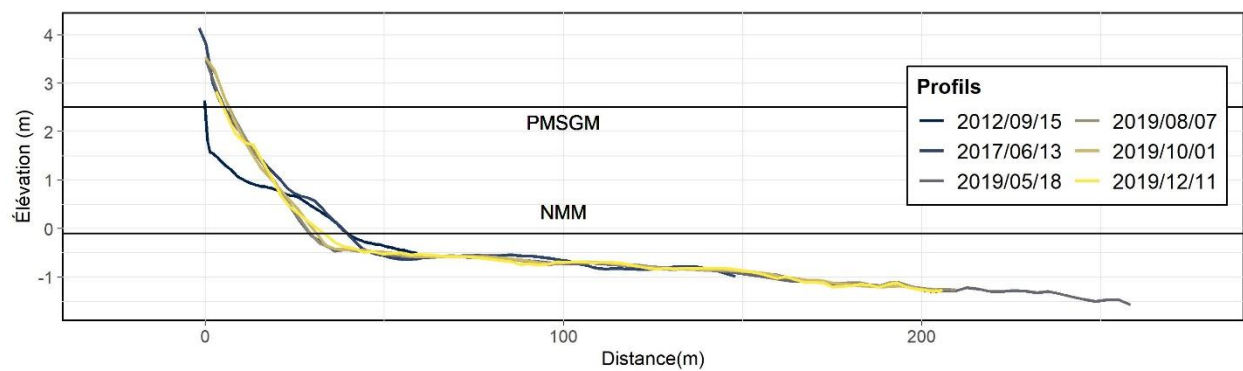
Profil n° 2, Anse-aux-Coques



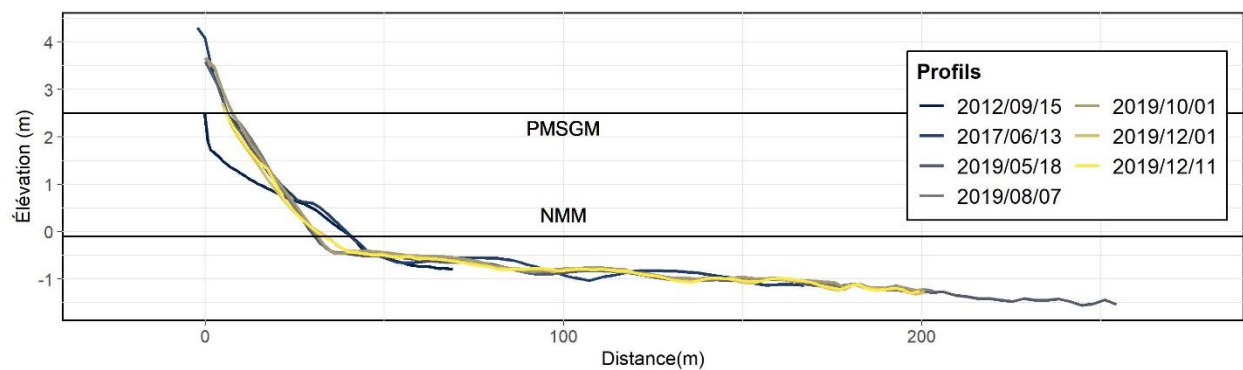
Profil n° 3, Anse-aux-Coques



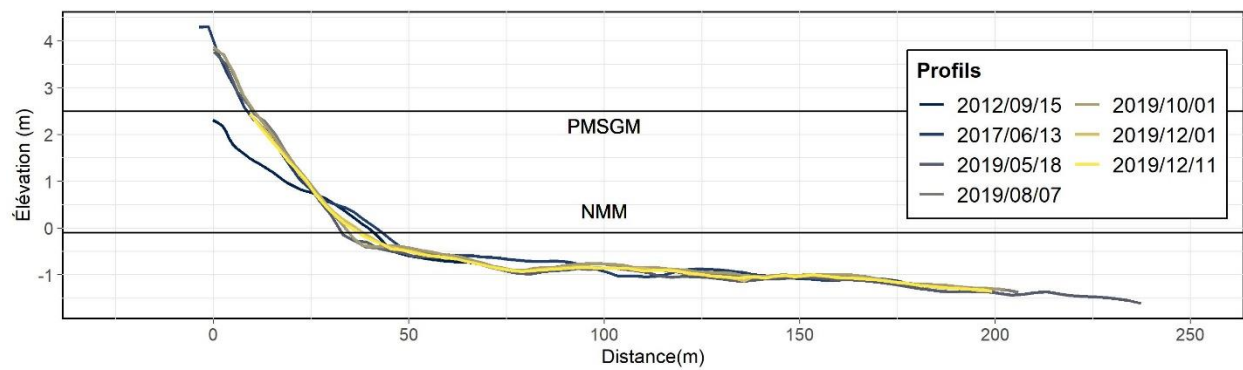
Profil n° 4, Anse-aux-Coques



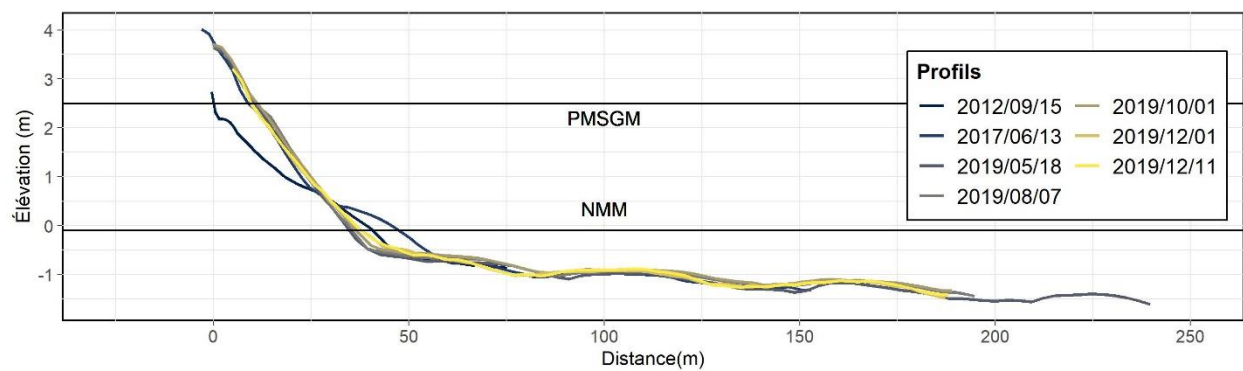
Profil n° 5, Anse-aux-Coques



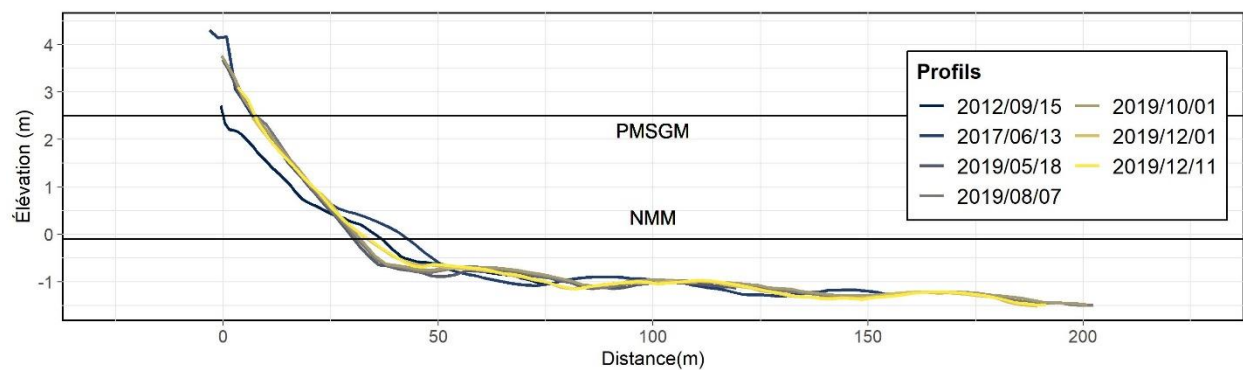
Profil n° 6, Anse-aux-Coques



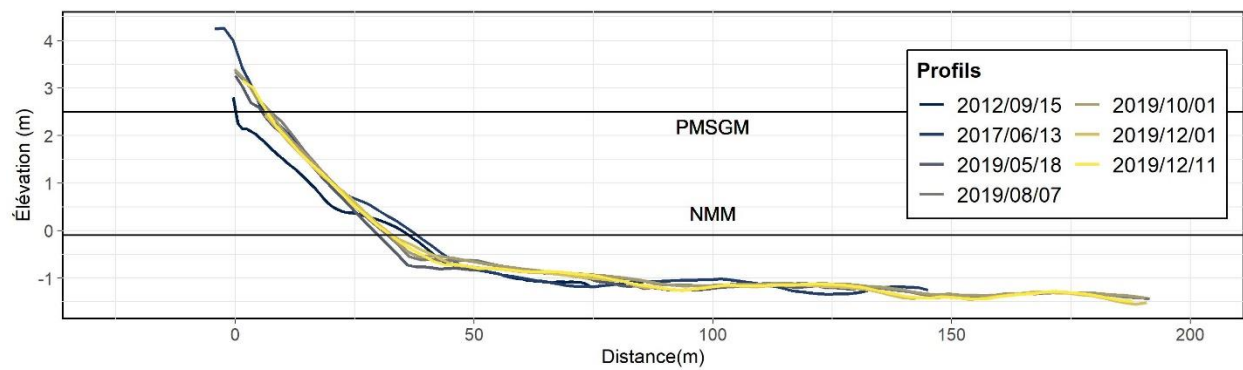
Profil n° 7, Anse-aux-Coques



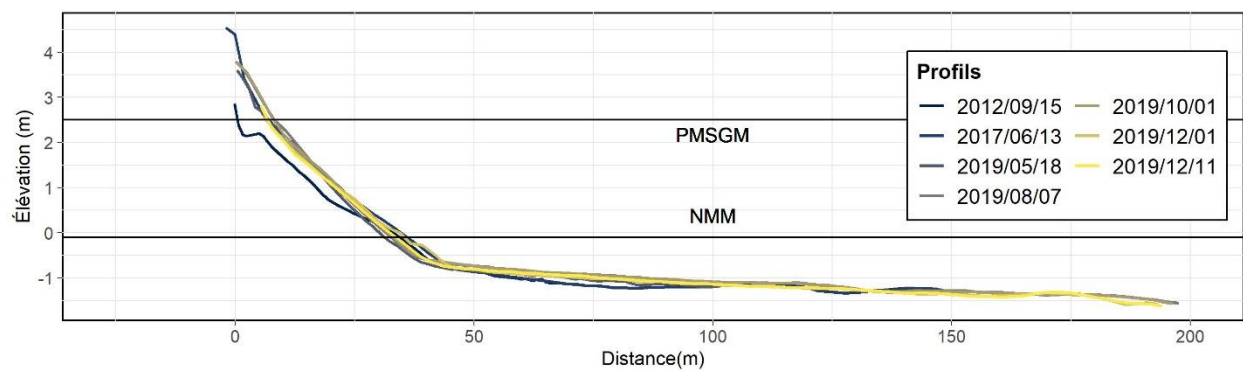
Profil n° 8, Anse-aux-Coques



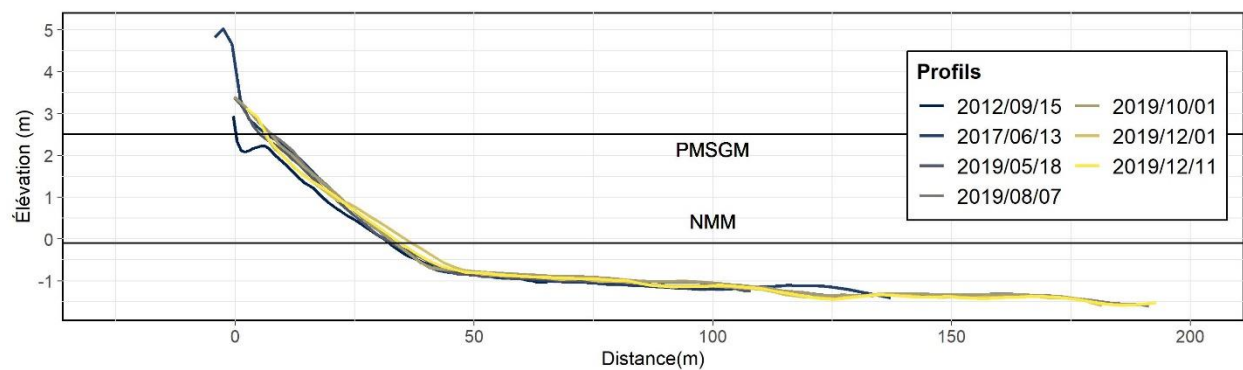
Profil n° 9, Anse-aux-Coques



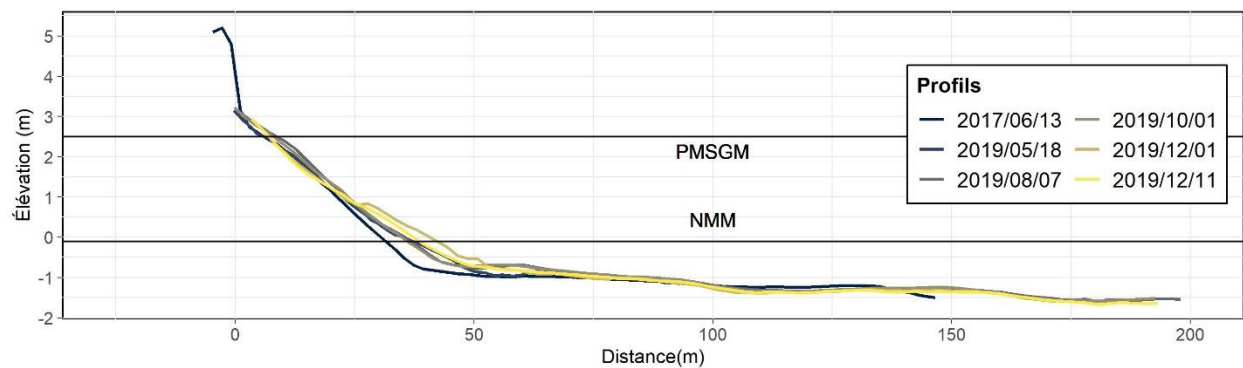
Profil n° 10, Anse-aux-Coques



Profil n° 11, Anse-aux-Coques

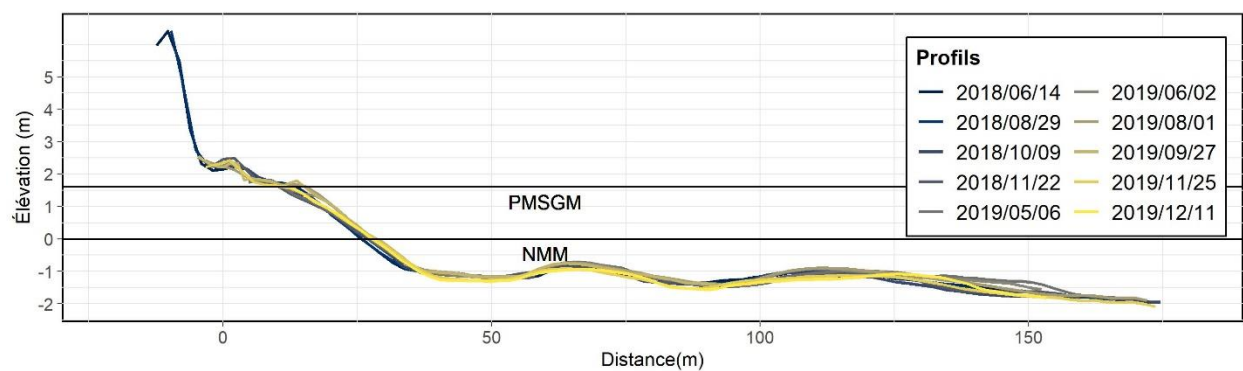


Profil n° 12, Anse-aux-Coques

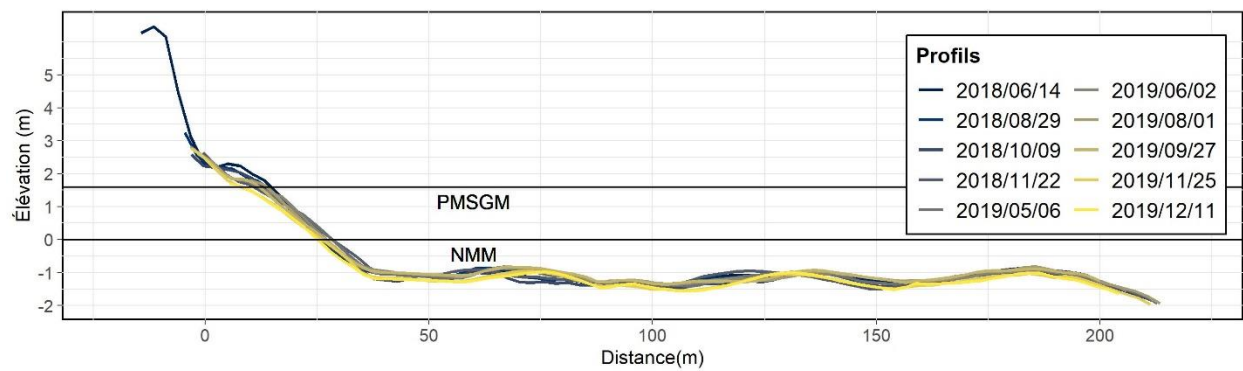


Profil n° 13, Anse-aux-Coques

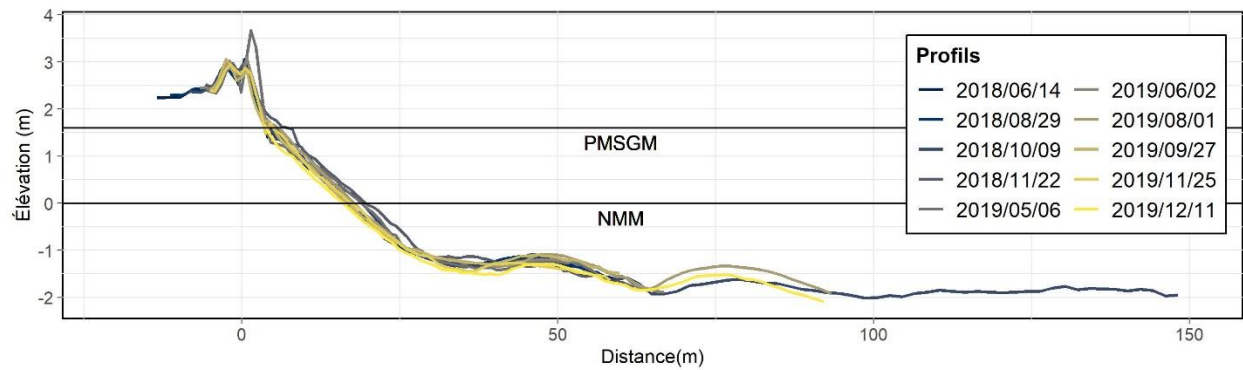
ANNEXE 9-3 – BANC LAROCQUE



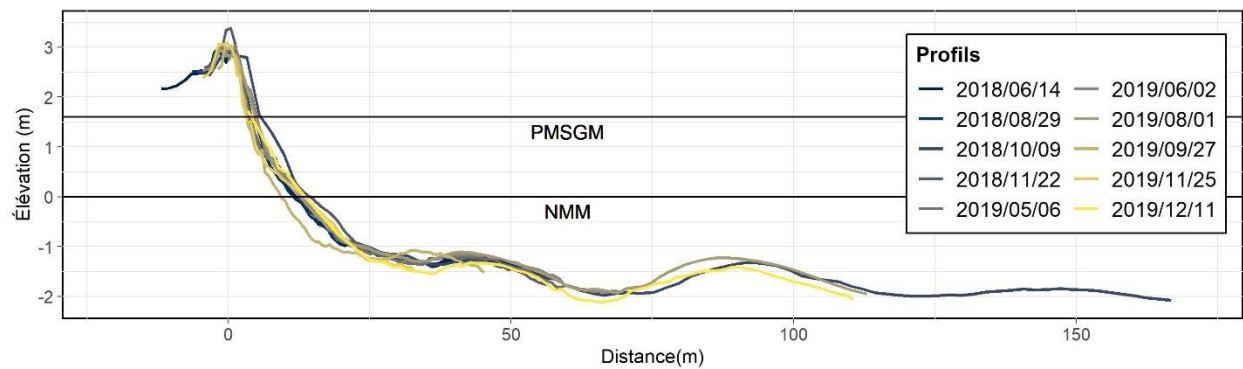
Profil n° 1, Banc Larocque



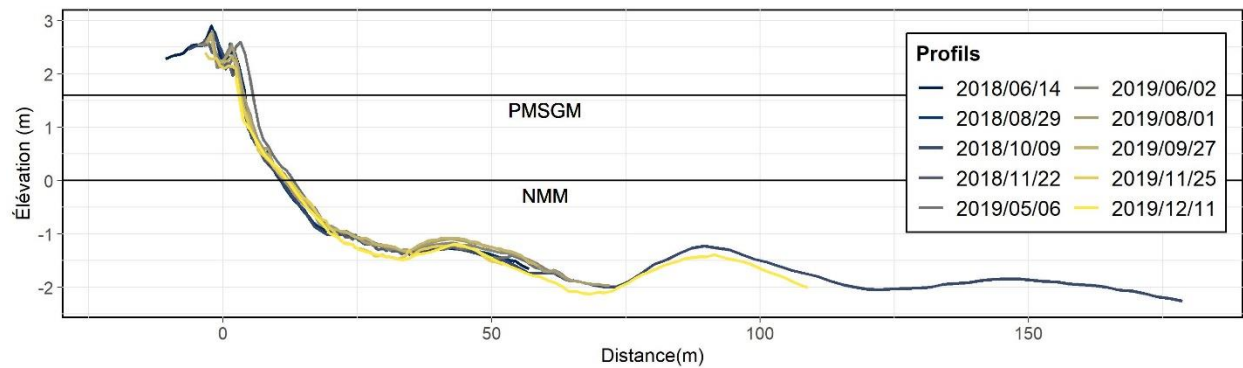
Profil n° 2, Banc Larocque



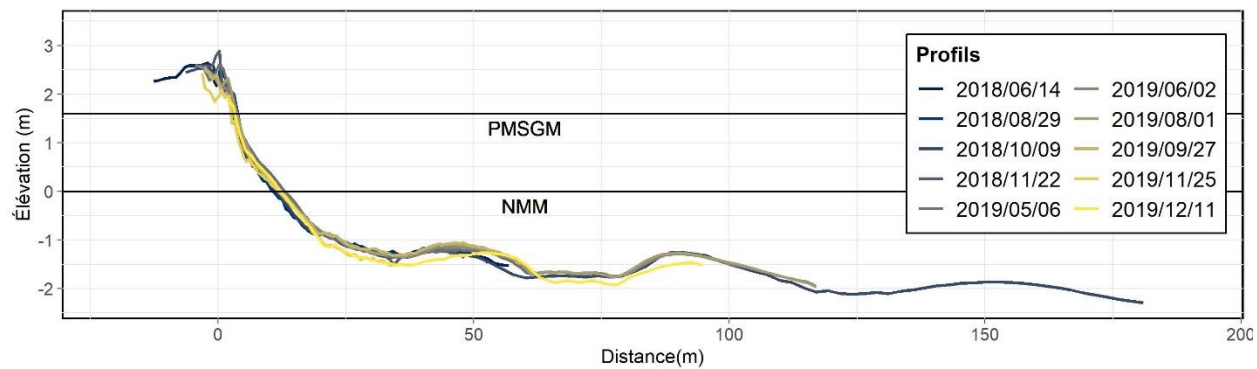
Profil n° 7, Banc Larocque



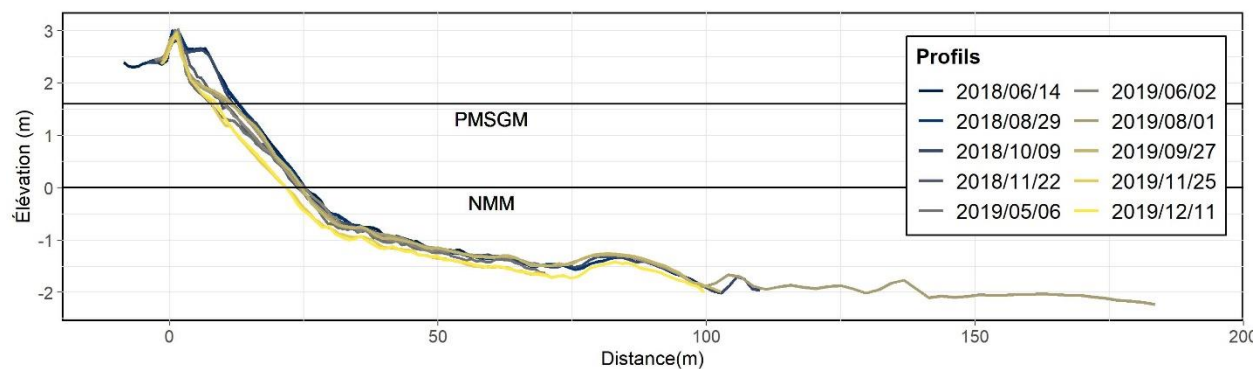
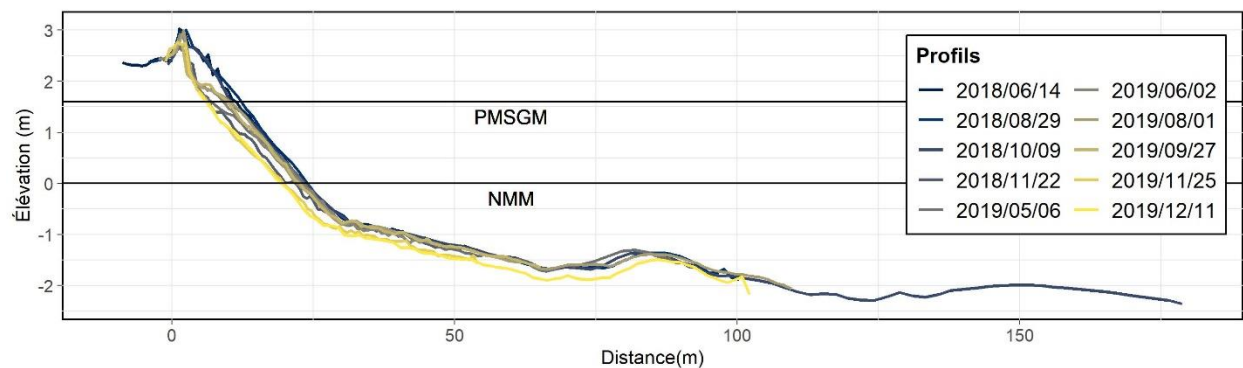
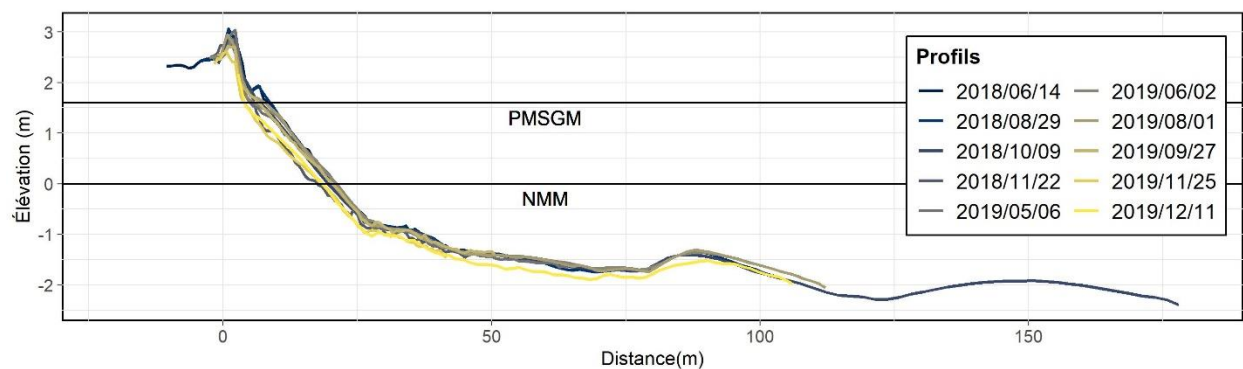
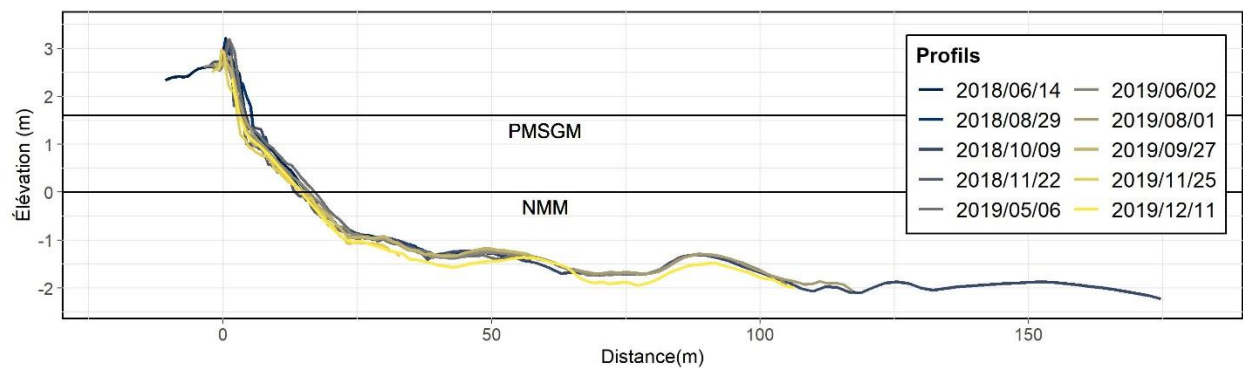
Profil n° 8, Banc Larocque

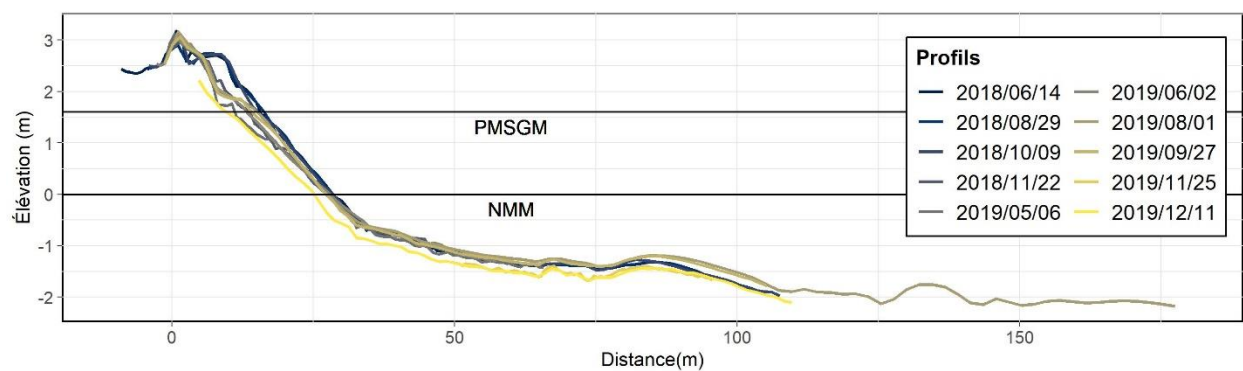


Profil n° 9, Banc Larocque

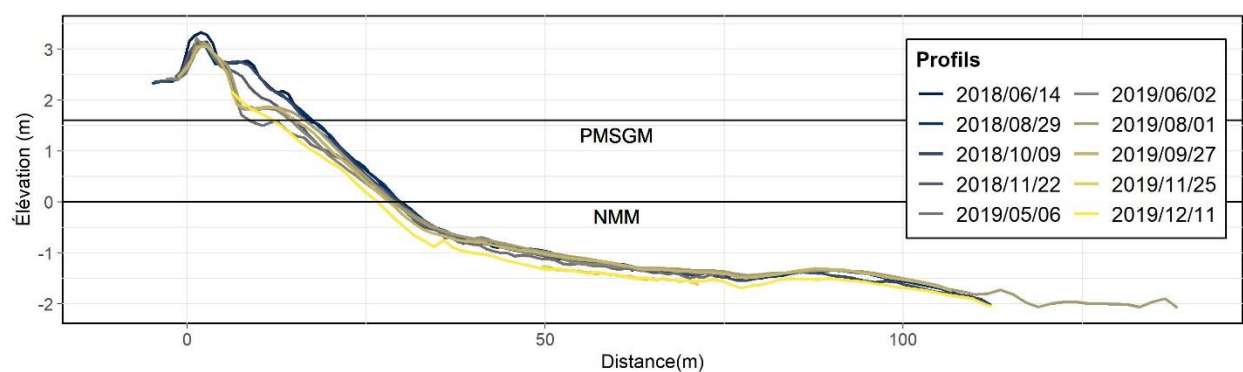


Profil n° 10, Banc Larocque

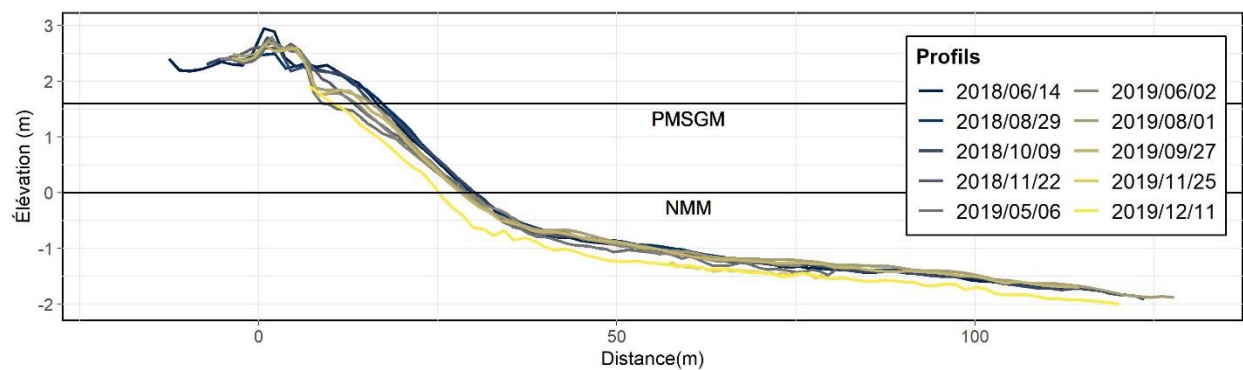




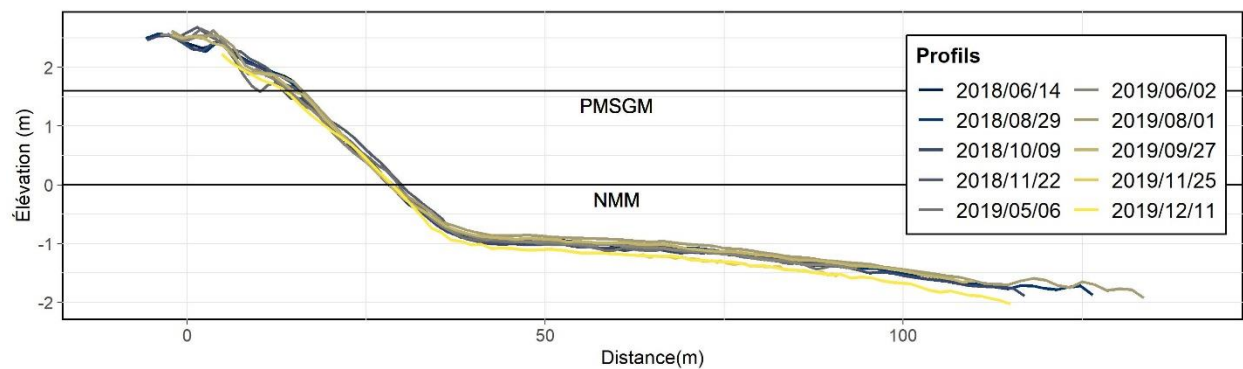
Profil n° 15, Banc Larocque



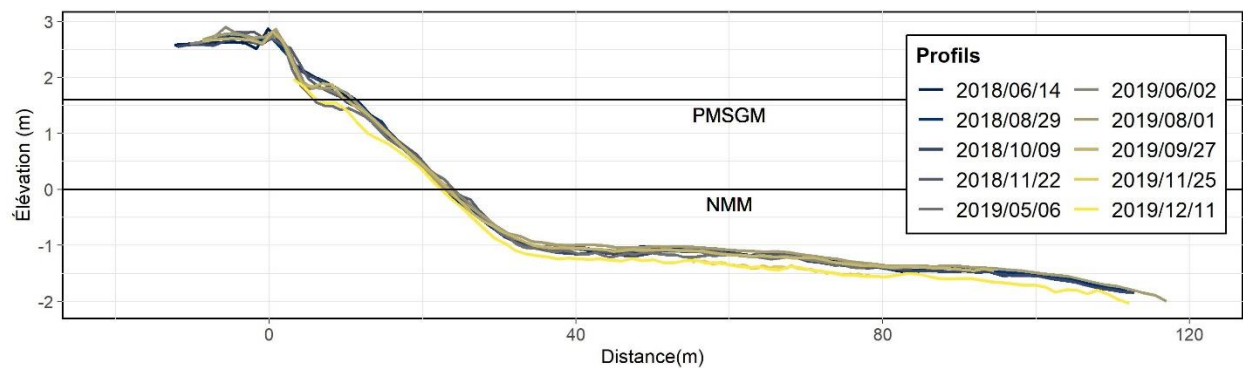
Profil n° 16, Banc Larocque



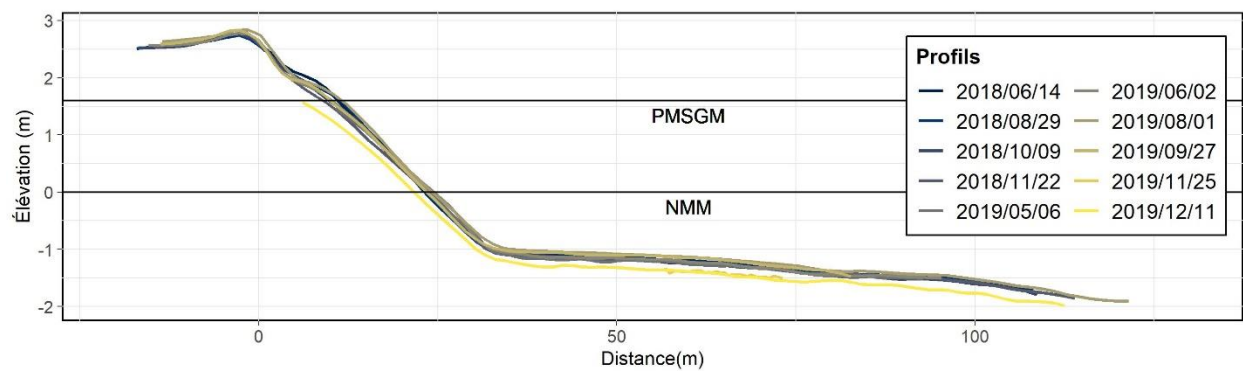
Profil n° 17, Banc Larocque



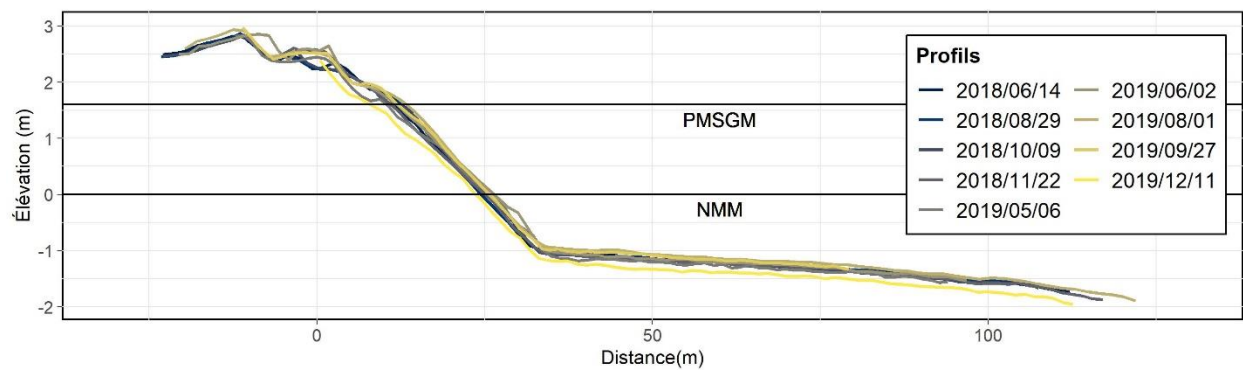
Profil n° 18, Banc Larocque



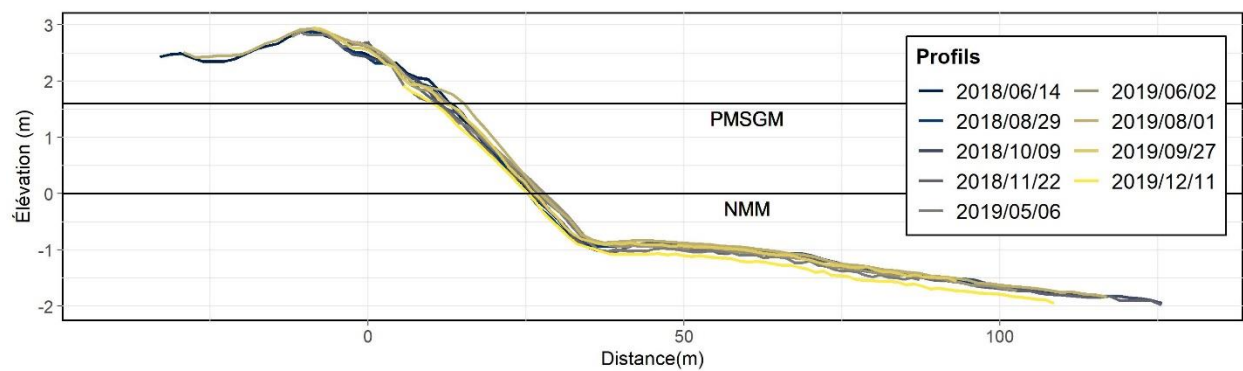
Profil n° 19, Banc Larocque



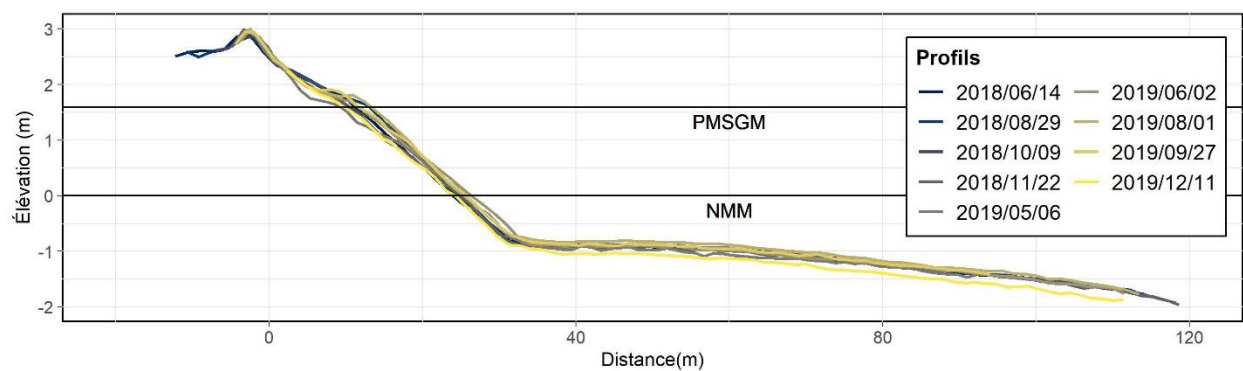
Profil n° 20, Banc Larocque



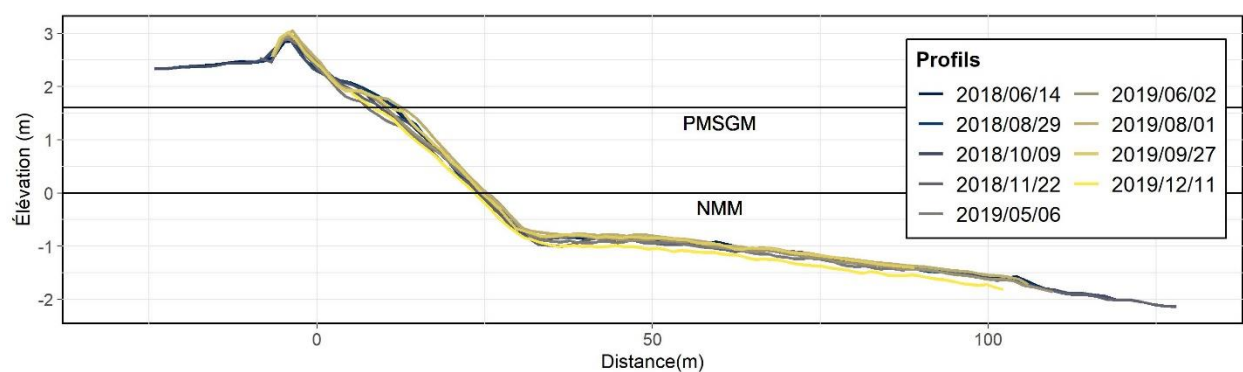
Profil n° 21, Banc Larocque



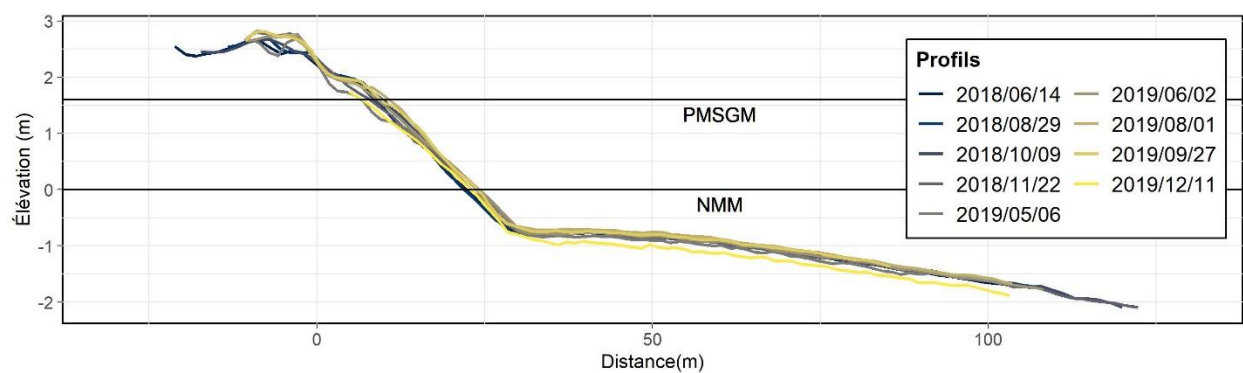
Profil n° 22, Banc Larocque



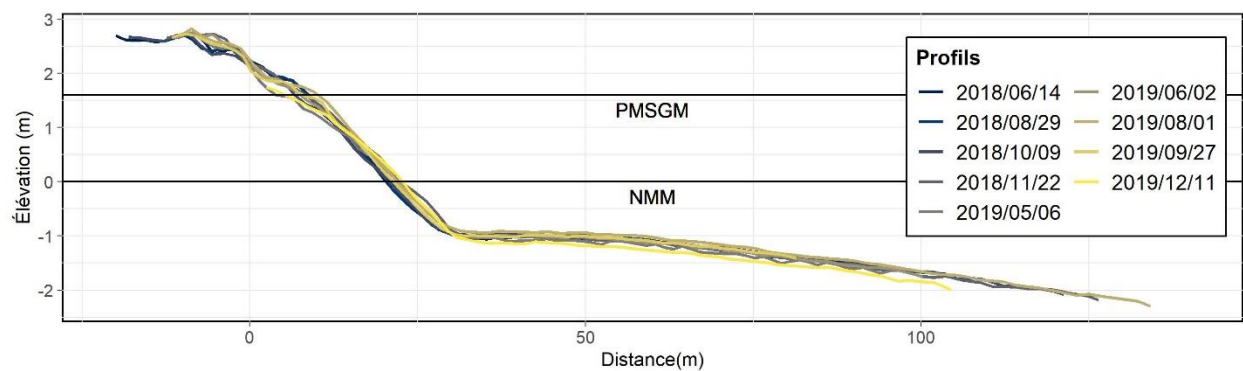
Profil n° 23, Banc Larocque



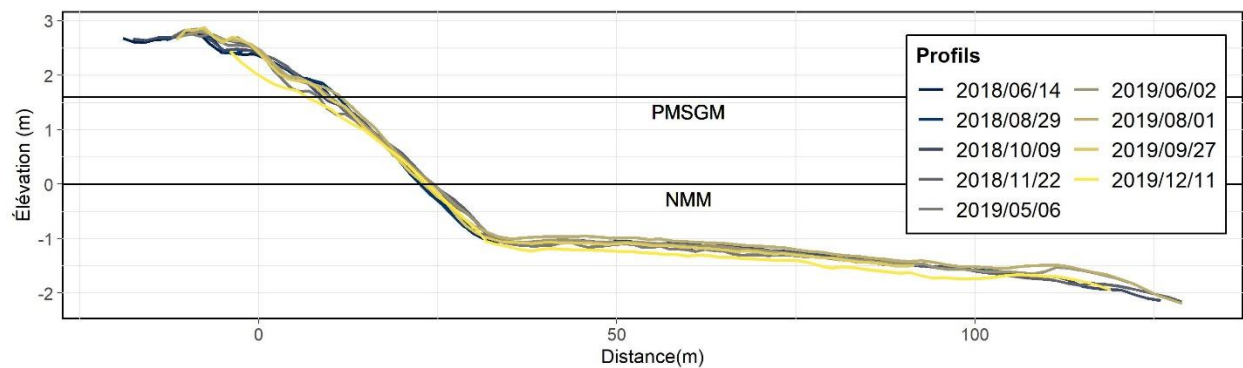
Profil n° 24, Banc Larocque



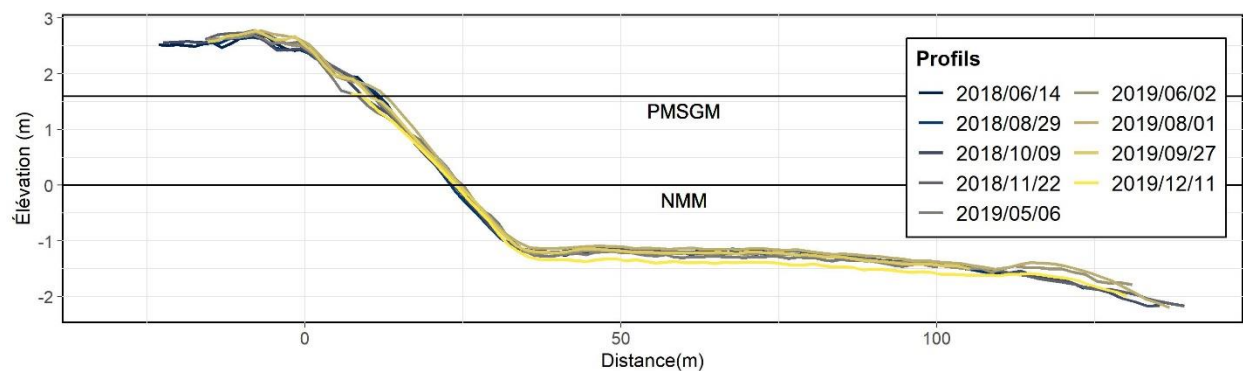
Profil n° 25, Banc Larocque



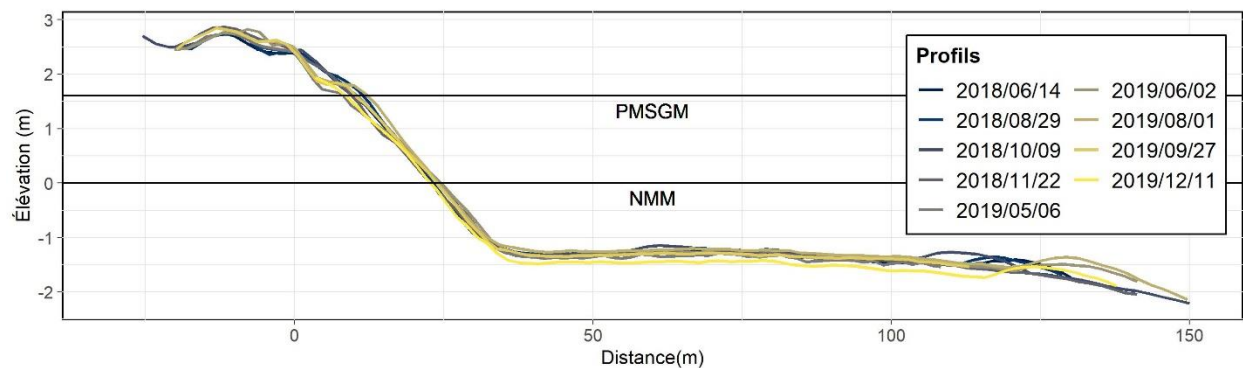
Profil n° 26, Banc Larocque



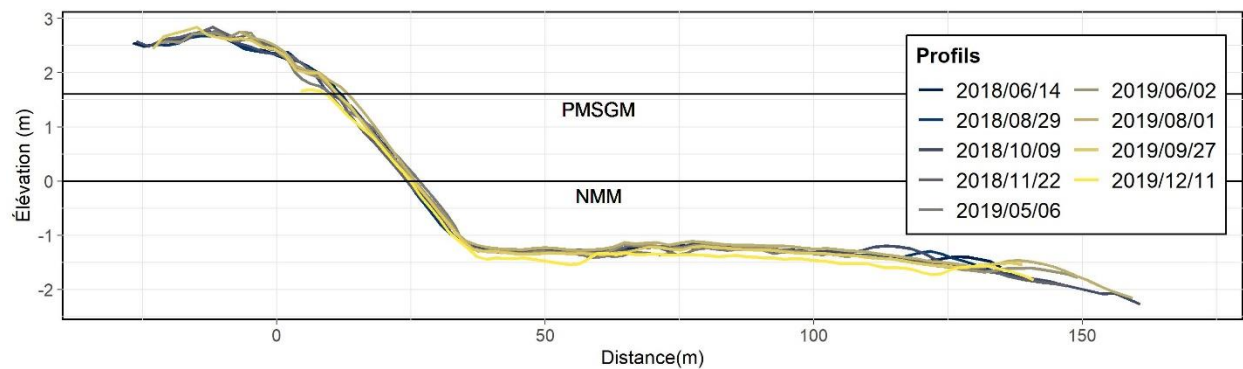
Profil n° 27, Banc Larocque



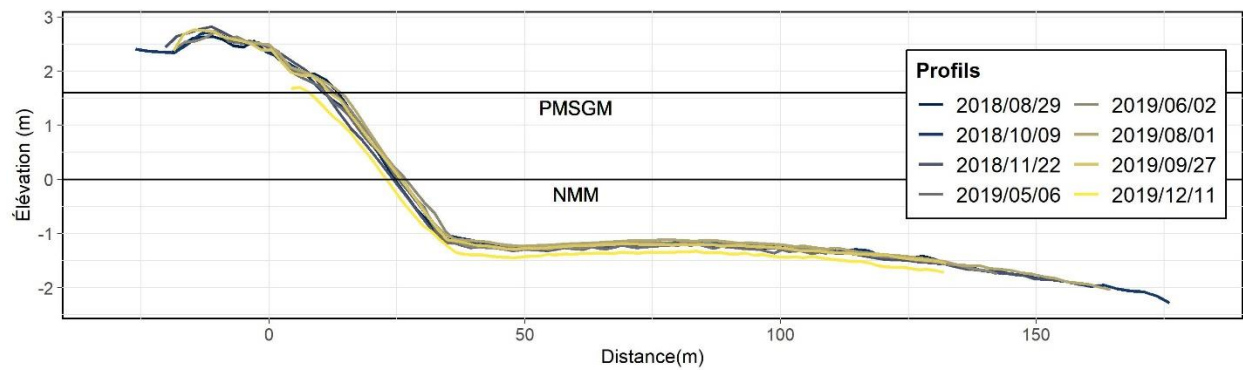
Profil n° 28, Banc Larocque



Profil n° 29, Banc Larocque

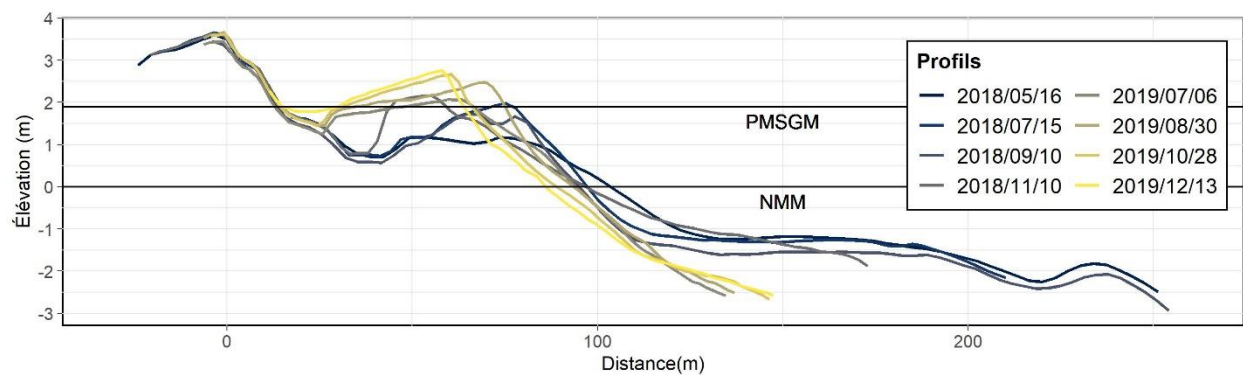


Profil n° 30, Banc Larocque

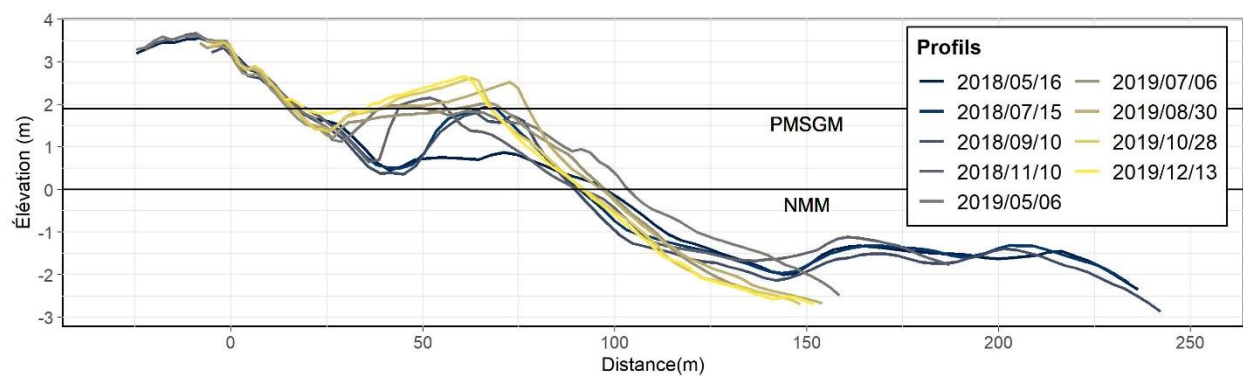


Profil n° 31, Banc Larocque

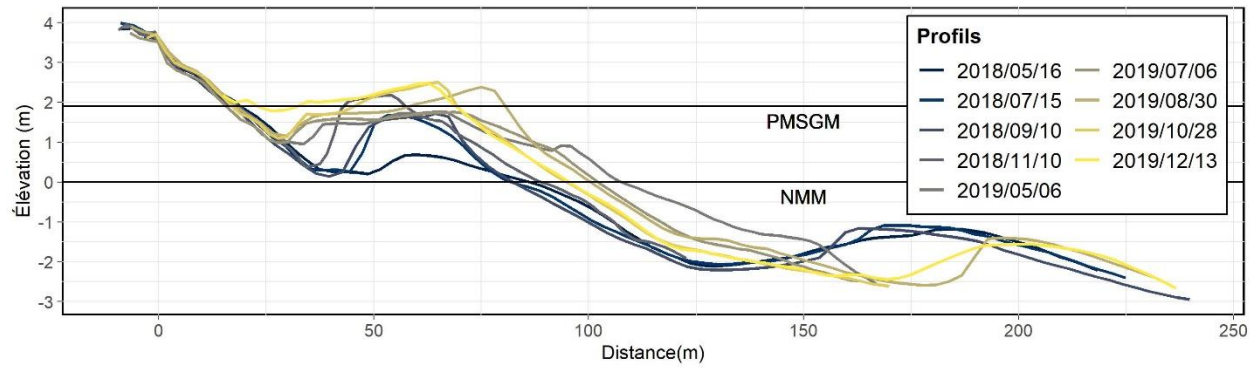
ANNEXE 9-4 – PLAGE MONAGHAN



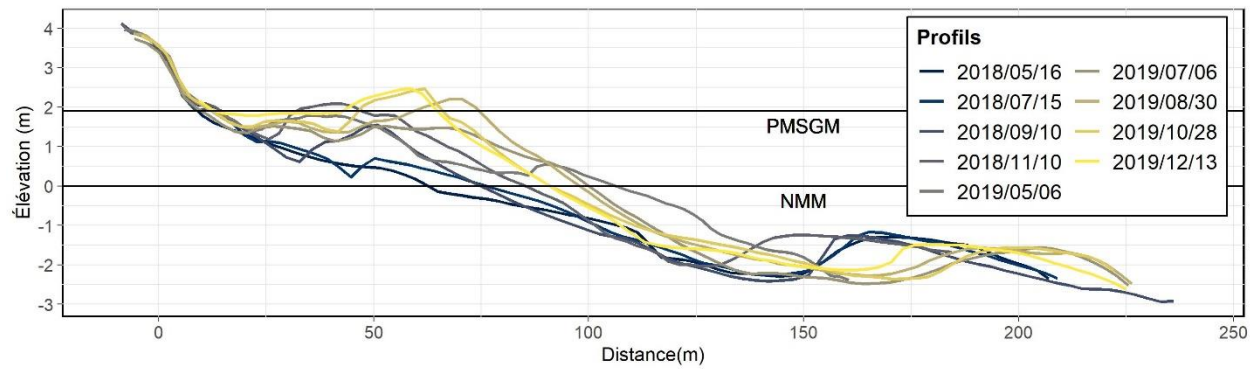
Profil n° 1, Plage Monaghan



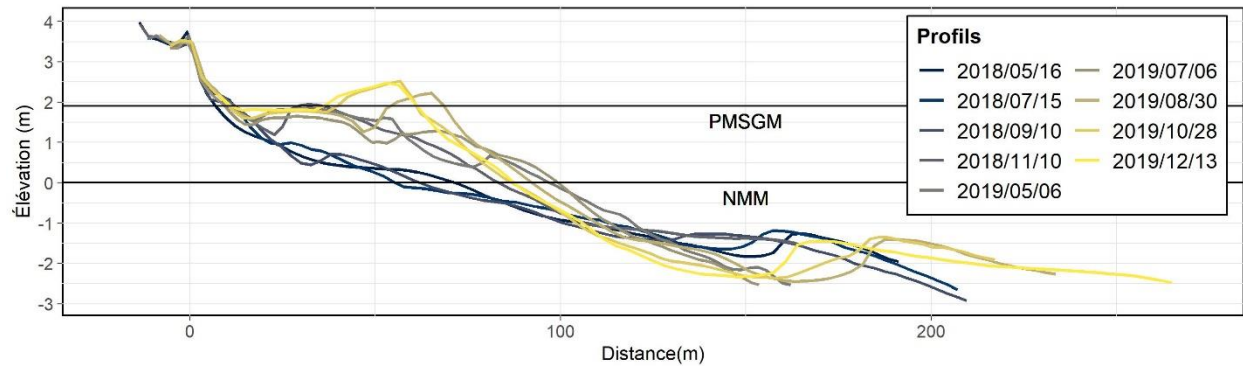
Profil n° 2, Plage Monaghan



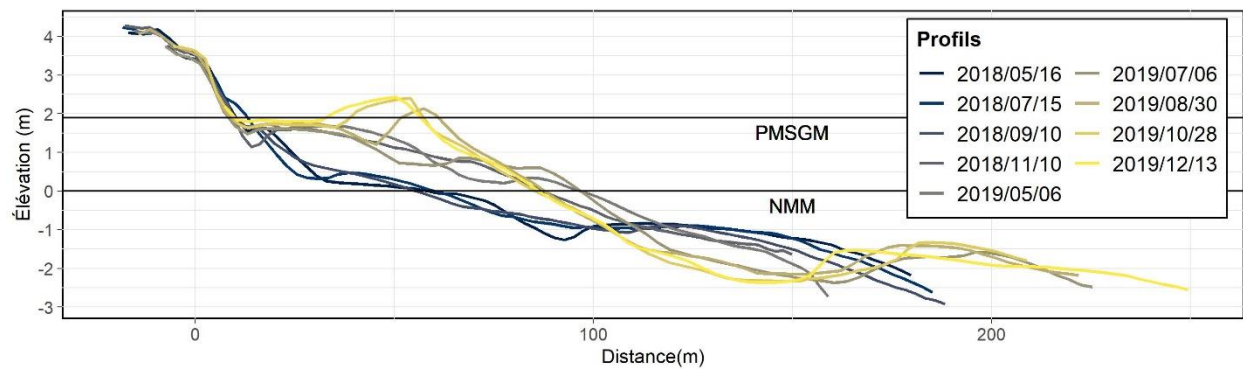
Profil n° 3, Plage Monaghan



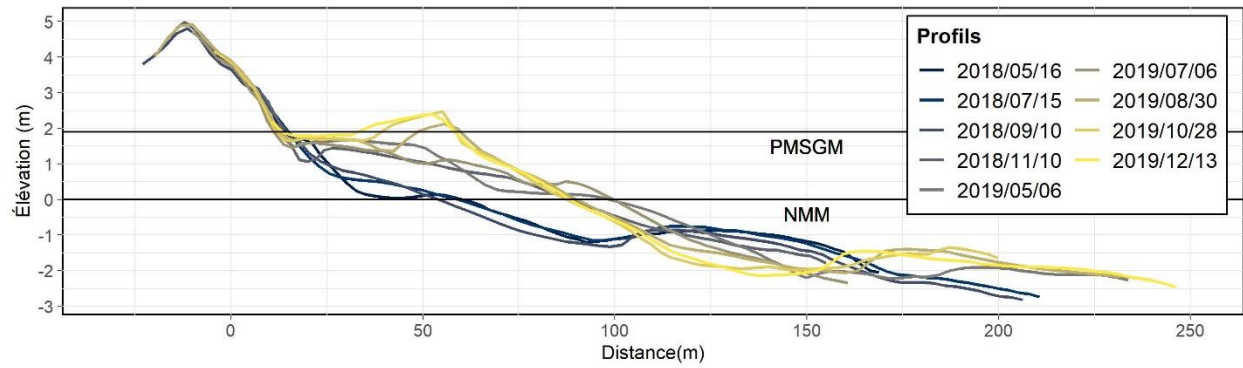
Profil n° 4, Plage Monaghan



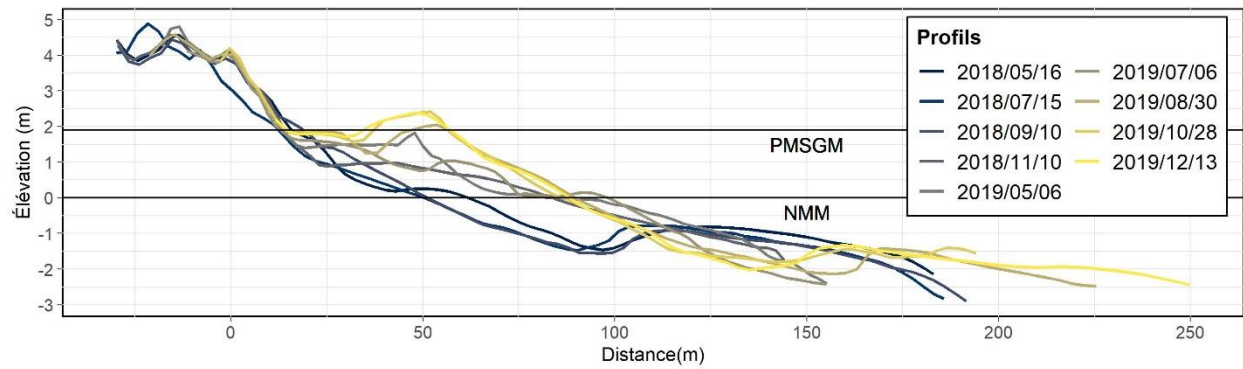
Profil n° 5, Plage Monaghan



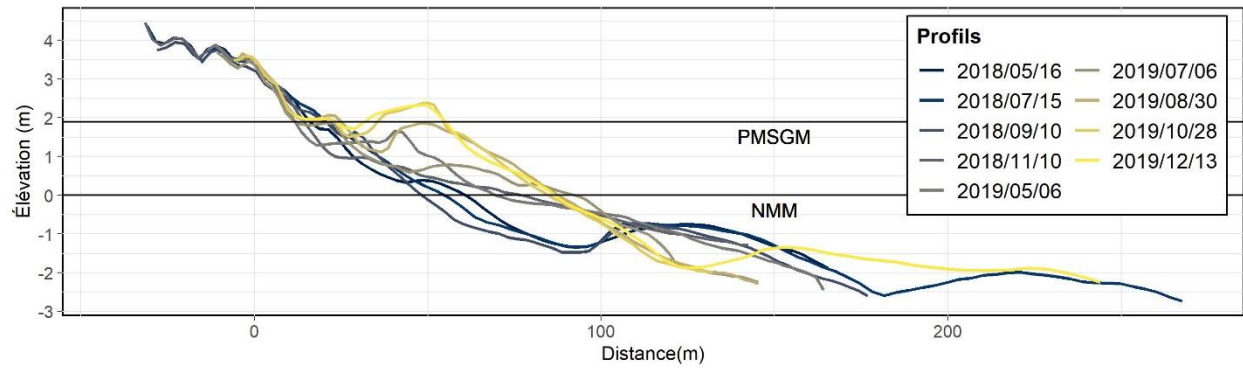
Profil n° 6, Plage Monaghan



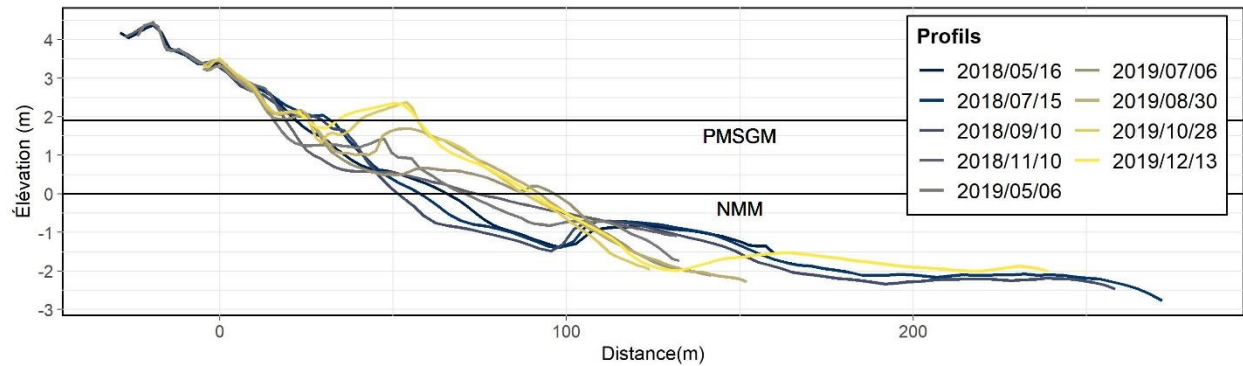
Profil n° 7, Plage Monaghan



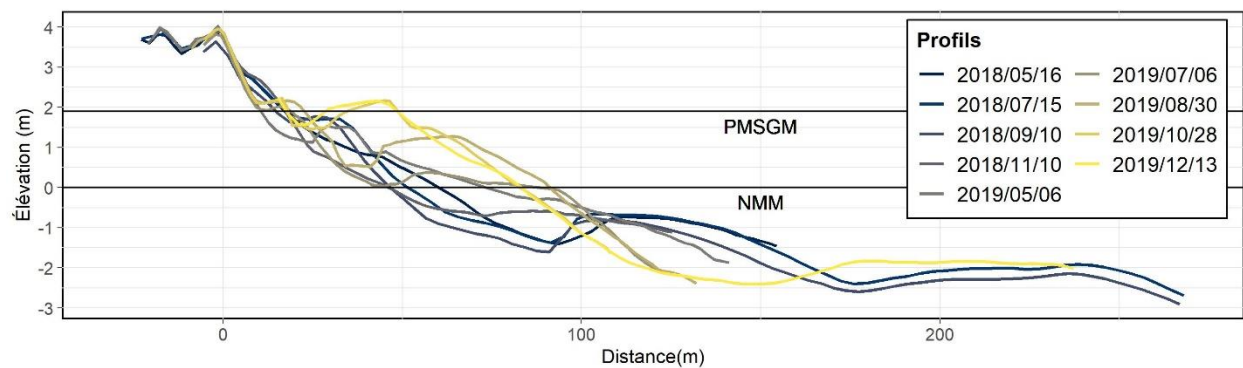
Profil n° 8, Plage Monaghan



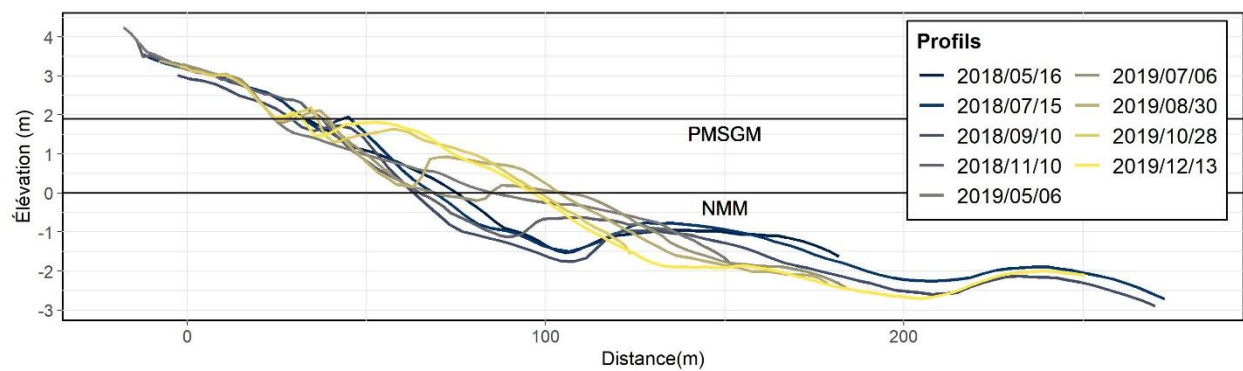
Profil n° 9, Plage Monaghan



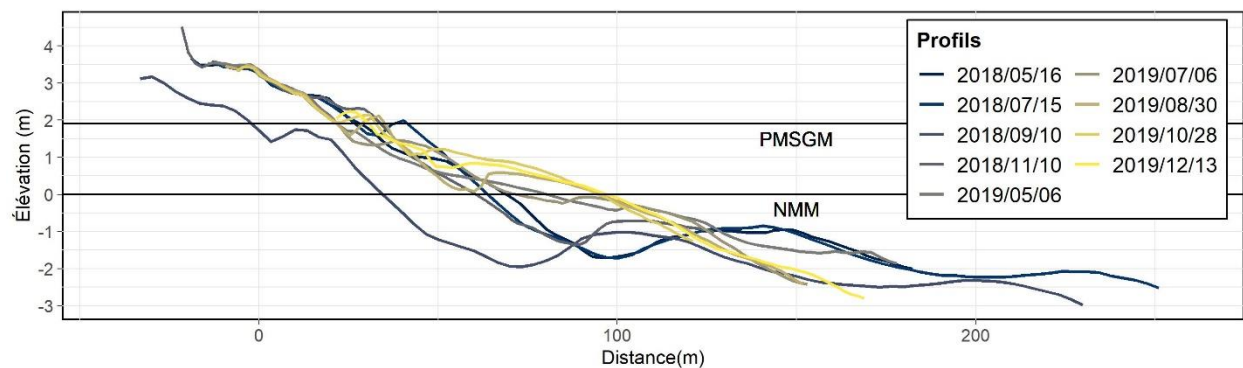
Profil n° 10, Plage Monaghan



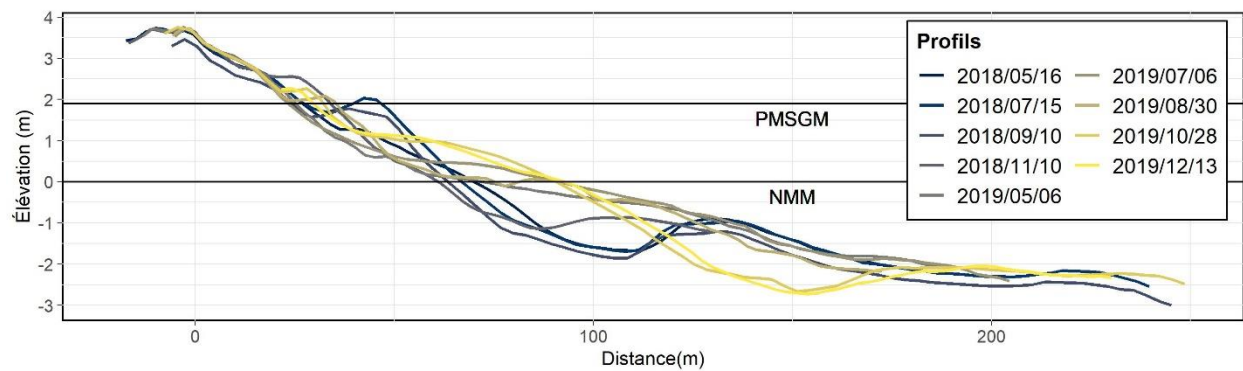
Profil n° 11, Plage Monaghan



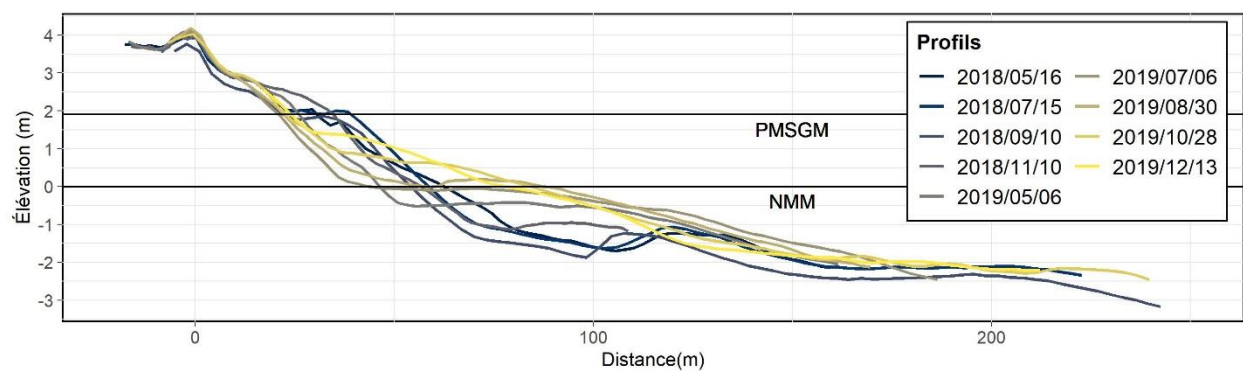
Profil n° 12, Plage Monaghan



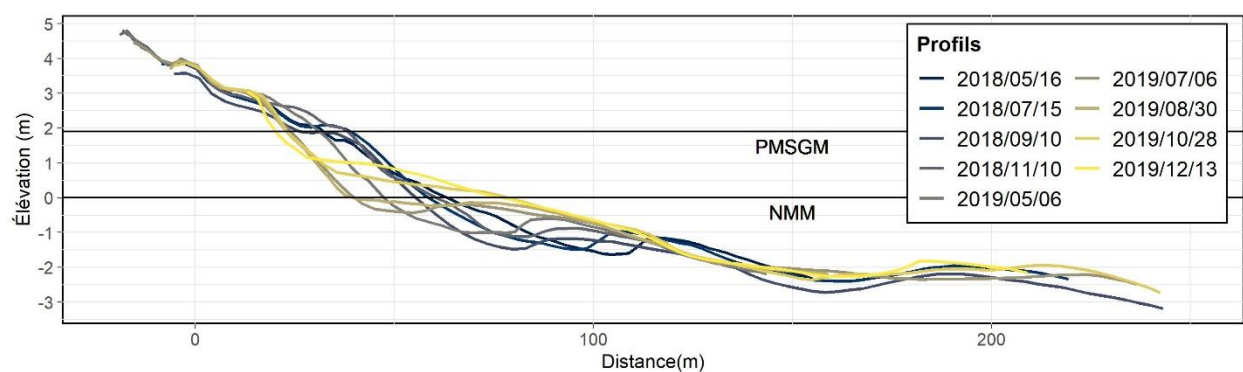
Profil n° 13, Plage Monaghan



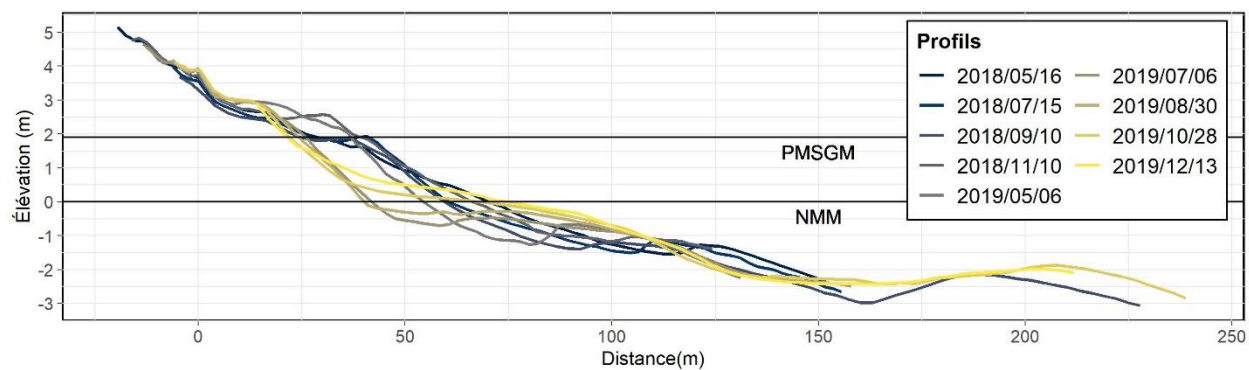
Profil n° 14, Plage Monaghan



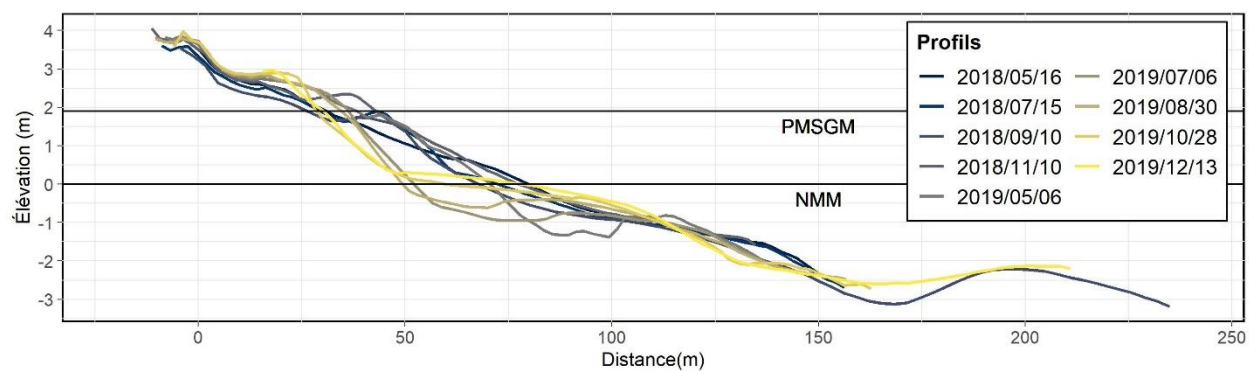
Profil n° 15, Plage Monaghan



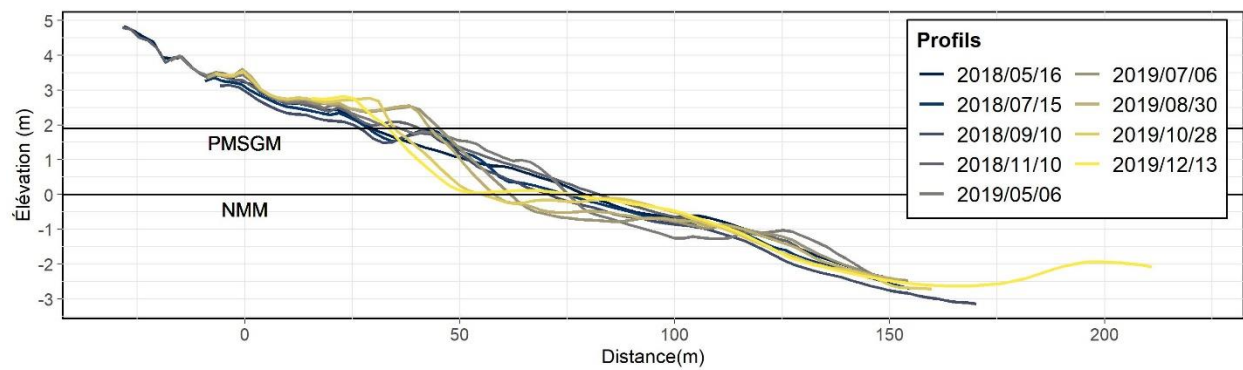
Profil n° 16, Plage Monaghan



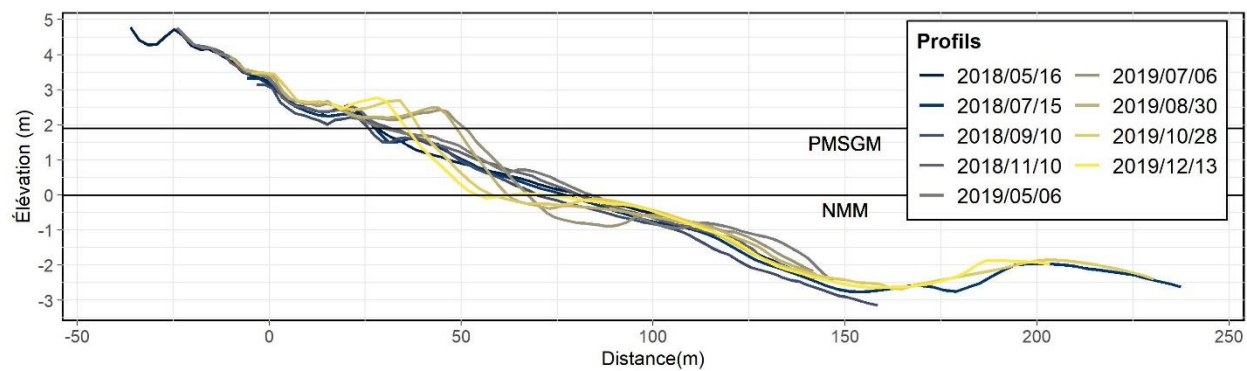
Profil n° 17, Plage Monaghan



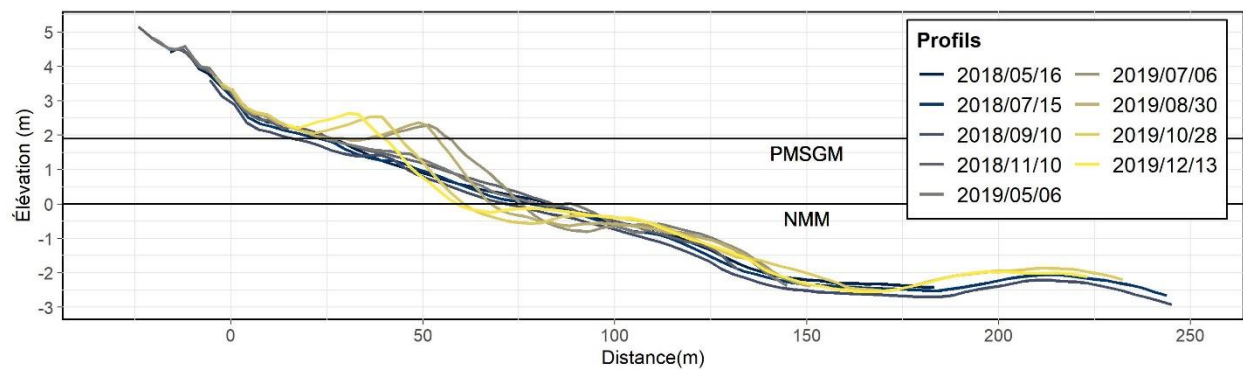
Profil n° 18, Plage Monaghan



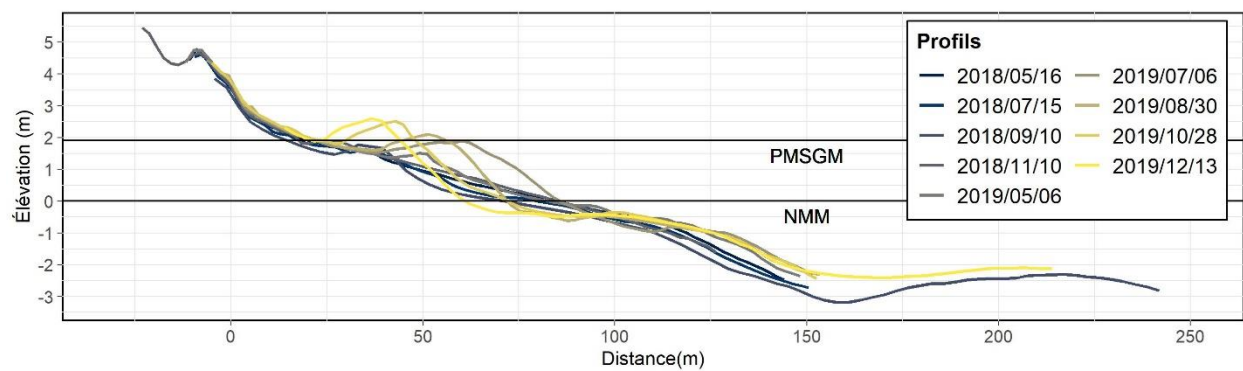
Profil n° 19, Plage Monaghan



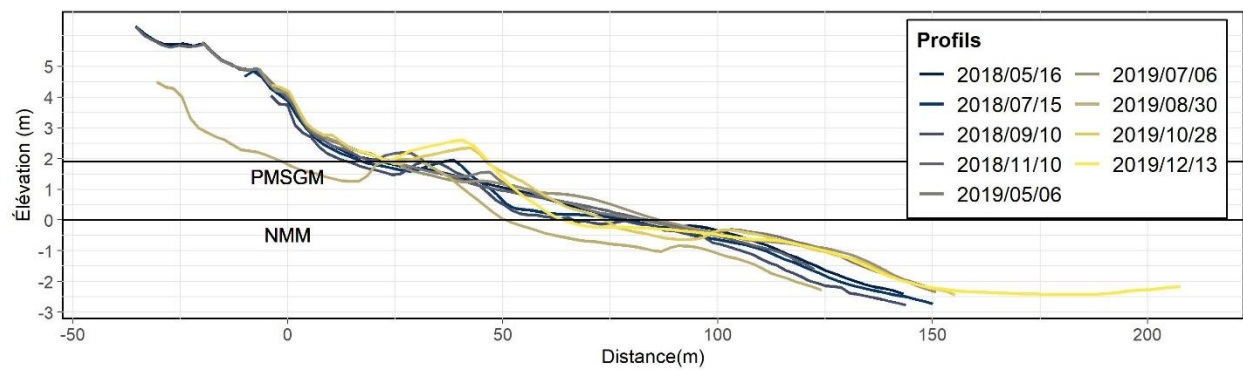
Profil n° 20, Plage Monaghan



Profil n° 21, Plage Monaghan

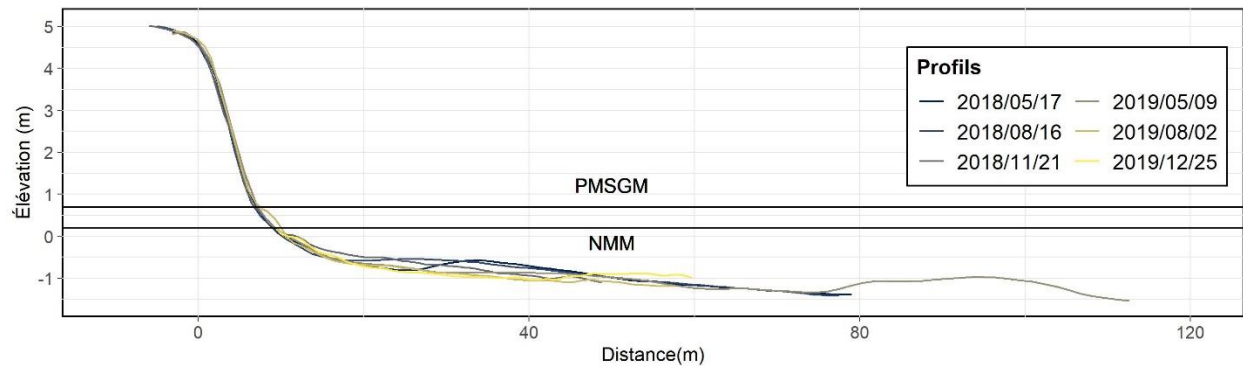


Profil n° 22, Plage Monaghan

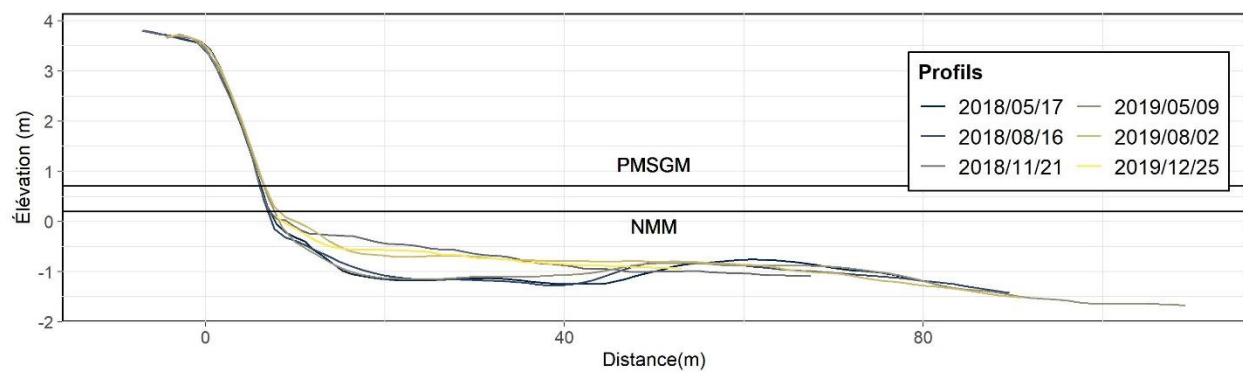


Profil n° 23, Plage Monaghan

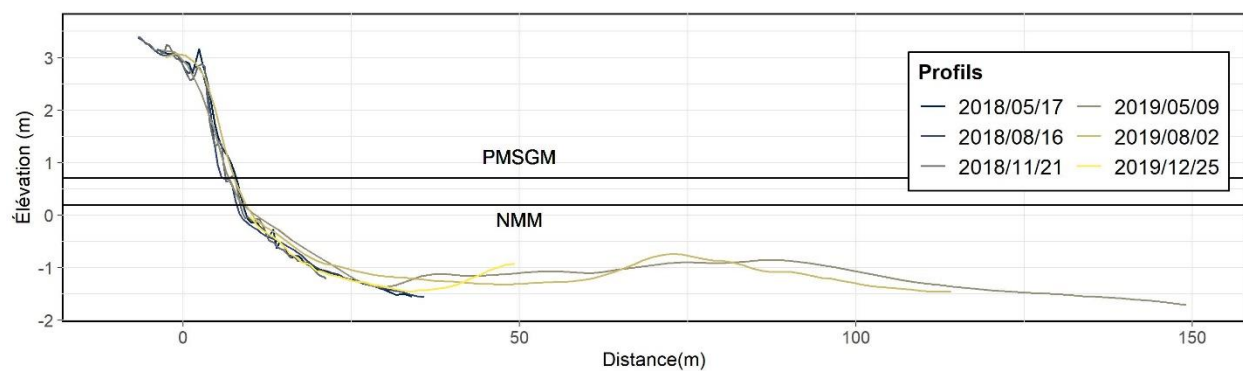
ANNEXE 9-5 – PLAGE DE LA MARTINIQUE



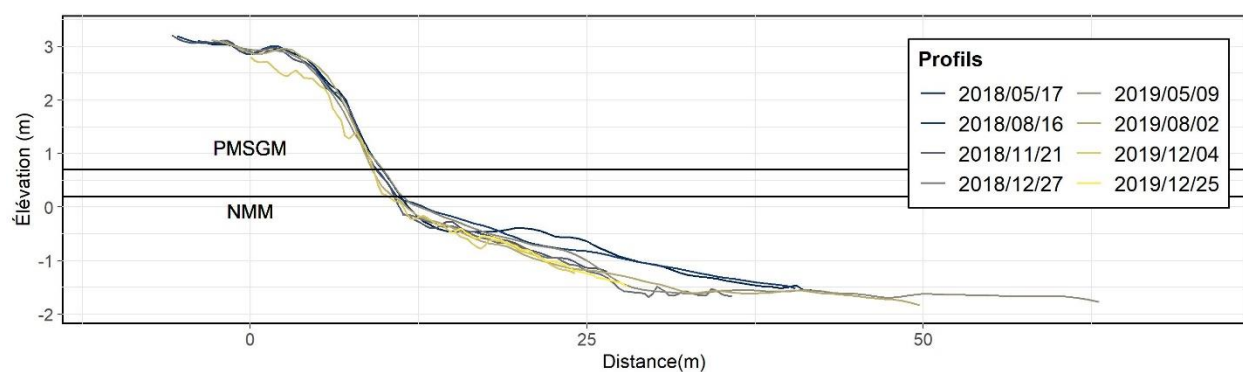
Profil n° 1, Plage de La Martinique



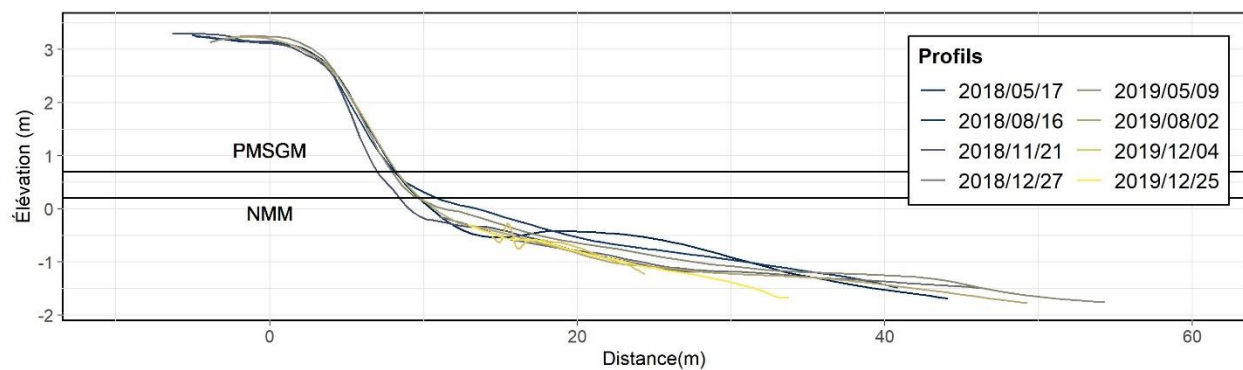
Profil n° 2, Plage de La Martinique



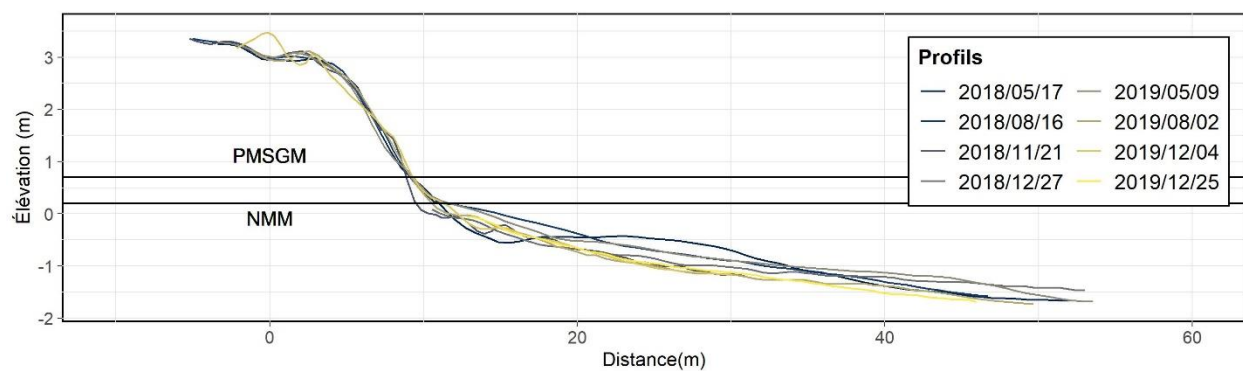
Profil n° 3, Plage de La Martinique



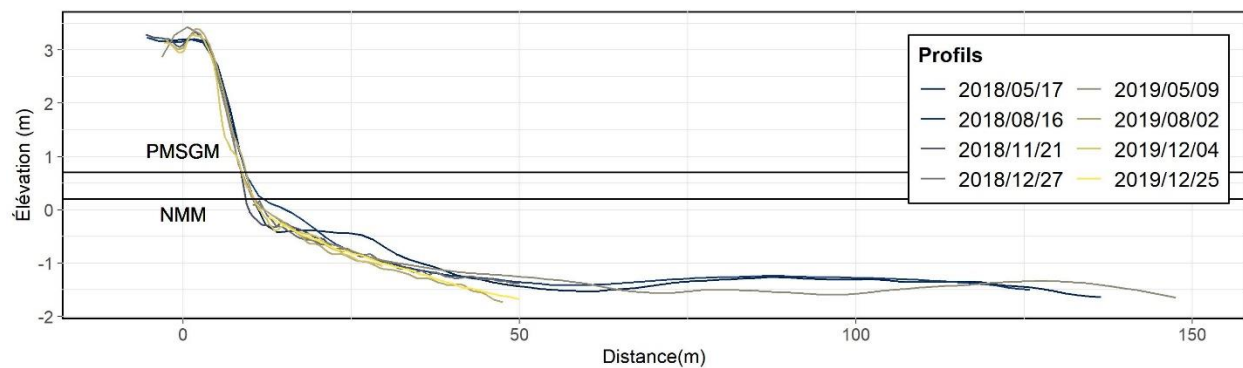
Profil n° 4, Plage de La Martinique



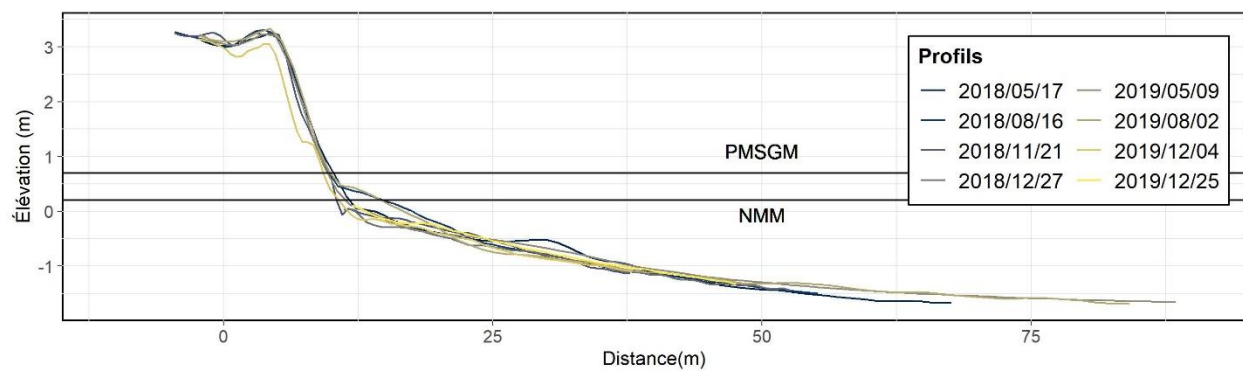
Profil n° 5, Plage de La Martinique



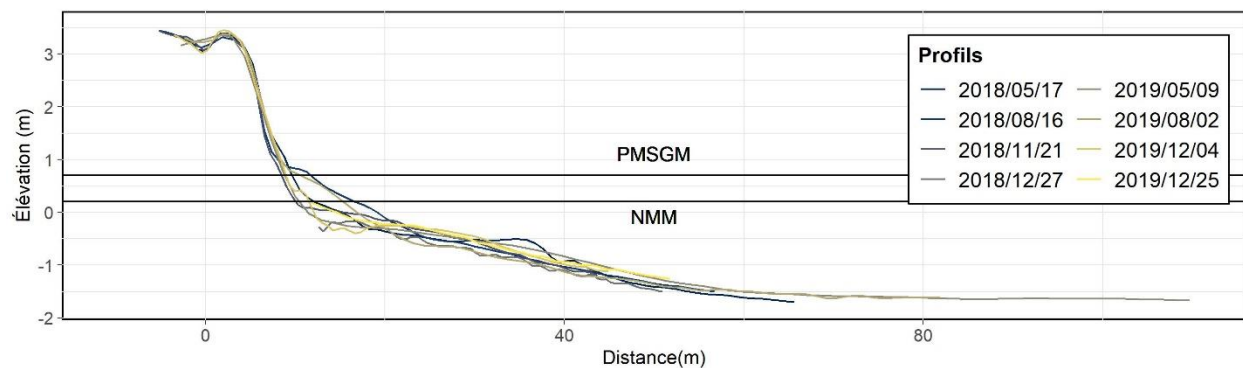
Profil n° 6, Plage de La Martinique



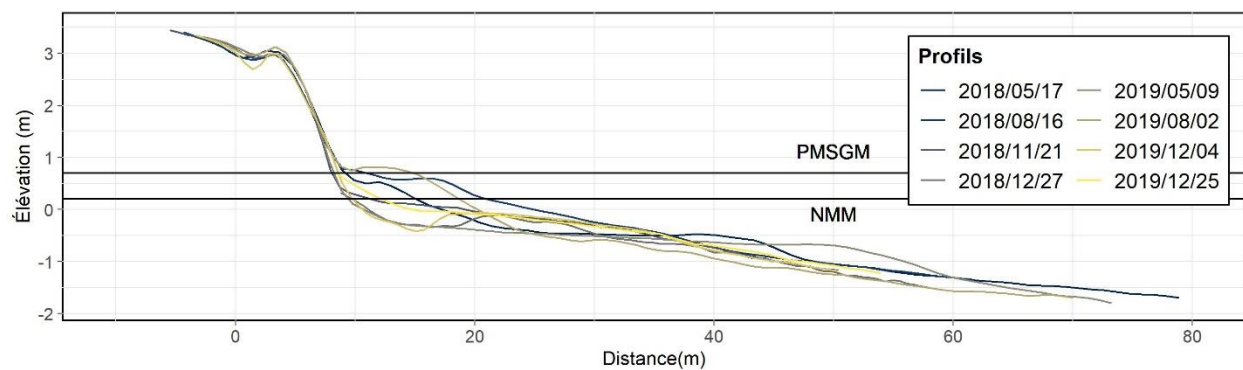
Profil n° 7, Plage de La Martinique



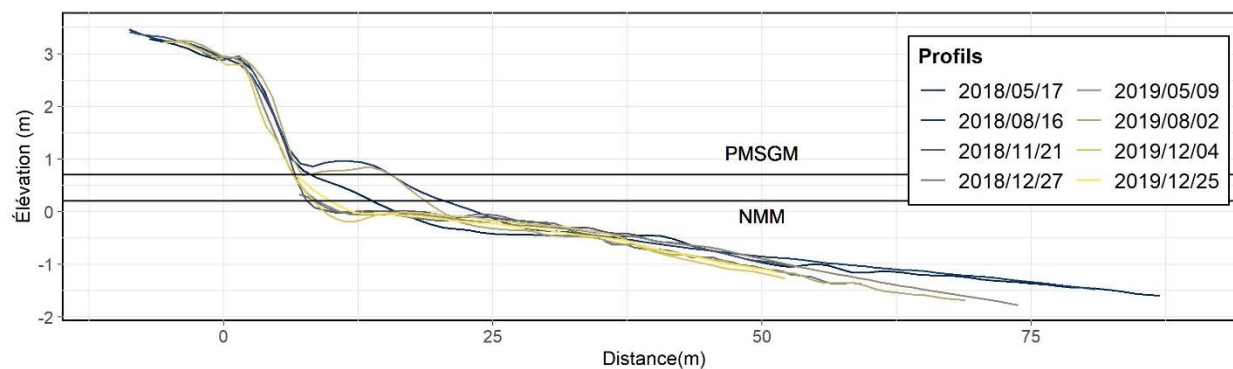
Profil n° 8, Plage de La Martinique



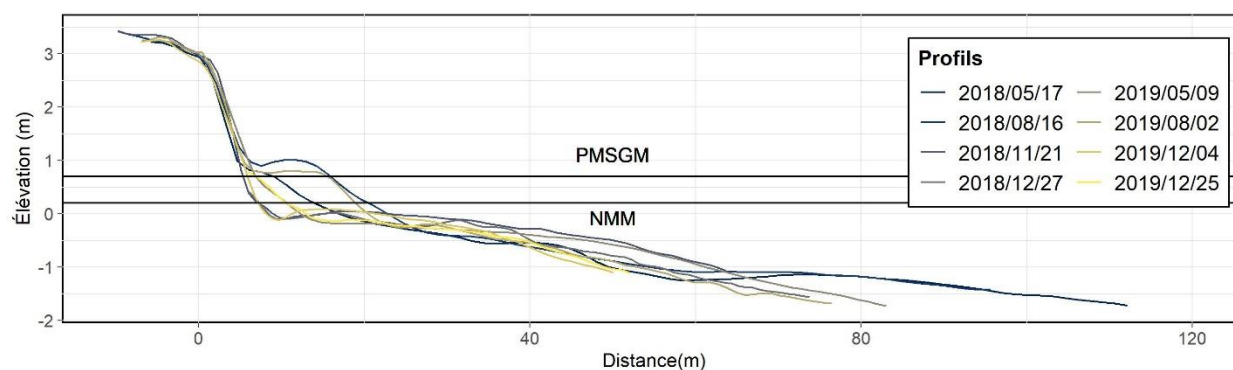
Profil n° 9, Plage de La Martinique



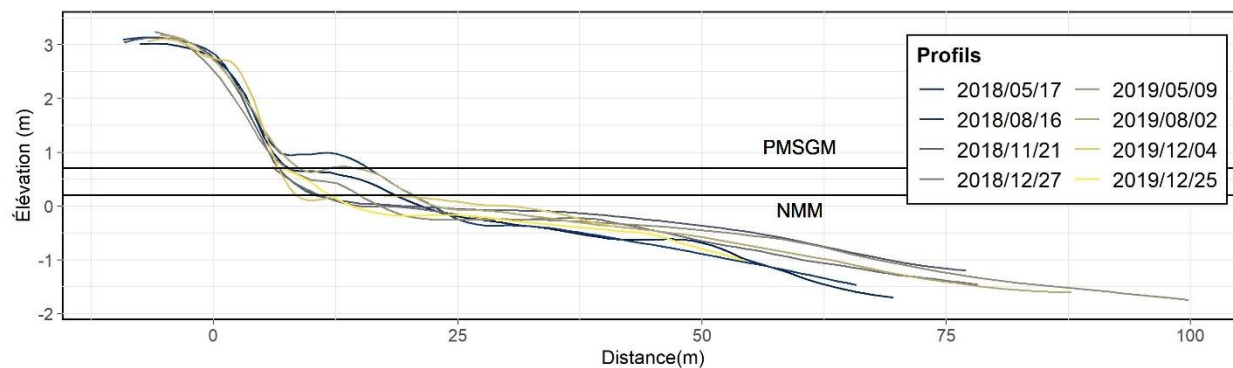
Profil n° 10, Plage de La Martinique



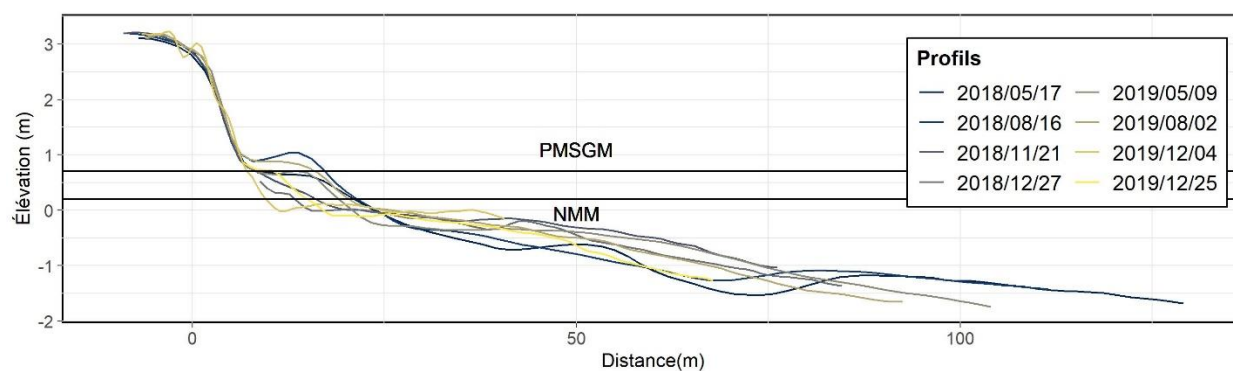
Profil n° 11, Plage de La Martinique



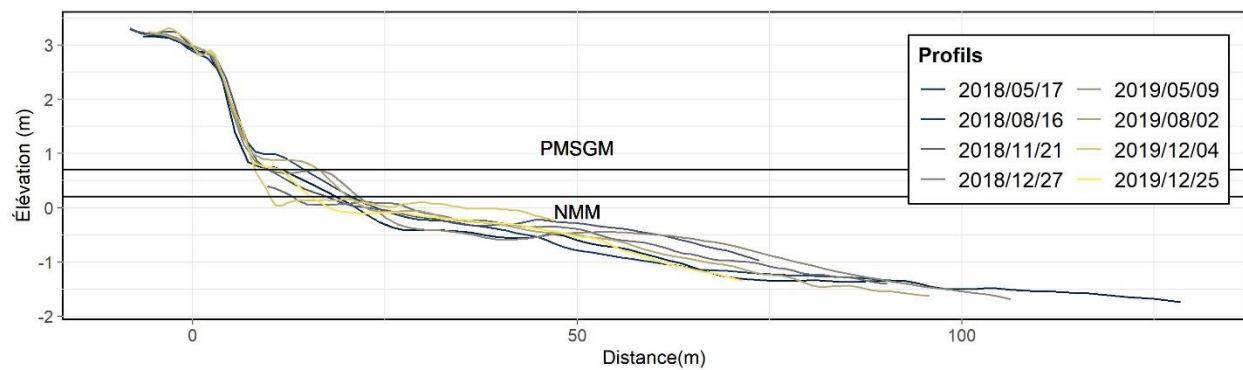
Profil n° 12, Plage de La Martinique



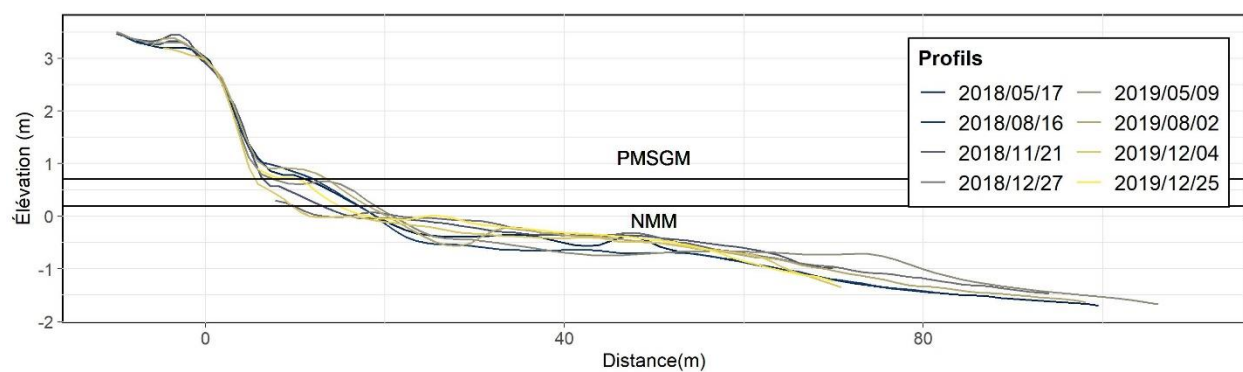
Profil n° 13, Plage de La Martinique



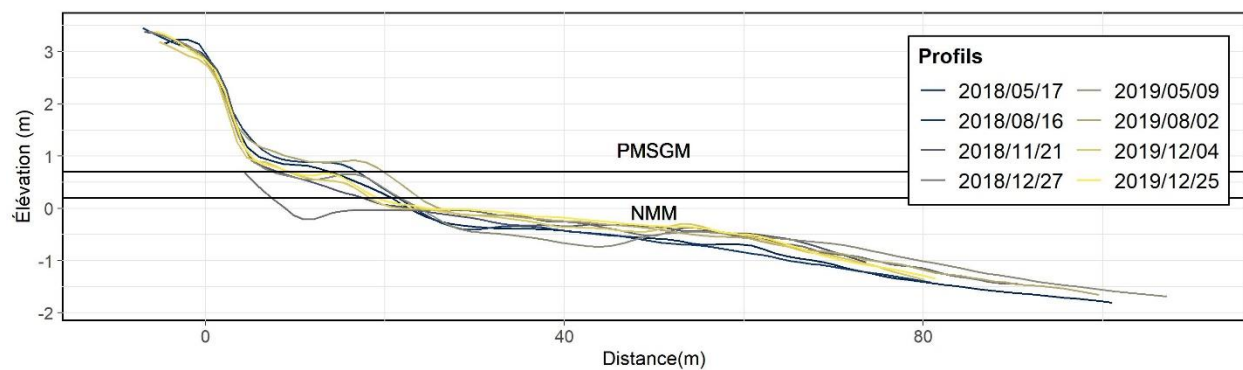
Profil n° 14, Plage de La Martinique



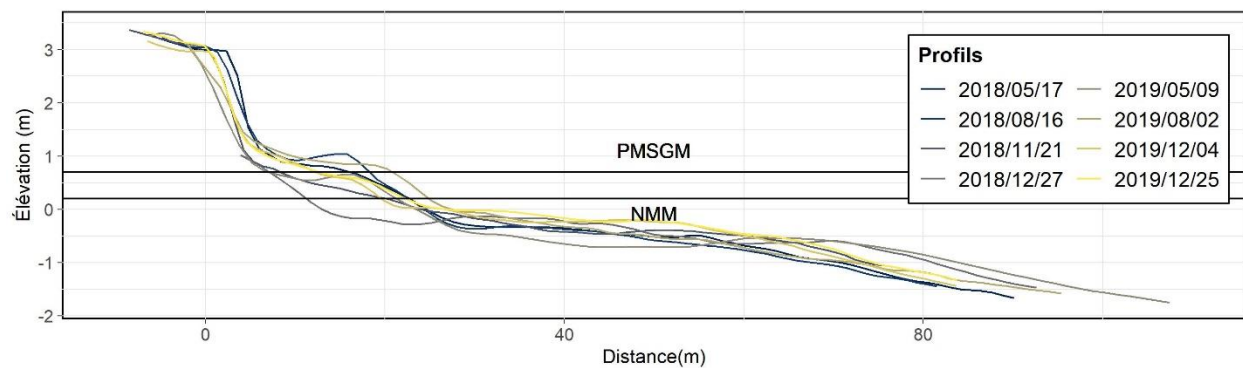
Profil n° 15, Plage de La Martinique



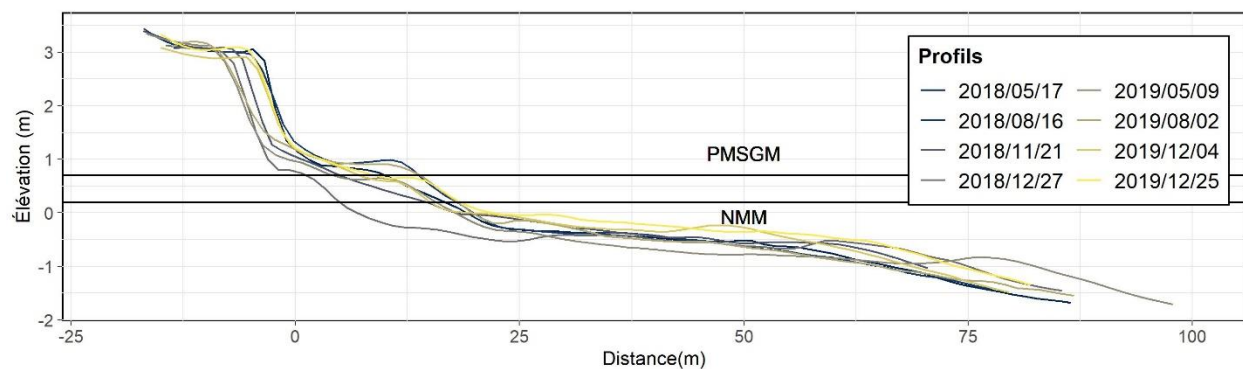
Profil n° 16, Plage de La Martinique



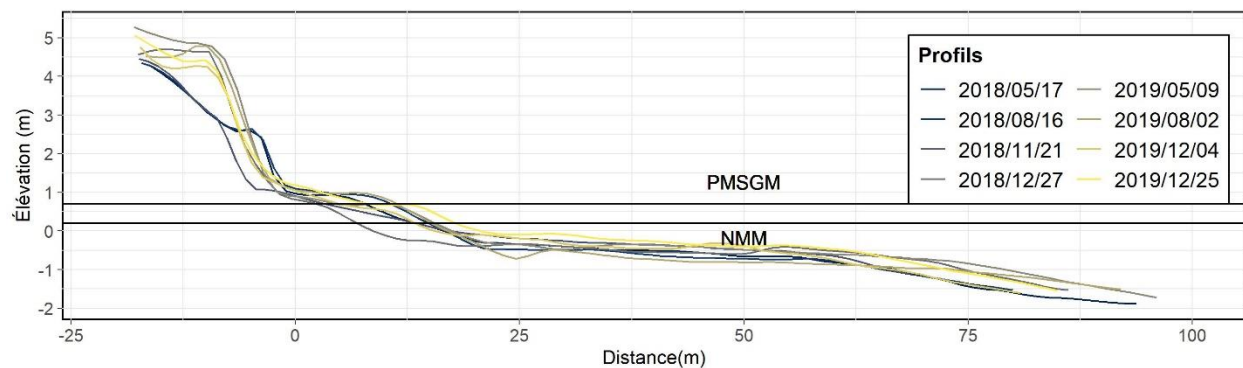
Profil n° 17, Plage de La Martinique



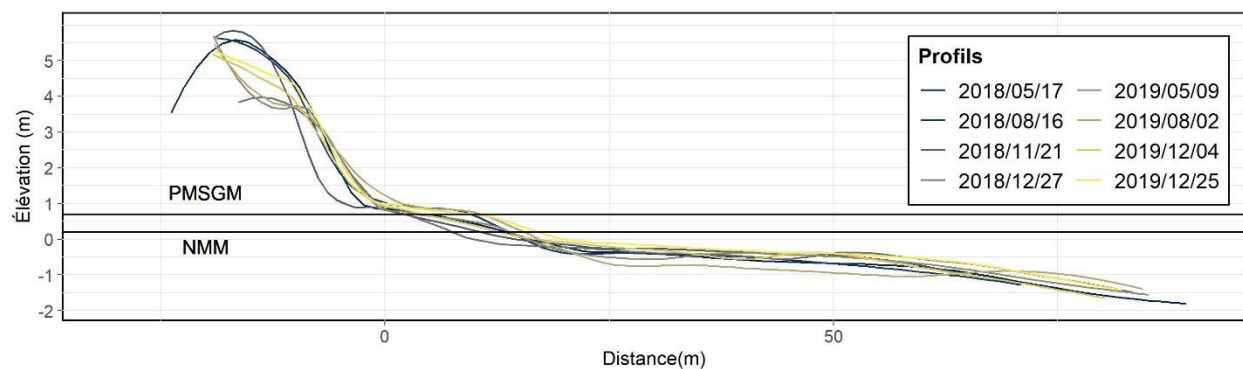
Profil n° 18, Plage de La Martinique



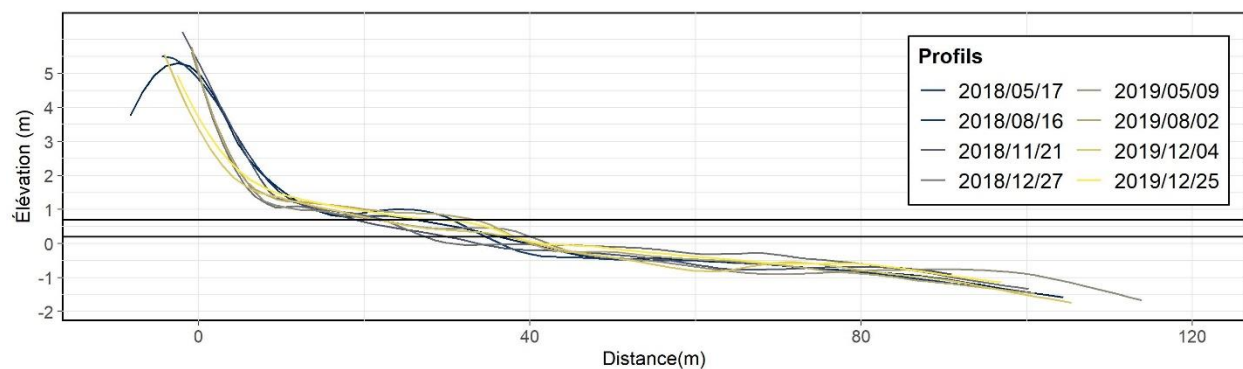
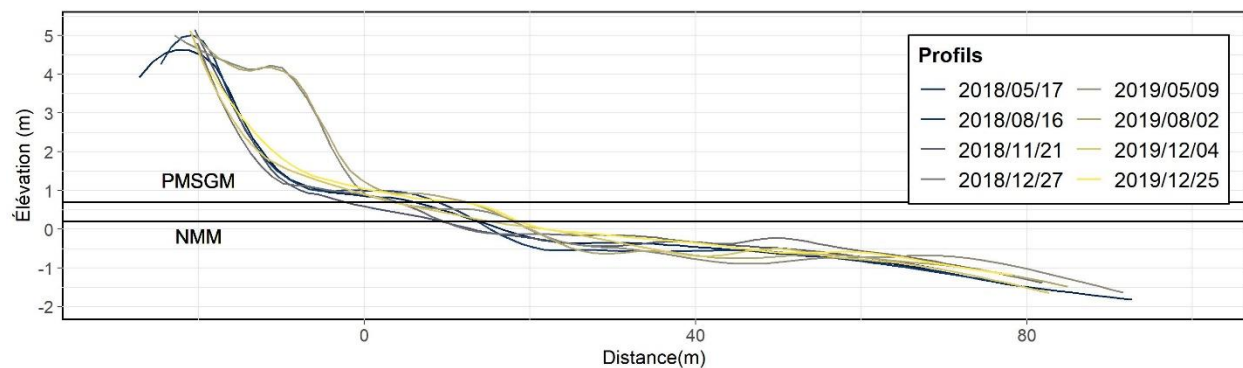
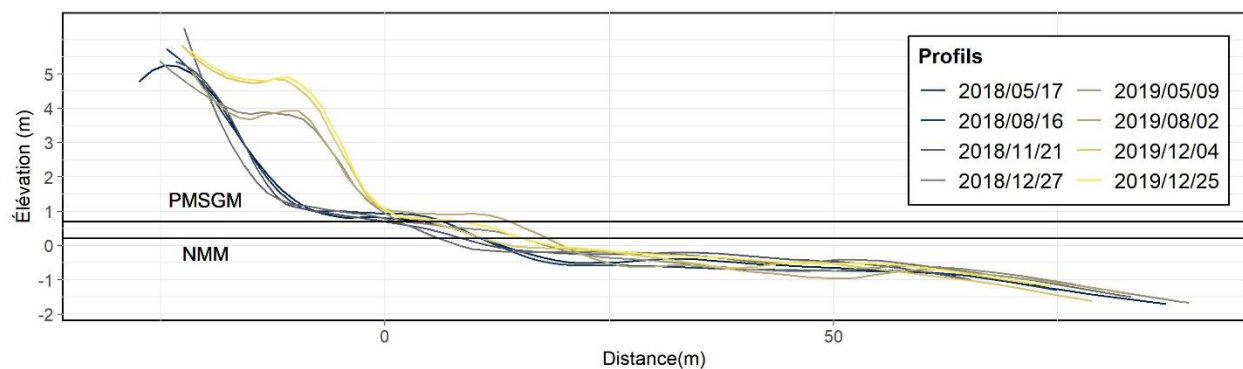
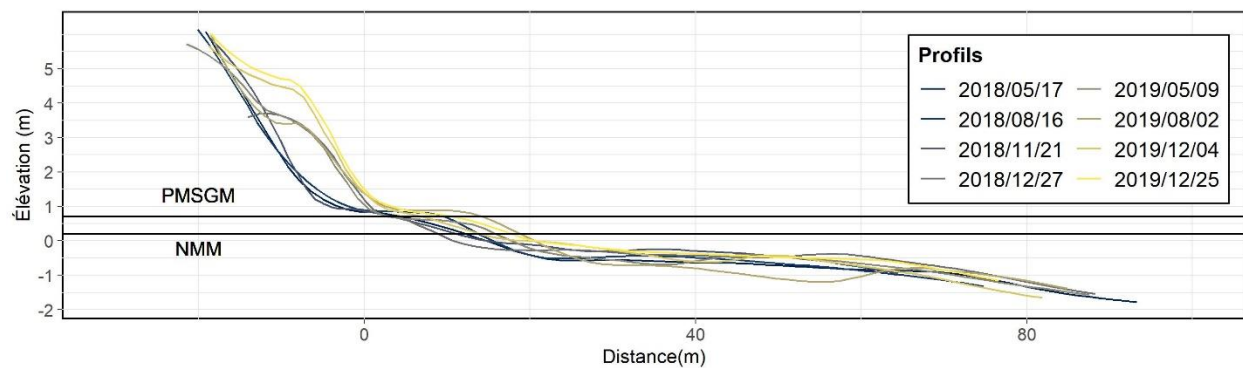
Profil n° 19, Plage de La Martinique

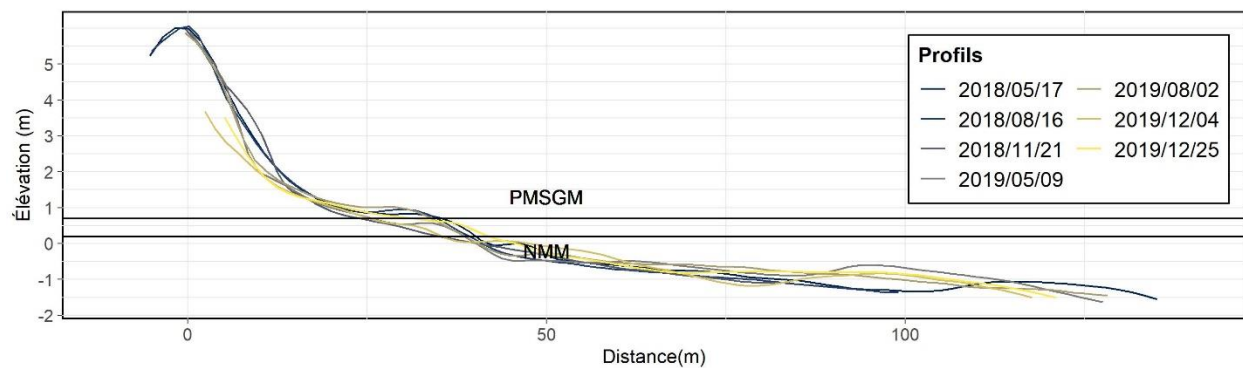


Profil n° 20, Plage de La Martinique

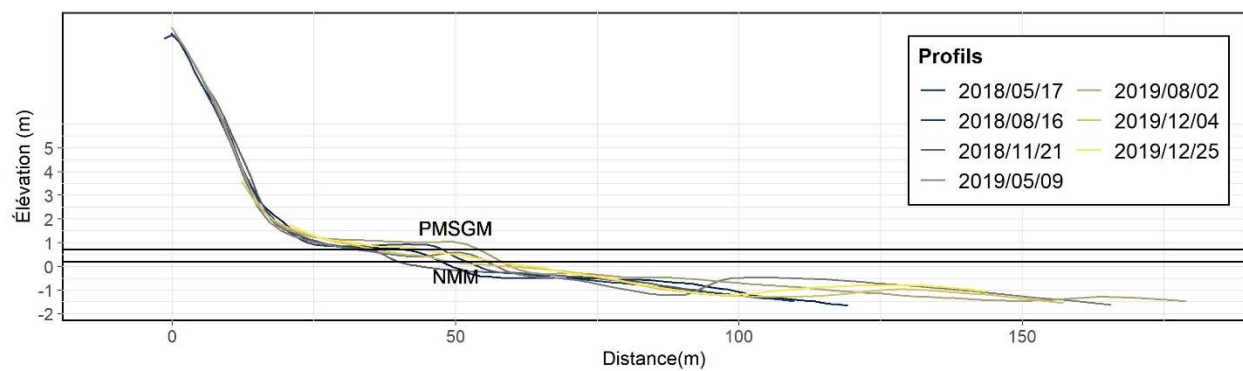


Profil n° 21, Plage de La Martinique

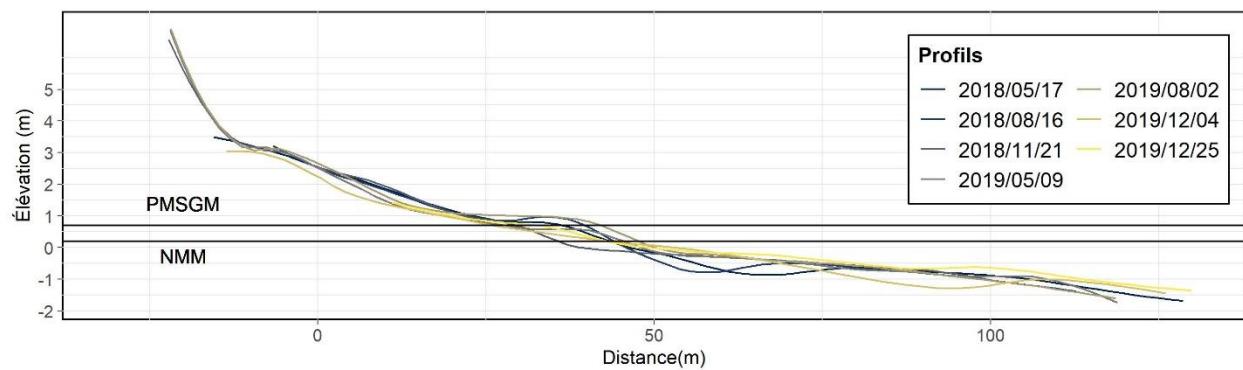




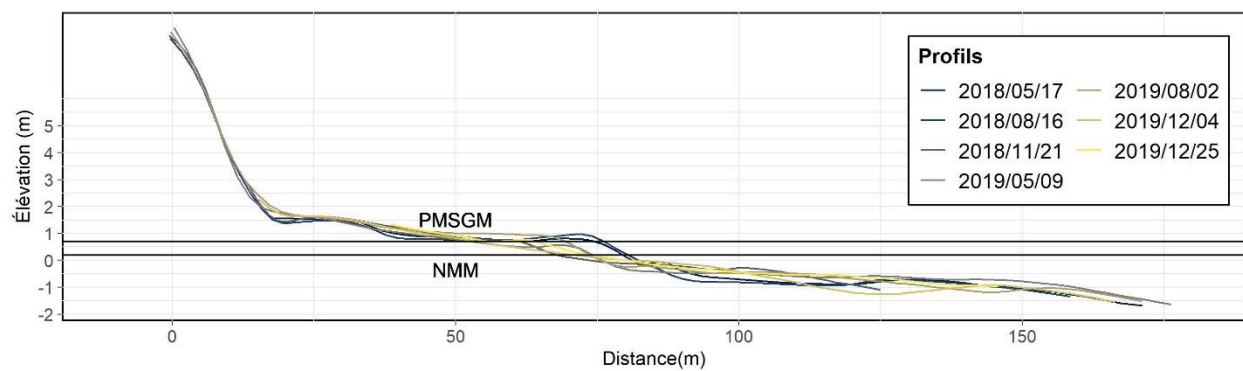
Profil n° 26, Plage de La Martinique



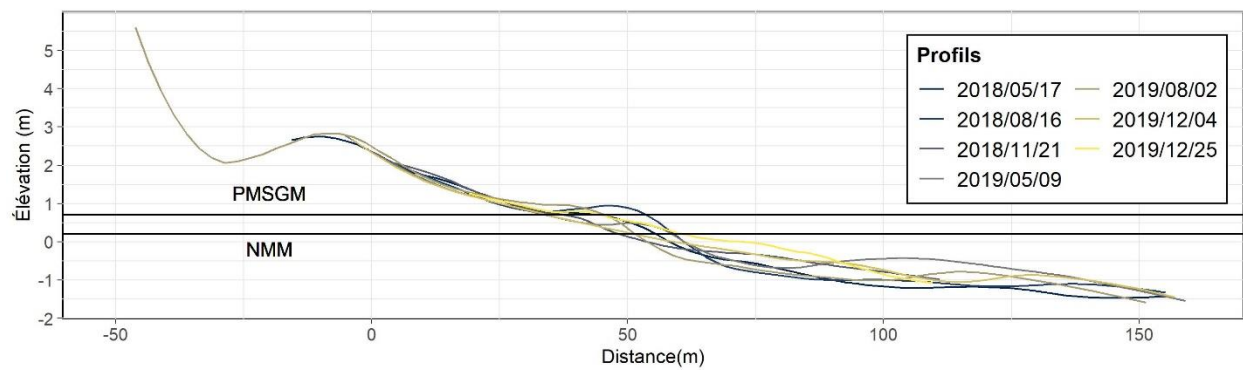
Profil n° 27, Plage de La Martinique



Profil n° 28, Plage de La Martinique

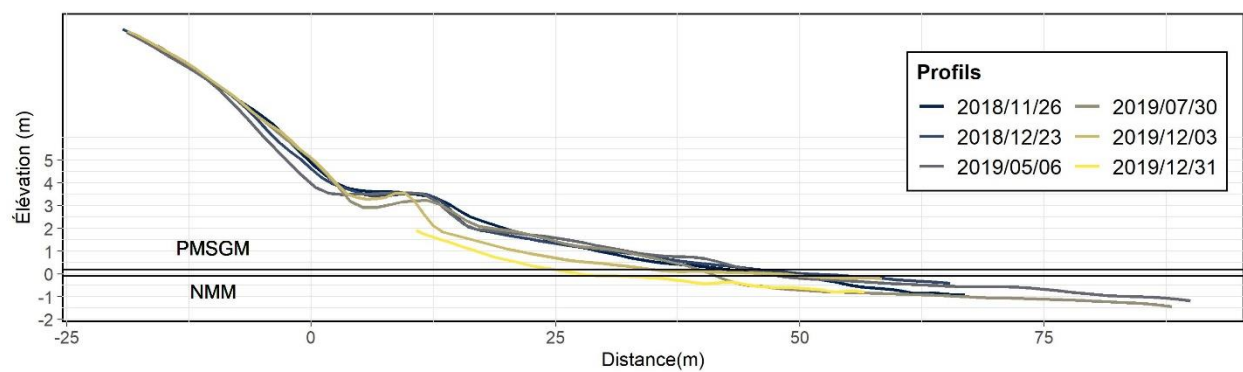


Profil n° 29, Plage de La Martinique

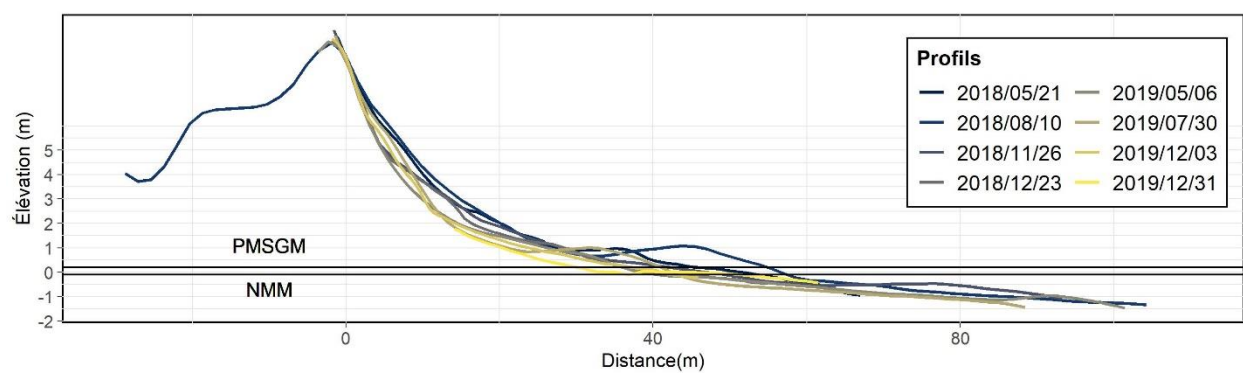


Profil n° 30, Plage de La Martinique

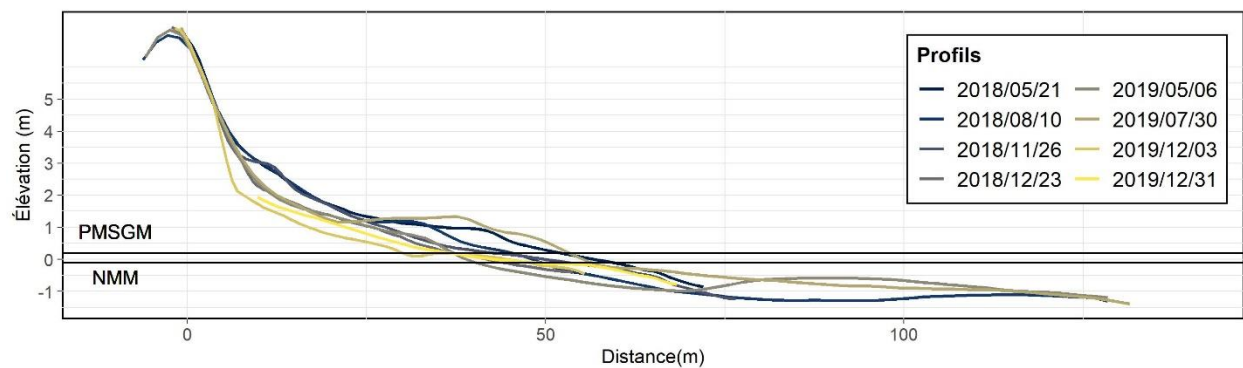
ANNEXE 9-6 – PLAGE DE POINTE-AUX-LOUPS



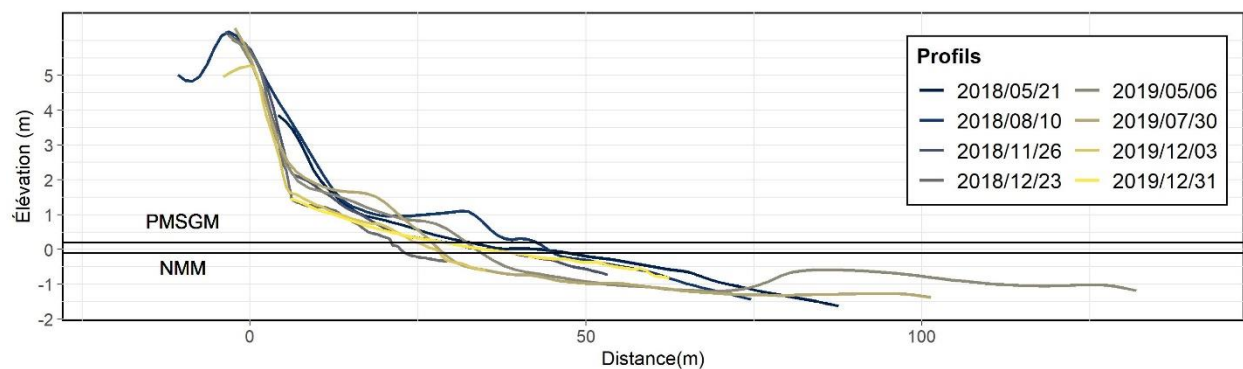
Profil n° 1, Plage de Pointe-aux-Loups



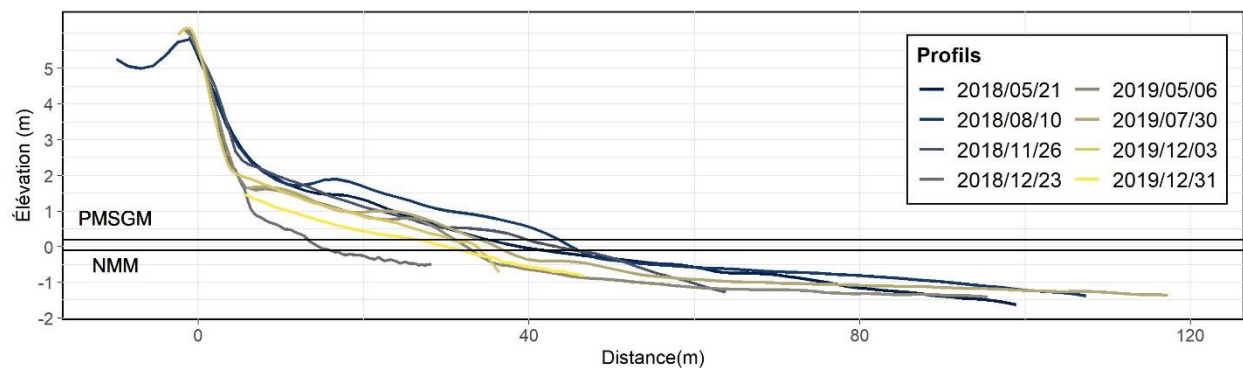
Profil n° 2, Plage de Pointe-aux-Loups



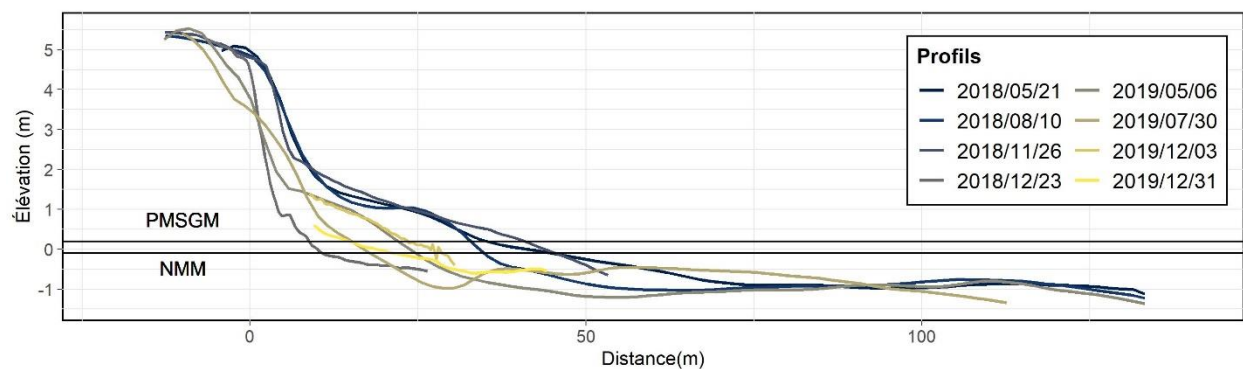
Profil n° 3, Plage de Pointe-aux-Loups



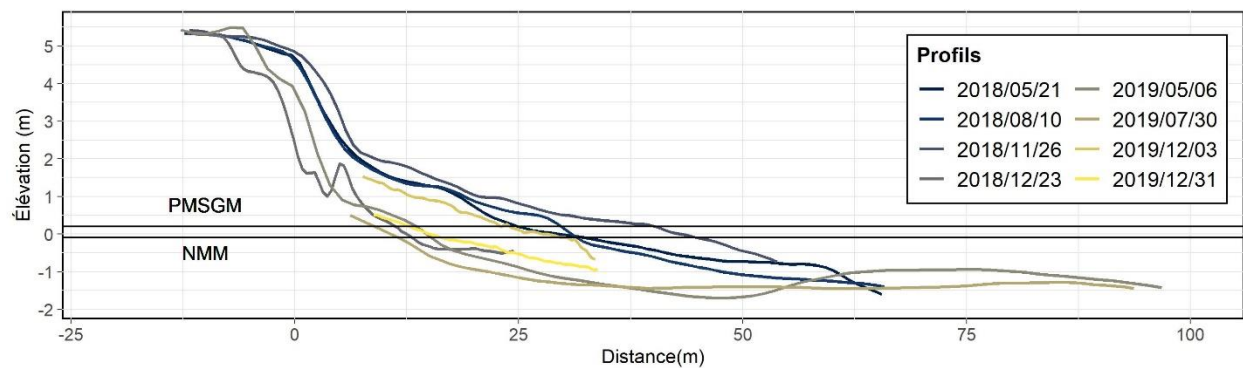
Profil n° 4, Plage de Pointe-aux-Loups



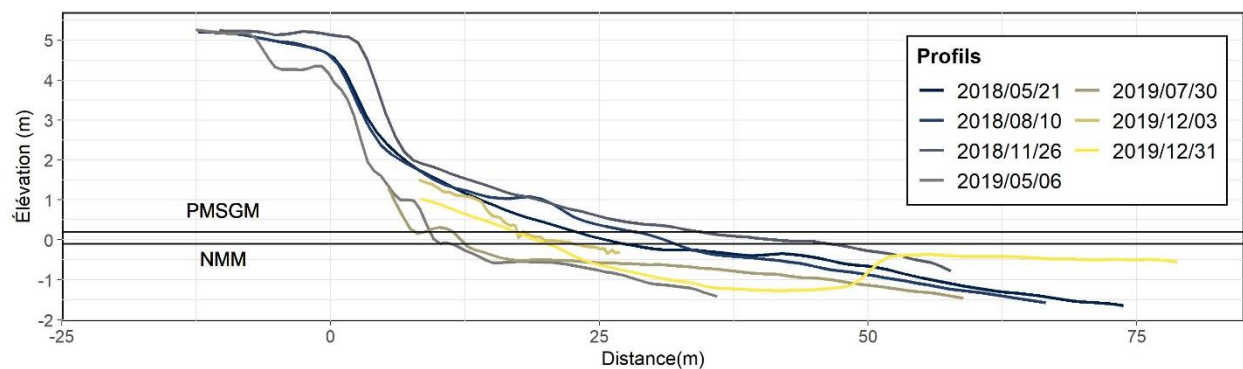
Profil n° 5, Plage de Pointe-aux-Loups



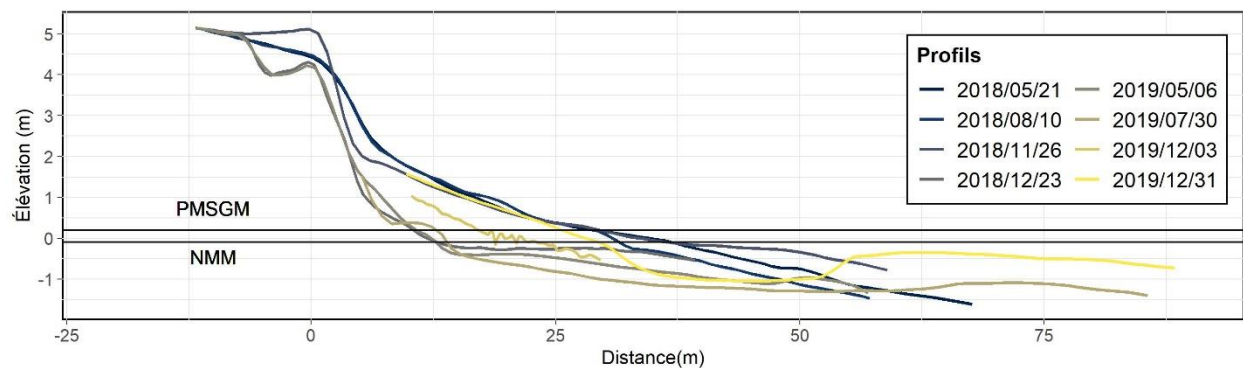
Profil n° 6, Plage de Pointe-aux-Loups



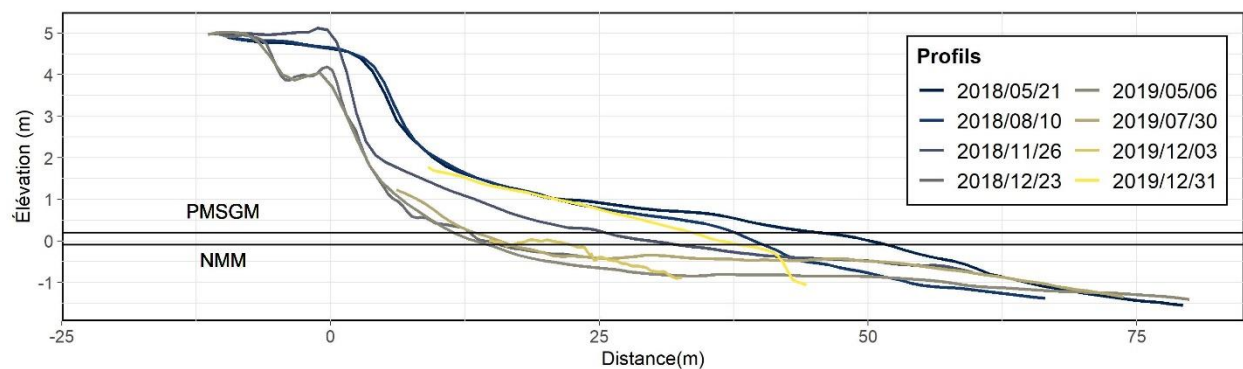
Profil n° 7, Plage de Pointe-aux-Loups



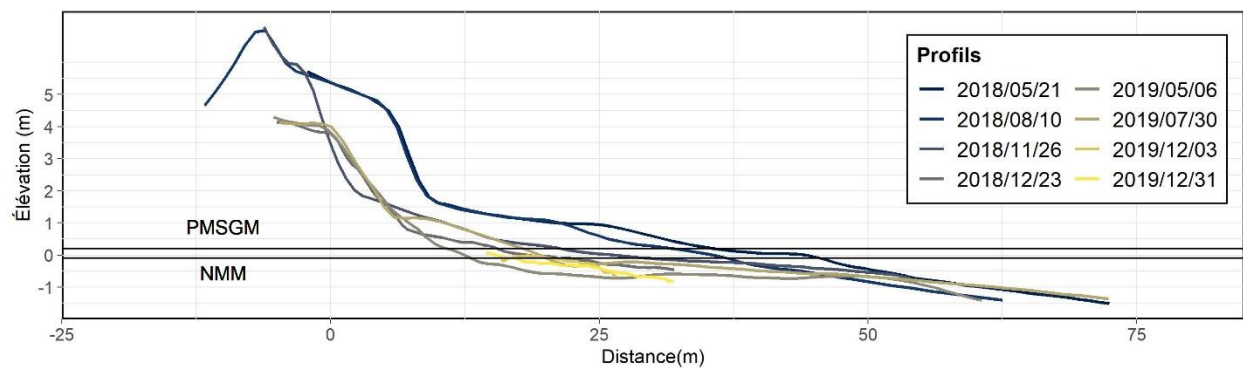
Profil n° 8, Plage de Pointe-aux-Loups



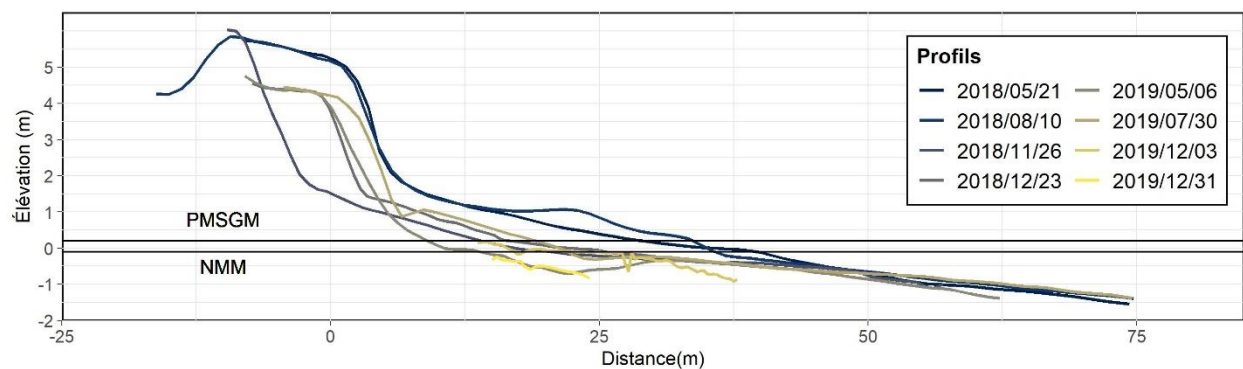
Profil n° 9, Plage de Pointe-aux-Loups



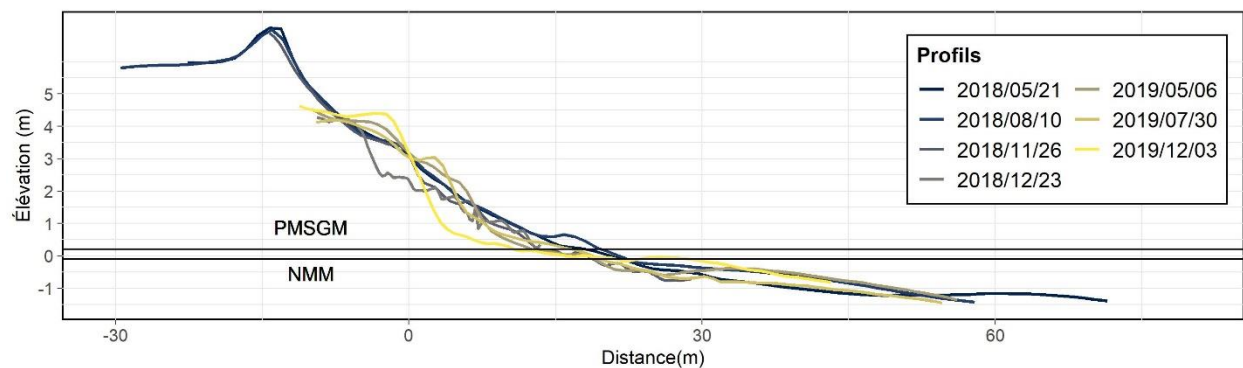
Profil n° 10, Plage de Pointe-aux-Loups



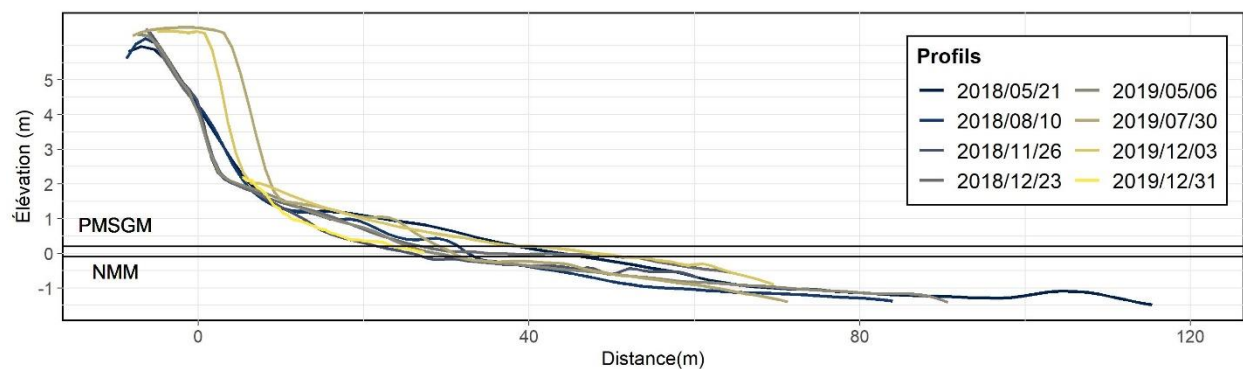
Profil n° 11, Plage de Pointe-aux-Loups



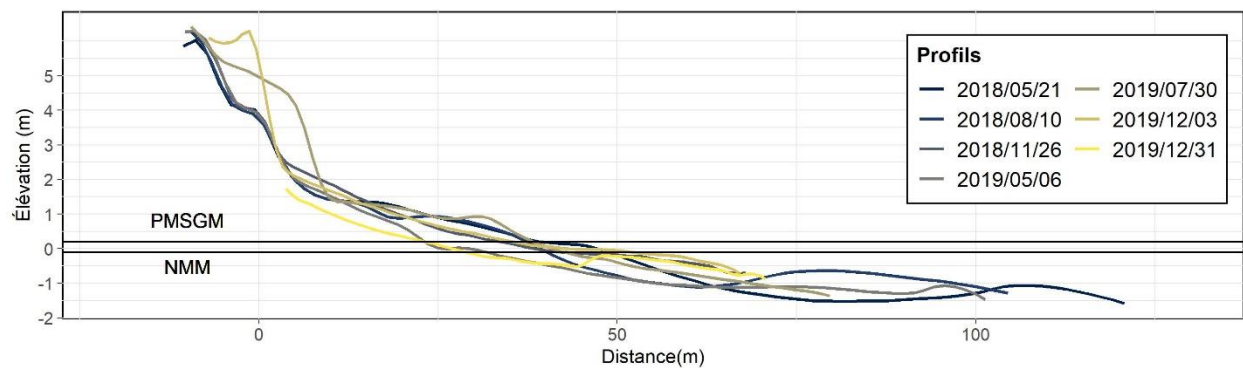
Profil n° 12, Plage de Pointe-aux-Loups



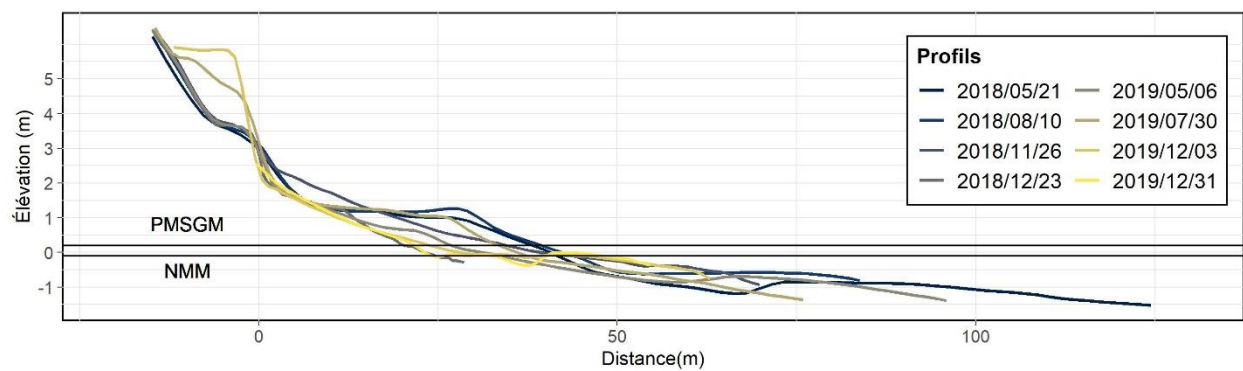
Profil n° 13, Plage de Pointe-aux-Loups



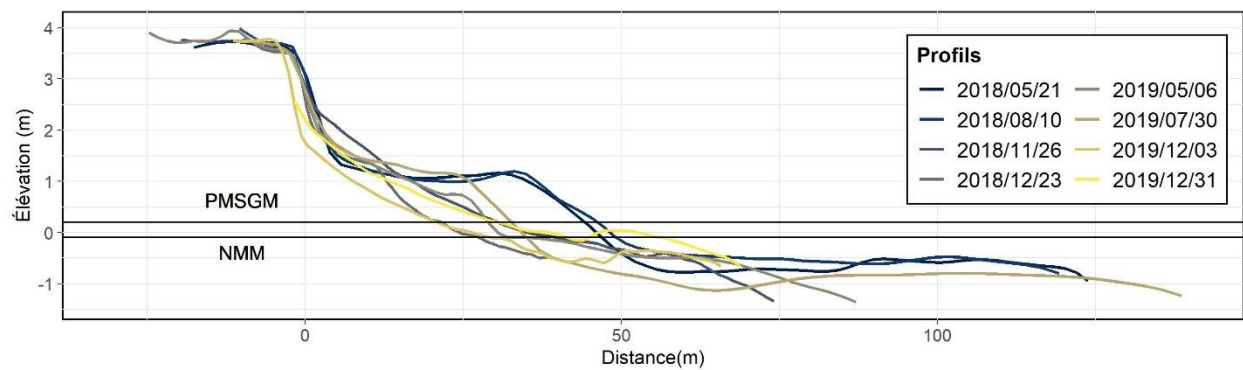
Profil n° 14, Plage de Pointe-aux-Loups



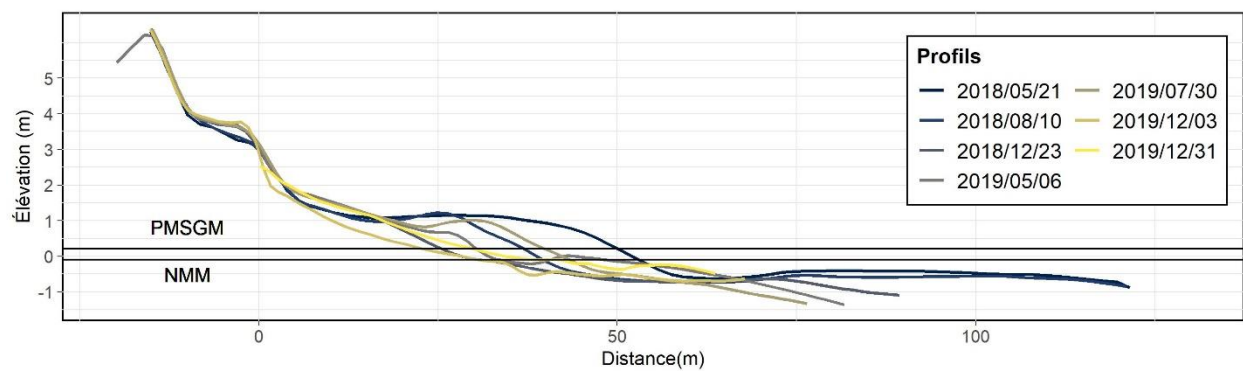
Profil n° 15, Plage de Pointe-aux-Loups



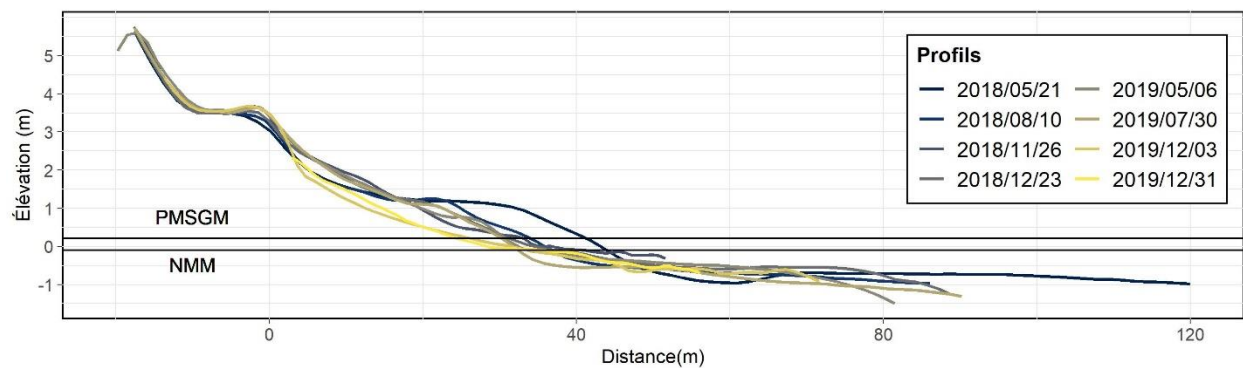
Profil n° 16, Plage de Pointe-aux-Loups



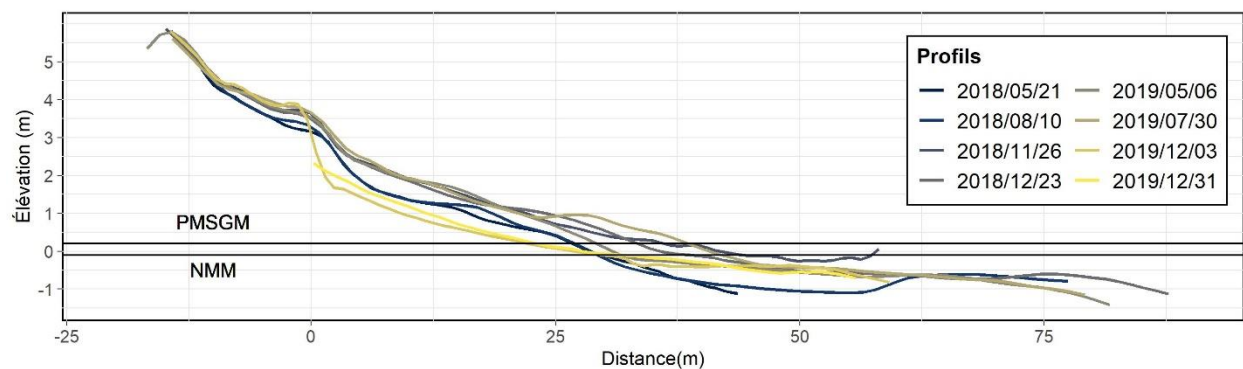
Profil n° 17, Plage de Pointe-aux-Loups



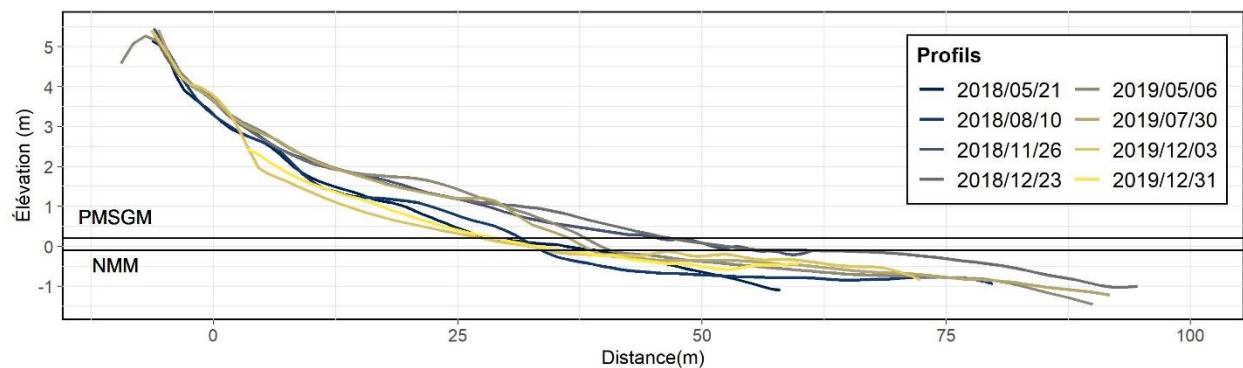
Profil n° 18, Plage de Pointe-aux-Loups



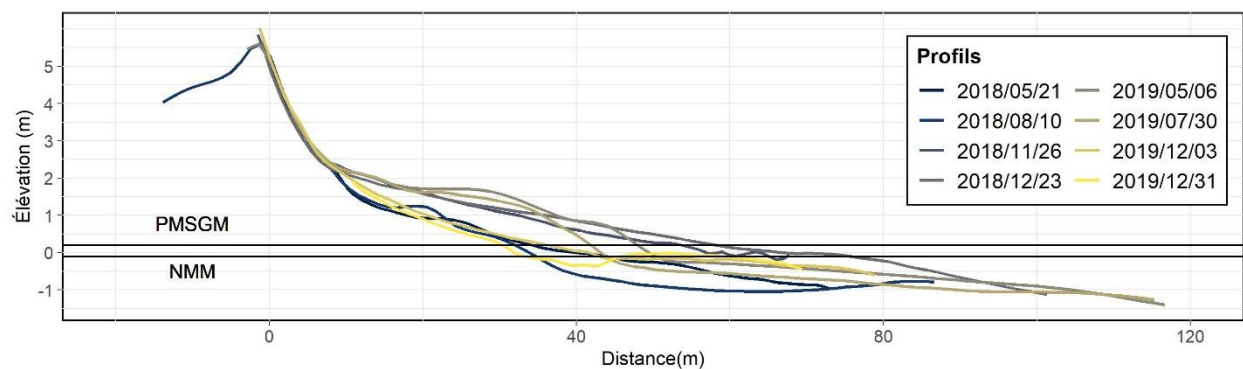
Profil n° 19, Plage de Pointe-aux-Loups



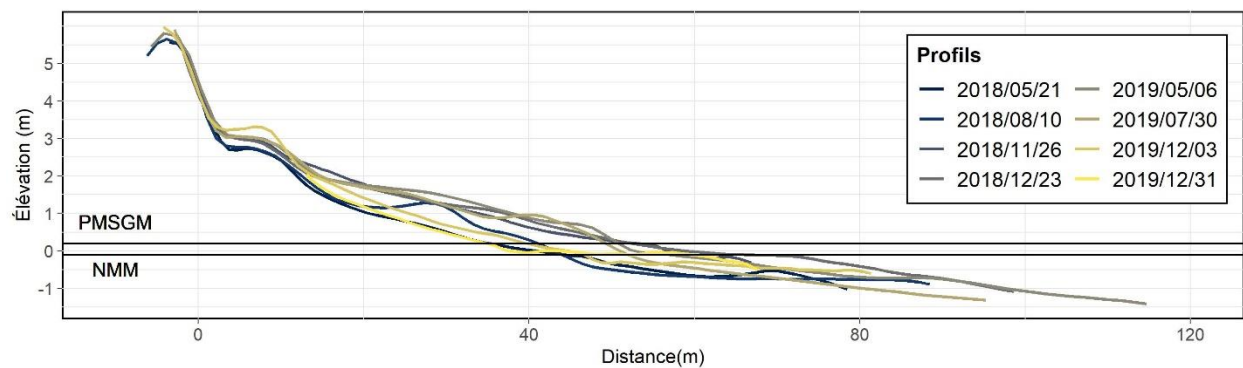
Profil n° 20, Plage de Pointe-aux-Loups



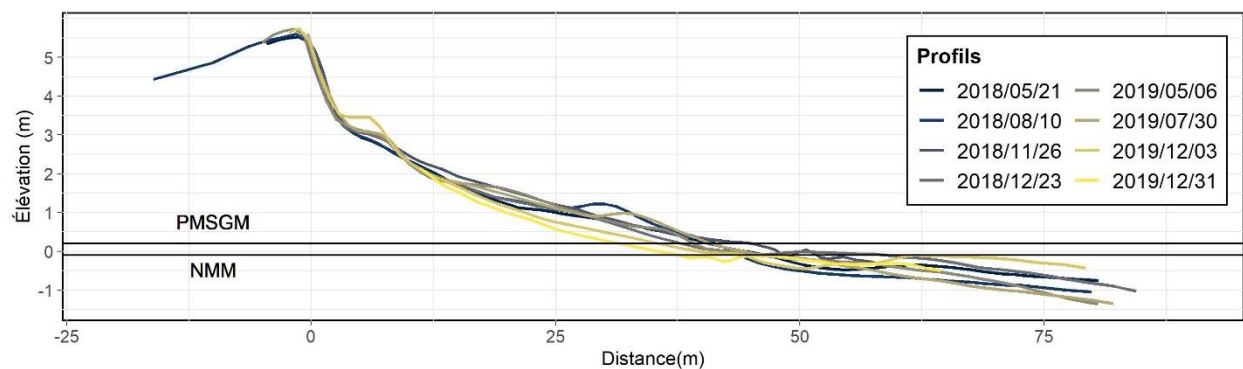
Profil n° 21, Plage de Pointe-aux-Loups



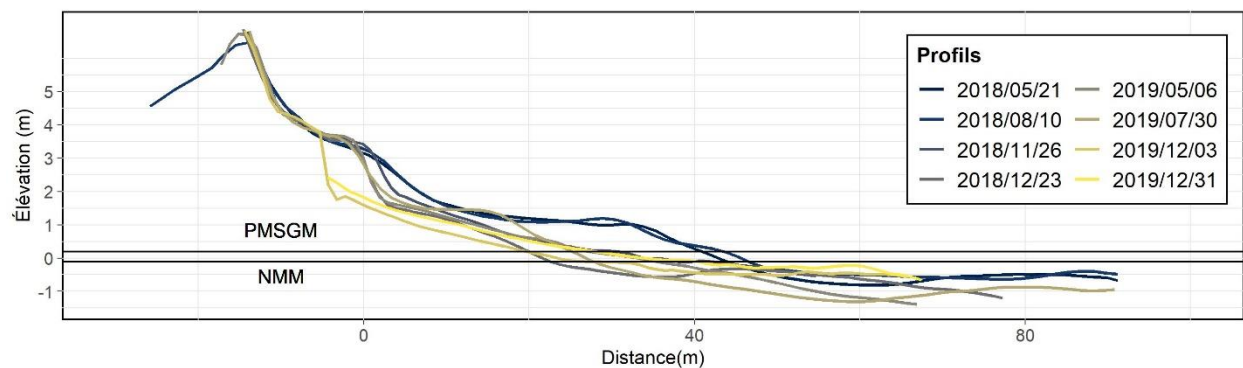
Profil n° 22, Plage de Pointe-aux-Loups



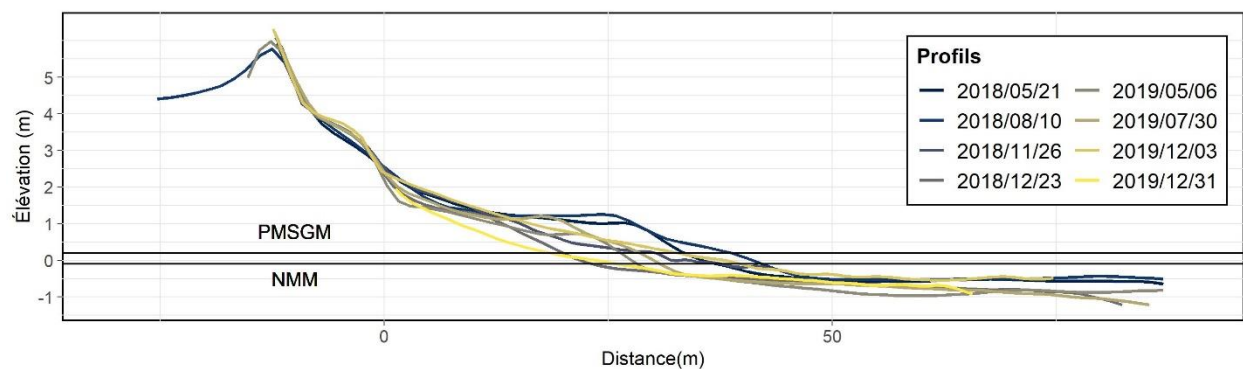
Profil n° 23, Plage de Pointe-aux-Loups



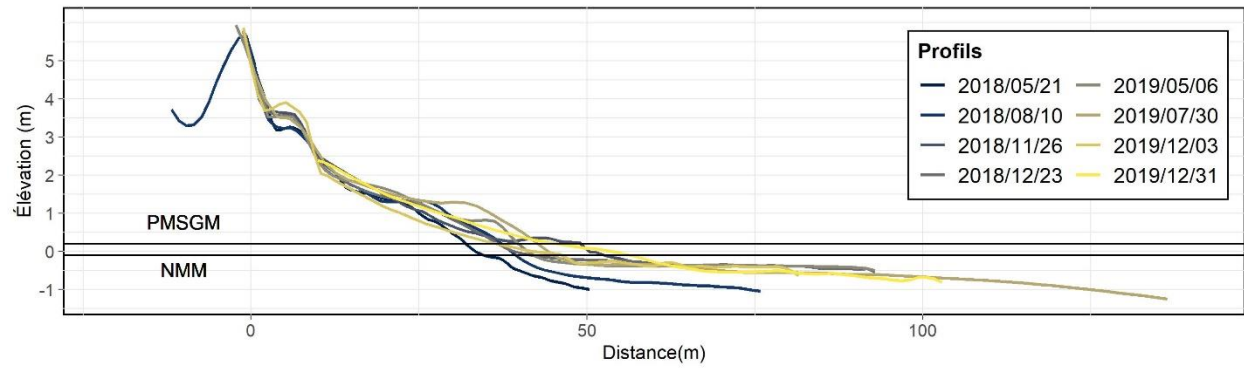
Profil n° 24, Plage de Pointe-aux-Loups



Profil n° 25, Plage de Pointe-aux-Loups



Profil n° 26, Plage de Pointe-aux-Loups



Profil n° 27, Plage de Pointe-aux-Loups